

Systeemanalyse van de Rijn- Maasmonding voor verzilting

Synopsis en deelrapporten 2016



Systeemanalyse van de Rijn- Maasmonding voor verzilting

Synopsis en deelrapporten 2016

Meinard Tiessen
Wouter Kranenburg
Judith ter Maat
Ymkje Huismans
Kees Kuijper
Marjolein Mens
Remi van der Wijk

1230077-001

Titel

Systeemanalyse van de Rijn-Maasmonding voor verzilting

Opdrachtgever RWS-WVL	Project 1230077-001	Kenmerk 1230077-001-ZWS-0013	Pagina's 33
---------------------------------	-------------------------------	--	-----------------------

Trefwoorden

Systeemkennis, Rijn-Maasmonding, verzilting, zoutindringing, splitsingspunten, afvoerverdeling, SOBEK3, WAQUA, achterwaartse verzilting, Haringvlietsluizen, Haringvliet, getijdegeulen, Hollandsche IJssel, dispersie, verziltingskarakterisering.

Samenvatting


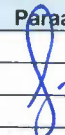
Het doel van dit project is de kennis van en inzichten in het onderwerp (externe) verzilting via oppervlaktewateren in de Rijn- en Maasmonding te vergroten, om de invloed van ingrepen en maatregelen in het systeem op verzilting beter in beeld te kunnen brengen. In dit project worden vier velden, t.w. Systeemkennis, Proceskennis, Modelinstrumentarium en Statistiek, geïnventariseerd (fase 1), beschreven (fase 2) en verdiept (fase 3). De doorlooptijd van het totale project beslaat 3 jaar. Fase 1 en 2 vonden plaats in 2015. Fase 3 geschiedt in 2016 en 2017. In 2016 zijn verschillende deelonderwerpen nader onderzocht:

- 1) Waterverdeling binnen het RMM systeem, transport op splitsingspunten
- 2) Noord-zuid relaties in het RMM systeem: sturende invloed van de Haringvliet en Hollandsch diep op zoutindringing
- 3) Haringvliet lokaal: werking diepe geulen en uitspoeling zout
- 4) Verzilting Hollandsche IJssel: conflicterende (transport-)processen en minimaal benodigde hoeveelheid zoetwater
- 5) Verziltingstypen per deelgebied, vertaling van de inzichten naar concrete aanbevelingen voor de aanpalende projecten rond verziltingsstatistiek

Dit rapport bevat de synopsis van de werkzaamheden die in 2016 zijn uitgevoerd. In bijlagen zijn de rapporten en memo's behorende bij de verschillende deelonderwerpen opgenomen. De belangrijkste en direct toepasbare bevindingen hieruit zijn dat voor noord-zuid relaties (2) een nieuwe en effectievere vuistregel is afgeleid om achterwaartse verzilting te bepalen en dat voor de Hollandsche IJssel (4) de diffusie is bepaald op basis van meetgegevens. Deze kan nu worden toegepast bij de bepaling van het doorspoeldebiet om verzilting bij Gouda tegen te gaan. Begin 2017 zal op basis van de bevindingen uit 2016 en de nog openstaande beheer- en beleidsvragen, kennisvragen worden geformuleerd die in het laatste jaar (2017) van de verdiepingsfase nader zullen worden onderzocht.

Referenties

KPP Verzilting (project Systeemanalyse Verzilting Rijn- en Maasmonding), KPP Modelschematisaties, KPP Slim Watermanagement, KPP Waterkwaliteitsmodelschematisaties, WABES Project (Rijkswaterstaat-WVL).

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	dec. 2016	Meinard Tiessen	MT	Frans Buschman		Frank Hoozemans	
		Wouter Kranenburg					
		Judith ter Maat					
		Ymkje Huismans					
		Kees Kuijper					
		Marjolein Mens					
		Remi van der Wijk					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.1.1 Organisatorisch kader	1
1.1.2 Gebiedsbeschrijving	1
1.1.3 Probleemanalyse	2
1.2 Het project Systeemanalyse Rijn-Maasmonding	3
1.2.1 Overkoepelende projectdoelstelling	3
1.2.2 Projecthistorie	3
1.2.3 Onderwerpen Systeemanalyse RMM fase 3 deel 2016	3
1.3 Opzet	5
2 Synopsis	6
2.1 Transport op splitsingspunten	6
2.1.1 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek	7
2.2 Noord-Zuid relaties	8
2.2.1 Achterwaartse verzilting	8
2.2.2 Inzet stuurknoppen	9
2.2.3 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek	10
2.3 Zoutverspreiding via voormalige getijdegeulen in het Haringvliet	11
2.3.1 Zoutindringing vanuit zee	11
2.3.2 Terugdringing van verzilting	11
2.3.3 Zoutverspreiding vanuit diepe delen	11
2.3.4 Zoutbalans voor het Haringvliet	12
2.3.5 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek	12
2.4 Verzilting Hollandsche IJssel	12
2.4.1 Advectief transport	13
2.4.2 Dispersief transport	13
2.4.3 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek	13
2.5 Verziltingstypen per deelgebied	13
2.5.1 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek	14
3 Doorkijkje naar 2017	16
3.1 Systeemanalyse van de Rijn-Maasmonding voor verzilting 2017	16
3.2 Generieke aanbevelingen	16
4 Referenties	18
A Transport op splitsingspunten	A-19
A.1 Verslag mini-symposium zoutverspreiding bij splitsingspunten	A-19
A.2 Memo	A-20
B Noord-Zuid relaties	B-21
B.1 Rapport	B-21
B.2 Presentatie	B-22
C Zoutverspreiding voormalige getijdegeulen in het Haringvliet	C-25
C.1 Memo	C-25

C.2	Presentatie (RMM Systeemanalyseoverleg, 15 september 2016)	C-26
D	Verziltig Hollandsche IJssel	D-27
D.1	Rapport	D-27
D.2	Presentatie (Kennisdag Zoetwater, 8 november 2016)	D-28
E	Verziltigstypen per deelgebied	E-29
E.1	Memo	E-29
E.2	Presentatie (RMM Systeemanalyseoverleg, 15 september 2016)	E-30
F	Longlist beheer- en beleidsvragen m.b.t. verziltig van het hoofdwatersysteem	F-31

1 Inleiding

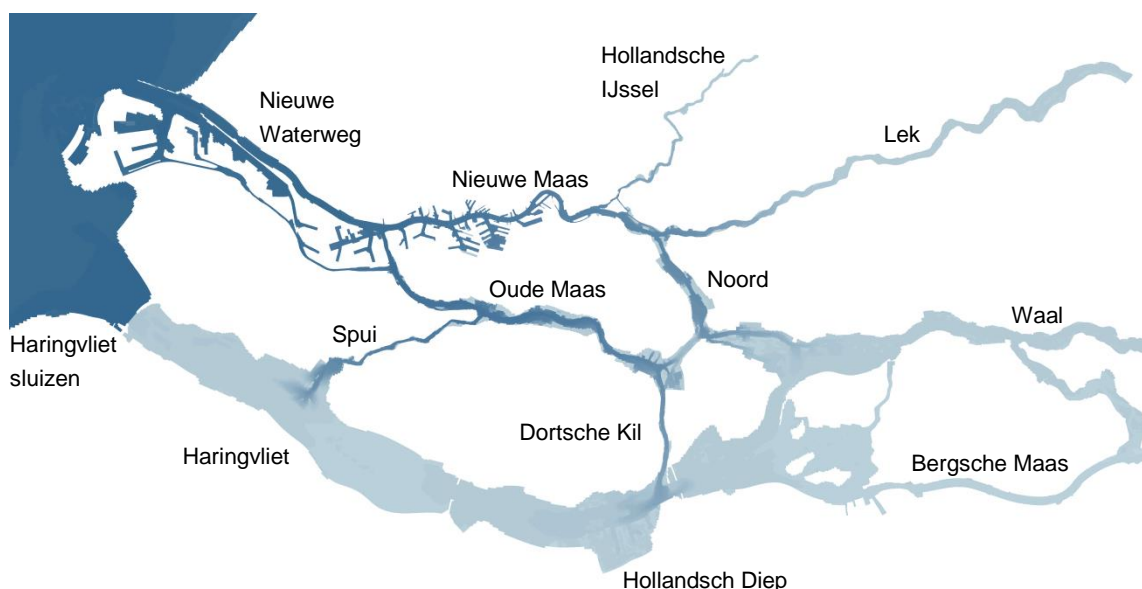
1.1 Achtergrond

1.1.1 Organisatorisch kader

Dit document is een product behorend bij het project Systeemanalyse Rijn-Maasmonding voor externe verzilting. Dit project wordt uitgevoerd door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat (RWS-WVL) als onderdeel van het KPP-project Verzilting. Financiering is afkomstig vanuit RWS Landelijke Taken en BOA Zoetwater. Dit project omvat onderzoeksonderwerpen die overlappen met KPP projecten die gericht zijn op de beantwoording van specifieke beheer- en/of beleidsvragen. Er is getracht zo veel mogelijk de samenwerking met deze specifieke KPP projecten te bevorderen en kennis te delen. Enkele onderzoeksonderwerpen die in dit project worden beschreven, worden gedeeltelijk uit deze andere KPP projecten gefinancierd. Het meerjarenproject Systeemanalyse Rijn-Maasmonding voor externe verzilting is begonnen in 2015 en loopt tot eind 2017. Dit product is het jaarrapport voor 2016.

1.1.2 Gebiedsbeschrijving

De Rijn- en Maasmonding (RMM gebied) beslaat het gedeelte van de Nederlandse delta waar de rivieren Rijn (Lek en Waal) en Maas de zee in stromen¹. Het gebied heeft twee verbindingen naar zee: de Nieuwe Waterweg aan de noordzijde, en het Haringvliet aan de zuidzijde (Figuur 1.1). Waar de Nieuwe Waterweg in open verbinding staat met zee, wordt de Haringvliet afgesloten met de Haringvlietsluizen.



Figuur 1.1 Overzicht van het Rijn-Maasmondingsgebied, met benaming van de belangrijkste takken en de locatie van de Haringvlietsluizen.

¹ Er bestaan verschillende beschrijvingen van wat binnen het RMM gebied valt. De hier gehanteerde omschrijving is relatief beperkt maar beslaat de gedurende dit jaar bestudeerde deelgebieden. Zie Zijl, 2014 en Kranenburg, 2015 voor alternatieve omschrijvingen, die bijvoorbeeld ook het Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal omvatten.

De Rijn- en Maasmonding wordt gekarakteriseerd door een complex systeem van riviertakken, die bepalend is voor de waterverdeling en zoutindringing in het gebied. Onttrekkingen of lozingen in een riviertak kunnen grote invloed hebben op de zoutindringing en verdeling van het gehele systeem.

Zout dringt op dit moment alleen het gebied in via de Nieuwe Waterweg. Deze directe indringing van zeewater in een zoet bekken komt op veel plaatsen in de wereld voor en wordt in het RMM gebied ook wel *voorwaartse verzilting* genoemd. Er bestaat een evenwicht tussen de indringing van zout en de netto rivierafvoer naar zee. Tijdens hoge rivierafvoeren wordt de zoutindringing teruggedrongen, terwijl bij lage afvoeren het zout tot voorbij de splitsingen met de Hollandsche IJssel en de Lek kan binnendringen. De rivierafvoer is voornamelijk afkomstig van de Waal, Maas, en Lek, maar wordt veelal gekarakteriseerd via de Bovenrijnafvoer bij Lobith.

De Haringvlietsluizen vormen aan de zuidzijde de scheiding tussen het zoete Haringvliet en de Noordzee. Tot op heden worden de sluisen alleen gebruikt voor het spuien van zoet water naar zee. In 2018 zal worden overgegaan tot de uitvoering van het “Kierbesluit” in de vorm van “lerend implementeren”. Hierbij zullen de sluisen ook (gedeeltelijk) worden geopend bij vloed, waardoor zout water het systeem in kan stromen, om zo vismigratie de rivieren op te faciliteren.

Aan de zuidrand kunnen drie verziltingstypen worden onderscheiden: *Achterwaartse verzilting* vindt plaats wanneer zout water via de noordrand het Haringvliet of het Hollandsch Diep bereikt. Vervolgens kan *nalevering* van zout uit het Haringvliet of het Hollandsch Diep naar de noordelijke helft van het RMM gebied (als gevolg van reststroming) optreden. *Voorwaartse verzilting* zal in de toekomst ook aan de zuidrand op gaan treden wanneer zout water in het kader van het Kier besluit het Haringvliet wordt ingelaten.

1.1.3 Probleemanalyse

Zoutindringing via oppervlaktewater vormt in dit gebied een complex maatschappelijk probleem, waarbij verschillende gebruikersfuncties, zoals scheepvaart, zoetwatervoorziening of natuur, verschillende belangen hebben. Goede kennis van het systeem en begrip van de verschillende processen die een rol spelen bij verzilting kunnen helpen bij het bepalen van de effectiviteit van verschillende maatregelen, maar ook inzicht geven in de mogelijke negatieve effecten van ingrepen of maatregelen voor gebruikers.

Een goed inzicht in de systeemwerking van de Rijn-Maasmonding wordt noodzakelijk geacht voor een goede inschatting van de effecten van autonome ontwikkelingen en menselijke ingrepen in het systeem op de zoutindringing, en voor het inschatten van de effectiviteit van compenserende en mitigerende maatregelen. Met het oog op te verwachten ingrepen (zoals de verdieping Nieuwe Waterweg en het lerend implementeren van het Kierbesluit) en nadere bezinning op mogelijke maatregelen (Fase 2 Deltaprogramma Zoetwater) is daarom deze systeemanalyse opgestart. De bedoeling van het project is kennis aan te leveren die gebruikt kan worden bij het beantwoorden van actuele kennisvragen in het kader van beheerstrategie- en beleidsvraagstukken (zie de longlist in de Appendix F). De daadwerkelijke beantwoording van de diverse vragen zal in andere, speciaal aan de betreffende beheer- of beleidsvraagstukken gewijde, projecten gebeuren.

1.2 Het project **Systeemanalyse Rijn-Maasmonding**

1.2.1 Overkoepelende projectdoelstelling

De doelstelling van het project is de kennis en inzichten op het onderwerp (externe) verzilting via oppervlaktewateren te vergroten, en beter te begrijpen hoe chloride in het systeem van de Rijn-Maasmond wordt verspreid. Hiertoe bestuderen we:

- de werking van de verziltingprocessen in de Rijn- en Maasmonding en de aangrenzende delen van het hoofdwatersysteem (HWS);
- de factoren die verziltingsprocessen beïnvloeden en welke kenmerkend zijn voor de verschillende verziltingstypologieën;
- de gevoeligheid van verziltingsprocessen voor veranderingen in deze factoren;
- de invloed van ingrepen op (de kans op) verzilting zowel lokaal als op het watersysteem als geheel.

1.2.2 Projecthistorie

Om het doel te realiseren worden in het project vier kennisvelden onderscheiden: Proceskennis, Systeemkennis, Modelinstrumentarium en Statistiek. Ook is het project opgedeeld in drie fasen: 1) inventarisatiefase; 2) beschrijvende fase; 3) verdiepende fase.

In de inventarisatiefase (fase 1, voorjaar 2015) heeft een Quick Scan plaatsgevonden op alle vier de kennisvelden aan de hand van recent onderzoek naar de robuustheid van maatregelen gedefinieerd in fase 1 van het Deltaprogramma Zoetwater. Dit heeft een werkdocument opgeleverd ('Verziltingsanalyse in het DPZW: lessons learnt').

In de beschrijvende fase (fase 2, zomer/najaar 2015) is de huidige stand van zaken van de kennis op elk van de vier kennisvelden nader beschreven in Factsheets voor het RMM-systeem als geheel en per deelsysteem (Kranenburg, 2015). Voor deze Factsheets zijn geen nieuwe analyses uitgevoerd, maar is ingezet op het verzamelen, ordenen en samenvatten van reeds beschikbare informatie. Er is hiervoor een groot aantal bronnen geraadpleegd. Daarbij is met name gekeken naar informatie die reeds bij Deltares voorhanden was, aangevuld met recent (extern) onderzoek voor het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal aangedragen door Rijkswaterstaat. Het onderzoek in fase 2 is vooral bedoeld als basis om op voort te bouwen in fase 3.

Het doel van de huidige, verdiepende fase (fase 3, 2016 en 2017) is inzichten en/of uitkomsten van eerder onderzoek up-to-date te maken, de verzamelde informatie in fase 2 te duiden en te interpreteren en kennisleemten te vullen.

1.2.3 Onderwerpen Systeemanalyse RMM fase 3 deel 2016

Vanuit de beheer- en beleidsvragen, vragen vanuit aanpalende projecten en kennisvragen uit de eerdere fase van de systeemanalyse zijn de volgende deelonderwerpen geformuleerd voor fase 3 van de Systeemanalyse, periode 2016 (zie Appendix F voor een overzicht van beheer- en beleidsvragen samen met een prioritering, zoals deze is opgesteld door RWS):

- 1) Waterverdeling binnen het RMM systeem en zoutverspreiding bij splitsingspunten
- 2) Noord-zuid relaties in het RMM systeem: sturende invloed van de Haringvliet en Hollandsch diep op zoutindringing
- 3) Haringvliet lokaal: werking diepe geulen en uitspoeling zout
- 4) Verzilting Hollandsche IJssel: conflicterende (transport-)processen en minimaal benodigde hoeveelheid zoetwater

- 5) Vertaling van de inzichten naar concrete aanbevelingen voor de aanpalende projecten rond verziltingsstatistiek
- 6) Overige systeemvragen (kleine vragen, of kleine efforts aan grote, maar niet-prioritaire systeemvragen)

Het eerste onderdeel richt zich op het grote plaatje van het systeem als geheel. Vervolgens wordt gekeken naar de specifieke invloed van het deelsysteem van het Haringvliet en Hollands Diep op de rest van het systeem. Daarna wordt ingezoomd op meer lokale effecten in het Haringvliet/Hollandsch Diep deelsysteem dat gekenmerkt wordt door een geringe dynamiek (in de toekomst beïnvloed door de Kier) en de aanwezigheid van voormalige getijgeulen. Vervolgens wordt ingezoomd op het deelsysteem Hollandsche IJssel, waarvan het typische kenmerk is dat het feitelijk een 'dode' riviertak is. Vervolgens wordt een indicatieve karakterisering van de verschillende deelgebieden gemaakt naar het dominante type verzilting welke toeleverend kan zijn aan de bepaling van geschikte statistische verziltingsindicatoren per deelgebied.

Tussen de diverse deelonderzoeken is verschil in karakter en detailniveau. Het meest uitgebreid zijn de onderdelen 2 (noord-zuid relaties) en 4 (Hollandsche IJssel). Tabel 1.1 geeft een overzicht van de doelen en relaties van de onderdelen uitgevoerd in 2016.

Tabel 1.1 Samenvatting inrichting Fase 3, jaar 2016, onderdeel 1-5.

	Onderdeel	Doel	Methodiek	Toeleverend aan
1	Waternverdeling & zoutverspreiding	Kwantificeren, 'unificeren'	Mini-symposium, Data-overzicht	Alle modelstudie-afhankelijke proj.
2	Noord-zuid relaties	Complexe verbanden inzichtelijk maken	Literatuur, Modeldata, Visualisatie	SWM RMM, POA
3	Functioneren voormalige getijgeulen	Hypothese-vorming	Data-analyse (ook IJsselmeer)	Kier&VZM proj., 3D&1D modelontw.
4	Hollandsche IJssel	Proceskennis t.b.v. 'zoetwaterbel'	Uitbreiden Data-analyse 2015	SWM, knelpunten, Lek-studies
5	Verziltingsindicator en	Linken forcering & procestijdschaal aan type inlaat & gebruiker	Data analyse van langjarige meet- en modelreeksen per deelsysteem	WaBes, IMPREX, Knelpunten

Het onderdeel 'Overige Systeemvragen' (6) heeft concreet bestaan uit: betrokkenheid bij een MSc-studie (uitgevoerd bij HKV) naar het Noordzeekanaal-AmsterdamRijnKanaal deelsysteem en betrokkenheid bij het STW-project 'Sustainable RoFi's' over de zoet/zout dynamiek van de rivierpluim direct zeewaarts van de Nieuwe Waterweg.

1.3 Opzet

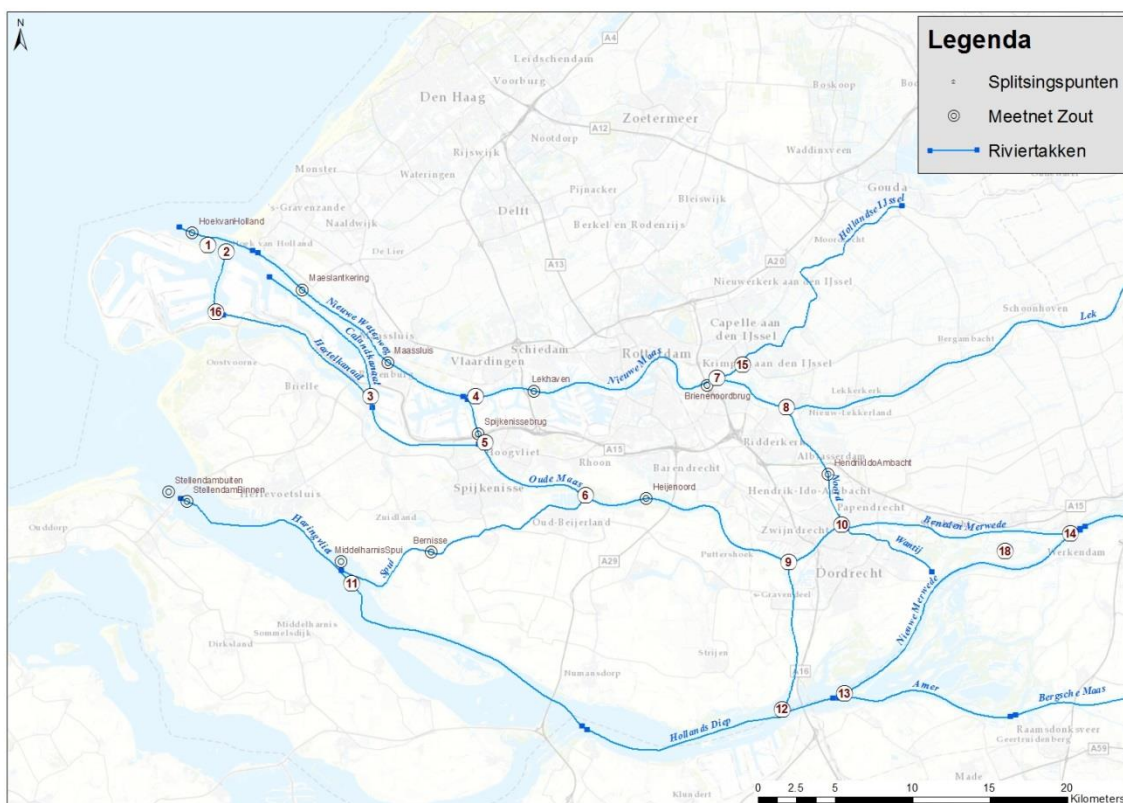
Dit rapport beschrijft een beknopte samenvatting van de bevindingen per deelonderzoek (hoofdstuk2). Daarnaast wordt in dit hoofdstuk per deelonderwerp weergegeven wat nog openstaande vragen zijn, en waar de systeemkennis nog kan worden uitgebreid of toegepast. Tot slot volgen in (hoofdstuk3) nog enkele aanbevelingen. De uitgebreide rapportages en memo's die zijn opgesteld per deelonderzoek zijn opgenomen in appendices, waar per deelonderwerp ook een representatieve presentatie is weergegeven die de bevindingen van de deelonderwerpen beschrijft.

2 Synopsis

2.1 Transport op splitsingspunten

In dit deelonderzoek is een inventarisatie gemaakt van fysica nabij splitsingspunten. In een mini-symposium (Appendix A.1) is gekeken wat de sterke en minder sterke kanten van de huidige 3D-modellering zijn. Hieruit bleek dat de stroming en zoutverspreiding aan de noordzijde van het gebied redelijk wordt gereproduceerd, terwijl het getijvolume via de Oude Maas en Hartelkanaal worden overschat. Daarnaast is besproken welke condities nog onderbemeten zijn.

In een vervolg op dit mini-symposium is, aansluitend op de werkzaamheden binnen KPP Modelschematisaties 2016 (Van der Wijk & Fujisaki, 2016), in kaart gebracht welke grootschalige (over meerdere splitsingspunten) stromingsmetingen er beschikbaar zijn. Dit overzicht beschrijft de meetdata die gebruikt kunnen worden voor modelvalidaties en wat de toepasbaarheid en kwaliteit van deze gegevens is (zie Appendix A.2 en zie Figuur 2.1).

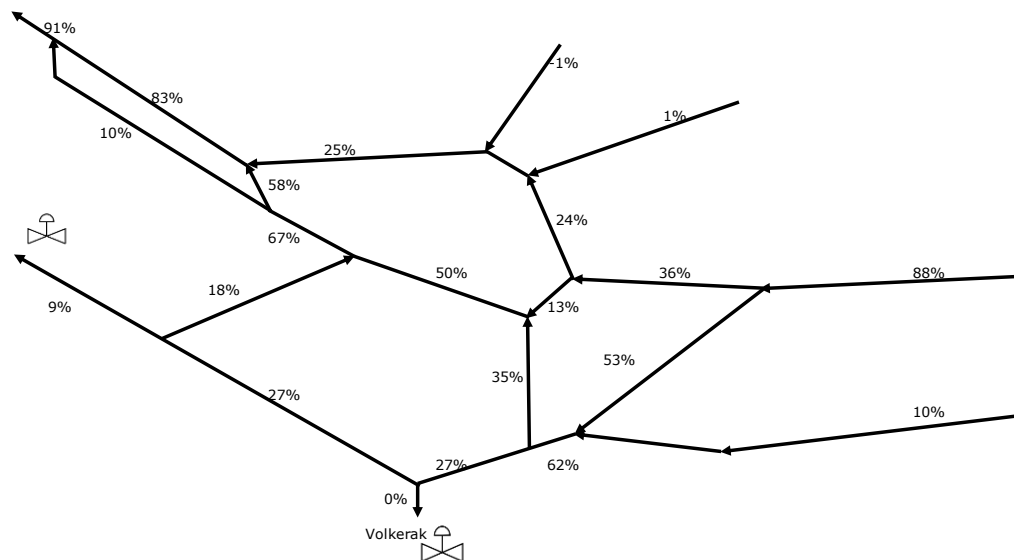


Datum	Splitsingspuntennummer	Randvoorwaarden	Kwaliteit
1998-08	4, 5, 6	Lage afvoer, geringe opzet	Onbekend
1999-03	15, 13, 8, 14, 9, 10	Hoge afvoer, geen opzet	Onbekend
2000-05	5, 4, 6	Gemiddelde afvoer, geringe opzet	Onbekend
2000-10	14, 8, 9, 10, 13, 12	Gemiddelde afvoer, geen opzet	Redelijk
2003-05	4, 5, 6, 9, 10	Gemiddelde afvoer, geen opzet	Goed
2003-08	4, 5, 6, 9, 10	Lage afvoer, geen opzet	Goed
2011-05	8, 7, 6, 5, 9, 14, 12, 13, 4, 16, 11	Lage afvoer, geen opzet	Redelijk

Figuur 2.1 Overzicht van beschikbare grootschalige afvoermetingen met behulp van ADCP metingen.

Daarnaast is een vergelijking modellen (5^{de} generatie 1D en 2D schematisaties) met metingen uitgevoerd voor de 2003 (gemiddelde afvoer) en 2011 (lage afvoer) casussen (Van der Wijk & Fujisaki, 2016). Hieruit kwam naar voren dat zowel het 5^{de} generatie WAQUA als SOBEK3 model de debieten redelijk tot goed (5-15% afwijking) voorspellen, maar dat de modellen bijzonder gevoelig zijn voor de stand van de Haringvlietsluizen.

Op basis van de gemeten randvoorwaarden van de 2011 casus is over een periode van 3 maanden een afvoerverdeling in fracties gemaakt (Figuur 2.2). Tijdens deze periode was sprake van een lage rivierafvoer (gemiddeld ongeveer 1000 m³/s). Onder deze lage rivierafvoercondities valt op dat het grootste deel van de restafvoer via de Nieuwe Merwede, Hollands Diep, Dordtsche Kil naar de Oude Maas stroomt. Het Haringvliet is slechts verantwoordelijk voor 9% van de totale restafvoer dat naar zee stroomt.



Figuur 2.2 Afvoerverdeling in fracties van de totale restafvoer voor de 2011 casus over 3 maanden bepaald met behulp van WAQUA

2.1.1 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek

- Alleen de meetcampagnes van RWS zijn nu meegenomen in de analyse en het overzicht die tot doel hadden om de afvoerverdeling in kaart te brengen en meerdere splitsingspunten beschouwen. In het RMM gebied zijn ook metingen op individuele splitsingspunten uitgevoerd en bovenal zijn de meetcampagnes van HbR en WUR niet in beschouwing genomen terwijl die zowel zout als stromingsdata bevatten. Met het oog op de slechts beperkte beschikbare meetgegevens is het gewenst om deze meetgegevens ook in het in paragraaf 2.1 beschreven dataoverzicht op te nemen zodat deze ook kunnen worden toegepast bij verdere modelvalidaties. De gegevens moeten dan wel beschikbaar zijn voor Rijkswaterstaat en andere partijen.
- Het dataoverzicht zoals dat nu is gepresenteerd bevat een selectie van alle beschikbare metingen. Het zou zeer waardevol kunnen zijn om de meetcampagnes te groeperen per opzet en afvoerconditie. Uit deze te ontwikkelen matrix kan direct worden afgeleid voor welke condities metingen beschikbaar zijn. Daarnaast zou in dit overzicht ook aangegeven kunnen worden welke data kan worden gebruikt voor validatie van welk type (1D, 2D, of 3D) modellen.
- Het is gewenst dat meetcampagnes zowel in ruimtelijke als in temporele schaal worden uitgebreid. Voor een uitgebreide systeemkennis op basis van debiet- en zoutmetingen zijn meetcampagnes op verscheidene splitsingspunten nodig die langer duren dan één

getijperiode, en dat daarnaast gericht metingen worden uitgevoerd om bepaalde combinaties van condities in kaart te brengen (zie ook Schroevers, 2015).

- Onderzoek naar de modelmatige parametrisering van de Haringvlietsluizen. Het systeem is zeer gevoelig voor de sturing van de sluizen. Daarnaast zijn er in dit gebied de grootste afwijkingen tussen de modelresultaten en metingen.

2.2 Noord-Zuid relaties

Binnen dit deelonderzoek is bekeken hoe de zoutconcentraties aan de zuidrand (Haringvliet en Hollandsch Diep) worden beïnvloed door condities aan de noordrand (Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas), en vice versa. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van zowel KPP Verzilting, als KPP Slim watermanagement (Het volledige rapport staat in Appendix B.1).

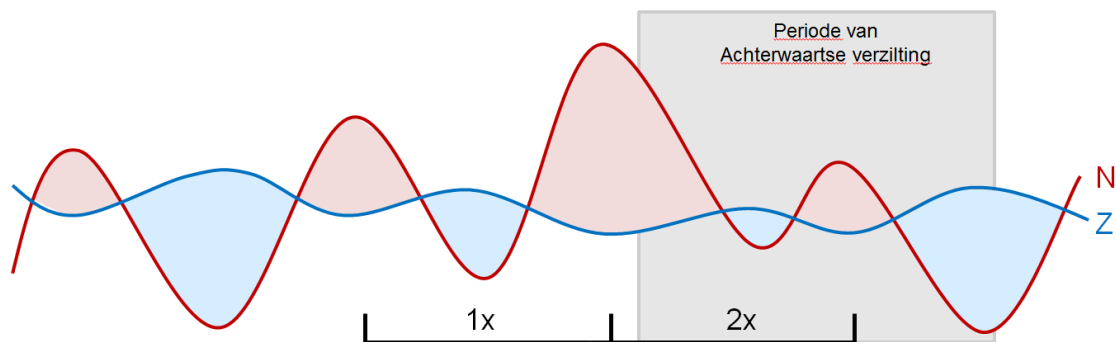
2.2.1 Achterwaartse verzilting

Onder achterwaartse verzilting wordt verstaan: de toename van de zoutconcentratie aan de zuidzijde van de Rijn- en Maasmonding, als gevolg van binnendringing van zout water via de noordrand (de Nieuwe Waterweg). Dit treedt alleen op bij extreme condities, wanneer door stormopzet extra zout water via de Nieuwe Waterweg het systeem binnendringt. Om achterwaartse verziltingscondities te kunnen voorspellen is tot op heden gebruik gemaakt van een vuistregel die de maximale waterstand bij vloed voor Hoek van Holland (noordzijde) vergeleek met de minimale eb-waterstand bij Moerdijk (zuidzijde), de *HL-parameter*. Wanneer sprake was van een lage rivierafvoer ($Q_{\text{Lobith}} < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$) en door stormopzet de vloedwaterstand bij Hoek van Holland meer dan 1 m hoger was dan de eb-waterstand bij Moerdijk werd achterwaartse verzilting voorspeld.

In dit onderzoek is eerst de huidige vuistregel gevalideerd. Hieruit bleek dat de vuistregel slechts een beperkte voorspellingswaarde heeft: slechts 15 van de 25 gevallen van achterwaartse verzilting (in de periode 1990 – 2005) correct werden voorspeld. De HL en Bovenrijnafvoer zijn dus niet maatgevend. In een tweede stap is gekeken naar de systeemwerking om te bepalen welke factoren wel maatgevend zijn. Hieruit blijkt dat twee factoren bepalend zijn:

- 1 De *gemiddelde waterstandsverschillen* tussen de noord- en de zuidrand gedurende de hele getijperiode. Deze bepalen hoeveel water en zout van noord naar zuid kan stromen tijdens vloed en hoeveel water en zout weer terug kan stromen tijdens eb.
- 2 De mate van oplading, als zout al ver heeft kunnen binnendringen gedurende de vorige getijperiode dan bereikt zout gedurende de opvolgende periode sneller de zuidrand.

Beide aspecten worden gedekt door de gemiddelde waterstandsverschillen over twee getijperiodes te bepalen, waarbij de eerste periode de mate van oplading bepaald en de tweede de zoutindringing gedurende het huidige getij. Deze nieuwe methode is beter in het voorspellen van achterwaartse verzilting. Van de 25 achterwaartse verziltingsincidenten, worden er door deze nieuwe vuistregel 20 goed voorspeld.



Figuur 2.3 Theoretische waterstand bij Hoek van Holland (rood) en Moerdijk (blauw), waarbij in het grijs gearceerde deel achterwaartse verzilting optreedt.

Alhoewel een uitgebreidere toetsing en fine-tuning van deze methodiek gewenst is, biedt de nieuwe vuistregel een beter inzicht wanneer achterwaartse verzilting op kan treden. De toepassing van deze nieuwe vuistregel in plaats van de bestaande HL-parameter kan leiden tot een efficiënter waterinnamebeleid bij zoetwaterinnamepunten zoals Bernisse.

2.2.2 Inzet stuurknoppen

In de Rijn- en Maasmonding zijn verschillende knoppen beschikbaar waaraan gedraaid kan worden om zo de waterverdeling en zoutverspreiding te beïnvloeden. De Haringvlietsluizen kunnen worden beschouwd als de grote stuurknop, waarmee grootschalige veranderingen worden gecreëerd. Bij uitvoering van het Kierbesluit, zullen de Haringvlietsluizen zowel bij eb als in beperkte mate bij vloed worden geopend, waardoor de werking van deze stuurknop verandert. Kleinere stuurknoppen (van het hoofdwatersysteem) waarmee de waterverdeling en zoutindringing in het gebied kunnen worden beïnvloed zijn het stopzetten van de onttrekking van zoetwater via de Volkeraksluizen en de verschuiving in de afvoerverdeling tussen de Lek en de Waal. In huidig onderzoek is de werking van deze drie knoppen onderzocht. De bevindingen zijn hieronder schematisch weergegeven voor welke condities de stuurknoppen Haringvlietsluizen (A), Volkeraksluizen (B) en stuw bij Hagestein (C) ingezet kunnen worden.

Verziltiong monding Hollandsche IJssel

Creëren juiste uitgangssituatie

B – Winterdoorspoeling

Bij verwachte verziltiong over 1 à 2 weken:

A – Beperking restafvoeren met minimaal enkele tientallen m³/s (indien mogelijk).

B – Beperking van doorspoeling met minimaal enkele tientallen m³/s (indien mogelijk).

Bij acuut dreigende verziltiong (1 à 2 dagen)

C – Verhogen afvoer over de Lek met minimaal enkele tientallen m³/s (indien mogelijk).



Tegengaan achterwaartse verziltiong

Risico inschatten met behulp van nieuwe vuistregel.

Creëren juiste uitgangssituatie

B – Doorspoelen buiten stormseizoen

Bij verwachte achterwaartse verziltiong

A – Minder spuien (indien mogelijk)

B – Beperken doorspoeling (indien mogelijk)

C – Verhogen afvoer over de Waal (indien mogelijk)



Ontziltiong Haringvliet

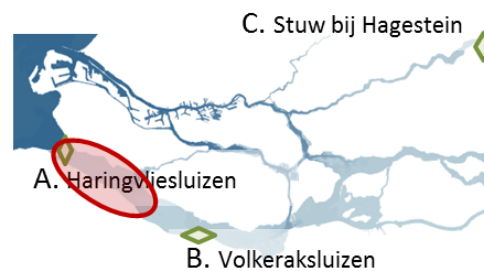
(na achterwaartse verziltiong of bij voorwaartse verziltiong zuidrand tgv Kier)

Creëren juiste uitgangssituatie

A – zoetspoelen (toekomst).

Na verziltiong

A – zo mogelijk meer spuien, minder innemen met vloed.



2.2.3 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek

- De hierboven beschreven opzet voor een nieuwe vuistregel voor achterwaartse verziltiong, zou verder kunnen worden uitgebreid met een validatie en optimalisatie. Hiervoor liggen concrete ideeën. Daarna zou deze ingebouwd kunnen worden in de operationele modellen om zo een waarschuwingssignaal af te geven bij dreigende achterwaartse verziltiong.
- Uit dit onderzoek kwam naar voren dat het gecombineerde effect van een grotere eb en vloed opening van de Haringvlietsluizen op de zoutindringing aan de zuidrand niet goed bekend is. Verder onderzoek met behulp van een 3D model is gewenst.
- Verdere kwantificering van de effectiviteit van de stuurknoppen middels het simuleren van meerdere jaren met een 1D model. Daarnaast is een validatie van de met 1D modellen berekende effecten met een 3D modelstudie gewenst.

2.3 Zoutverspreiding via voormalige getijdegeulen in het Haringvliet

In het kader van het RMM Systeemanalyse onderzoek is gekeken naar welke lessen er op basis van verziltingscasussen uit het verleden getrokken kunnen worden over de processen die een rol zullen gaan spelen in verzilting van het Haringvliet, bij uitvoering van het Kierbesluit (de memo is weergegeven in Appendix C.1). Dit onderzoek gebeurt in samenwerking met het meerjarige project om tot een 3D model van het Haringvliet te komen. Bij verzilting van het Haringvliet zijn de voormalige getijdegeulen van groot belang omdat het zwaardere zoute water zich in deze diepere delen ophoopt. Om de zoutverspreiding van en naar deze diepere delen beter te begrijpen, zijn 9 verziltingscasussen geanalyseerd. Drie processen zijn hierbij onderzocht: zoutindringing van uit zee; terugdringing van verzilting en zoutverspreiding vanuit diepe delen.

2.3.1 Zoutindringing vanuit zee

Het gaat hierbij om “voorwaartse verzilting”, waarbij zout zeewater via de Haringvlietsluizen het systeem wordt ingelaten. Uit analyse van de verschillende verziltingscasussen waarbij bewust zout water werd ingelaten, kwam naar voren dat er sprake is van twee fasen. Een eerste fase treedt bij beperkte inlaatdebieten op, waarin het binnenstromende zoute water de diepe putten direct achter de Haringvlietsluizen opvult. Wanneer deze vol zijn gelopen begint de tweede fase waarin het zoute water zich verder verspreidt over de bodem van het Haringvliet. Het zoute water volgt de diepste delen, waardoor zoutverspreiding aan de zuidzijde van het Haringvliet sneller en verder geschiedt dan aan de noordzijde waar sprake is van ondiepere drempels tussen de diepe putten.

2.3.2 Terugdringing van verzilting

In het geval van een verzilt Haringvliet, is het de bedoeling dat dit zoute water via de Haringvlietsluizen naar zee wordt geloosd. Wanneer er sprake is van continue hoge rivierafvoeren, is dit te doen door het huidige bedieningsprogramma (LPH'84) te hanteren. Voor het geval dat er lage rivierafvoeren worden verwacht (en de Haringvlietsluizen gesloten horen te zijn) kan worden overgegaan tot een korte periode van zogenaamd *zoetspoelen*. Dit houdt in dat er extra water gespuid wordt naar zee, en geschiedt alleen als er sprake is van verzilting van het Haringvliet en de verwachting is dat de Bovenrivierafvoer bij Lobith voor meer dan 7 dagen onder de 1500 m³/s blijft.

Bij lage rivierafvoeren of zoetspoelen is sprake van het zogezegd “afschaven” van zoutgehaltenes, waarbij de spronglaag tussen het zoete water boven en het zoute water onder langzaam naar beneden wordt verschoven. Door de lage debieten, wordt primair het zout tot het niveau van de drempels (van -5 tot -8 m NAP) teruggedrongen. Hoge rivierafvoeren leiden echter tot een grotere stroomsnelheid waarbij tot op grotere dieptes het water in beweging wordt gebracht en zoutgehaltenes worden teruggedrongen.

2.3.3 Zoutverspreiding vanuit diepe delen

Wanneer zout is binnengedrongen in het Haringvliet, en er tijdelijk niet gespuid kan worden, bestaat de mogelijkheid dat dit zout zich verspreidt vanuit de diepere delen en zich richting meer stroomopwaarts gelegen gebieden verplaatst zoals het Spui en het innamepunt bij Bernisse. Deze situatie is zeer bedreigend voor de zoetwatervoorziening van de omliggende gebieden. Wanneer niet door middel van spuien naar zee de zoutverspreiding kan worden beheerst, is de mate waarin externe factoren invloed hebben op de zoutverspreiding vanuit de diepere delen van het Haringvliet naar ondiepe gebieden van groot belang.

Dit onderdeel is in eerste instantie met slechts beperkte inzet onderzocht door bij verzilting van het Haringvliet (door achterwaartse verzilting in 2013) het zoutgehalte bij

waterinnamepunt Bernisse te relateren aan de omgevingsfactoren wind en afvoerdebieten. Analyse wees uit dat de meest waarschijnlijke bron van verzilting bij Bernisse in dit geval de verplaatsing van de zoutwaterbel vanuit het Hollandsch Diep naar het Haringvliet en vervolgens naar Bernisse was, en werd veroorzaakt door het spuien via de Haringvlietsluizen. Er waren geen indicaties dat opmenging van zout uit de diepere delen van het Haringvliet (meetlocatie Middelharnis) als oorzaak voor verzilting bij innamepunt Bernisse aan kon worden gewezen.

2.3.4 Zoutbalans voor het Haringvliet

Als aanvulling op de bovenstaande inventarisatie is voor de Zoutinlaatproef 1997 een zoutbalans opgesteld op basis van zoutmetingen in het Haringvliet. Dit onderdeel is ook gedeeltelijk uitgevoerd vanuit het project om tot een 3D Haringvliet model te komen en staat beschreven in Groenenboom et al., 2016. Uit deze analyse is gebleken dat tijdens de 5 dagen dat zout zeewater het systeem is ingelaten, mogelijk sprake was van de ontwikkeling naar een dynamisch evenwicht tussen de hoeveelheid binnenstromend zout en de hoeveelheid die in iedere eb-fase weer werd uitgelaten. Dit evenwicht trad op na ongeveer 3 dagen. Hierbij moet worden aangemerkt dat dit niet betekent dat de zoutverspreiding in het Haringvliet zelf in deze periode was gestabiliseerd.

2.3.5 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek

- Met betrekking tot het terugdringen van verzilting in het Haringvliet is het uitbouwen van de voorgestelde relatie tussen rivierafvoeren (spuidebieten door de Haringvlietsluizen) en zout concentratie gewenst om zo een beter zicht te krijgen op de effectiviteit van deze maatregel. Deze relatie kan aan de hand van verschillende zoutindringingscasussen uitgebreid worden gekwantificeerd.
- Verbreden onderzoek met betrekking tot nalevering van zout uit diepere delen door ook de verticale opmeking te onderzoeken. Hier is meer data van beschikbaar dan van de nalevering op zich, terwijl verticale verspreiding als voorstadium van de horizontale verspreiding kan worden gezien. Daarnaast is een vergelijking met ruimtelijk gedetailleerde gegevens van verziltingscasussen in het Haringvliet en het Volkerak-Zoommeer gewenst om de langere termijn (seizoenale) verspreiding van de zoutindringing te bestuderen.

2.4 Verzilting Hollandsche IJssel

Verzilting van de (monding van de) Hollandsche IJssel vormt een probleem voor de zoetwatervoorziening in de omgeving van Gouda. Met name bij lage rivierafvoeren is de kans op (langdurige) verzilting van de monding van de Hollandsche IJssel het grootst. Er is echter gevonden dat de verzilting van de Nieuwe Maas nabij de monding van de Hollandsche IJssel geen probleem vormt wanneer dit aan het einde van de vloed-fase in de Nieuwe Maas plaatsvindt. Dit komt omdat op dat moment al sprake is van uitstroom vanuit de Hollandsche IJssel. Echter, als aan het einde van de eb-fase in de Nieuwe Maas al sprake is van verzilting nabij de monding kan verzilt water wel de Hollandsche IJssel instromen. Hierdoor zijn zoutmetingen bij de monding van de Hollandsche IJssel (Krimpen) minder geschikt als proxy om de verzilting nabij Gouda te voorspellen, en zal er waarschijnlijk sprake zijn van een te conservatief voorspelde verzilting. Wanneer de monding permanent is verzilt, is de snelheid waarmee het zout zich richting Gouda verplaatst afhankelijk van advectie en dispersie. In dit onderzoek is onderzocht in welke mate verzilting van de Hollandsche IJssel als gevolg van dispersie optreedt en hoe dit kan worden tegengegaan door het instellen van een netto lozingsdebiet bij Gouda (het volledige rapport is weergegeven in Appendix D.1).

2.4.1 Advectief transport

Het advectieve transport in de richting van Gouda is afhankelijk van de mate waarin water wordt onttrokken. Dit onderzoek heeft uitgewezen dat wanneer de monding van de Hollandsche IJssel continue is verzilt, het bij een continue onttrekking van 10 m³/s ongeveer 2 weken duurt voordat water vanuit de monding Gouda bereikt.

2.4.2 Dispersief transport

In dit project is daarnaast gekeken naar de bijdrage die dispersief transport heeft op de verspreiding van zout richting Gouda. De mate van dispersief transport is afhankelijk van de dispersie coëfficiënt (K). Deze is aan de hand van gemeten zoutgehaltenes (2015) bepaald aan de hand van veldmetingen, en wordt lokaal geschat tussen de 10 en 65 m²/s. Deze waarde ligt substantieel lager dan wordt gebruikt in de huidige SOBEK modellen (250 m²/s) maar komt overeen met gebruikte waarden in het verleden.

Bij permanente verzilting van de monding van de Hollandsche IJssel, kan met behulp van een residueel debiet vanuit Gouda naar de Nieuwe Maas de indringing van zout worden tegengegaan, waarbij een zogeheten zoetwaterbel voor Gouda wordt gecreëerd. Een eerste schatting van het (netto) lozingsdebiet om dit te bewerkstelligen is op basis van de in dit onderzoek bepaalde dispersie coëfficiënt bepaald (voor een homogene situatie met een constante dispersie coëfficiënt in de Hollandsche IJssel).

2.4.3 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek

- Voor verder inzicht in verspreiding van zout in de Hollandsche IJssel is toepassing van een 1D SOBEK model gewenst. Dit zou kunnen gebeuren in vergelijking met de gemeten zoutindringing om zo tot een betere (ruimtelijk variabele) kalibratie van de dispersie coëfficiënt te komen. Daarnaast is aanvullend onderzoek naar de toepasbaarheid van 1D dispersie modellering voor zoutindringing ook gewenst.
- De in dit onderzoek gebruikte meetgegevens kunnen daarnaast ook als verificatieset dienen van het 3D model van de Hollandsche IJssel.
- De in dit onderzoek opgebouwde kennis en de ontwikkelde methode kunnen worden toegepast om de zoutindringing en dispersie in de Lek te bepalen.

2.5 Verziltingstypen per deelgebied

Dit onderzoek is mede uitgevoerd in kader van het WABES project (Rijkswaterstaat-WVL), waarin inzicht wordt verkregen in de waterbeschikbaarheid voor een groot aantal locaties langs het hoofdwatersysteem. Voor de Rijn- en Maasmonding hangt de waterbeschikbaarheid vooral al van de verzilting. Op basis van meetgegevens is een onderscheid in deelgebieden gemaakt naar het dominante type verzilting (zie Appendix E.1). Welke forcering dominant is, hoe snel het zout kan worden teruggedrongen, en wat de aard van verziltingsincidenten is (kortstondig of langdurig) kan aan de hand van deze karakterisering worden afgeleid.

Op basis langjarige metingen van de Bovenrivierafvoer en de wind-gedreven opzet bij Hoek van Holland, zijn hier verschillende combinaties van externe forceringen vergeleken met gemeten zoutgehaltenes door de Rijn- en Maasmonding (Tabel 2.1).

Zeewaterstand bij Hoek van Holland	Windopzet	Invloed getij/opzet ver bovenstrooms merkbaar (Noordrand) en kans op achterwaartse verzilting (Zuidrand)	Invloed getij/opzet ver bovenstrooms merkbaar (Noordrand) en kans op achterwaartse verzilting (Zuidrand)	Kans op achterwaartse verzilting (Zuidrand)
	Normaal getij	Zouttong rukt op (Noordrand) Achtergrondconcentraties rivierwater nemen toe	Zouttong rukt op (Noordrand) Achtergrondconcentraties rivierwater nemen licht toe	Zout grofweg tot Brienenoordbrug (Nieuwe Maas) en tot Spijkenisse (Oude Maas)
		Zeer laag (< 1100 m ³ /s)	Laag (1100 < Q < 1700 m ³ /s)	Normaal (Q > 1700 m ³ /s)
Bovenrijnafvoer Q				

Tabel 2.1 Kwalitatieve beschrijving van verziltingskarakteristieken die kunnen optreden bij gegeven combinatie van Bovenrijnafvoer en zeewaterstand bij Hoek van Holland. Onder alle condities kan er sprake zijn van voorwaartse verzilting (dit wordt niet specifiek benoemd), wanneer er sprake kan zijn van achterwaartse verzilting wordt dit wel zo aangeduid.

De analyse van de externe forcering (opzet en afvoer) en zoutgehaltenes wees uit dat aan de noordzijde van het RMM gebied geldt dat de verzilting veelal direct gerelateerd kan worden aan zowel stormopzet en/of lage rivierafvoeren. Hoe verder stroomopwaarts, hoe groter de stormopzet of lager de rivier afvoer moet zijn voordat verzilting optreedt. Voor de Lek en de Hollandsche IJssel zijn minder meetgegevens beschikbaar, waardoor dit soort relaties niet kon worden bepaald. Echter voor deze takken speelt (ook) dispersie een belangrijke rol, omdat de afvoeren vaak laag zijn of zelfs tijdelijk negatief.

Aan de zuidzijde van het RMM gebied moet ook de historie (opladen van het systeem) en aansturing van de Haringvlietsluizen worden meegenomen als belangrijke factoren die verziltingscondities bepalen. In het Haringvliet en het Hollandsch Diep is het verziltingsproces sterk locatie-afhankelijk, terwijl voor het Spui geldt dat zowel lage rivierafvoeren als hoge windopzet kunnen leiden tot kortstondige verzilting.

2.5.1 Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek

- De karakterisering van verziltingstypen per deelgebieden kunnen met name voor de noordzijde van de Rijn- en Maasmonding worden aangevuld met verwachte forcering als gevolg van klimaatverandering
- Een vertaling van de karakterisering naar statistische maatstaven zoals die gebruikt worden in het waterbeschikbaarheidsproject (WABES). Om tot een eerste objectieve kwantificatie van wanneer verzilting optreedt te komen zou de relatie tussen verzilting en windopzet en rivierafvoer kunnen worden gevisualiseerd voor de verschillende deelgebieden.
- Het opzetten van een eenvoudig te interpreteren visualisatie van de verschillende deelgebieden en verziltingsprocessen waarin de in dit onderzoek ontwikkelde systeemkennis wordt samengebracht. Dit kan vervolgens als basis worden gebruikt

waarbinnen in het WABES-project de meest geschikte statistische methodes of indicatoren kunnen worden afgeleid.

3 Doorkijkje naar 2017

In ieder deelonderzoek zijn verschillende aanbevelingen gedaan met betrekking tot het uitbreiden van de systeemkennis binnen dit deelonderwerp. Hieronder volgt ten eerste een kort overzicht van de onderdelen die in overleg tussen RWS en Deltares zijn aangemerkt voor onderzoek in 2017. Daarna volgen nog enkele meer generieke aanbevelingen over de ontwikkeling van systeemkennis in de Rijn- en Maasmonding die voortkomen uit het hier uitgevoerde onderzoek en de aanbevelingen die bij ieder deelonderwerp zijn opgemerkt.

3.1 Systemanalyse van de Rijn-Maasmonding voor verzilting 2017

De activiteiten in het laatste jaar (2017) van het RMM Systeemkennis project zullen voortbouwen op de in 2016 opgedane kennis en inzichten. Uit overleg tussen RWS en Deltares is een lijst met onderwerpen bepaald die in aanmerking komen om in 2017 onderzocht te worden. Zo is het voorstel om het onderzoek naar de Hollandsche IJssel uit te breiden en ook de verzilting in de Lek te beschouwen. Daarnaast wordt aanbevolen om de werking van regelknoppen voor de debiet- en zoutverdeling in het RMM gebied verder te onderzoeken. Ook is het plan om vooruitlopend op de implementatie van het Kierbesluit, de inventarisatie van zoutverspreidingsprocessen in de diepe delen van het Haringvliet verder uit te breiden. Tot slot is de zoutindringing in het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal ook als mogelijk onderzoeksonderwerp aangedragen. In deze kanalen wordt systeemkennis gevraagd op het gebied van verzilting, vanwege de grote nieuwe zeesluis bij IJmuiden en daaraan gerelateerde zoutbeperkende maatregelen, zoals selectieve onttrekking. Er zal ook gekeken worden naar nog openstaande beheer-, beleids- en kennisvragen voor zowel het RMM gebied, als omliggende delen van het hoofdwatersysteem voor de bepaling van overige onderzoeksonderwerpen voor 2017.

Gestreefd wordt om waar mogelijk naast verdiepende ook praktisch georiënteerde systeemkennis aan te leveren, vergelijkbaar met de bevindingen zoals die in 2016 voor het onderdeel noord-zuid relaties (2) en verzilting Hollandsche IJssel (4) zijn gepresenteerd. Mogelijk zou in samenwerking met andere projecten dit verder vorm kunnen krijgen door een onderdeel te formuleren waarin eenvoudige verziltingsrelaties worden afgeleid.

Volgend jaar zal opnieuw veel aandacht uitgaan naar het uitdragen van de opgebouwde kennis. Wij denken daarbij niet alleen aan het geven van presentaties over de opgedane inzichten maar ook aan sparren en kennisuitwisseling met stakeholders zoals verziltingsspecialisten bij waterschappen en RWS zodat kennis direct kan landen in hun projecten.

3.2 Generieke aanbevelingen

Ter aanvulling op de voorgestelde plannen voor 2017 volgen nog twee generieke aanbevelingen met betrekking tot systeemkennis van verzilting in de Rijn- en Maasmonding.

- Bepaling van debieten en zoutlasten door de Haringvlietsluizen via langdurige veldmetingen, omdat dit niet nauwkeurig genoeg bekend is. Uit de vergelijking tussen debietmetingen op splitsingspunten en modelvoorspellingen (1) bleek dat modellen zeer gevoelig waren voor de afregeling van de Haringvlietsluizen, terwijl zowel 1D (zie Appendix A.2) als 3D modellen (Groenenboom et al, 2016) juist in dit gebied grote voorspellingsfouten maken. De onzekerheid in het voorspelde effect van aanpassingen in de aansturing van de Haringvlietsluizen (2) leidt er toe dat onzekerheid op het gebied van zoutindringing in het gebied bestaat wanneer de kering zowel bij vloed als bij eb wordt geopend. Tot slot geldt dat voor een beter inzicht in de zoutverspreidingsprocessen in het Haringvliet (4) naast het debiet ook de zoutlast door de Haringvlietsluizen nog onzeker is. De bepaling van de debieten en zoutlasten door

de Haringvlietsluizen zou met behulp van metingen kunnen worden uitgevoerd in parallel met de invoering van het Lerend Implementeren van het Kierbesluit.

- Toepassing van (gebiedsdekkend) 3D model ter aanvulling van 1D model-instrumentarium. Voor een eerste inventarisatie naar de processen van zoutindringing en zoutverspreiding in het RMM gebied, kunnen een 1D model en data analyse veel inzichten bieden. Echter voor verdere detailstudies naar de debietverdeling (1), de werking van stuurknoppen (2), de zoutverspreiding in diepe delen van het Haringvliet (3), en de zoutindringing in de Hollandsche IJssel (4) geldt dat de toepassing van een gevalideerd 3D model gewenst is.
- Binnen de academische wereld wordt op verschillende vlakken (zoals mening, turbulentie, en lange termijn processen en effecten van klimaatverandering) gewerkt aan de uitbreiding van systeem- en proceskennis op het gebied van zoutverspreiding via oppervlaktewateren. Dit onderzoek kan bijdragen aan de beantwoording van beheer- en beleidsvragen. Op dit moment is er daarnaast een STW voorstel (STW Perspectief SALT: "Salt intrusion through open water in urbanised delta's") ingediend, waarin vijf universiteiten en meer dan tien onderzoeksinstituten en bedrijven samenkomen om kennis en inzicht op het gebied van verzilting van oppervlaktewateren uit te bouwen. Het is voor de toekomst van de systeemkennis op het gebied van verzilting van de Rijn- en Maasmonding van belang dat de kennis die bij universiteiten wordt ontwikkeld ook binnen dit soort onderzoeken wordt geborgen en kan worden toegepast voor beantwoording van beheer- en beleidsvragen.

4 Referenties

- Groenenboom, J., M.C.H. Tiessen, van der Kaaij, Th. (2016). *Ontwikkeling 3D-Haringvlietmodel*. Deltares, rapport 1230069-000-ZKS-0028 – in voorbereiding.
- Kranenburg, W., Mens, M., Buschman, F., Wesselius, C., Huismans, Y., ter Maat, J., Diermanse, F. (2015). *Systeemanalyse van de Rijn- Maasmonding voor verzilting; Factsheets proceskennis, systeemkennis, meodlinstrumentarium en statistiek*. Deltares rapport 1220107-002
- Schroevens, M. (2015). *Verdeling zouttransport bij splitsingspunt Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Oude Maas*. Deltares rapport 1220034-010-ZKS-0003
- Van der Wijk, R.M., Fujisaki, A. (2016). *Afvoervalidatie Rijnmaasmonding; Vergelijking tussen ADCP metingen en WAQUA en SOBEK simulaties*. Deltares rapport 1230071-004-ZWS-0028
- Zijl, F., Kerkhoven, D., Visser, A.Z., van der Kaaij, T. (2011). *WAQUA-model Rijnmaasmonding: Modelopzet, kalibratie en verificatie*. Deltares rapport 1202199-005-ZKS-0035

A Transport op splitsingspunten

A.1 Verslag mini-symposium zoutverspreiding bij splitsingspunten

Memo

Aan
Diversen

Datum
15 februari 2016

Aantal pagina's
8

Van
Wouter Kranenburg
Yann Friocourt (RWS)

Doorkiesnummer
+31(0)88335 7491

E-mail
wouter.kranenburg@deltares.nl

Onderwerp
Verslag mini-symposium zoutverspreiding bij splitsingspunten

1 Introductie

Dit document is een **verslag van het mini-symposium 'zoutverspreiding bij splitsingspunten'**. Deze bijeenkomst, georganiseerd door Lambèr Hulsen (Havenbedrijf Rotterdam), Erik de Goede (Deltares) en Wouter Kranenburg (Deltares), vond plaats op gehouden op 4/2/2016 bij Deltares. Dit verslag is opgesteld door Yann Friocourt (RWS) en Wouter Kranenburg.

1.1 Aanleiding

Zowel bij het Havenbedrijf Rotterdam (HbR) als bij Deltares, in het laatste geval in opdracht van RWS, zijn in het afgelopen jaar onderzoeken uitgevoerd naar de zoutverspreiding door de Rijn-Maasmonding en de kwaliteit van modelvoorspellingen daarvoor. Een interessante bijdrage is het recente MSc-afstudeeronderzoek van Merel Verbeek bij HbR. Naar aanleiding daarvan is het idee ontstaan voor een 'mini-symposium'. Insteek van deze bijeenkomst was: de ervaringen met elkaar delen, kennis uitwisselen en gezamenlijk discussiëren over de sterke en minder sterke kanten van de huidige 3D-modellering, eventuele behoeften aan en mogelijkheden voor verbetering, en wensen met betrekking tot metingen van snelheden en saliniteit in de Rijn-Maasmonding.

Zoutindringing in de Rijn-Maasmonding is een breed onderwerp met diverse facetten, en geïnteresseerden uit veel verschillende hoeken. In deze informele bijeenkomst in het Nederlands lag de focus bij de fysica rond de splitsingspunten en was het aantal deelnemers enigszins beperkt. In een latere, bredere, en eventueel Engelstalige bijeenkomst hopen we zoutindringing in de Rijn-Maasmonding in breder perspectief aan de orde te kunnen stellen.

1.2 Deelnemers

Aan de bijeenkomst namen de volgende personen deel:

	Naam	Organisatie
1	Lambèr Hulsen	HbR
2	Merel Verbeek	WUR / HbR (→TUD)
3	Ton Hoitink	WUR

	Naam	Organisatie
4	Yann Friocourt	RWS-WVL
5	Sacha de Goederen	RWS-WNZ
6	Harm Verbeek	RWS-ZD
7	Wouter Kranenburg	Deltares (ZKS)
8	Theo van der Kaaij	Deltares (ZKS)
9	Rob Uittenbogaard	Deltares (ZKS/DSC)
10	Rinus Schroevers	Deltares (ZKS)
11	Erik de Goede	Deltares (DSC)
12	Frans Buschman	Deltares (ZWS)
13	Ymkje Huismans	Deltares (ZWS)
14	Herman Kernkamp	Deltares (DSC)
15	Henk van den Boogaard (gedeelte)	Deltares (DSC)

Ook Cor van der Schelde (HbR) en Robert-Jan Labeur waren uitgenodigd, maar niet in de gelegenheid aanwezig te zijn.

1.3 Programma

Het programma van de bijeenkomst zag er als volgt uit:

Tijd	Spreker	Titel
13:00 – 13:15	Yann Friocourt	Inleiding: Ambities RWS voor modelleren en meten van zoutindringing in de delta
13:15 – 14:00	Merel Verbeek	Metingen en modellering van stroming en saliniteit rond splitsingspunten (met speciale aandacht voor laterale verschillen)
14:00 – 14:30	Wouter Kranenburg	OSR-simulaties van zoutindringing zomer 2003
14:30 – 14:40	Koffie	
14:40 – 15:00	Rinus Schroevers	Meetbehoeften met het oog op modelvalidatie: condities en type metingen
15:00 – 15:30	Discussie	
15:30 – 16:00	Drinks	

Hieronder volgt het verslag van de diverse onderdelen, met een hoofdstukje per onderdeel.

2 Presentatie Yann Friocourt: Context van model- en kennisontwikkeling rondom zout bij Rijkswaterstaat

RWS-WVL voert de regie over ontwikkeling van kennis en modellen uit ten behoeve van de gebiedsbeheerders bij de regionale diensten.

De aandacht voor verzilting neemt de afgelopen jaren steeds verder toe. Er lopen veel projecten en ontwikkelingen waarin verzilting een rol speelt (Deltaprogramma beslissingen, verdieping Nieuwe Waterweg, Haringvlietsluizen op een kier, nieuwe sluis IJmuiden, etc.). De vragen die Rijkswaterstaat moet beantwoorden worden steeds specifiek en vereisen steeds

gedetailleerde en nauwkeurige antwoorden Vraag om steeds nauwkeuriger antwoorden (een typische voorbeeldvraag is 'stel dat 10 m³/s extra Rijnwater het Amsterdam-Rijnkanaal op worden gestuurd, wat heeft het voor effect bij de innamepunten in de Rijn-Maasmonding?').

Om zulke detailvragen te kunnen beantwoorde, heeft Rijkswaterstaat steeds meer behoefte aan een goede weergave van de relevante processen en een goede onderbouwing van de modelkeuzes. Ook is er behoefte aan het helder vaststellen van de wijze van gebruik van modellen (wat kunnen ze wel/niet?).

Een aspect hiervan is ook de behoefte aan meer eenduidigheid rond modellen. In 2012 is veel verwarring ontstaan in de modellering van het Rijn-Maasmondgebied, toen naar aanleiding van een model vergelijking met diepe zoutprofielen in de NWW-OM-NM is geconstateerd dat het Zeedeltamodel van Rijkswaterstaat niet zo goed presteerde. Ook is toen veel discussie geweest met HbR die veel andere resultaten met het OSR model kreeg. Naar aanleiding hiervan is in 2014 een samenwerkingsovereenkomst getekend tussen HbR en RWS om de modelontwikkeling gezamenlijk op te trekken.

Ook is de laatste jaren geconstateerd de het huidige monitoringsprogramma van RWS (combinatie Landelijk Meetnet Water + ad-hoc meetcampagnes) onvoldoende informatie leverde om modellen goed te kunnen valideren.

Nu is Rijkswaterstaat druk bezig om de ontwikkeling van kennis en modellen beter en meer gestructureerd te organiseren, met o.a. een hiervoor bruikbaar monitoringsprogramma. Ook is Rijkswaterstaat op zoek naar meer eenduidigheid en meer samenwerking met derden. Het delen van ervaringen van derden bij modellering en meettechnieken, waar dit mini-symposium een mooi voorbeeld van is, speelt hierbij een belangrijke rol.

3 Presentatie Merel Verbeek: Meten en modelleren van stroming en zout op splitsingspunten

Merel heeft haar afstudeeronderzoek bij WUR en daarna een stage bij HbR uitgevoerd over de processen, het meten en modelleren van stroming en zout op splitsingspunten.

Splitsingspunten spelen een sleutelrol en de verdeling van zout door het systeem. In tegenstelling tot simpelere estuariumvormen, vinden op splitsingspunten bijzondere processen plaats, zoals:

- Verschillen in getijfase;
- Bochtstroming;
- Horizontale zout gradiënten.

Haar onderzoek richtte zich op het identificeren van de processen die de stroming over de splitsingspunten beïnvloeden, en op een evaluatie van de prestatie van het OSR model op splitsingspunten voor zout en stroming.

Hiervoor zijn 2 keer 13-uursmetingen uitgevoerd bij gemiddelde (12 augustus 2014) en lage (14 september 2015) rivierafvoer (allebei bij springtij) op 2 splitsingspunten (Hartelkanaal-Oude Maas op 12 augustus 2014 en Nieuwe Waterweg-Oude Maas-Nieuwe Maas op 14 september

2015). Toen zijn gedurende 13 uur, 3 keer per uur 1 ADCP raai (stroomsnelheid) en 5 CTD zoutprofielen gemeten.

Bij het splitsingspunt Nieuwe Maas-Oude Maas is een gelaagde stroming gemeten, met een faseverschil van het getij tussen rivierarmen. Bij het splitsingspunt Hartelkanaal-Oude Maas is de gemeten stroming niet gelaagd, wel zijn er faseverschillen van het getij binnen één rivierarm.

Bij de modelvergelijking is gevonden dat het OSR model best goed presteert bij het OM-NM-NWW splitsingspunt, met toch een lichte overschatting van de saliniteit. De model prestatie is minder goed bij het OM-HK splitsingspunt, met een overschatting van de absolute waarden van saliniteit en stroomsnelheden.

De vergelijking bij OM-HK blijkt een stuk moeilijker. Mogelijk omdat het splitsingspunt dichterbij de punt van de zouttong is. Ook spelen mogelijk de eigenschappen van de rekengrid een rol.

4 Presentatie Wouter Kranenburg: OSR simulaties zoutindringing in de RMM, zomer 2003

Bij eerdere data-model vergelijkingen in het kader van evaluatie van het OSR-model is gekeken naar zoutprofielen van nov/dec 2011 in de NWW, OM en NM, debietmetingen van mei 2011, en tijdsreeksen gemeten door het LMW. Zowel in nov/dec 2011 als in mei 2011 was de rivierafvoer laag (1000 m³/s), maar in nov/dec was er ook sprake van stormopzet. In de evaluatie-studies is geconstateerd dat het OSR-model de gemeten tijdsreeksen goed weer gaf, maar de gelaagtheid gemeten bij de profielen flink onderschatte.

Naar aanleiding hiervan is besloten het model ook te vergelijken met nooit eerder geanalyseerde gegevens van mei 2003 (rivierafvoer 1900 m³/s) en augustus 2003 (900 m³/s) bij splitsingspunten NWW-OM-NM (mei en augustus), OM-HK (mei) en OM-Spui (augustus). Voor beide periodes was er geen bijzonder hoge windopzet.

Bij deze vergelijking is geconstateerd dat de reproductie van zout en debiet bij het splitsingspunt NWW-NM-OM goed was, en minder goed bij het splitsingspunt OM-HK. Ook wordt het getijvolume op de OM overschat, tot aan het Spui. Mogelijk ligt de oorzaak hiervan bij de randvoorwaarden die door het 2DH model worden berekend?

Naar aanleiding van deze vergelijking kan worden geconcludeerd dat de combinatie van debieten en zoutprofielen op dwarsraaien een goed en bruikbaar beeld geeft van de ontwikkelingen in de tijd en zeer bruikbaar is voor modelvalidatie.

5 Presentatie Rinus Schroevers: Monitoring zoutverspreiding

In 2014 heeft Deltares in opdracht van WVL een onderzoek uitgevoerd naar de geschiktheid van het huidige monitoringsprogramma voor het valideren van modellen voor zoutverspreiding.

De aanleiding hiervoor was de slechte vergelijking van Zeedeltamodelresultaten met de diepe zoutprofielen van nov/dec 2011, terwijl men toen dacht (op basis van eerdere vergelijkingen met de tijdreeksen uit het LMW) dat het model goed presteerde.

Het vaste meetnet van RWS zoals nu ingericht heeft een aantal beperkingen voor het valideren van zoutmodellen:

- De diepste zoutsensor meet op een diepte van 9 meters, alle sensors hangen in de bovenste helft van de waterkolom. Daarmee wordt er niet gemeten in de “zouttong.”
- De meeste sensoren liggen aan de oevers en zijn daardoor niet representatief voor het midden van de waterloop.
- Het LMW is gericht op waarschuwing en niet op de validatie van procesmodellen. De sensoren zijn dus dicht bij inname punten maar niet de grootste gradiënten zijn.

Daarnaast zijn er geen afvoermetingen beschikbaar in het gebied. Wel zijn er stroommetingen beschikbaar, maar die worden nooit gebruikt voor modelvalidatie bij Deltares. Mogelijk heeft dit te maken met hoe moeilijk het is om modellen te kalibreren/valideren op stroomsnelheden. HbR heeft wel veel ervaring hiermee.

Er ontbreekt een overzicht van de gegevens die beschikbaar zijn en die door de verschillende organisaties (RWS, HbR, WUR) worden uitgevoerd. Bij RWS is het zelfs zo dat gegevens uit meetcampagnes ouder dan 10-15 jaar grotendeels niet meer te vinden zijn.

Om de bestaande metingen beter te benutten moet er een overzicht worden gemaakt van de metingen voor HbR, RWS, en WUR. Ook meten de meetgegevens beter worden ontsloten.

In het vervolg moet worden gefocust op gecombineerde meetcampagnes van zout en stroming (debiet) rond splitsingspunten, in 1e instantie NWW-OM-NM, omdat splitsingspunten belangrijk zijn voor waterbeweging. Ook moeten vaste meetpunten worden verplaatst/toegevoegd naar grotere dieptes verder in de vaargeul.

Er moet ook meer eenduidigheid zijn hoe ADCP gegevens worden verwerkt. WUR heeft hiermee veel ervaring.

Ook kan worden verkend of de bestaande stromingsmeters op de van Brienoord- en Spijkenissebruggen kunnen worden omgezet naar gelaagde stromingsmeters (op meerdere dieptes). De bijbehorende vraag is of H-ADCP (ADCP die in het horizontale vlak meten) goed bruikbaar zijn bij gelaagde stromingen. (Punt van discussie).

6 Presentatie Ton Hoitink: Innovatieve meettechnieken om stroming te meten

RWS heeft net een HF-radar systeem laten bouwen om oppervlaktestroming te meten t.b.v. scheepvaartbegeleiding bij de ingang van Rotterdam (Maasgeul). Ton was betrokken bij de review van de validatie van het systeem. Een vergelijkbaar systeem (alhoewel gebruik makend van UHF-radiogolven i.p.v. HF) kan worden gebruikt bij rivieren om stroming te meten. Zo'n systeem wordt al toegepast in de VS bij de Sacramento River en Georgiana Slough. Om de stroming te meten moeten wel kleine golven aanwezig zijn. In verband met het gebruik van UHF wordt de stroming maar in de eerste centimeters van de waterkolom worden gebruikt, waardoor de metingen erg gevoelig zijn voor de invloed van wind.

Ook kunnen stroomsnelheden worden gemeten d.m.v. akoestische tomografie (Kawanisi et al. 2000), waardoor de propagatie van geluid in water wordt gebruikt om de stroomsnelheid af te leiden.

7 Discussie

Er wordt unaniem geconstateerd dat de modelresultaten die Merel en Wouter hebben gepresenteerd voor verschillende condities dezelfde kant op wijzen, t.w.:

- Aardig goede data-model-vergelijking voor zout en stroming bij NWW-NM-OM
- Overschatting van het getijvolume en van het zout op de OM / bij splitsing OM-HK

Er ontstond een kleine discussie over de achtergrond chlorideconcentraties die bij de rivierandvoorwaarden moeten worden gebruikt. Bij sommige modelsommen is gebruik gemaakt van constante concentraties, bij anderen is gebruik gemaakt van concentraties uit SOBEK jaarsommen. **Wouter en Sacha gaan uitzoeken hoe de SOBEK concentraties zijn bepaald (meting of berekening).** Uit ervaring van Deltares met het Zeedelta model is de aanpassing van debieten op de rivierandvoorwaarden van weinig invloed op de zoutverspreiding in het model.

In het kader van het onderzoek van Merel zijn ook simulaties uitgevoerd met het NSC-grof model (variant van het OSR met een grof rooster in het 3D domein). Terugdenkend aan de ervaring met het Zeedelta model zou het waardevol zijn om te kijken of de modelresultaten met een grof rooster ook goed zijn. **Lambèr biedt aan om naar de resultaten van NSC-grof te kijken.**

Ook wordt geconstateerd dat de combinatie van 13-uursmetingen van debiet en zout erg waardevol is bij een vergelijking met modellen. Er wordt geadviseerd om een vergelijkbare meetcampagne uit te voeren bij veel windopzet. Dit is interessant, omdat juist bij deze condities grote data-model verschillen werden gevonden in de evaluatie-studies. Rinus geeft overigens aan dat het mogelijk niet per se noodzakelijk is een meetcampagne uit te voeren voor 13-uur. Waarschijnlijk kunnen 8-uursmetingen een aantal dagen achter elkaar (5 dagen?) ook zeer waardevol zijn.

Verder wordt benadrukt dat een data-model vergelijking met stromingsmetingen best lastig is. Onder andere omdat daarvoor eerst een verwerking nodig is van de ruwe metingen om tot debieten en snelheidsraaien te komen, waarmee fouten kunnen worden geïntroduceerd. Er is behoefte aan meer eenduidigheid en toets rond de verwerking. Daarnaast blijft de vraag hoe de model-meting vergelijking het best kan worden uitgevoerd. Moet er worden gevalideerd op punten of op patronen?

Bij RWS, HbR en WUR zijn er veel metingen beschikbaar, want voor 2003 mat RWS jaarlijks in het gebied. Alleen zijn een groot deel van de RWS metingen niet goed ontsloten of verdwenen. Ad Schipperen heeft in 2014-2015 een aantal metingen weer gelokaliseerd (de metingen van 2003 die Wouter heeft gepresenteerd vormen een deel hiervan). Door de metingen beter te ontsluiten en te delen kan ook veel meer ermee worden bereikt. De ontsluiting moet dus op orde komen.

Er lopen initiatieven om het LMW geschikter te maken voor modelvalidatie, door o.a. bij splitsingspunten te meten en zout dieper (in arrays op verschillende diepten?), meer in de vaargeul, en bij geschiktere locaties te meten. Een continu meetpunt bij Maassluis zou bijvoorbeeld mooi zijn. Er wordt trouwens geconstateerd dat gebied rijk is aan bestaande infrastructuur (bruggen e.d.) die eventueel gebruikt zouden kunnen worden om meetapparaten te hangen.

In eerste instantie werd gedacht dat het meten bij het splitsingspunt NWW-OM-NM de hoogste prioriteit had. N.a.v. de recente modelresultaten zijn metingen bij andere splitsingspunten misschien interessanter → Voortgaande discussie.

Er wordt geprobeerd een prioriteitenlijst te maken in de condities waarin zou moeten worden gemeten (zeer lage afvoer, lage afvoer, gemiddelde afvoer, hoge afvoer; geen opzet, lage opzet, hoge opzet). Het probleem van extreme condities is dat ze niet vaak voor komen. Is het niet verstandiger om opportunistisch te zijn door bij minder extreme condities te meten? Waarschijnlijk zijn zulke metingen toch erg waardevol, bijvoorbeeld om de debietverdeling uitgebreider te valideren. **Rinus neemt dit mee in z'n notitie voor 'monitoringsprogramma'.**

De volgende gelegenheden om in het gebied uitgebreid te meten zijn de Kier en de monitoring van de verdieping van de NWW. **Yann koppelt de inzichten van de mini-symposium terug binnen RWS;** hopelijk kan daarmee in beide kaders effectiever worden gemeten t.b.v. kennis- en modelontwikkeling.

Actiepunten uit discussie op een rij:

- Wouter en Sacha: uitzoeken hoe de concentraties gebruikt op de rivierranden in de SOBEK-jaarsommen zijn bepaald (meting of berekening).
- Lambèr: kijkt naar de resultaten van NSC-grof voor zout bij splitsingen.
- Rinus: verwerkt discussie over meetcondities in notitie voor 'monitoringsprogramma'
- Yann: koppelt de inzichten van de mini-symposium terug binnen RWS;

Datum
15 februari 2016

Pagina
8/8

Bijlagen:

- Aantekeningen Discussie
- Presentatie Yann
- Presentatie Merel
- Presentatie Wouter
- Presentatie Rinus
- Presentatie Tom




Aantekeningen discussie mini-symposium Zoutverspreiding op Splitsingspunten

4 februari 2016



Over modellen / kwaliteit OSR

- Laat tot nu toe de beste resultaten zien (waarbij opgemerkt dat ZD niet is getest voor nieuwe condities)
- Presteert redelijk tot goed, bij lage afvoer, afhankelijkheid van condities (bij stormopzet minder), en van de positie (NM-OM-NWW vrij goed)
 - Nuttig om voor conditie van Merel (gemiddelde afvoer) de debietverdeling te bestuderen. Is kwaliteit hiervan erg afhankelijk van afvoer?
 - Zou ook uit eerdere studies te halen moeten zijn.
- Opvallend in studie Merel: soms meer gelaagdheid in model dan in data. Opvallend!
- Mogelijk is de debietverdeling de sleutel tot verdere modelverbetering. Kan ook zorgen voor verandering van waterverdeling bij stormopzet.
- Belangrijke vraag: Hoe verhoudt resultaat OSR-fijn zich tot OSR-grof: Kan die vergelijkbare kwaliteit leveren?

23 maart 2016



Over meetmethodes / verwerking / ontsluiting

- Betere ontsluiting data noodzakelijk
- HK: zoek naar (cor)relatie tussen vaste metingen en meetcampagnes → kan toevoegen aan bruikbaarheid vaste meetpunten
- Zorg voor consistentie in afleiding van debieten vanuit ADCP-metingen (zijn er scripts bij Deltares?)
- Bestudeer ontwikkelingen in nieuwe meetmethodes: H-ADCP??
- HK-OM → laterale verschillen, dus 5 meetpunten noodzakelijk bij dwarsraaien?! (kijk naar fluxen merel)
- Ontwerp 'programma' voor vaartocht: stilliggen / varen / (RINUS)

23 maart 2016


Deltares

Over gewenste meetcondities en soort metingen

- Kan model helpen bij bepalen waar je moet meten? (variates?)
- Kijk verder naar oude studies
- Zijn opzet-condities kritisch voor de modellen?
- Rinus: zal tabel voor meetcondities updaten → belangrijk!
- Zinvol om langer te meten dan 13-uur? Of juist korter en meer?
- Ergens een vaste verticale array met sensoren zou wel heel prettig zijn, te beginnen voor zout. Bv: meetboei aan rand van vaargeul. Vlak voor brug, gebruik veerboot (Maassluis)
- Idee om STW-voorstel te ontwikkelen rond nieuwe meettechnieken?

23 maart 2016

Deltares



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Ambities RWS voor modelleren en meten van zoutindringing

Yann Friocourt

Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving



Modelontwikkeling bij Rijkswaterstaat



Helpdesk Water

[Homepage](#)
[Actueel](#)
[Onderwerpen](#)
[Organisatie](#)
[Waterbegrippen](#)

[Homepage](#)
[Actueel](#)
[Onderwerpen](#)
[Organisatie](#)
[Waterbegrippen](#)

[Homepage](#)
[Actueel](#)
[Onderwerpen](#)
[Organisatie](#)
[Waterbegrippen](#)

Gebedsschematisaties per regio

[Nederlands Continentaal Plat](#)
[Zuidelijke Noordzee](#)
[Kuststrook](#)
[Waddenzee](#)
[Dijsselmeer en Harkermeer](#)
[Hras](#)
[Rijn](#)
[Nieuws](#)
[WAD*Info](#)
[Emissiebeheer](#)
[Gebruiksfuncties water](#)
[Monitoring](#)
[Water en ruimte](#)
[Waterbodems](#)
[Waterveiligheid](#)
[Wetgeving en beleid](#)

Gebedsschematisaties per regio

[Nederlands Continentaal Plat](#)
[Zuidelijke Noordzee](#)
[Kuststrook](#)
[Waddenzee](#)

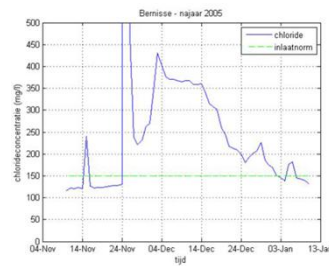
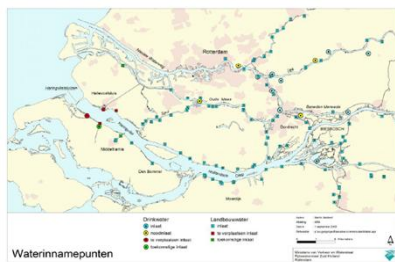
2 RWS BEDRIJFSINFORMATIE

Rijkswaterstaat
Presentatie RWS NL



Verzilting en zoetwatervoorziening

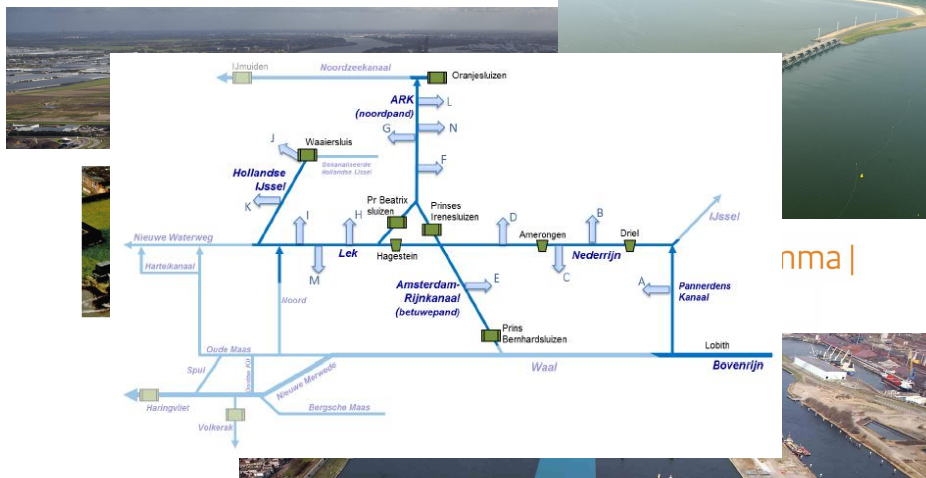
- Achtergrond chlorideconcentratie Rijn bij Lobith: 50 (hoge afvoer) à 140 mg/L (lage afvoer)
- Maximale toegestaan chlorideconcentraties: 150-400 mg/L



Figuur 7.2 Gemeten chlorideconcentraties bij Bemisse als gevolg van najaarstorm en lage Bovenrijnvoeren (Q<1000 m³/s) in november 2005



Behoeften omtrent modellen



Modellering Rijn-Maasmonding
2016

Helpdesk Water

Homepage Actueel Onderwerpen Organisatie Waterbegrippen

Actueel

Onderwerpen

Organisatie

Waterbegrippen

Stel ons een vraag

Stuur door

Waterniveau - Nieuwe Maas - Oude Maas

Maas, 27 augustus 2003

5 RWS BEDRIJFSINFORMATIE

Rijkswaterstaat
Presentatie RWS NL

Metingen in relatie tot modelontwikkeling

Debietmeting continu

Zoutmeting coninu

Zoutmeet campagne

6 RWS BEDRIJFSINFORMATIE

Rijkswaterstaat
Presentatie RWS NL



En nu verder...

Missie Rijkswaterstaat

Samenwerken aan een veilig, leefbaar en bereikbaar Nederland.
Dat is Rijkswaterstaat.

Onze missie wordt gevuld door:

- **duurzame leefomgeving.** Samen met anderen werken we voldoende groen is, en voldoende veilig. Samen werken aan een

Home

Over ons

Onze organisatie

• **Onze missie**

Bereikbaar

Leefbaar

Veiligheid

Veiligheid

Leefbaarheid

Bereikbaarheid

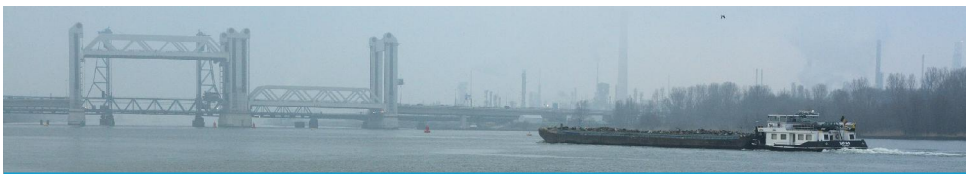
Rijkswaterstaat
Presentatie RWS NL

7 RWS BEDRIJFSINFORMATIE

Meten en modelleren van stroming en zout op splitsingspunten

Merel Verbeek (Afstuderen/Stage), Lambèr Hulsen, Ton Hoitink
Havenbedrijf Rotterdam N.V., Wageningen University

Minisymposium Deltares, 4 februari 2016



Wie is Merel?

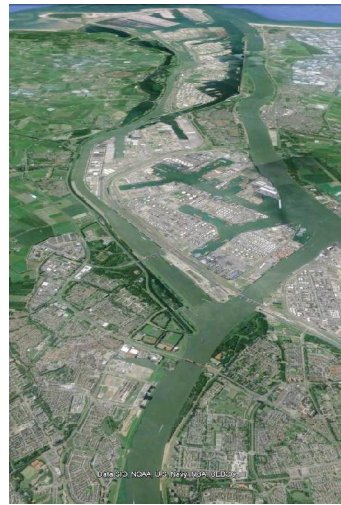
Afstudeeropdracht bij Wageningen University:
Analyse van getij en zoutdispersie op een splitsingspunt

Stage bij Havenbedrijf Rotterdam N.V.:
Meten en modelleren van stroming en zout op splitsingspunten



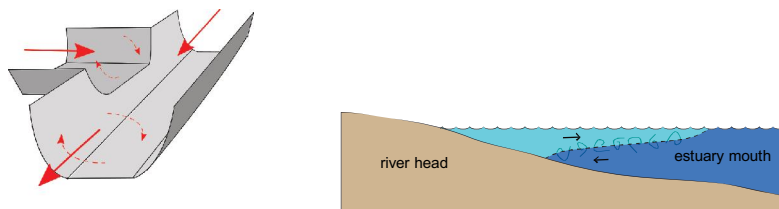
Waarom splitsingspunten?

- ▶ Zoutinvasie bedreigt beschikbaarheid van zoet water, duurzaam management
- ▶ Splitsingspunten spelen sleutelrol in verdeling van water en zout over de delta
- ▶ Complexe stroming, beperkt gekarakteriseerd
- ▶ Modellen testen



3/28

Splitsingspunt vs. klassiek estuarium



- ▶ Wat zorgt vooral voor de zoutverdeling?

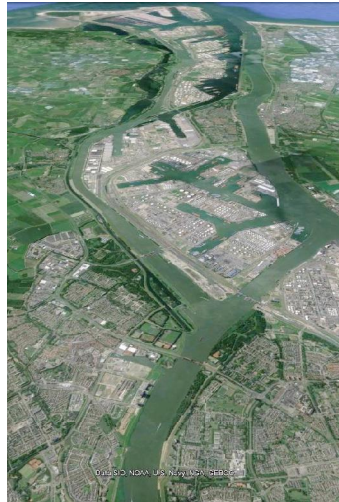
Splitsingspunt	Klassiek estuarium
Verschillen in getijfase Bochtstroming Horizontale zoutgradiënten	Horizontale advectie verticale menging

4/28

Doel onderzoek

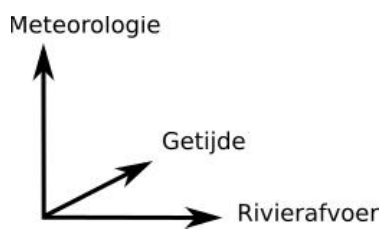
- ▶ Welke processen beïnvloeden de stroming over splitsingspunten?
- ▶ Hoe goed presteert het model op splitsingspunten voor stroming en saliniteit?

DOEL:
Testen van het OSR-model
op snelheden en zoutwaardes
op twee splitsingspunten



5/28

Methode - Metingen



Welke metingen zijn nodig?

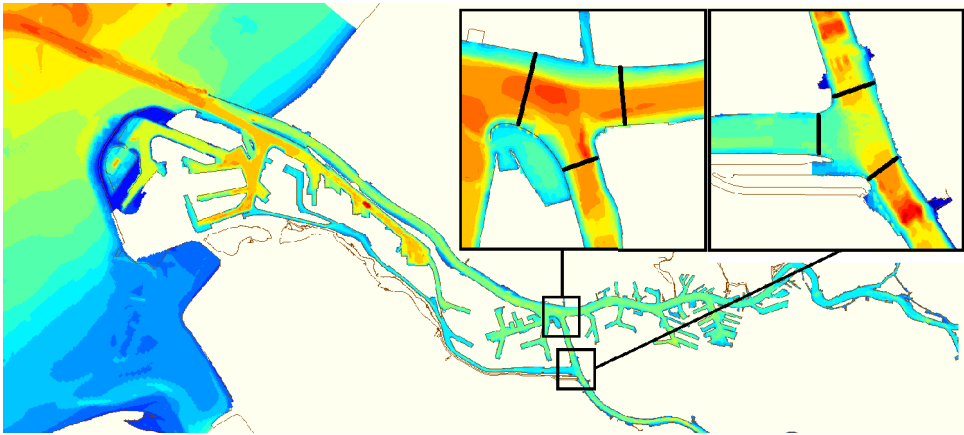
- ▶ Hele spectrum
- ▶ Extreme condities veel aandacht (afhankelijk van de vraag)

Wat hebben wij gedaan?

- ▶ Tijdens lage tot gemiddelde afvoer en springtij

6/28

Methode - Meetlocaties 13-uursmetingen



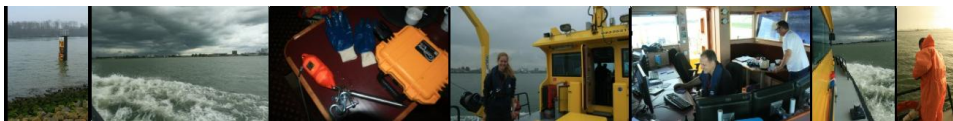
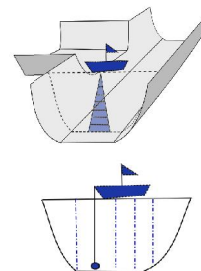
- ▶ Twee splitsingspunten: 1) Hartelkanaal - Oude Maas
- 2) Nieuwe Waterweg - Oude Maas - Nieuwe Maas

7/28

Methode - Metingen 12-08-14 en 14-09-15

Gedurende dertien uur snelheid en zout meten

- ▶ Per uur 3x1 ADCP-raaien (stroomsnelheid)
- ▶ Per uur 3x5 CTD-profielen (zout)

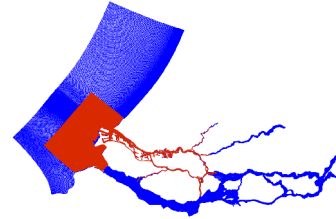


8/28

Methode - Modelopzet

Operationeel Stromingsmodel Rotterdam (OSR)

- ▶ Operationeel:
 - ▶ 4x/dag voorspellingen van waterhoogtes en stroming
 - ▶ Incidenteel zouteffecten van infrastructurele ingrepen
- ▶ Testhistorie
 - ▶ 2008: Validatie waterhoogtes
 - ▶ 2009: Validatie zout
 - ▶ Incidenteel: varende metingen
 - ▶ Dagelijkse vergelijking op OSR-site
- ▶ En nu: een test op splitsingspunten



- Havenmodel
- NSC fijn
- NSC grof

9/28

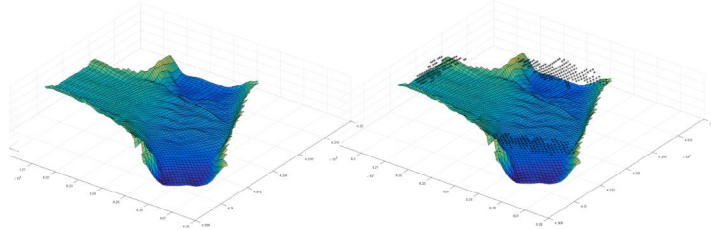
Methode - Modelopzet

- ▶ Modelstappen NSC fijn:
 1. Steady state run, Kalman filtering
 2. 2D run Havenmodel
 3. Nesting
 4. 3D run NSC fijn model
- ▶ Modelstappen NSC grof:
 1. Steady state run, Kalman filtering
 2. 2D run Havenmodel
 3. Nesting
 4. 3D run NSC grof model
- ▶ Triwaq, 10 σ -lagen, (hier: hindcast)
- ▶ Model in de eerste instantie afgeregeld op waterhoogte en stroming

10/28

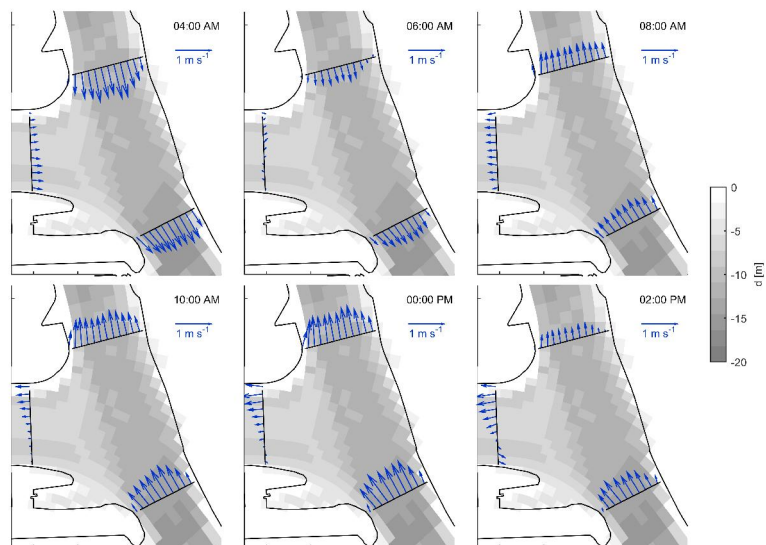
Methode - Vergelijking meting en model

- ▶ Vaste meetstations (waterhoogte, stroomsnelheid, saliniteit)
- ▶ 13-uursmetingen
 - ▶ Reproductie van belangrijke processen (faseverschillen, secundaire stroming, zoutgradiënten)
 - ▶ Per meetverticaal (snelheid en saliniteit): correlatie, gemiddelde fout, variatie



11/28

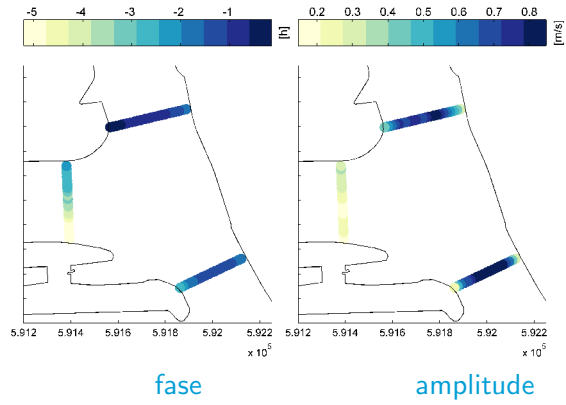
Resultaten - Meting Hartelkanaal-Oude Maas



12/28

Resultaten - Meting Hartelkanaal-Oude Maas

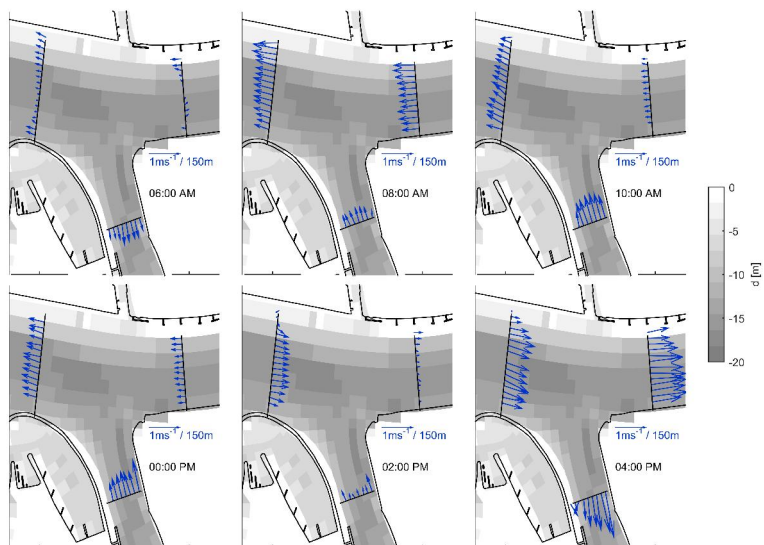
► Tweemaaldaags getij (M2)



► Tot 2 uur tijdsverschil binnen één rivierarm

13/28

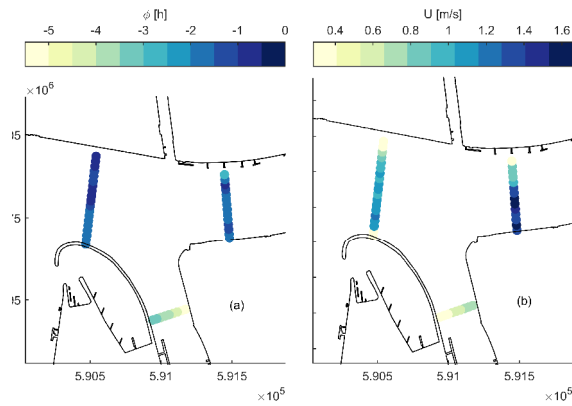
Resultaten - Meting Nieuwe Waterweg-OM-NM



14/28

Resultaten - Meting Nieuwe Waterweg-OM-NM

► Tweemaaldaags getij (M2)



fase

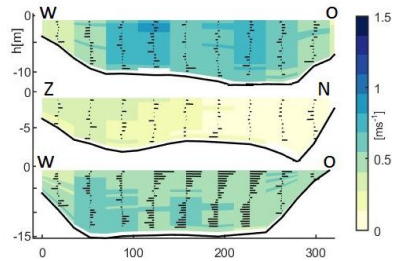
amplitude

- 3 uur tijdsverschil tussen Nieuwe Waterweg-Nieuwe Maas en Oude Maas

15/28

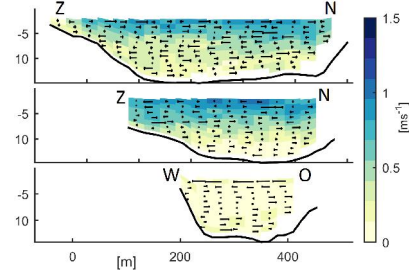
Resultaten - Splitsingspunten vergelijken

Oude Maas noord - Hartelkanaal - Oude Maas zuid 2014



- Bochtstroming
- Verschil tijdstip getij **binnen** een rivierarm

Nieuwe Waterweg - Nieuwe Maas - Oude Maas 2015

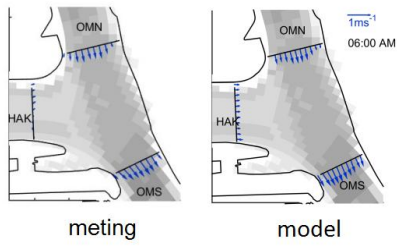


- Gelaagde stroming
- Verschil tijdstip getij **tussen** rivierarmen

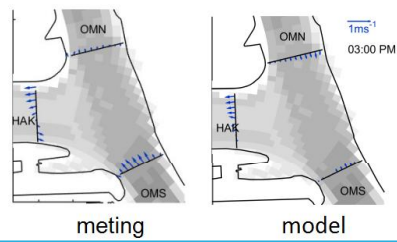
16/28

Resultaten - Vergelijking met het model

Dieptegemiddelde stroming



tijdstip met veel
overeenkomst

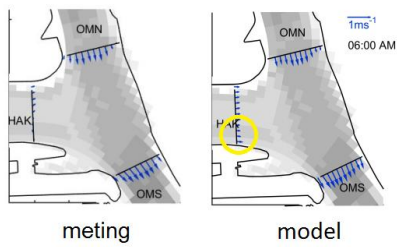


tijdstip met minder
overeenkomst

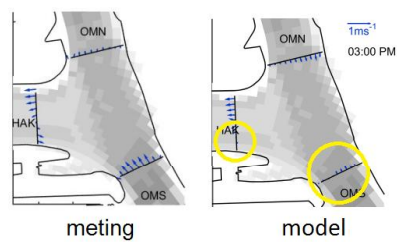
17/28

Resultaten - Vergelijking met het model

Dieptegemiddelde stroming



tijdstip met veel
overeenkomst

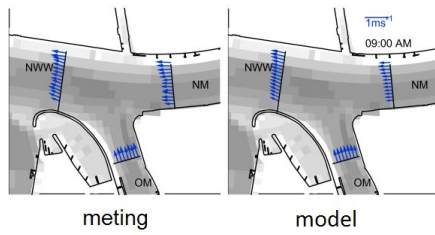


tijdstip met minder
overeenkomst

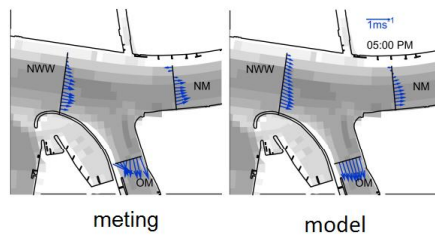
18/28

Resultaten - Vergelijking met het model

Dieptegemiddelde stroming



tijdstip met veel
overeenkomst

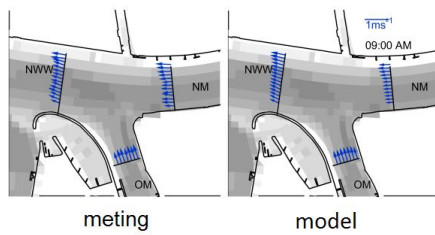


tijdstip met minder
overeenkomst

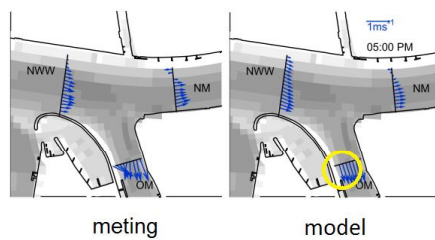
19/28

Resultaten - Vergelijking met het model

Dieptegemiddelde stroming



tijdstip met veel
overeenkomst

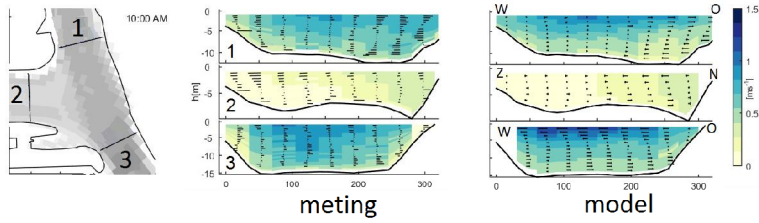


tijdstip met minder
overeenkomst

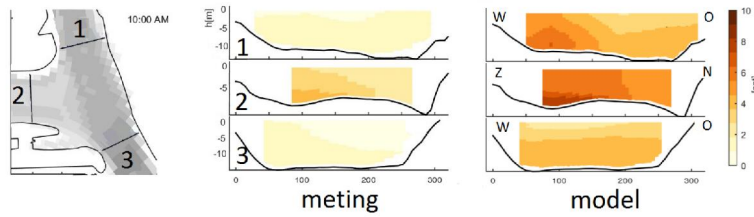
20/28

Resultaten - Vergelijking met het model

► Stroomsnelheid



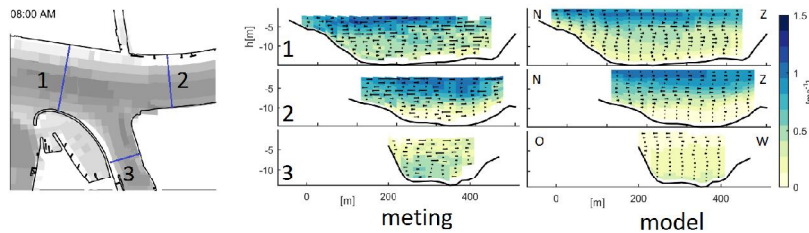
► Saliniteit



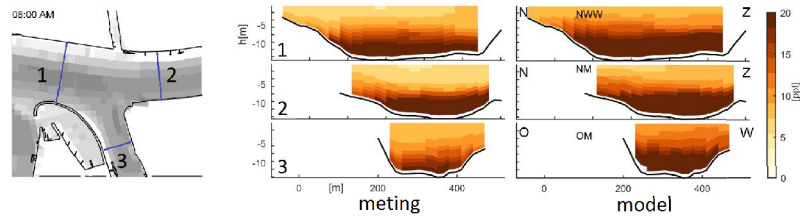
21/28

Resultaten - Vergelijking met het model

► Stroomsnelheid



► Saliniteit



22/28

Resultaten - In cijfers

Stroomsnelheid	Saliniteit
<i>2014: Hartelkanaal - Oude Maas</i>	
ME = +0.01-0.1m/s $r = 0.5$	ME = +2ppt $r = 0.5$

- ▶ Uitzondering: Hartelkanaal $r(\text{sal}) = 0$

<i>2015: Nieuwe Waterweg - OM - NM</i>	
ME = 0m/s $r = 0.6$	ME = +0.1-2ppt $r = 0.9$

- ▶ Uitzondering: Aan de randen $r(\text{sal}) = 0$

r = Correlatie
ME = Mean error

23/28

Discussie - Zout in het model

Stroming en saliniteit in benedenstroomse Nieuwe Waterweg beter voorspeld dan in de bovenstroomse Oude Maas

- ▶ Stratificatie en positie zouttong
- ▶ Geometrie complexer bovenstrooms → propagatie getij
- ▶ Eigenschappen rekengrid

Overschatting saliniteit

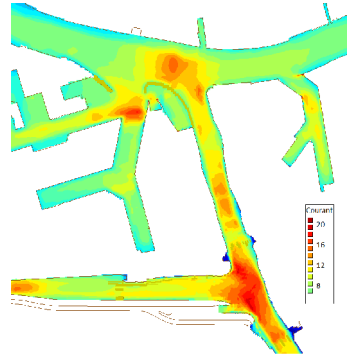
- ▶ Randvoorwaarden, initiële condities
- ▶ Parameterset
- ▶ Wat denken jullie?

24/28

Discussie - Rekengrid

Kunnen we de modelresultaten verbeteren door aanpassingen te doen in het rekengrid?

- ▶ Aantal sigma-lagen
- ▶ Land-watergrens
- ▶ Cell-oriëntatie
- ▶ Courantgetal



25/28

Conclusie

- ▶ **Model geeft een kleine overschatting in de saliniteit voor de mestdagen**
 - ▶ Gerelateerd aan randvoorwaarden en modelschematisatie
- ▶ **Berekening in de benedenstroomse Nieuwe Waterweg beter dan in de bovenstroomse Oude Maas**
 - ▶ Gerelateerd aan geometrie en stratificatie
- ▶ **Het model vat de stroming op splitsingspunten goed**
 - ▶ Met uitzondering van de getijfase aan de randen en bochtstroming

26/28

Aanbevelingen

- ▶ Onderzoek effecten van parameterset op positie van de zouttong in het model
- ▶ Gridoptimalisatie
- ▶ Bovenstroomse rivierrandvoorwaarden herzien
- ▶ 13-h meting herhalen bij bijzondere omstandigheden (bv. windopzet)

27/28

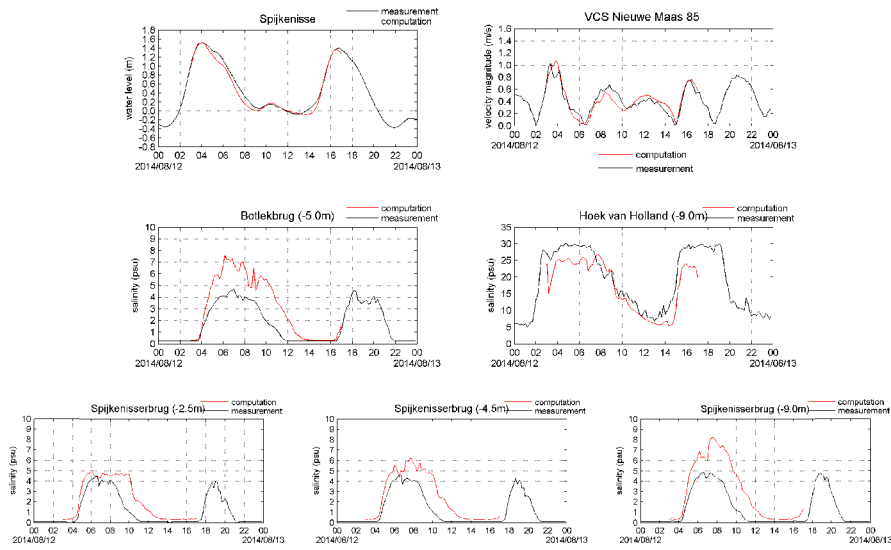
Vragen?

- ▶ Bedankt voor de aandacht
- ▶ Suggesties:
verbeekmc@gmail.com

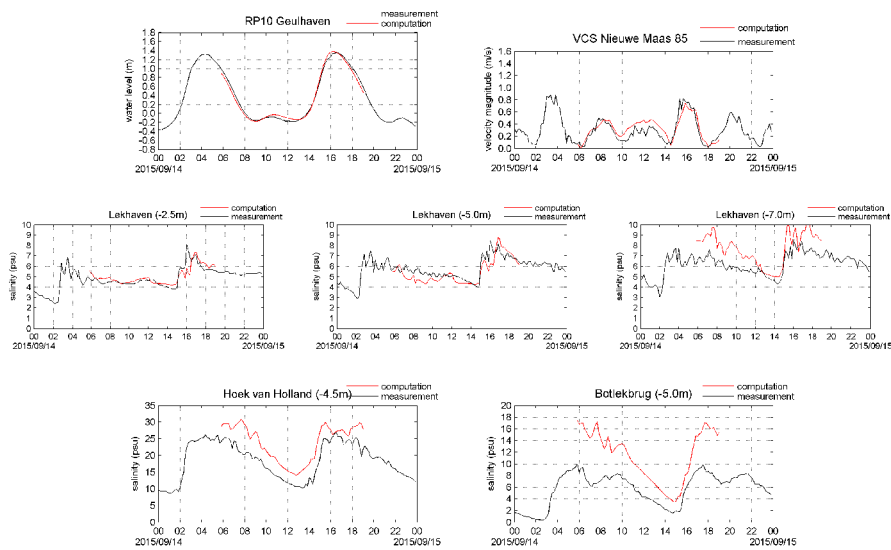


28/28

Appendix A - Vaste meetpunten 12-08-2014

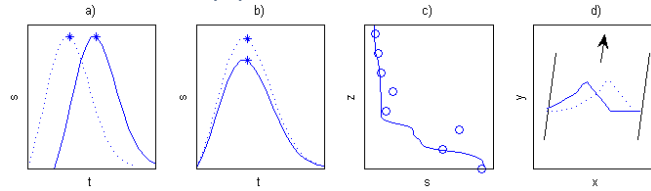


Appendix A - Vaste meetpunten 14-09-2015



Appendix B - Aandachtspunten verificatie

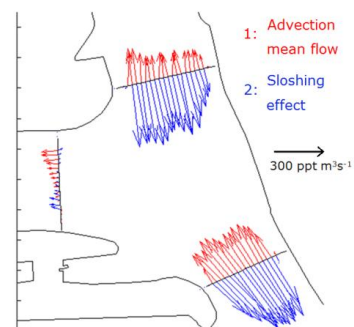
Waar moet het model op presteren?



- a) Tijdstip piek (fasing)
- b) Amplitude
- c) Diepte variatie (stratificatie)
- d) Laterale variatie

Appendix C - Decompositie zouttransport

$$T = \overline{hqs} = \langle h \rangle \langle \bar{q} \rangle \langle \bar{s} \rangle + \langle hq_T s_T \rangle + \langle \bar{q} \rangle \langle h_T s_T \rangle + \langle \bar{s} \rangle \langle h_T q_T \rangle + \langle \overline{h q' s'} \rangle.$$



- ▶ Advectie en sloshing zijn dominant

Appendix C - Tidal sloshing

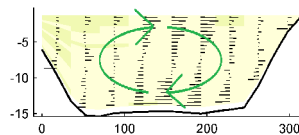
- ▶ Correlatie tussen water fluctuatie (h), stroomsnelheid van het getij (q_T) en tijdsafhankelijke saliniteit (s_T)

$$\langle hq_T s_T \rangle$$

- ▶ *Integraal product van een functie met twee onafhankelijk verschoven kopieën van zichzelf.*

Appendix C - Tidal sloshing

- ▶ Zoutdispersie is voornamelijk gedomineerd door de barotropische getijbeweging die een 3D karakter heeft



- ▶ Secundaire circulatie mengt de waterkolom
- ▶ Niet dichtheidsverschillen, maar topografie drijft het zouttransport over splitsingspunten

Appendix C - Zouttransport tabel

[ppt m³s⁻¹]

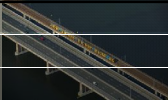

	a. Hartelkanaal	b. Oude Maas Z	c. Oude Maas N
Netto transport: $\langle \overline{hus} \rangle \cdot w$	+54	-164	-196
T1: $\langle h \rangle \langle \overline{u} \rangle \langle \overline{s} \rangle \cdot w$	+41	+272	+189
T2: $\langle h U_T S_T \rangle \cdot w$	+15	-406	-358
T3: $\langle \overline{u} \rangle \langle h_T S_T \rangle \cdot w$	-1	+4	+3
T4: $\langle \overline{s} \rangle \langle h_T U_T \rangle \cdot w$	-6	-26	-25
T5: $\langle \overline{hu' s'} \rangle \cdot w$	+3	-9	-6



OSR simulaties zoutindringing in de RMM, zomer 2003

Presentatie
Mini-symposium zoutverspreiding op splitsingspunten


4 februari 2016



Introductie

- 1) Voorgeschiedenis
- 2) Evaluatie (I) en (II)
 - Observaties adhv tijdseries & profielen; mei en nov/dec 2011
 - Tijdserie repro ok, profielen: onderschatting gelaagdheid
- 3) Simulaties voor zomer 2003
 - OSR-model
 - geselecteerde testcases
 - opzet modelsimulaties
 - data-model-vergelijking
 - Discussie
 - conclusies & aanbevelingen

23 maart 2016



OSR-model: (I) Opzet

Two geneste modellen:

- OSR-HAVEN (2012-v304) → SIMONA-Waqua (2DH)
- OSR-NSC (2014-v702) → SIMONA-Triwaq (3D, 10 σ -lagen)

Laagverdeling:
(neerwaarts)

- 12%
- 12%
- 11%
- 11%
- 11%
- 11%
- 11%
- 9%
- 6%
- 6%

23 maart 2016

Deltares

OSR-model: (II) Parametersettings

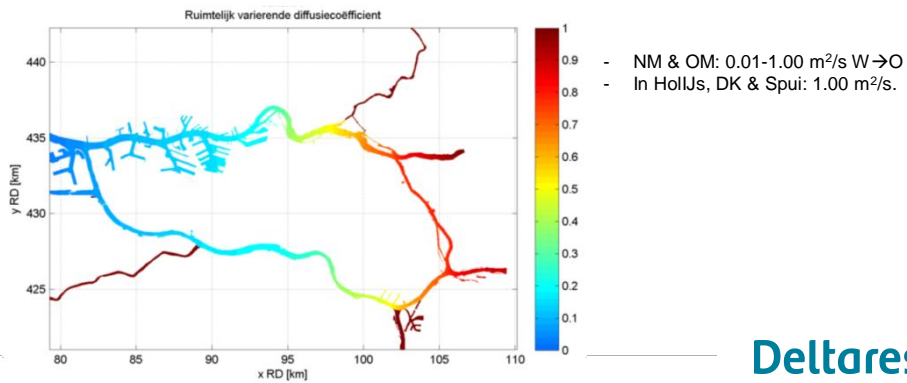
	Parameter	OSR-HAVEN (2DH)	OSR-NSC (3D)
Rekenrooster	Aantal domeinen	1	1
	Horizontaal	7 cellen breedte NW	20 cellen breedte NW
	Verticaal	1	10 σ -lagen (niet equidistant)
Diepte	Bron		Iodingen HBR
	Positie diepten		Hoekpunten
	Zijkanten (UV punten)		Gemiddeld
	Colmidden		Gemiddelde UV
Processen		Saliniteit	Saliniteit
Locatie Open Randen	Zee	>30 km offshore	15 a 20 km offshore
	Riveren	Lek (Hagestein)	Lek (Krimpen aan de Lek)
		Waal (Tiel)	Beneden Merwede (Papendrecht)
		Maas (Lith)	Dordtsche Kil (zuidzijde)
Ruwheid	Type	Manning	Manning
	Waarden [$s/m^{1/3}$]	Globaal 50; Ruimtelijk variërend: 50 – 1500; 0 t.p.v. HVL/SLZ	Ruimtelijk variërend: 0.01-1.00, toenemend van west naar oost.
Viscositeit	Horizontaal (coëfficiënt) [-]	6.0	1.0
	Verticaal	n.v.t.	k-eps;
Dispersie / diffusie	Horizontaal [m^2/s]	Globaal 50; Ruimtelijk variërend 50 – 1500;	0.01
	Verticaal	n.v.t.	k-eps;
Wind	Dichtheid lucht [kg/m^3]	1.205	1.205
	Cd [-]	Constant (0.0026)	Constant (0.0026)
	Windforcering	Wind H/H	Wind H/H (ruimtelijk uniform)
Numerieke instellingen	Tijdstap [s]	30 s	7.5 s
	Iteraties cont.	40	40
	Afbreekcrit. cont. [m^3]	?	0.002
	Iteraties impuls	8	20
	Afbreekcrit. snelheid [m/s]	0.0005	0.0002
	Anti-creep	n.v.t.	off

Deltares

OSR-model: (III) Bijzonderheden

Enkele bijzonderheden:

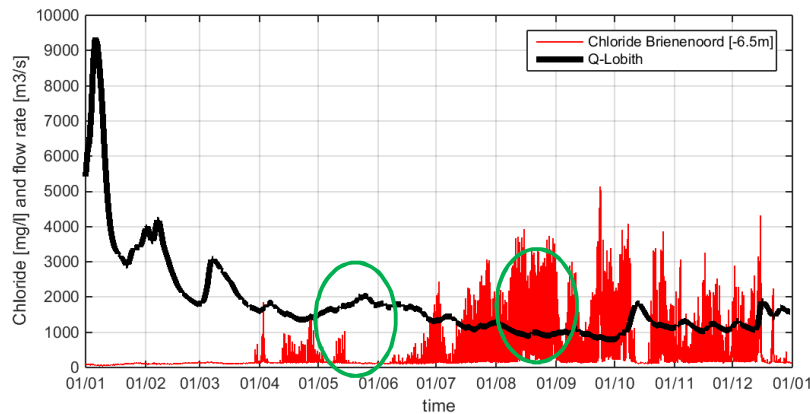
1. (2DH) Dispersiecoëfficiënt nabij HVLSLZ $\rightarrow 0$
2. (3D) Plaatselijke reductie windsterkte niet meer toegepast
3. (3D) Horizontale diffusiecoëfficiënt in delen van het domein verhoogd.

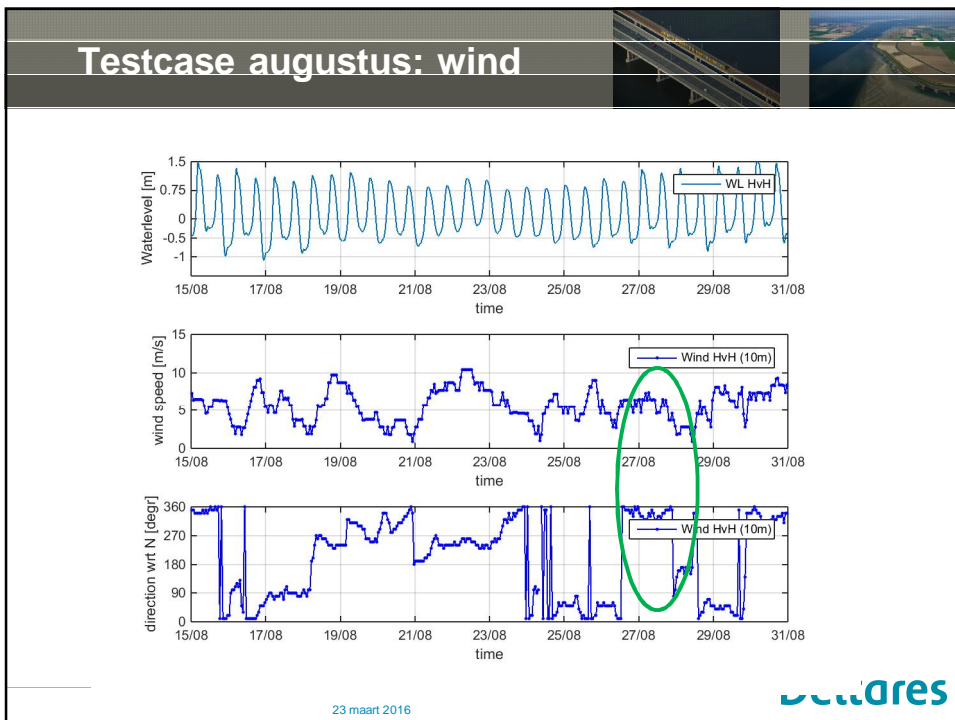
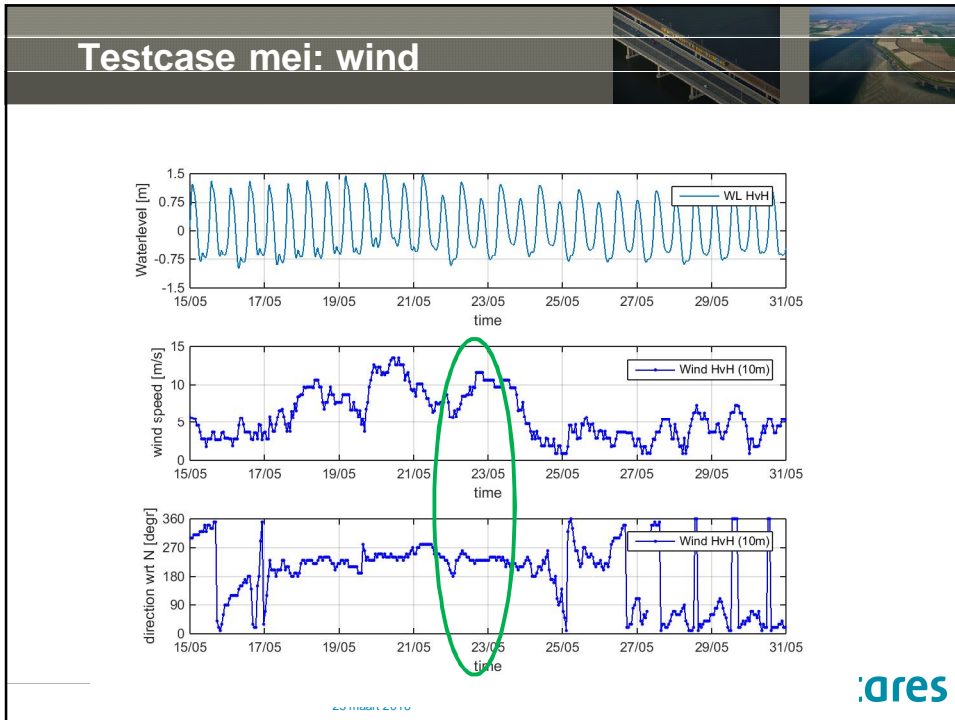


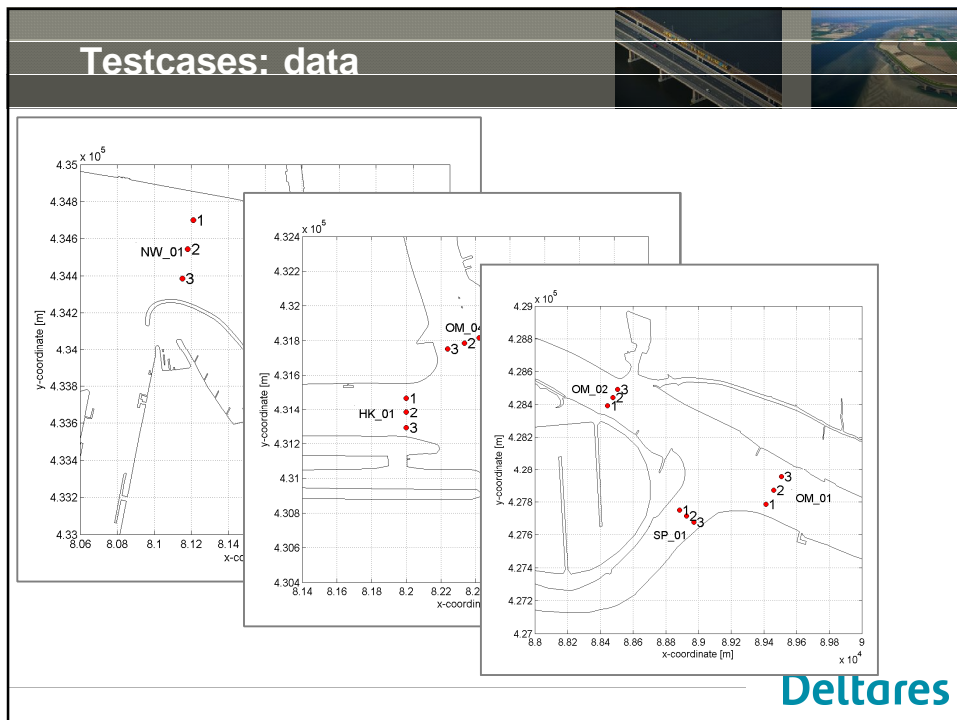
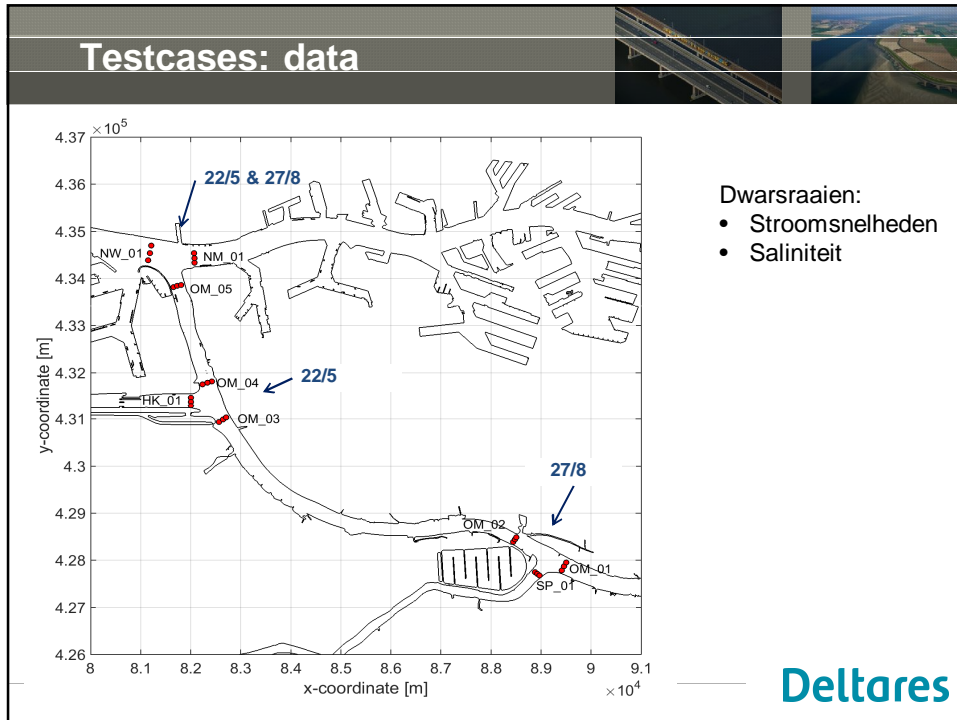
Testcases: mei & augustus 2003

Tabel 3.1 Debieten bij Lobith (bron: Waterkrant)

	Datum	Debiet (m ³ /s)
Mei 2003	20 / 21 / 22	1777 / 1828 / 1953
Augustus 2003	25 / 26 / 27	924 / 913 / 902







Opzet modelsimulaties

2D-haven-model

	Case
Waterstanden referentiepkt:	waterbase
Debieten rivieren:	waterbase
Saliniteit rivieren:	waterbase
Wind:	knmi
Schuifstanden HVLSLZ:	RWS-tijdreeksen

3D-NSC-model

	Case
Wind:	knmi
RVW	Uit 2D-model

```

    graph TD
      A[tijdseries RNDVW 2D-domein] --> B[2DH-stap 1]
      B --> C[2DH-stap 2]
      C --> D[tijdseries RNDVW 3D-domein]
      D --> E[3D (nsctri)]
      E --> F[ ]
      style F width:0px,height:0px
    
```

Deltares

23 maart 2016

Opzet modelsimulaties

2D-haven-model

	Case
Waterstanden referentiepkt:	waterbase
Debieten rivieren:	waterbase
Saliniteit rivieren:	waterbase
Wind:	knmi
Schuifstanden HVLSLZ:	RWS-tijdreeksen

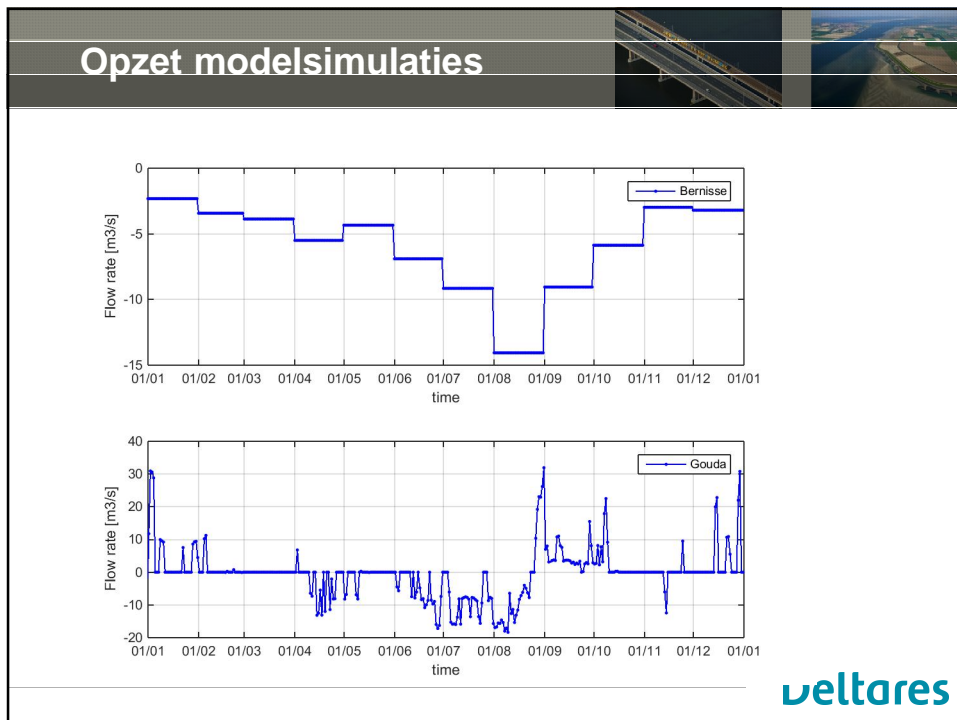
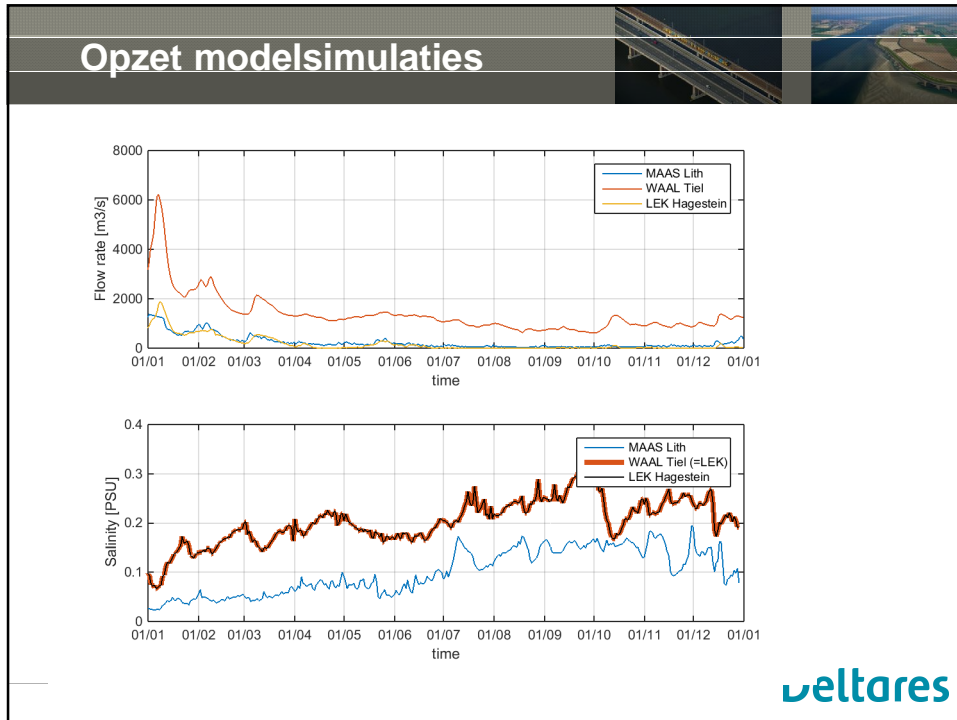
3D-NSC-model

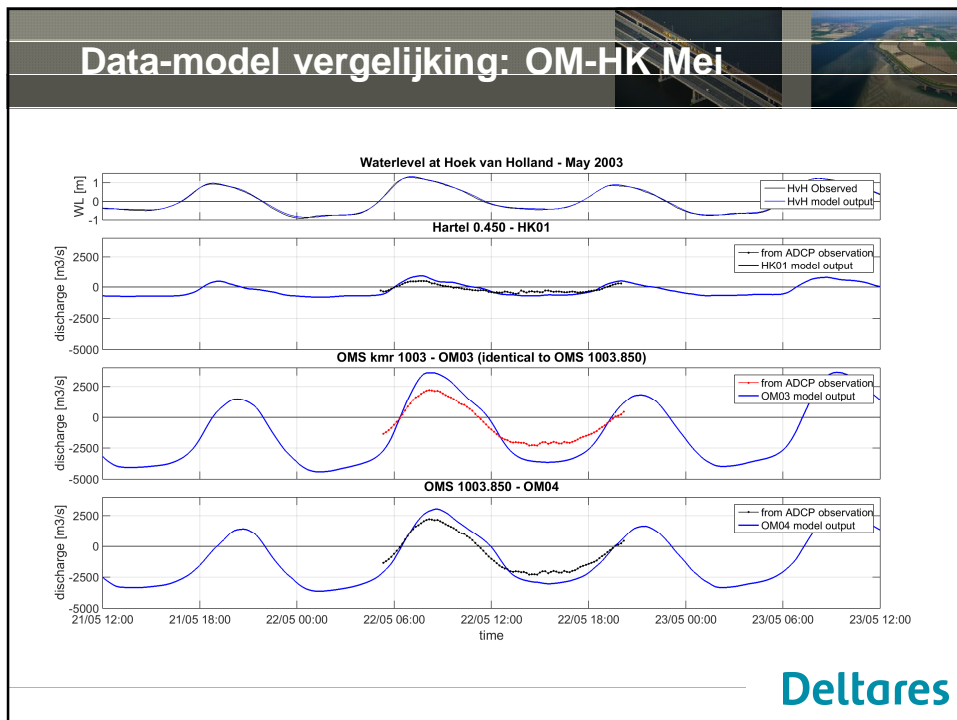
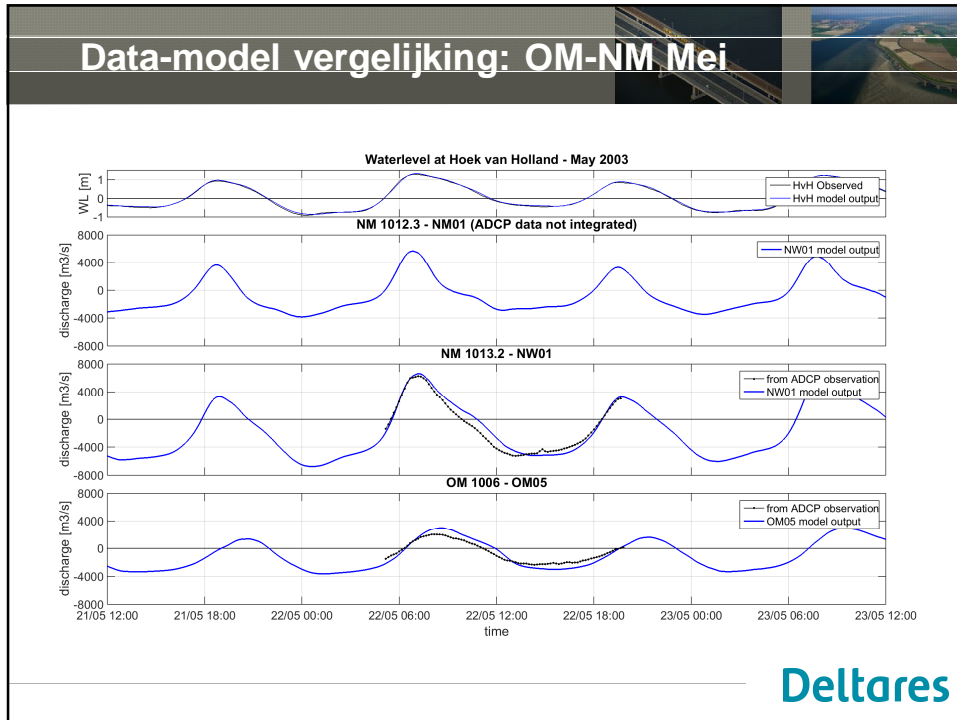
	Case
Timeframe 1:	30/10 – 8/12/2011
Timeframe 2:	
Wind:	knmi
RVW	Uit 2D-model

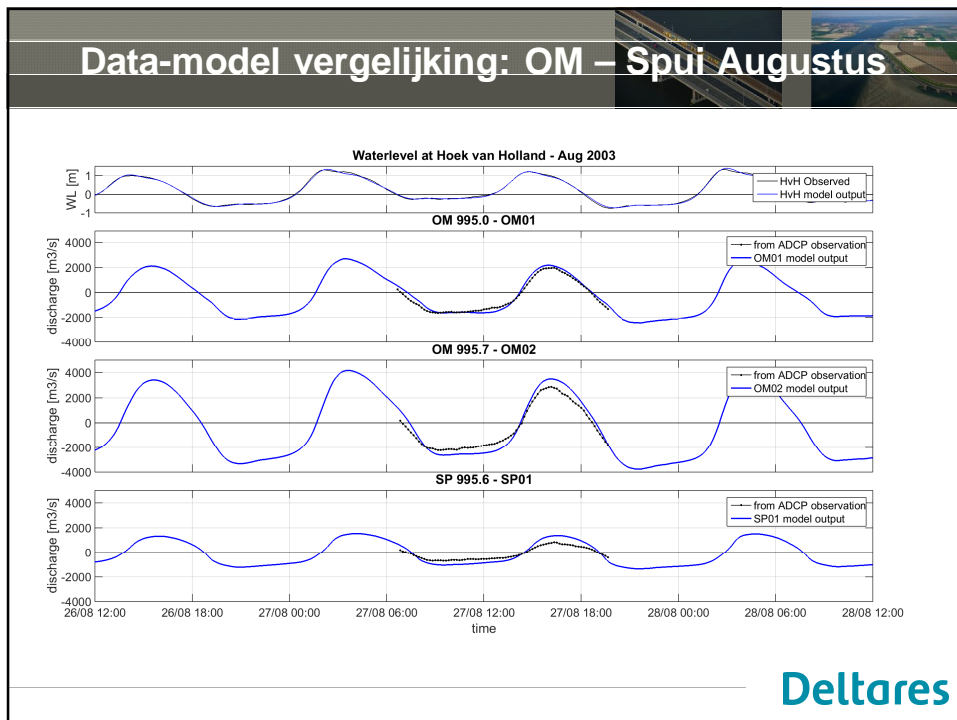
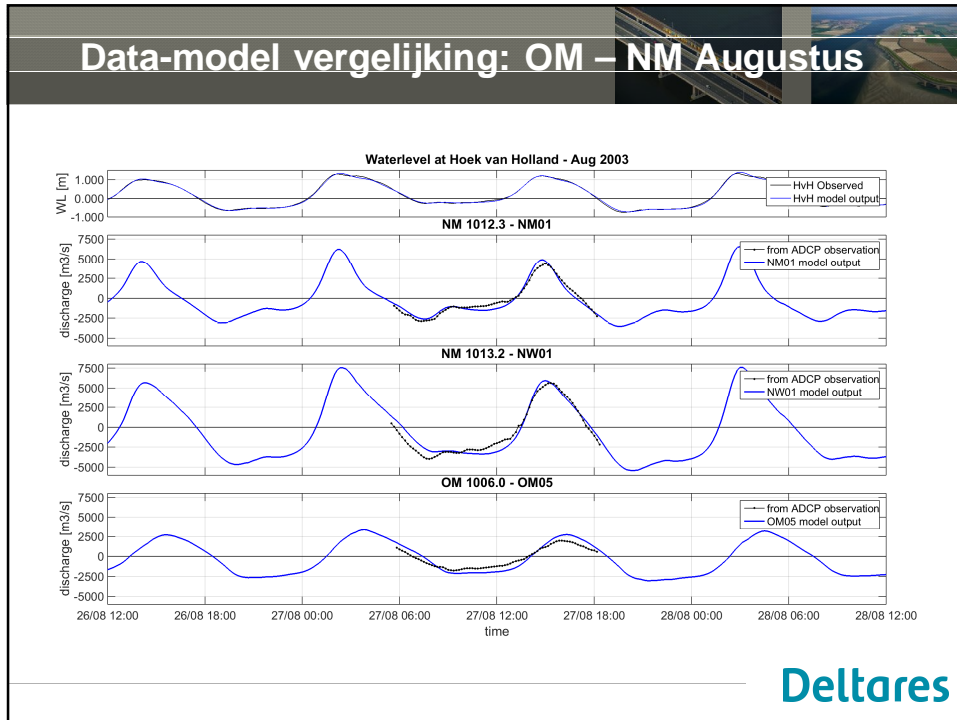
Tabel 4.1 Overzicht simulatieperioden

	Aanvang	Einde
2DH-OSR-Haven	1/3/2003; 14:00 uur	1/9/2003
3D-OSR-NSC (mei-case)	1/4/2003; 15:00 uur	1/6/2003
3D-OSR-NSC (augustus-case)	1/7/2003; 16:00 uur	1/9/2003

Deltares







Data-model vergelijking: saliniteit

Tonen figuren vanuit folder.

23 maart 2016

Deltares

Discussie

A.d.h.v. resultaten:

- Goede reproductie zout NW-NMM-OM
- Mismatch verderop op OM
- Overschatting getijvolume op Oude Maas
- Te vinden tot in Spui
- Mogelijke oorzaak: randvoorwaarde uit 2DH-model?

A.d.h.v. data:

- Soort metingen → dwarsraaien geven goed beeld, m.n. door ontwikkeling in de tijd
- Conditie: voor welke condities moeten we nog valideren?

23 maart 2016

Deltares

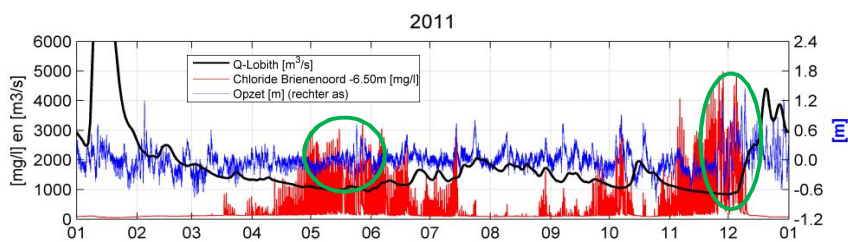
Verhouding tot eerdere resultaten

Volgende slides

Deltares

23 maart 2016

Testcases

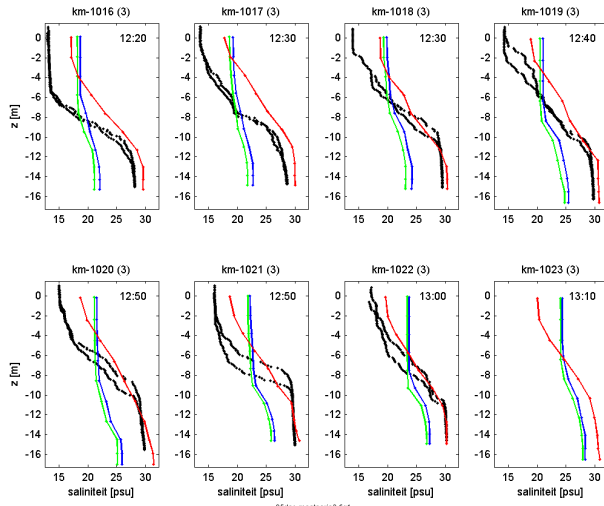


Evaluatie (I): mei & 29/11 – 8/12
 Herkalibratie: 4-9/11 & 3-8/12
 Evaluatie (II): 29/11 – 8/12

Deltares

23 maart 2016

Model-data vergelijking: (III) Profielen



- Vergelijkbaar met 'Evaluatie (I)' zonder LWR

23 maart 2016

Deltares



Deltares
Enabling Delta Life

Monitoring zoutverspreiding

23 maart 2016

Belangen



Waterinnamepunten

Drinkwater	Landbouwwater
inlaat	inlaat
noodinlaat	te verplaatsen inlaat
te verplaatsen inlaat	toekomstige inlaat
toekomstige inlaat	

Auteur : Martin Subbot
Afdeling : ZAK
Datum : 1 september 2008
Referentie : p:\ten.geoproject\toedelen\vermen\waterinlaten.apr

0 1 2 Kilometers

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Rijkswaterstaat Zuid Holland
Rotterdam

Deltares

23 maart 2016

Kansen en knelpunten in Cyclus zoutindringing

Beleids en beheervragen

Beleids en beheervragen op gebied van zoutindringing centraal bekend.

Informatiebehoefte

Informatiebehoefte nog niet volledig geformuleerd voor zoutindringing.
 Huidige beschrijving zou geformuleerd zijn uit doel: "Vastlegging van de karakteristieken van watersystemen (inclusief ontwikkelingen)" maar de praktijk blijkt dat het voor dit doel niet voldoet maar is beschreven vanuit lokaal waterbeheer.
 Kans: Huidige inventarisatie van benodigde metingen voor kennisontwikkeling en modelontwikkeling RWS en Deltares meer in informatiecyclus denken. Doorzetten voor alle gebieden waar ontwikkelingen noodzakelijk zijn.

Beschikbare systeemkennis

Systeembeschrijvingen dateren veelal van voor 2005 (uit de RIZA RIKZ tijd)
 RWS documenten niet terug te vinden voor niet RWS-ers.
 Documenten geschreven in opdracht van RWS niet terug te vinden voor niet RWS-ers.

Beschikbare modellen

3D modellen niet in staat zoutverspreiding te modelleren, door gebrek aan input uit metingen
 Operationele voorspelling van zout nog in beginfase (1D Sobek).

Beschikbare metingen

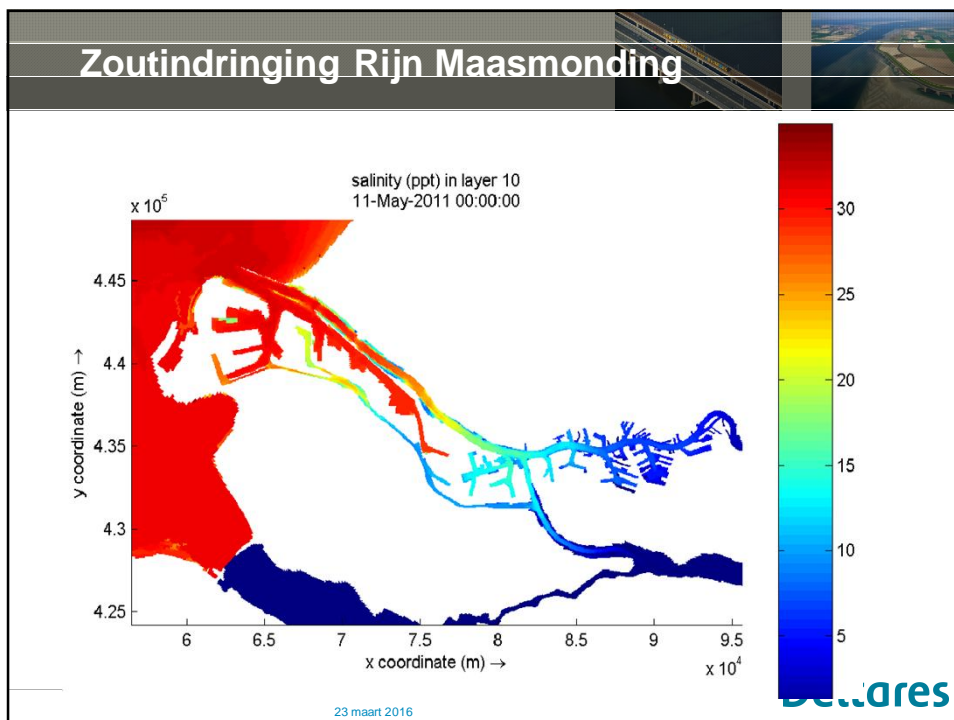
Geen vaste saliniteitsmetingen voldoende dicht bij de bodem om de "zoutong" te kunnen monitoren.
 Vaste metingen aan oever en niet representatief voor midden waterloop.
 Onvoldoende profielmetingen in midden van waterlopen
 Vaste metingen gericht op waarschuwing (dus dicht bij inname punten) en niet op systeemkennis of systeem monitoring (daar waar de grootste gradiënten zijn)
 Kans: Zoutmeters onderhouden is arbeidsintensief. Alternatief om temperatuur te meten, zowel aan boeien als ruimtelijk van oppervlak.

Dataopslagen ontsluiting

Geen overzicht beschikbare data. Data wel aanwezig, maar niet te vinden. Dit geldt met name voor data van meetcampagnes.
 Data wel aanwezig en te vinden, maar niet beschikbaar in format waar iemand iets mee kan.
 Data niet bij RWS maar bij opdrachtgever niet beschikbaar voor anderen.
 Historische data verdwenen.
 Data uit LMW niet overgedragen naar DONAR

Informatiecyclus

23 maart 2016



Metten voor systeemkennis en modelontwikkeling

Zoutgehalten

Meerjarig: Hoge temporele resolutie, lage ruimtelijke resolutie (vast)

kortstondig: Hoge temporele resolutie, lage ruimtelijke resolutie over korte periode (meetcampagne)

Afvoeren

Meerjarig: Debieten bovenstrooms, debietverdeling NWW, NW Maas

Kortstondig: Debietverdelingen alle splitsingspunten

Waterstanden

Temperatuur

(zie zout)

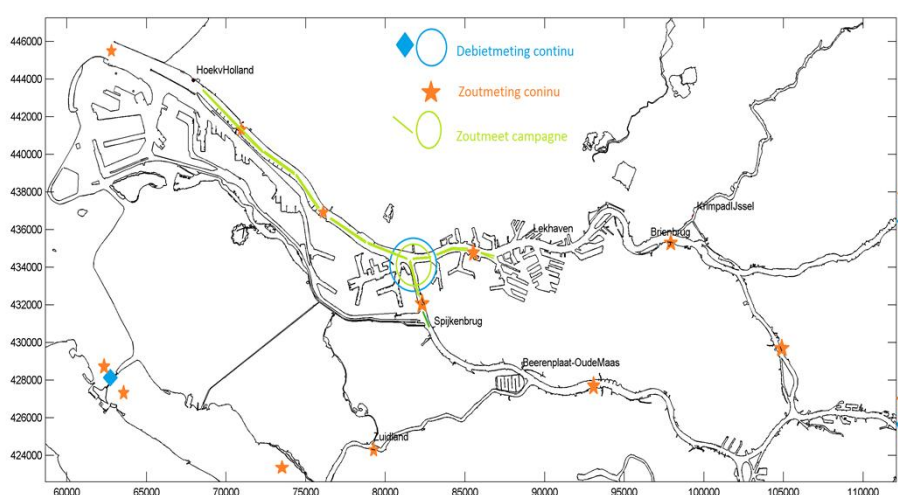
Stroming

Bathymetrie

Deltares

23 maart 2016

Behoefte metingen voor kennis en modellen



Deltares

23 maart 2016

Vaste meetnetten Zout en afvoeren

Beperkingen vaste meetnet:

- maximale diepte 9 meter: geen meting in "zouttong"
- Oever: niet representatief voor midden waterloop
- Gericht op waarschuwing (dus dicht bij inname punten) en niet op systeem (daar waar de grootste gradiënten zijn)

Geen afvoermetingen beschikbaar in gebied

Wel stroommetingen beschikbaar

Deltares

23 maart 2016

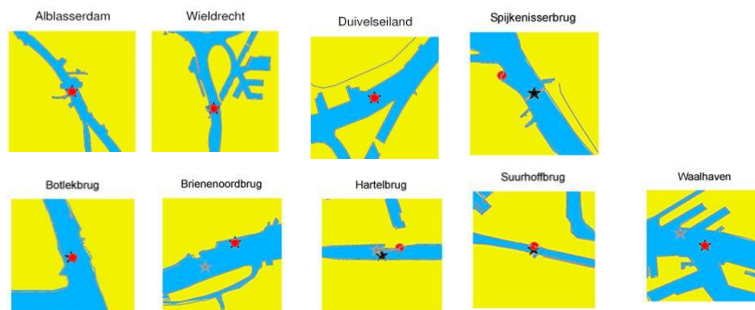
Vaste stromingsmeters

Havenbedrijf

- Botlekbrug -5 mNAP
- Brienoordbrug -4,5 mNAP
- Hartelbrug -4,5 mNAP
- Suurhoffbrug
- Waalhaven

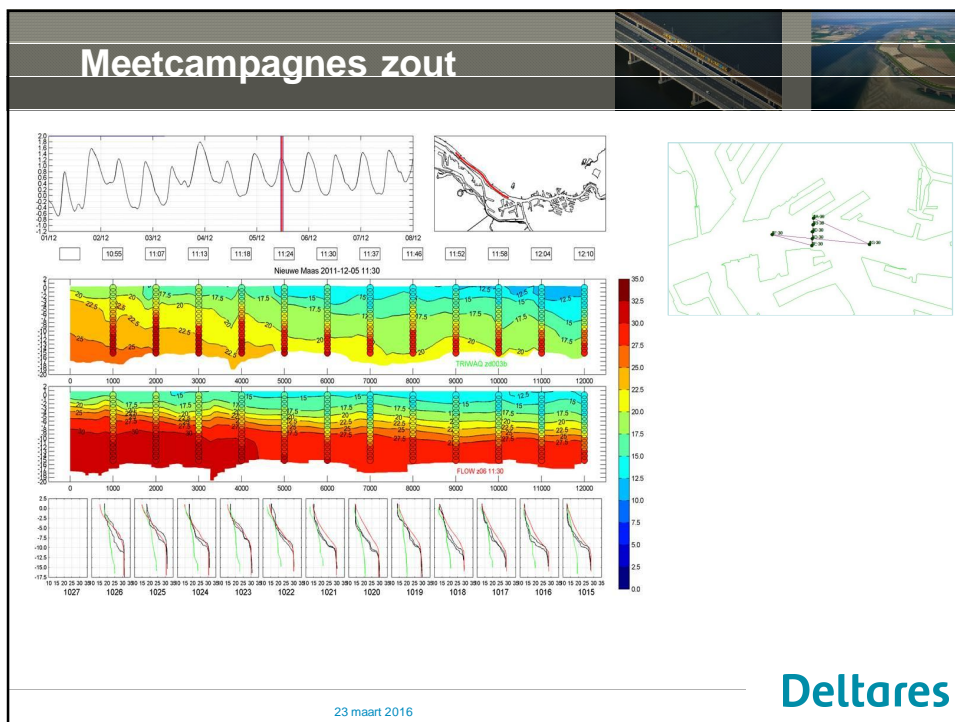
Rijkswaterstaat

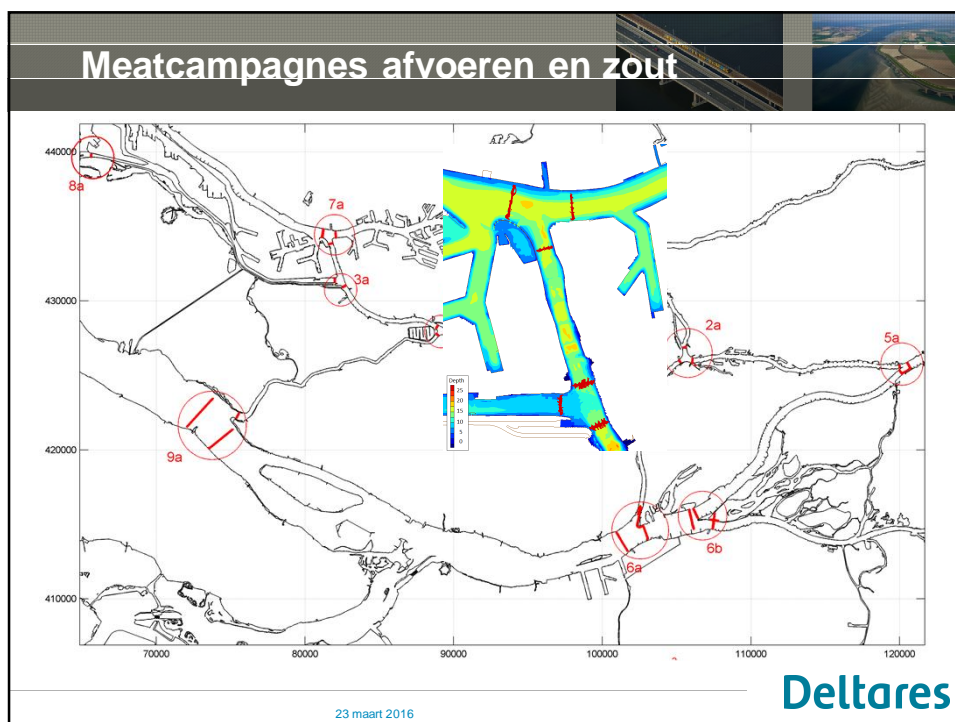
- Alblasterdam (ALBL)
- Spijkenissebrug (SPBR)
- Wieldrecht (WIED)
- Haringvlietbrug (HB)
- Moerdijkbrug (MO)
- Duivelseiland (DU)



Deltares

23 maart 2016



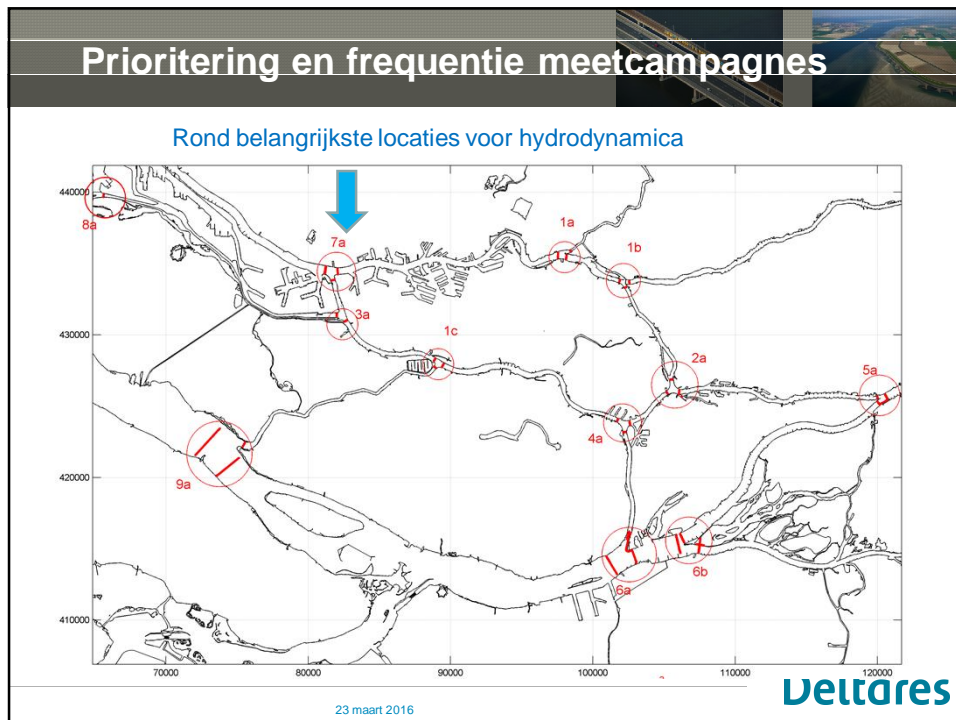


Advies aan RWS

- Overzicht en ontsluiten van de metingen voor HbR, RWS en WUR
- Vervolg plannen van gecombineerde meetcampagnes van zout en stroming(debiet) met rond NWW-OM-NM
- Aanpassen/invoeren van de vaste zoutmetingen naar grotere diepte verder in de vaargeul
- Toets op een aangepaste verwerking van ADCP gegevens op basis van methode WUR.
- Verkennen mogelijkheden om stromingsmeters op Brienoord en Spijkenisse om te zetten naar gelaagde stromingsmeters.

Deltares

23 maart 2016



Prioritering omstandigheden en frequentie

- Voor en na ieder grote ingreep

	Zeer lage afvoer =< 1000 m ³ /s	Lage afvoer rond 1200 m ³ /s	Gemiddelde afvoer 2200 m ³ /s	Hoge afvoer
Hoge opzet (>3 m)	Prioriteit 1	Prioriteit 2	Prioriteit 3	Geen prioriteit
Opzet die invloed heeft bij lage rivier afvoer (> 1m)	Prioriteit 2	Prioriteit 1	Prioriteit 2	Geen prioriteit
Zonder opzet	Prioriteit 2	Prioriteit 1	Prioriteit 3	Geen prioriteit

Deltares

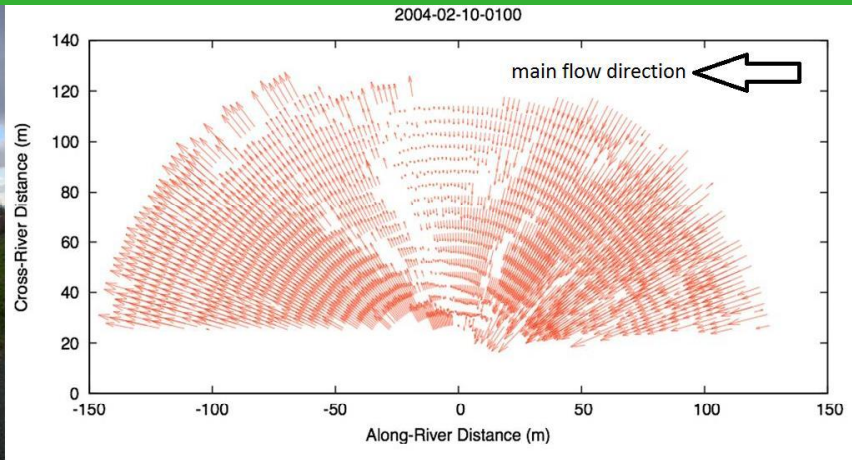
23 maart 2016

Prioritering omstandigheden en frequentie

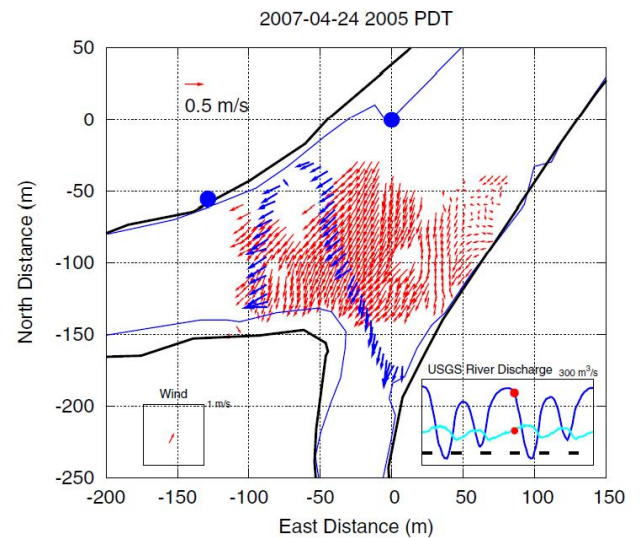
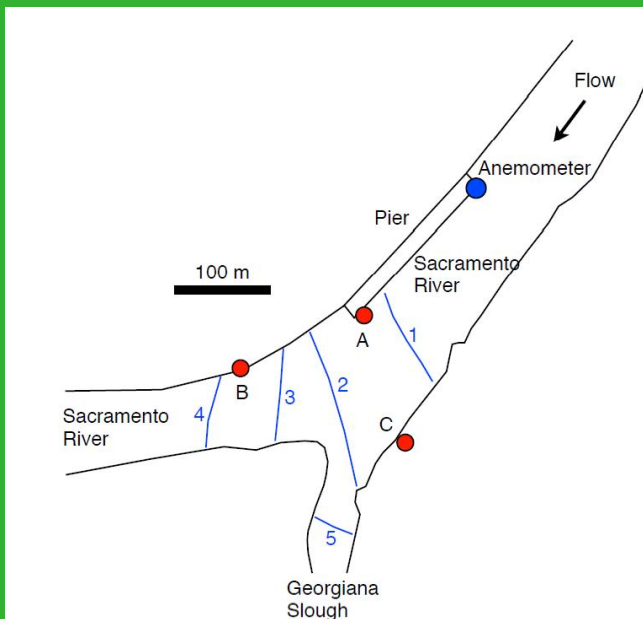
	Zeër lage afvoer =< 1000 m ³ /s	Lage afvoer rond 1200 m ³ /s	Gemiddelde afvoer 2200 m ³ /s	Hoge afvoer
Hoge opzet (>3 m)	Prioriteit 1 Zodra het voorkomt	Prioriteit 2 Zodra het voorkomt	Prioriteit 3	Geen prioriteit
Opzet die invloed heeft bij lage rivier afvoer (> 1m)	Prioriteit 2 aug 2003 dec 2011 2016	Prioriteit 1 1998 2016 /2017 2020 2030	Prioriteit 2	Geen prioriteit
Zonder opzet	Prioriteit 2 mei 2011 sept 2015 2017 iedere 10 jaar	Prioriteit 1 1998/1999 2016 /2017 2020 2030	Prioriteit 3 22 mei 2003	Geen prioriteit Feb 1999

23 maart 2016

UHF radar (Teague et al., 2008)

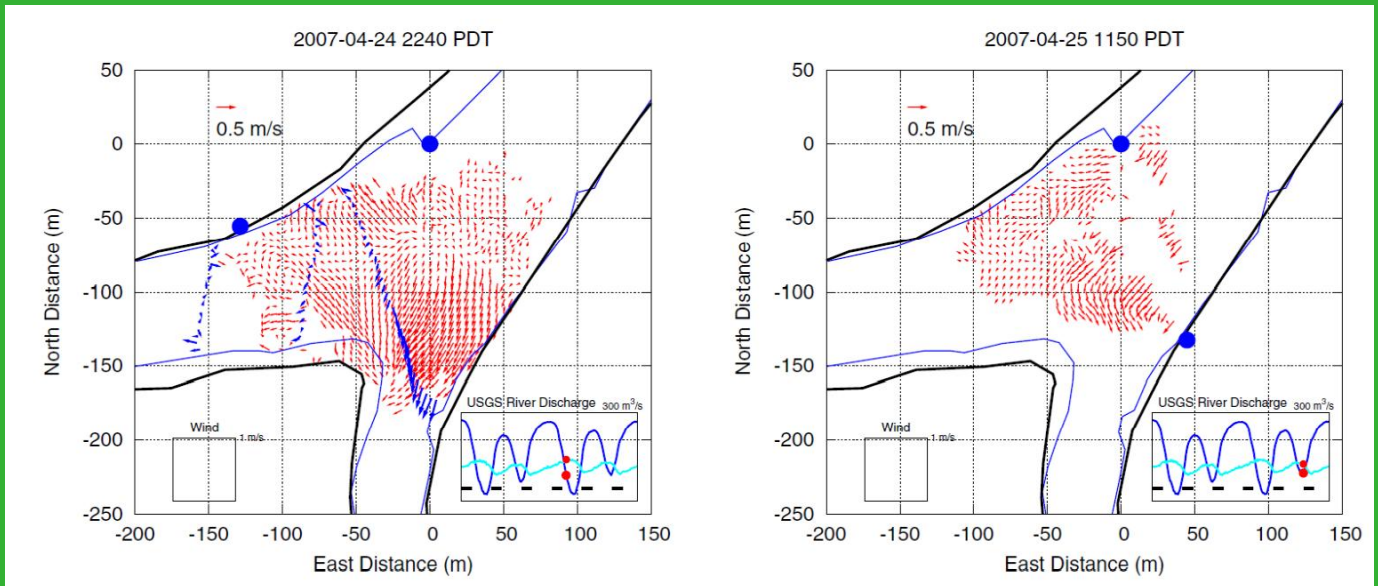


UHF radar, dual deployment



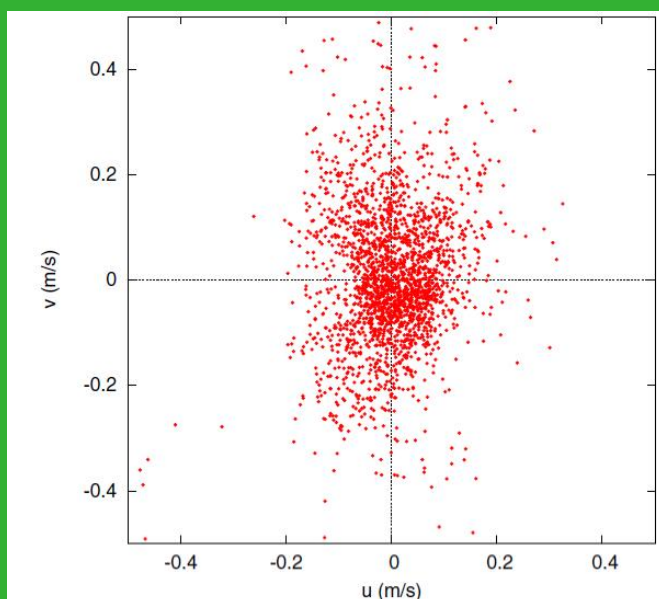
- Needs a rough water surface
- Bragg-resonant wave ~ 35 cm

Reveals complex flow patterns at junctions



WAGENINGEN UNIVERSITY
WAGENINGEN UR

ADCP – UHF radar comparison



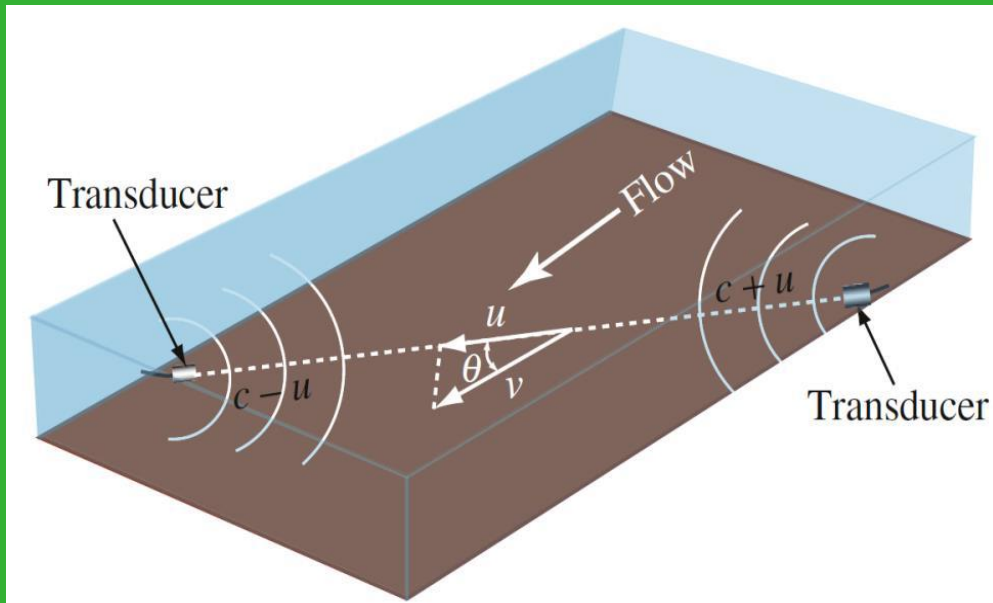
ADCP – UHF radar comparison hampered by:

- UHF radar penetration depth ~ 3 cm, where no ADCP data is available
- Dependent on *linear* dispersion relation to subtract the wave phase velocity

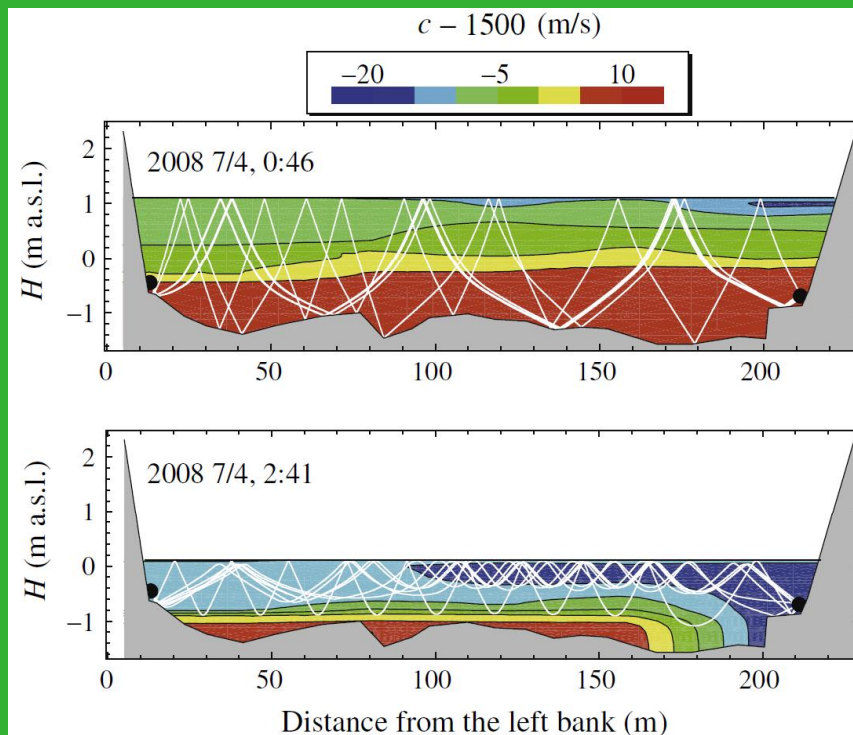


WAGENINGEN UNIVERSITY
WAGENINGEN UR

Acoustic tomography (Kawanisi et al., 2010)



Applicable in stratified flow



A.2 Memo

Memo

Aan
Neeltje Kielen

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
21 december 2016	1230077-001-ZWS-0008	16
Van	Doorkiesnummer	E-mail
Remi van der Wijk	+31(0)88335 8469	remi.vanderwijk@deltares.nl

Onderwerp
Afvoerdeling en beschikbare metingen Rijnmaasmonding

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
3.0	dec. 2016	Remi van der Wijk		Ymkje Huismans		Frank Hoozemans	
5.0	dec. 2016	Remi van der Wijk	<i>Rwf</i>	Ymkje Huismans	<i>jh</i>	Frank Hoozemans	<i>J</i>

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en probleem

Deltares heeft eerder geuit dat er te weinig kennis is van de werking van het systeem Rijnmaasmonding (Zijl et al., 2014). Dit omvat ook de kennis van de debietverdeling in zowel de modellen als in de werkelijkheid. Gedegen kennis van debietverdeling is essentieel voor:

- Een validatie van de zoutverspreiding in modellen van de Rijnmaasmonding;
- Inzichten over de grootste debieten en stroomrichtingen voor de zouttransporten.

Tot op heden werd deze kennis uit SOBEK-RE NDB (eerdere generatie model) gehaald, het is echter beter om deze analyses op metingen te baseren waar mogelijk. Het was echter niet bekend of er voldoende metingen waren om een analyse te baseren op metingen.

Tot 2016 was het ook niet bekend hoe goed de kwaliteit van de afvoer is binnen simulaties van de 5^{de} generatie 1D en 2D modellen. Het was dus niet mogelijk om een vergelijkbare analyse uit te voeren met de 5^{de} generatie modellen die wel werd gedaan met SOBEK-RE. Binnen het project KPP modelschematisaties is in 2015 de wens geuit om de modellen te valideren met afvoermetingen.

In dit onderdeel zijn daarom de volgende werkzaamheden ondernomen:

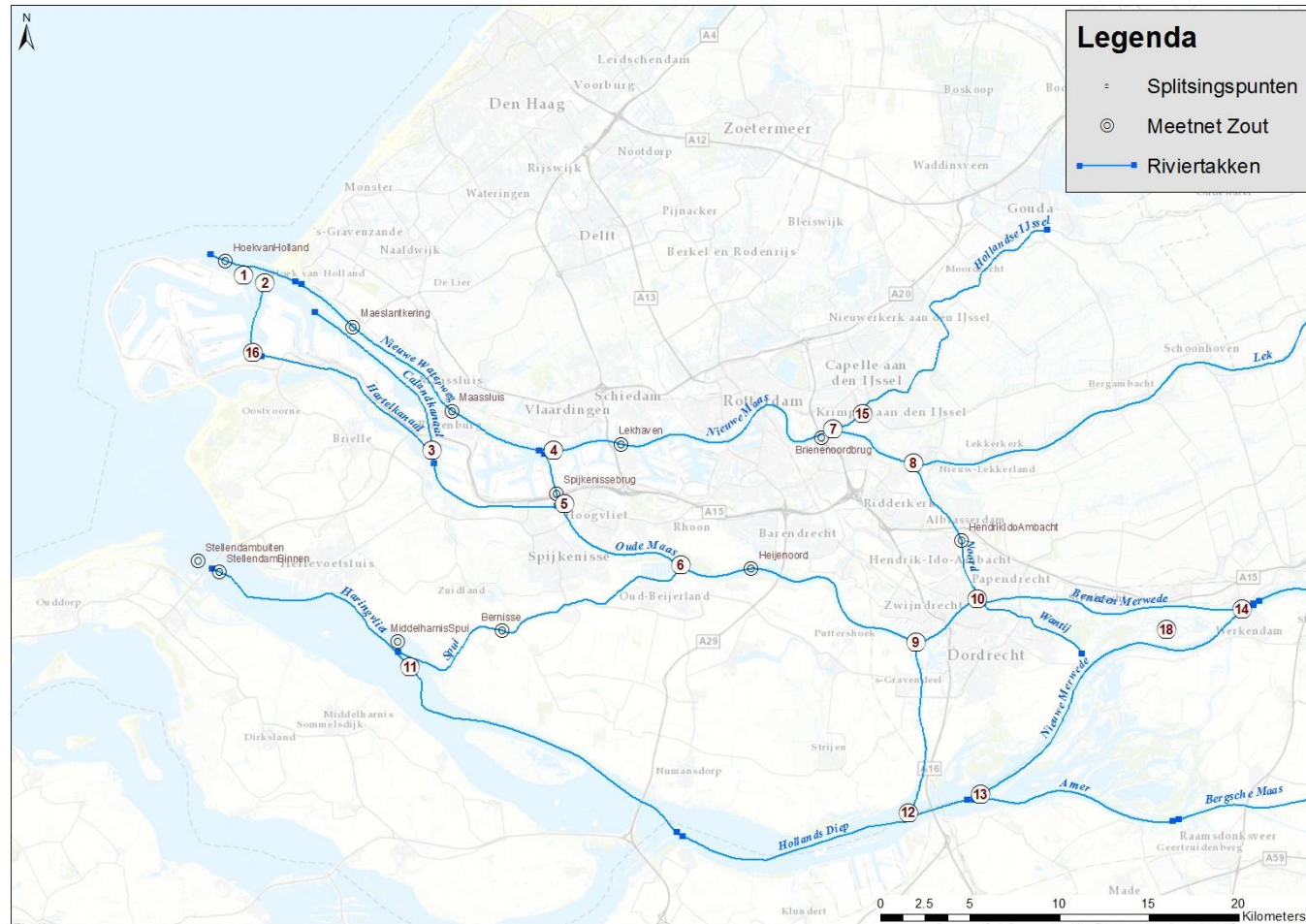
- Inventarisatie van de beschikbare debietmetingen op splitsingspunten;
- Overzicht van de beschikbare metingen inclusief een analyse voor de bruikbaarheid van de gegevens zodat toekomstige studies sneller van start kunnen gaan;
- Een begin rondom systeeminzicht voor lage en gemiddelde afvoer condities.

In deze memo wordt ook kort verteld hoe goed de metingen worden gereproduceerd door de 5^{de} generatie modellen. Hier worden ook enkele trends aangestipt waar rekening mee gehouden moet worden indien de modellen voor scenario studies worden gebruikt. Het overzicht bouwt voort op het werk van Kranenburg & Schueder (2015) en Schroevers (2016). De beoordeling van de modellen is een voor dit vraagstuk toegespitste samenvatting van het rapport van der Wijk & Fujisaki (2016).

Datum
21 december 2016

Ons kenmerk
1230077-001-ZWS-0008

Pagina
2/16



Figuur 1.1 Overzichtskaat Rijnmaasmondung met splittingspunten en meetnetpunten

1.2 Doel

Het doel van deze memo is:

- Een inventarisatie maken van de beschikbare debietmetingen op splitsingspunten in de Rijnmaasmonding;
- Een overzichtelijke samenvatting geven van de beschikbare grootschalige afvoermetingen om toekomstig werk in de Rijnmaasmonding te bespoedigen.
- Een korte samenvatting geven hoe goed de 5^{de} generatie modellen in staat zijn om de stromingsmetingen te reproduceren.
- Een korte samenvatting geven van eerder werk over de mate waarin 3D modellen in staat zijn om stromingsmetingen te reproduceren.
- Een overzicht geven van de systeemwerking op basis van modelsimulaties voor lage en gemiddelde afvoer condities.

Het overzicht van de beschikbare metingen wordt gegeven in een Excel bestand. Deze memo dient onder andere als beschrijving bij het Excel bestand (1230077-001-ZWS-0008-OverzichtADCPmetingen.xlsm). Verder wordt in detail ingegaan op de kwaliteit van de 5^{de} generatie modellen in een rapportage uit KPP Modelschematisaties. In deze memo wordt een korte samenvatting gegeven die relevant is voor KPP Verzilting.

2 Afvoermetingen

2.1 Beschikbare gegevens

Bij Deltares en Rijkswaterstaat West-Nederland Zuid zijn er momenteel 7 grootschalige campagnes bekend waarin er stromingsmetingen zijn gedaan op tenminste 3 splitsingspunten. Er zijn op verschillende locaties langdurige zout- en stromingsmetingen gedaan die zijn beschreven in Schroevers (2016). Tevens zijn er sinds 2014 metingen gedaan die in beheer zijn van de WUR (2014) en Havenbedrijf Rotterdam (2015). Deze zijn niet in beheer van Rijkswaterstaat en zijn daarom niet opgenomen in dit overzicht.

Er wordt gewerkt aan een overzicht waar op basis van de condities verschillende campagnes worden gecategoriseerd. Er is nu gekozen om een overzicht te geven van grootschalige campagnes, deze campagnes zijn namelijk geschikter voor modelvalidaties voor de hydrodynamica, welke de basis zijn voor een goede zoutmodellering. Bij afwijkingen ten opzichte van de metingen kan op andere splitsingspunten namelijk worden gekeken of daar soortgelijke afwijkingen zijn te vinden.

2.1.1 Overzicht

Het overzicht (Tabel 2.1) is opgebouwd om snel een overzicht te geven van de beschikbare gegevens en welke mogelijkheden er zijn met de data. (t.b.v. systeemanalyse en voor uniforme validatie en kalibratieset voor hydrodynamische, morfologische en zoutverspreidingsmodellen). Er is hierbij onderscheid gemaakt op de volgende categorieën:

- Locatie, de beschikbare locaties zijn van cruciaal belang voor de vragen die zijn te beantwoorden voor verschillende (validatie) studies;
- Randvoorwaarden, dit omvat een beschrijving van de rivierafvoer en opzet. Een andere benaming zou condities kunnen zijn;
- Gebruik, dit geeft een indicatie waar de set voor is gebruikt of redelijkerwijs voor is te gebruiken;

- Kwaliteit is een beoordeling van de ADCP gegevens na ervaring binnen het validatie project. De beoordeling is gebaseerd op beschikbare metadata, opvallende meetfouten en netheid van de dataset.
- Zout is een parameter die kort wordt benoemd om aan te geven of de zoutconcentratie tegelijk met de stromingsmetingen is bepaald.

Uit het overzicht is te concluderen dat 5 van de 7 campagnes zich met name hebben toegelegd op de splitsingspunten rondom de Oude Maas en dan voornamelijk in het havengebied. Slechts 1 campagne heeft ook metingen uitgevoerd op het Haringvliet. Er zijn wel stromingsmetingen beschikbaar op het Haringvliet die niet in combinatie met andere locaties zijn uitgevoerd. Het overzicht zou in de nabije toekomst aangevuld moeten worden met metingen die uitgevoerd zijn in 1 gebied. Het criterium waar dan op gesorteerd kan worden is een combinatie van condities, zoals afvoer en windopzet. Dit zou het zoeken op specifieke omstandigheden om op te valideren vereenvoudigen.

Tevens valt er op dat de extremere condities, zowel hoge rivierafvoer als hoge opzet, minder vaak zijn gemeten. Dit is logisch omdat deze condities minder vaak voorkomen, maar biedt ook de uitdaging om met weinig gegevens de interessante condities te valideren en/of te gebruiken. In de memo van Schroevers (2016) is een prioritering opgegeven voor welke condities gebruikt dienen te worden om een meetcampagne uit te voeren om de zoutindringing zo goed mogelijk in kaart te brengen.

In de classificatie omtrent het gebruik is er een verschil aangebracht tussen zoutindringing en zoutverdeling. Hierbij geeft zoutindringing een indicatie tot hoever de zouttong komt en geeft zoutverdeling een indicatie hoe deze tong zich verspreid in de Rijnmaasmonding. Voor deze toepassing kan ook in beperkte mate gebruik gemaakt worden van het vaste meetnet voor zoutconcentraties.

Al met al zijn er verschillende data sets beschikbaar die een breed bereik beschrijven aan condities. Zoals Schroevers (2016) al heeft gesteld zijn condities met hoge opzet prioriteit om te meten voor het verziltingsvraagstuk (Tabel 2.2). Voor de systeemanalyse zou met oog op wijzigingen in de Rijnmaasmonding sinds 1999 een nieuwe hoge rivierafvoer meetcampagne wenselijk zijn. Verder is het aan te raden om metingen op het Haringvliet uit te voeren die integraal onderdeel zijn van metingen in het hele systeem.

De 13-uurs ADCP metingen zijn te gebruiken om de modellen te valideren op stroomsnelheden en afvoeren. Voor een goed beeld van de afvoerverdeling in het hele gebied is het raadzaam om meerdere splitsingspunten tegelijk te meten. Daarbij kan het handig zijn om op enkele belangrijke punten een langdurige meting te doen van de stroomsnelheden en/of afvoer. Met die metingen kan ook de afvoerverdeling van modellen worden gevalideerd om te bepalen of de aanname dat modellen in staat zijn om de afvoerverdeling voor verschillende condities te simuleren te toetsen.

2.1.2 Kwaliteit

Afvoermetingen verkregen vanuit ADCP metingen zijn nauwkeurig tot ongeveer 5% van de gemeten afvoer. Deze onzekerheid is voor elke dataset gelijk, dit wordt niet verder meegenomen in het beoordelen van de kwaliteit. Het beoordelen van de kwaliteit is gebeurd op basis van de opbouw van de dataset, waarschijnlijkheid van de resultaten en presentatie van de dataset.

De meeste datasets bestaan uit .val bestanden met de belangrijkste meta-info. Er zijn niet altijd profielen beschikbaar van de rivier bij de raaien om te corrigeren voor de stroming langs de oevers van de geul. De set uit 2011 bevat in tegenstelling tot andere datasets kaartjes die gedetailleerd weergeven waar de raaien van 2011 liggen.

Enkele metingen zijn direct af te schrijven omdat de gegevens overduidelijk niet juist zijn. De reden voor de afwijking is niet altijd terug te vinden in de documentatie. Met name in de 2011 data set zijn er enkele resultaten te vinden die niet in lijn zijn met de verwachting en modelresultaten (van der Wijk & Fujisaki, 2016). In Kranenburg & Schueder (2015) worden enkele metingen van de 2003 mei en augustus set in twijfel getrokken. Dit is gebaseerd op enkele duplicaten in de meetset en onlogische profielen en trends in de data.

Op basis van de ADCP metingen worden afvoeren gegenereerd met een bepaalde tijdstap. De grootte van de tijdstap bepaald ook het detailniveau van de afvoermetingen. Dit betekent dat het lastig is om de precieze maxima en minima in afvoer te bepalen omdat deze door interpolatie afgevlakt kunnen worden. Interpolatie in de profielen voor de locatie kan ook leiden tot verlies van detail in de meetdata. Dit wordt ook in Kranenburg & Schueder (2015) besproken voor de 2003 datasets.

Datum 21 december 2016 **Ons kenmerk** 1230077-001-ZWS-0008 **Pagina** 6/16

Tabel 2.1 Overzicht van beschikbare grootschalige afvoermetingen op tenminste 3 splitsingspunten met behulp van ADCP. Zie Figuur 1.1 voor de splitsingspunt nummers. Lage afvoer is als er minder dan 1200 m³/s bij Lobith wordt gemeten, gemiddelde afvoer is om en nabij 2200 m³/s bij Lobith en we spreken van hoge afvoer bij meer dan 4000 m³/s bij Lobith. Geringe opzet is als er rond de 0,5 – 1,0 meter opzet in waterstand is bovenop de getijamplitude bij Hoek van Holland.

Datum	Aantal splitsingspunten	Splitsingspunten Nummer	Randvoorwaarden	Gebruik	Kwaliteit	Zout
1998-08	3	4, 5, 6	Lage afvoer, geringe opzet	Zoutindringing	Onbekend	Ja
1999-03	6	15, 13, 8, 14, 9, 10	Hoge afvoer, geen opzet	Rivierafvoerdeling, Validatie modellen	Onbekend	Ja
2000-05	3	5, 4, 6	Gemiddelde afvoer, geringe opzet	Zoutindringing	Onbekend	Ja
2000-10	6	14, 8, 9, 10, 13, 12	Gemiddelde afvoer, geen opzet	Rivierafvoerdeling	Redelijk	Ja
2003-05	5	4, 5, 6, 9, 10	Gemiddelde afvoer, geen opzet	Oude Maas waterbalans, Validatie modellen	Goed	Ja
2003-08	5	4, 5, 6, 9, 10	Lage afvoer, geringe opzet	Oude Maas waterbalans, Validatie modellen	Goed	Ja
2011-05	11	8, 7, 6, 5, 9, 14, 12, 13, 4, 16, 11	Lage afvoer, geen opzet	Zoutindringing, Oude Maas waterbalans, Haringvliet spuien, Rivierafvoerdeling, Validatie modellen, Zoutverdeling	Redelijk	Ja

Datum 21 december 2016 Ons kenmerk 1230077-001-ZWS-0008 Pagina 7/16

Tabel 2.2 Overzicht van de grootschalige afvoermetingen overgenomen uit Schroevers (2016) met aanpassingen naar aanleiding van communicatie met Schroevers inclusief prioritering voor nieuwe metingen voor zoutindringing vraagstukken, voor validatie van modellen of kennis van de werking van de hydrodynamica van het systeem is de prioritering niet gelijk

	Zeer lage afvoer =< 1000 m ³ /s	Lage afvoer rond 1200 m ³ /s	Gemiddelde afvoer 2200 m ³ /s	Hoge afvoer
Hoge opzet (>2,30 m)	Prioriteit 1 Zodra het voorkomt	Prioriteit 2 Zodra het voorkomt	Prioriteit 3	Geen prioriteit
Opzet die invloed heeft bij lage rivier afvoer (> 1m)	Prioriteit 2 2003-08	Prioriteit 1	Prioriteit 2 2000-05	Geen prioriteit
Zonder opzet	Prioriteit 2 2011-05	Prioriteit 1	Prioriteit 3 2000-10 2003-05	Geen prioriteit 1999-03

3 Modellen en afvoerverdeling

3.1 Gevalideerde modellen

Zowel het SOBEK3 als WAQUA model zijn gevalideerd met de 1998 en 2015 schematisatie (waqua-rmm-j98_5-v2, waqua-rmm-j15_5-v1, sobek-rmm-j98_5-v2 en sobek-rmm-j15_5-v1). De validatie omvat een vergelijking op getij maxima en minima en gemiddeld verschil. Daarnaast is er gekeken naar getijgemiddelde afvoeren van zowel de modelresultaten en de metingen.

3.1.1 Overzicht van eerder werk omtrent validatie OSR model

Het OSR model, een 3D model van de Rotterdamse haven, is gevalideerd op basis van stromingsmetingen en zoutprofielen (Kranenburg & Schueder, 2015; Verbeek, 2015). In het werk van Kranenburg & Schueder (2015) is geconcludeerd dat de afvoer over de breedte van de rivier goed wordt geproduceerd op basis van visuele inspectie op de splitsingspunten Nieuwe Maas, Nieuwe Waterweg en Oude Maas. Er is alleen sprake van een getijamplitude overschatting op de Oude Maas (tot 25% overschatting).

In het werk van Verbeek (2015) wordt gedetailleerd gekeken naar afvoeren bij het splitsingspunt Oude Maas en Hartelkanaal. Daaruit volgde dat binnen het profiel van de rivier er verschillen in timing kunnen optreden. In zijn totaliteit was de reproductie van de afvoer goed op basis van visuele inspectie van de gegevens.

De gelaagdheid van de zoutverdeling wordt minder goed gereproduceerd in het OSR model. De gelaagdheid en verdeling van het zout binnen een profiel is logischerwijs niet te valideren met 1D en 2D modellen.

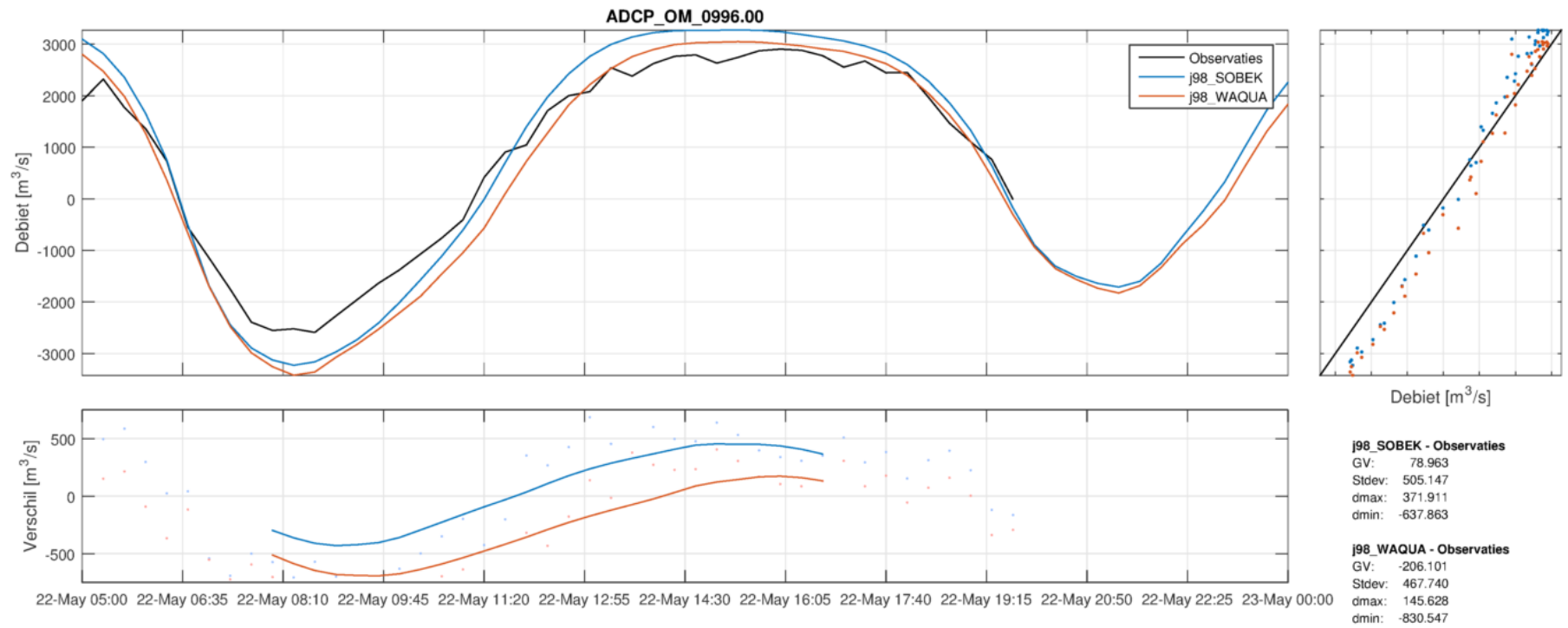
3.2 Resultaten modellen op de afvoeren

Beide 5^{de} generatie modellen presteren redelijk (10-15 % afwijking) tot goed (5-10% afwijking) (1230071-004-ZWS-0028_BijgevoegdeBestanden.zip). De classificatie in prestatie is gedefinieerd als een procentuele afwijking in het gemiddelde verschil. Daarnaast is een visuele inspectie gedaan door de metingen en simulatie resultaten in een grafiek te vergelijken. Beide modellen overschatten op veel splitsingspunten veelal de amplitude van de afvoer net als in het OSR model (Figuur 3.1). De minima en maxima wijken meer dan 5-10% af. Dit kan ook een gevolg zijn dat de piek van de afvoer in de metingen tussen twee meetmomenten valt. In bijvoorbeeld de 2003 casus was de tijdstap tussen de metingen tussen 15 en 30 minuten. De vorm van de afvoer is zeer vergelijkbaar tussen de metingen en de modelresultaten. Zelfs kleine schommelingen in de observaties zijn zichtbaar in de simulatie (Figuur 3.2).

Datum
21 december 2016

Ons kenmerk
1230077-001-ZWS-0008

Pagina
9/16

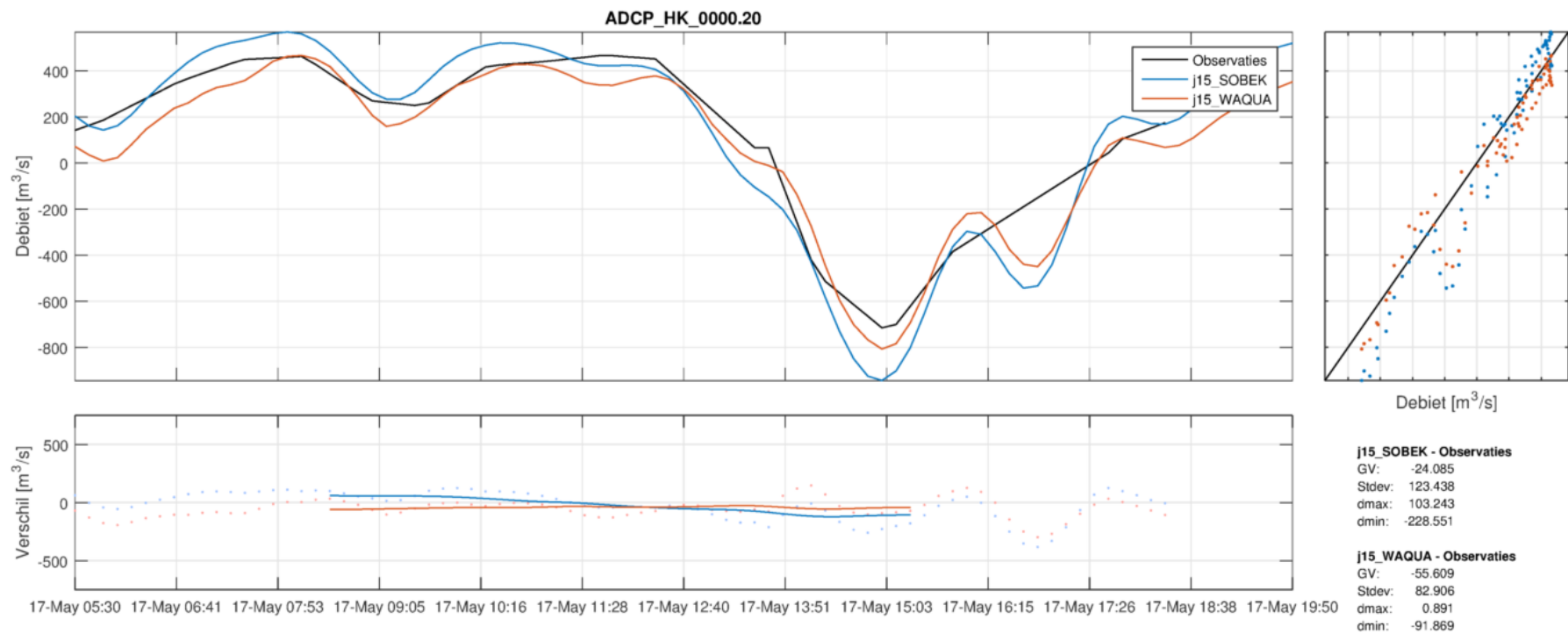


Figuur 3.1 Afvoermetingen en resultaten van SOBEEK en WAQUA voor OM_0996.00 in de 2003 casus

Datum
21 december 2016

Ons kenmerk
1230077-001-ZWS-0008

Pagina
10/16



Figuur 3.2 Afvoermetingen en resultaten van SOBEK en WAQUA voor HK_0000.20 in de 2011 casus

3.2.1 Gevoeligheden in afvoerreproductie

De modellen zijn bijzonder gevoelig voor de schuifstanden van de Haringvlietsluizen. De kwaliteit van de geproduceerde waterstanden en afvoeren is dus direct afhankelijk van de kwaliteit van de opgegeven schuifstanden of spuiprogramma. Met oog op de gemeten en gesimuleerde waterstanden op het Haringvliet zijn er kanttekeningen te plaatsen bij de schematisatie van de Haringvlietsluizen in beide modellen. In de rapportage van de afvoervalidatie is voorgesteld om de modellen onderling te vergelijken om beter grip te krijgen op de processen in het Haringvliet.

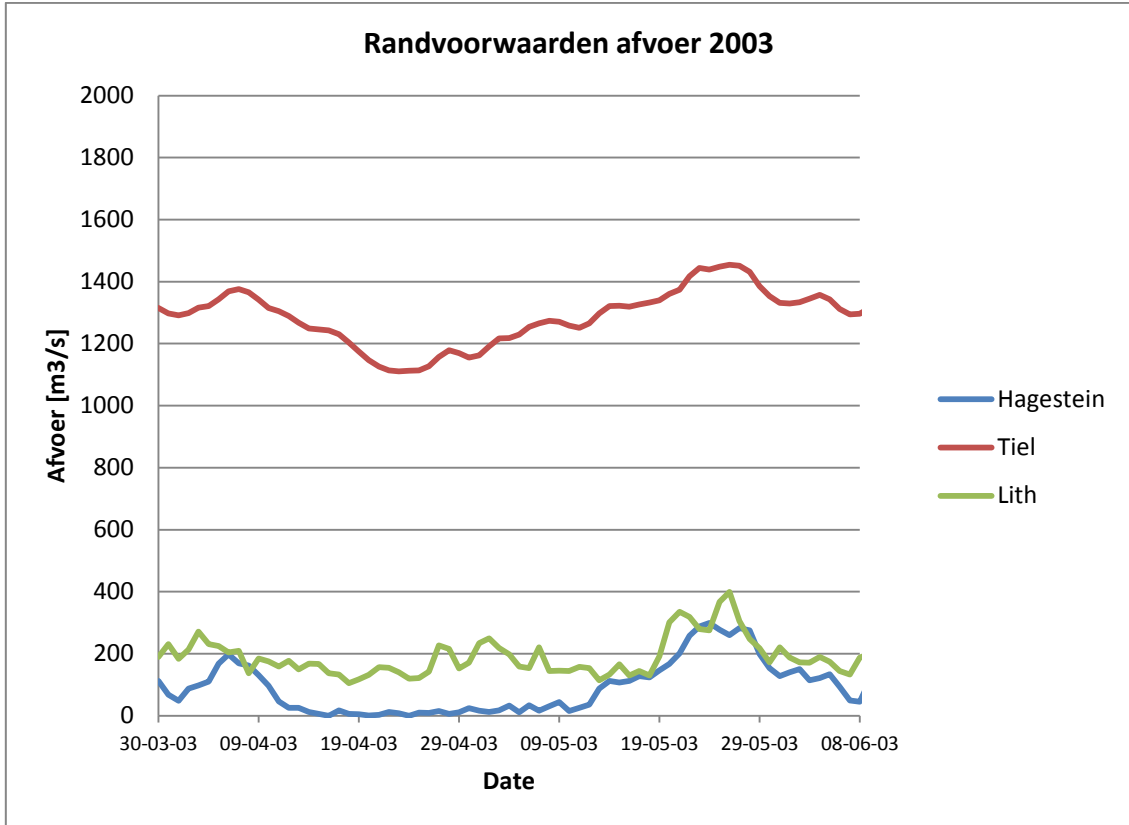
3.2.2 Trends en systeemwerking

Kennis van de afvoerverdeling binnen de Rijnmaasmonding wordt tot op heden gebaseerd op simulaties met SOBEK-RE NDB. Binnen de afvoervalidatie is een opzet gemaakt voor een afvoerverdeling voor twee type condities bepaald met de 5^{de} generatie modellen. De afvoerverdeling is bepaald voor een langere tijd met min of meer gelijke condities. Het afleiden van de afvoerverdeling is ook gebruikt voor een vergelijking tussen de twee modellen maar is idealiter de basis voor het afleiden van nieuwe afvoerverdelfigures op basis van de 5^{de} generatie modellen.

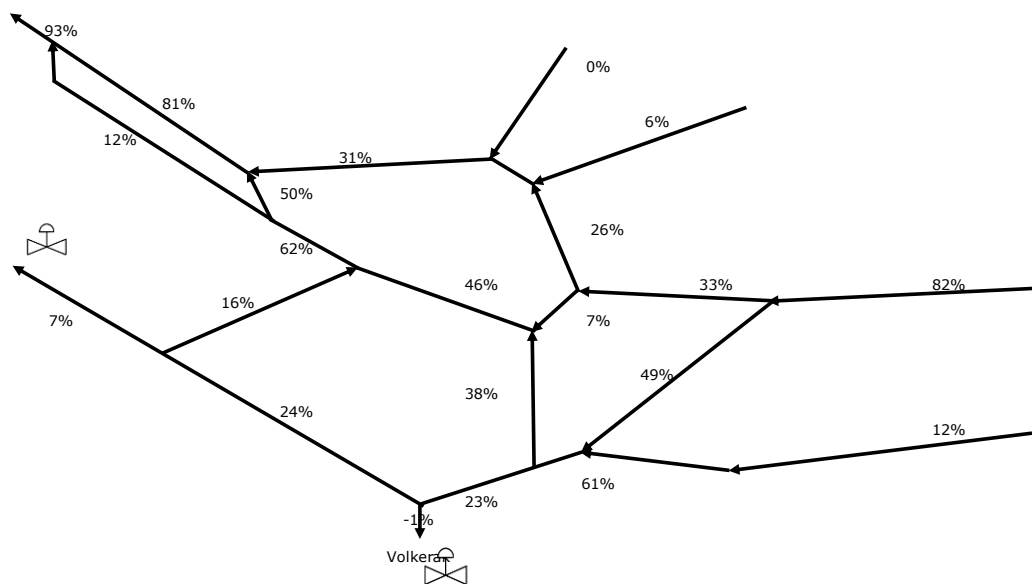
2003, 04-04-2003 tot en met 01-06-2003 (gemiddeld tot lage afvoer);

In de rapportage van de afvoervalidatie (van der Wijk & Fujisaki, 2016) is geconcludeerd dat bij deze casus het SOBEK3 model significant beter presteert dan het WAQUA model. Voor de systeemanalyse is het daarom aan te bevelen om het SOBEK3 model te gebruiken. De afvoerverdelling is nu gebaseerd op een langere periode met min of meer gelijke condities. De afvoer bij Lobith schommelt tussen de 1400 en 2000 m³/s. Er is geen sprake van hoge opzetten op zee in deze periode (van der Wijk & Fujisaki, 2016). Onder deze condities staan de Haringvlietsluizen een gedeeltelijk open tijdens eb (Huisman, 2016). Uit deze afvoerverdelling valt te concluderen hoe onder gemiddeld tot lage afvoercondities (zoals geclassificeerd in Mens (2016)) zonder noemenswaardige windopzet het water zich over langere tijd verspreiden binnen de Rijnmaasmonding. Dit kan worden gedaan omdat uit de validatie is gebleken dat het model in staat is om onder deze condities de afvoer goed te reproduceren.

Onder deze condities is te zien dat het grootste deel van de afvoer zich via de Nieuwe Merwede en Dordtsche Kil naar de Oude Maas begeeft (Figuur 3.3). Water dat over de Beneden Merwede stroomt gaat bijna exclusief richting de Noord en Nieuwe Maas. In totaal gaat er slechts 7% van de afvoer bij deze condities via het Haringvliet.



Figuur 3.3 Gemeten randvoorwaarden voor de rivierafvoer in 2003.



Figuur 3.4 Afvoerverdelingfracties voor de 2003 casus over 2 maanden bepaald met behulp van SOBEK3, afvoer bij Lobith valt tussen de lage en gemiddelde afvoercondities

2011, 31-03-2011 tot en met 19-06-2011 (lage afvoer Figuur 3.5):

In de rapportage van de afvoervalidatie (van der Wijk & Fujisaki, 2016) is gesteld dat er vraagtekens geplaatst kunnen worden bij de restafvoer in SOBEK over het Haringvliet. Daarom wordt voor deze casus gebruik gemaakt van WAQUA voor de afvoerverdeling (Figuur 3.6). De afvoerverdeling is nu gebaseerd op een langere periode met min of meer gelijke condities. De afvoer bij Lobith schommelt tussen de 900 en 1300 m³/s (Figuur 3.5). Er is geen sprake van noemenswaardige windopzet op zee (van der Wijk & Fujisaki, 2016). Onder deze condities staan de Haringvlietsluizen nagenoeg dicht (Huismans, 2016), alleen bij de iets hogere afvoer (>1100 m³/s bij Lobith) zullen de sluizen een kleine beetje openen tijdens eb. Uit deze afvoerverdeling valt te concluderen hoe onder lage tot zeer lage rivierafvoer condities (zoals geclassificeerd in Mens (2016)) zonder opzet op zee het water zich verspreid in de Rijnmaasmonding over langere tijd. Binnen de Rijnmaasmonding kan dit worden gedaan met de modellen omdat uit de validatie bleek dat de modellen redelijk tot goed in staat waren om de afvoer te reproduceren (van der Wijk & Fujisaki, 2016). Er zijn wel kanttekeningen te plaatsen bij de afvoer over het Haringvliet ten opzichte van de metingen wat meegenomen dient te worden in de analyse.

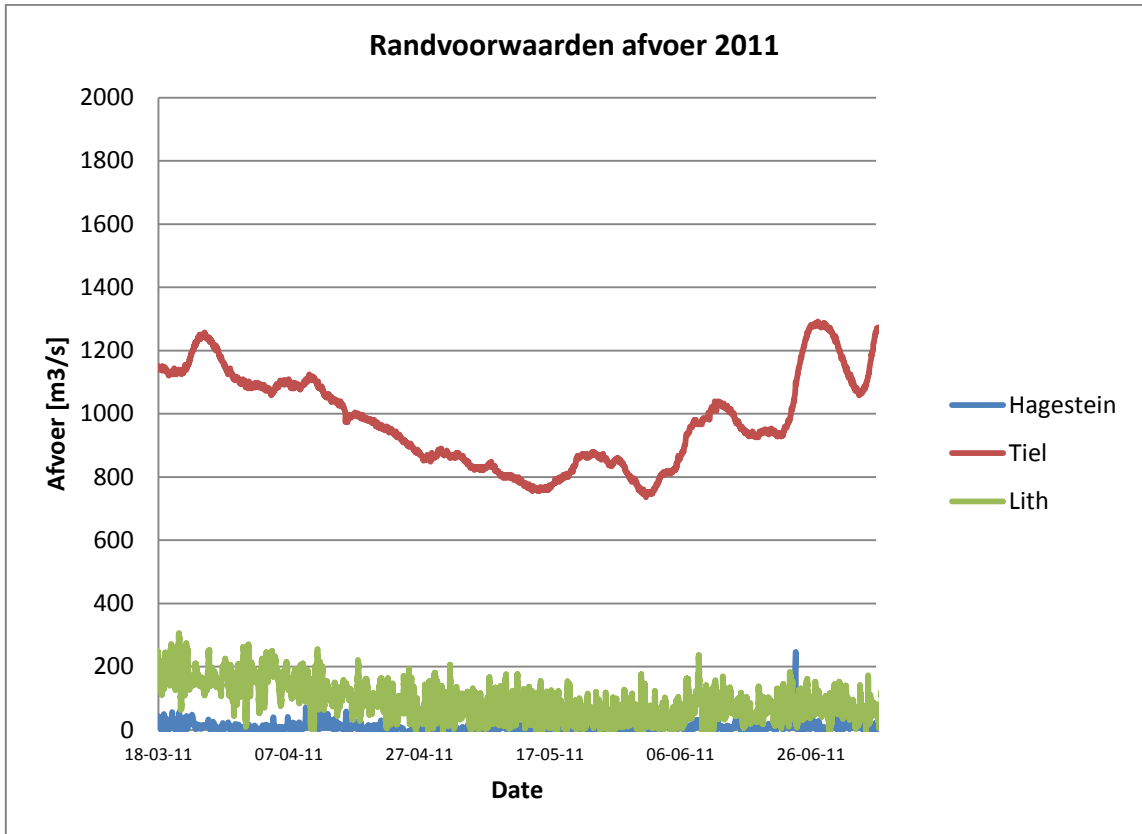
Het valt op in de afvoerverdeling dat de bijdrage van de Lek gedurende deze periode zeer beperkt is (1% van de totale afvoer, Figuur 3.6). Net als bij de periode van 2003 gaat ook hier minder dan 10% over het Haringvliet. De dominante route voor de rivierafvoer is eveneens de Nieuwe Merwede, Dordtsche Kil en Oude Maas. Van de afvoer over de Nieuwe Waterweg is slechts een klein deel afkomstig van de Nieuwe Maas en komt het merendeel van het water van de Oude Maas.

2003 en 2011 vergeleken met elkaar (gemiddeld/lage afvoer tegenover (zeer) lage afvoer:

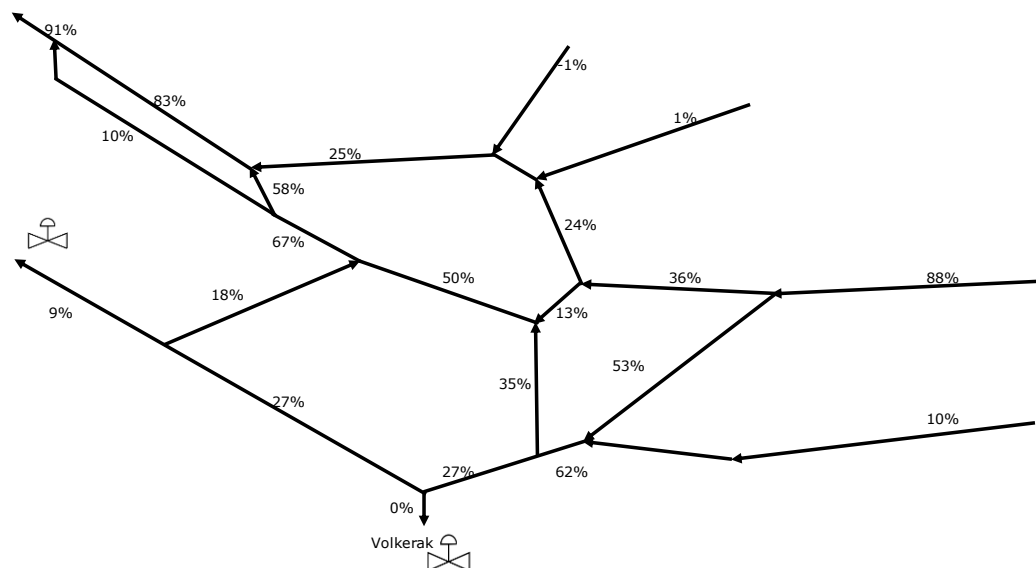
Indien de resultaten van de 2003 en 2011 casus met elkaar worden vergeleken vallen er een aantal zaken op. Het is hierbij belangrijk om te realiseren dat een deel van de verschillen kunnen komen door het gebruik van een andere schematisatie en model programmatuur (j98 tegenover j15 & SOBEK tegenover WAQUA).

- Bij iets hogere afvoercondities (2003) gaat er slechts een klein beetje meer afvoer door de Haringvlietsluizen en proportioneel zelfs minder door de Haringvlietsluizen. Dit is niet in lijn der verwachting wat de vermoedens en twijfels over de afvoeren over het Haringvliet in 2011 verder versterkt (van der Wijk & Fujisaki, 2016).
- In 2011 stroomt er slechts 1% ten opzichte van 6% in 2003 van de totale afvoer via de Lek naar de Rijnmaasmonding. Dit zorgt er ook voor dat er minder water via de Nieuwe Maas naar de Maasmond stroomt, het verschil in afvoer over de Lek is direct te relateren aan het verschil in afvoer over de Nieuwe Maas.
- Als gevolg van de lagere afvoer over de Maas en de naar alle waarschijnlijkheid te hoge afvoer door de Haringvlietsluizen in 2011 is de waterstand op het Haringvliet voor deze situatie gemiddeld lager dan voor 2003. Als gevolg hiervan gaat er ten opzichte van de 2003 casus relatief meer water via de Nieuwe Merwede naar de zuidrand, en minder via de Beneden Merwede.

Op basis van de afvoervalidatie is te concluderen dat voor in ieder geval lage tot gemiddelde afvoercondities een betrouwbare afvoerverdeling is op te zetten mits de Haringvlietsluizen juist worden aangestuurd in de modellen. Op basis van verschillende condities kan over 2 getijdeperiodes een aantal betrouwbare afvoerverdelingsfiguren worden gemaakt. Dit kan worden gedaan met zowel SOBEK3 als WAQUA. Deze figuren kunnen daarna worden gebruikt om inzicht te krijgen in de werking van het systeem.



Figuur 3.5 Gemeten randvoorwaarden voor de rivierafvoer in 2011.



Figuur 3.6 Afvoerverdelingfracties voor de 2011 casus voor 2,5 maanden bepaald met behulp van WAQUA, afvoer is in het lage niveau bij Lobith

4 Aanbevelingen

Er volgen een aantal aanbevelingen voor toekomstig werk omtrent systeemanalyse Rijnmaasmonding of gerelateerde projecten.

Het gecreëerde data overzicht (Tabel 2.1) met een kwalitatieve analyse biedt de mogelijkheid om snel de juiste data set op basis van locatie voor projecten in de Rijnmaasmonding te kiezen. Het is aan te raden dit overzicht te gebruiken en te blijven aanvullen en bij te houden. Na overleg met Rijkswaterstaat is de aanbeveling om het overzicht te baseren op condities en vervolgens een sortering op basis van locatie door te voeren. Dit betekent dat het overzicht er meer uit zou zien als Tabel 2.2. In 2017 wordt vermoedelijk dit overzicht op basis van condities gemaakt, tot die tijd is het gemaakte overzicht te gebruiken.

Daarnaast is het raadzaam om de grootschalige campagnes van het Havenbedrijf Rotterdam en Wageningen Universiteit te ontsluiten en op te nemen in het overzicht. Deze bevatten ook zoutmetingen tegelijk met de stromingsmetingen en zijn een duidelijke toevoeging bij de beschikbare data.

Ten tweede voldoen de grootschalige afvoermetingen niet geheel voor het maken van een afvoerverdeling op basis van metingen. Dit is gebaseerd op de volgende tekortkomingen van de metingen:

- Als niet alle splitsingspunten tegelijk zijn gemeten kunnen er afwijkingen optreden op één tak tussen twee splitsingspunten;
- Binnen één splitsingspunt is over één getijdeperiode de massabalans lang niet altijd sluitend (van der Wijk & Fujisaki, 2016). Dit kan komen door de inherente onnauwkeurigheid van ADCP metingen, de onnauwkeurigheid in de interpolatie van snelheidsmetingen naar debiet of andere onnauwkeurigheden.

Het is daarom raadzaam om op basis van een gevalideerd model afvoerverdelingsfiguren te maken voor verschillende condities (rivierafvoer, getij en windopzet). Ondanks dat niet alle condities zijn gevalideerd met de modellen is, met oog op de beschikbare resultaten (Kranenburg & Schueder, 2015; Verbeek, 2015; van der Wijk & Fujisaki, 2016), te concluderen dat tijdens getijgedomineerde condities tot gemiddelde rivierafvoeren de modellen op het gebied van afvoerproductie redelijk tot goed presteren.

De actuele modellen zijn nu nog niet gevalideerd voor hoge rivierafvoeren waardoor de prioritering van Schroevers (2016) uitgebreid kan worden met een hoge rivierafvoer campagne. Dit is zeker verstandig met oog op de ingrepen die hebben plaatsgevonden in de Rijnmaasmonding in de laatste jaren die de afvoerverdeling zullen beïnvloeden. Met een validatie voor hoge rivierafvoeren kunnen met grotere zekerheid ook afvoerverdelingsfiguren worden gemaakt voor hoge rivierafvoeren op basis van modellen.

Tevens kan het raadzaam zijn om naast gedetailleerde afvoeranalyse op splitsingspunten ook te kijken naar metingen op een hogere temporele schaal. Als er langdurige afvoermetingen zijn op enkele cruciale locaties kan de afvoerverdeling over langere tijd worden gevalideerd tussen modellen en metingen.

Als laatste is het duidelijk dat de Haringvlietsluizen een grote invloed hebben op de afvoerverdeling en stroming op de zuidelijke helft van de Rijnmaasmonding. Echter is het ook het gebied waar de grootste afwijkingen optreden ten opzichte van de metingen en de modellen onderling meer afwijken. Dit zorgt ervoor dat in dit gebied de meeste onzekerheid omtrent systeemkennis en modelresultaten is te vinden. Dit komt ook doordat stroming in het Haringvliet een sterk 3D karakter heeft. Om deze onzekerheid te verkleinen is het aan te raden om in dit gebied in detail te kijken naar de verschillen tussen de modellen beginnend met 3D modellering en de afwijkingen ten opzichte van beschikbare metingen.

5 Referenties

- Huismans, Y. (2016). *Systeemanalyse Rijn-Maasmonding analyse relaties noord- en zuidrand en gevoeligheid stuurknoppen. Deelproject Systeemanalyse en Slim Watermanagement*. Deltares rapport 1230077-001-ZWS-0010
- Kranenburg, W.M., Schueder, R. (2015). *OSR-simulaties voor zoutindringing in de Rijn-Maasmonding zomer 2003; Onderdeel KPP Waterkwaliteitsmodelschematisaties 2015*. Deltares rapport 1220070-000-ZKS-0029
- Mens, M. (2016). *Karakterisering van deelgebieden in de Rijn-Maasmonding naar type verziltingsproces*. Deltares memo 1230077-001-ZWS-0012 de dato 20 december 2016
- Schroevers, M. (2016). *Verdeling zouttransport bij splitsingspunt Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Oude Maas*. Deltares rapport 1220034-010-ZKS-0003
- Verbeek, M. (2015). *Tidal motion and salt dispersion at a channel junction*. Wageningen Universiteit Thesis Environmental Sciences, Hydrology and Quantative Water Management: http://www.wur.nl/en/Expertise-Services/Chair-groups/Environmental-Sciences/Hydrology-and-Quantitative-Water-Management-Group/MSc-theses_OLD.htm
- Van der Wijk, R.M., Fujisaki, A. (2016). *Afvoervalidatie Rijnmaasmonding; Vergelijking tussen ADCP metingen en WAQUA en SOBEK simulaties*. Deltares rapport 1230071-004-ZWS-0028
- Zijl, F., Kerkhoven, D., Visser, A.Z., van der Kaaij, T. (2011). *WAQUA-model Rijnmaasmonding; Modelopzet, kalibratie en verificatie*. Deltares rapport 1202199-005-ZKS-0035
- Zijl, F., Kuijper, C., Schroevers, M., Verlaan, M. (2014). *Advies 3D model Eurogeul, Maasgeul, RijnMaasmonding; 3D model voor navigatie en zoutindringing*. Deltares rapport 1209587-000-ZKS-0004

Kopie aan

Yann Friocourt, Sacha de Goederen en Ronald Struijk

B Noord-Zuid relaties

B.1 Rapport

**Systeemanalyse Rijn-Maasmonding:
analyse relaties noord- en zuidrand
en gevoeligheid stuurknoppen.**

Deelproject Systeemanalyse en Slim Watermanagement



**Systeemanalyse Rijn-Maasmonding:
analyse relaties noord- en zuidrand en
gevoeligheid stuurknoppen.**

Deelproject Systeemanalyse en Slim Watermanagement

Ymkje Huismans

1230077-001
1230080-007

Titel

Systeemanalyse Rijn-Maasmonding: analyse relaties noord- en zuidrand en gevoeligheid stuurknoppen.

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Neeltje Kielen (WVL), Herman Haas (WVL)	1230077-001	1230077-001-ZWS-0010	73

Trefwoorden

Rijn-Maasmonding, zoutindringing, Haringvlietsluizen, Systeemwerking, Achterwaartse verzilting, Volkeraksluizen, stuw bij Hagestein, Slim Watermanagement, verzilting monding Hollandsche IJssel.

Samenvatting

De Rijn-Maasmonding (RMM) is het gebied waar Rijn en Maas uitmonden in zee en is gelegen in het dichtstbevolkte en meest intensief gebruikte deel van Nederland. Beschikbaarheid van zoetwater is daarom van groot belang voor diverse doeleinden. Voor het tegengaan van verzilting nu en in de toekomst is een gedegen systeembegrip nodig en kennis van het effect van de stuurknoppen in het systeem.

Hoewel verziltingsprocessen langs de noord- en zuidrand van de RMM vaak apart van elkaar beschouwd worden, zijn deze in werkelijkheid vaak sterk gekoppeld. In dit onderzoek worden deze noord-zuidrelaties in kaart gebracht en toegepast. Op hoofdlijnen heeft dit tot de volgende resultaten geleid:

1. De algemene systeemwerking ten aanzien van de noord-zuidrelaties is in kaart gebracht.
2. De huidige vuistregel voor het voorspellen van achterwaartse verzilting uit het Handboek Waterwacht (gebaseerd op de HL-parameter en de Bovenrijnafvoer) is gevalideerd. Op basis van deze validatie en de in dit project verkregen systeemkennis is een nieuwe vuistregel afgeleid, welke gebaseerd is op de gemiddelde waterstandsverschillen tussen de noord- en de zuidrand over twee getijden. Deze vuistregel geeft aanzienlijk betere voorspellingen.
3. Het effect van de Haringvlietsluizen op de waterbeweging en zoutverspreiding is in kaart gebracht aan de hand van de systeemkennis en bestaande berekeningen. Hierbij is zowel de eb- als de vloedopening geëvalueerd. Hieruit volgt dat een grotere ebopening zorgt voor hogere zoutconcentraties aan de noordrand, grotere kans op achterwaartse verzilting en minder zout aan de zuidrand. Een grotere vloedopening zorgt voor het omgekeerde effect. De bestudeerde relaties zijn daarbij niet-lineair. Bij het verder openen van zowel de eb- als de vloedopening kunnen de niet-lineaire relaties soms voor onverwachte effecten zorgen. Tot slot is het effect van het toekomstige beheer ("de Kier") op de achterwaartse verzilting geëvalueerd.
4. De werking van de andere stuurknoppen in het systeem (Volkeraksluizen en de stuw bij Hagestein) voor het tegengaan van verzilting van de monding Hollandsche IJssel is geanalyseerd met behulp van numerieke 1D berekeningen. Hieruit volgt dat het stopzetten van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer (via Volkeraksluizen) tot grotere afname zorgt van de chlorideconcentraties langs de noordrand dan het in gelijke mate vergroten van de afvoer door de Lek (via de stuw bij Hagestein) ten koste van de afvoer van de Waal. Bij het stopzetten van de onttrekking duurt het echter meerdere dagen voor het effect merkbaar wordt. Bij het vergroten van de afvoer over de Lek is het effect al na 1 à 2 dagen merkbaar.
5. Op basis van bovenstaande bevindingen is het handelingsperspectief aangescherpt. Hierin staat beschreven wanneer welke stuurknop kan worden ingezet.

Referenties

KPP Slim Watermanagement, KPP Systeemanalyse Rijn-Maasmonding

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	nov. 2016	Ymkje Huismans		Theo van der Kaaij Kees Kuijper		Gerard Blom	

Status

definitief

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel	2
1.3	Organisatie	2
1.4	Leeswijzer	3
2	Noord-Zuidrelaties	5
2.1	Achtergrond	5
2.2	Verzilting noordrand	5
2.3	Verzilting zuidrand	5
2.3.1	Achterwaartse verzilting	5
2.3.2	Zoutopslag in geulen en nalevering	8
2.3.3	Verzilting zuidrand via Haringvlietsluizen (toekomst)	8
3	Achterwaartse verzilting	9
3.1	Achtergrond	9
3.2	Verziltingstypologieën verzilting zuidrand	9
3.3	Historische gebeurtenissen van achterwaartse verzilting	10
3.4	Vuistregel handboek waterwacht	11
3.5	Verkennde analyse nieuwe vuistregel optreden Achterwaartse verzilting	12
3.5.1	Theorie	12
3.5.2	Methode	13
3.5.3	Resultaat	13
3.6	Discussie, conclusies en aanbevelingen	14
3.6.1	Conclusie	14
3.6.2	Discussie	15
3.6.3	Aanbevelingen	16
4	Stuurknop Haringvlietsluizen	17
4.1	Achtergrond	17
4.2	Methode	18
4.3	Systeemwerking Haringvlietsluizen	20
4.3.1	Grotere ebopening	20
4.3.2	Grotere vloedopening	20
4.3.3	Grotere eb-vloed opening	22
4.3.4	Van LPH'84 naar de Kier	25
4.4	Haringvlietsluizen als stuurknop	27
5	Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein	31
5.1	Achtergrond	31
5.2	Methode	32
5.3	Effect stopzetten onttrekking naar Volkerak-Zoommeer	33
5.3.1	Effect op restdebieten	33
5.3.2	Effect op zout	35
5.4	Effect afvoervertrekking Waal naar Lek	38
5.4.1	Effect op restdebieten	38
5.4.2	Effect op zout	40

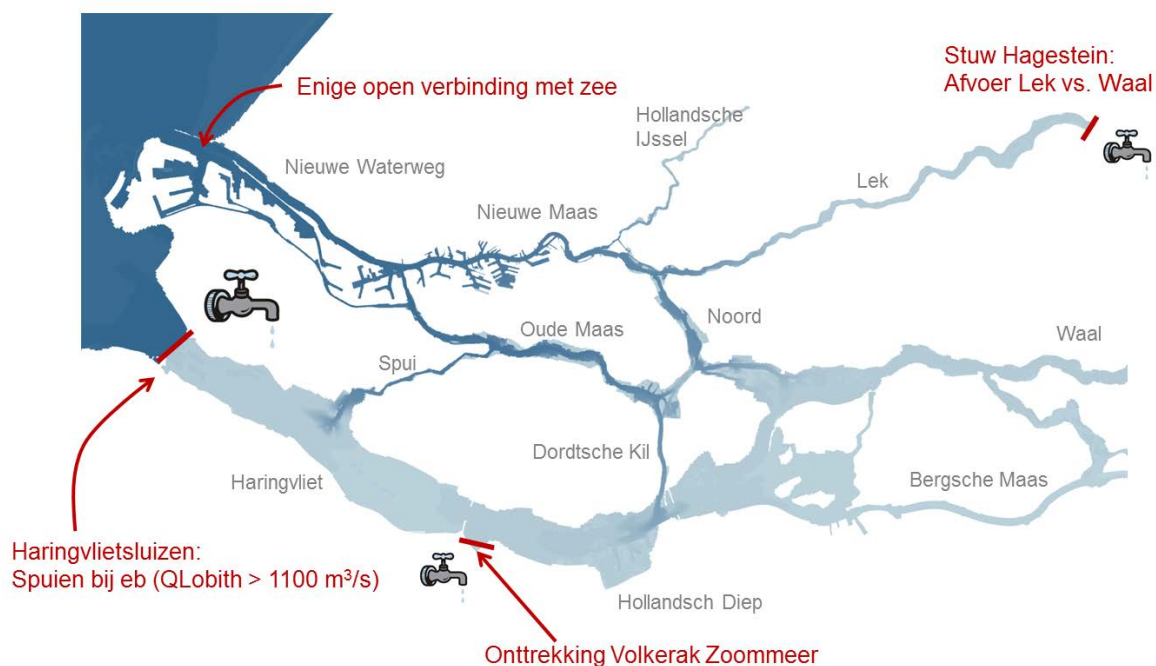
5.5	Discussie	41
5.6	Synthese en toepasbaarheid van de resultaten	43
5.7	Aanbevelingen	45
6	Handelingsperspectief	47
6.1	Overzicht	47
6.2	Verziltling monding Hollandsche IJssel	48
6.3	Tegengaan achterwaartse verziltling	50
6.4	Ontziltling Haringvliet	51
7	Conclusies en Aanbevelingen	53
7.1	Systeembeschouwing	53
7.2	Vuistregel achterwaartse verziltling	53
7.3	Stuurknop Haringvlietsluizen	54
7.4	Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein	55
7.5	Redeneerlijn/ Handelingsperspectief	55
7.6	Aanbevelingen op een rij:	55
8	Referenties	57
 Bijlage(n)		
A	Tabellen achterwaartse verziltling en uitgebreide vuistregel	A-1
B	Matlab code voor nieuwe vuistregel achterwaartse verziltling	B-1
C	Details validatie vuistregels	C-1
D	Model	D-1

1 Introductie

1.1 Achtergrond

De Rijn-Maasmonding is het gebied waar Rijn en Maas uitmonden in zee en is gelegen in het dichtst bevolkte en meest intensief gebruikte deel van Nederland, zie Figuur 1.1. Beschikbaarheid van zoetwater is van groot belang voor drinkwater, landbouw, industrie en de waterhuishouding in de polders. Sinds de aanleg van de Haringvlietsluizen in 1970 heeft het gebied slechts één open verbinding met zee, de Nieuwe Waterweg. Zout komt daardoor via de noordrand het gebied binnen en bereikt slechts bij uitzonderlijke omstandigheden de zuidrand.

De verwachting is dat in de toekomst de zoutindringing onder invloed van diverse processen en ingrepen zal toenemen of veranderen. Voorbeelden zijn de zeespiegelstijging en extremere (lage) rivierafvoeren (Klijn et al. 2012), de verdieping Nieuwe Waterweg (Hydrologic 2015b; van Leeuwen 2015; van den Boogaard 2015), het gedeeltelijk openen van de Haringvlietsluizen bij vloed (Rijkswaterstaat 1998; de Goederen et al. 2006) en de doorgaande rivierbodemerisatie (Huismans 2013).



Figuur 1.1 Overzichtskartaal Rijn-Maasmonding, met de verschillende riviertakken in grijs en enkele belangrijke locaties in rood. Hierbij vallen de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel Lek en Noord onder de noordrand en de overige takken onder de zuidrand.

In blauwschakeringen de zoutconcentratie (hoe donkerder hoe zouter) uit een 3D modelberekening van het najaar 2011, waarbij zout via de noordrand de zuidrand kon bereiken, zogenaamde achterwaartse verzilting.

1.2 Doel

Voor het tegengaan van externe verzilting¹ nu en in de toekomst is een gedegen systeembegrip nodig en kennis van het effect van de stuurknoppen in het systeem. Omdat de waterbeweging en zoutindringing langs de noord- en zuidrand van de Rijn-Maasmonding sterk gekoppeld zijn, is een gedegen begrip van deze relatie hierin essentieel. Doel van deze studie is daarmee tweeledig:

Inzichten in de Noord-Zuidrelaties:

Doel van dit onderdeel is om op basis van bestaande literatuur en aanvullende analyses deze ingewikkelde relaties beter in de vingers te krijgen en op eenvoudige manier te presenteren.

Voorbeelden van deze noord-zuidrelaties zijn:

- Achterwaartse verzilting: hierbij bereikt zout de zuidrand via de noordrand, vaak tijdens een periode van windopzet.
- Verzilting noordrand: hiervoor is het netto zeewaartse debiet op de Nieuwe Waterweg/ Nieuwe Maas zeer bepalend, welke mede wordt beïnvloedt door de grootte van de opening van de Haringvlietsluizen.

Werking van de stuurknoppen van het hoofdwatersysteem:

Het doel van dit onderdeel is om op basis van de systeemkennis over de noord-zuidrelaties en aanvullende berekeningen inzicht te krijgen in de werking van de drie stuurknoppen van het hoofdwatersysteem ten aanzien van verzilting: de Haringvlietsluizen ("hoofdkraan van Nederland"), de stuw bij Hagestein en de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer.

1.3 Organisatie

In dit project zijn de resultaten van deelprojecten gecombineerd, omdat deze een sterke relatie met elkaar hebben:

Systeemanalyse Rijn-Maasmonding, deelproject Noord-Zuidrelaties

Binnen dit onderdeel zijn de volgende vragen onderzocht:

1. Onder welke omstandigheden (zeewaterstand, windopzet, rivierafvoer) treedt achterwaartse verzilting op?
2. Hoe beïnvloedt de opening van de Haringvlietsluizen de waterstanden en debietverdeling in de Rijn-Maasmonding en daarmee de zoutverspreiding onder verschillende omstandigheden?
3. Hoe kunnen voorwaartse verzilting op de noordrand en achterwaartse verzilting op de zuidrand beïnvloed worden door het stuurprogramma van de Haringvlietsluizen?

Dit is gedaan op basis van literatuurstudie, data-analyse en aanvullende analyses van bestaande berekeningen. Belangrijk aspect van dit onderdeel was het inzichtelijk maken van de complexe relaties. Bijbehorende Powerpoint hiervoor is apart opgeleverd aan RWS.

¹ Onder verzilting verstaan we de situatie waarbij de chlorideconcentraties dusdanig hoog worden dat deze een belemmering vormen voor het gebruik (zoals voor drinkwater, de landbouw, en de waterhuishouding in de polders). In de diverse waterakkoorden zijn de verziltingscriteria per gebied gekwantificeerd.

Slim Watermanagement (SWM), deelproject Rijn-Maasmonding

Binnen dit onderdeel is op basis van 1D-berekeningen en literatuurstudie het effect van de twee kleinere stuurknoppen van het hoofwatersysteem op de verzilting langs de noordrand onderzocht. De volgende twee stuurknoppen zijn hierbij aan bod gekomen:

- Volkeraksluizen
- Stuw bij Hagestein voor regulatie debietverdeling Lek versus Waal.

Daarnaast is deelgenomen aan twee workshops van Slim Watermanagement, waarin Waterschappen, Rijkswaterstaat en drinkwaterbedrijven gezamenlijk tot een optimaal beheer van het gebied proberen te komen.

In de leeswijzer wordt aangeduid wat onder welk project valt.

1.4 Leeswijzer

<i>Hoofdstuk</i>	<i>Omschrijving</i>
1 Introductie	Omschrijving achtergrond, doel en organisatie van het project
2 Noord-Zuidrelaties	Definitie en inzicht in algemene werking noord-zuidrelaties <i>Methode: Literatuurstudie en aanvullende analyses</i>
3 Achterwaartse Verzilting	Analyse van opgetreden situaties van achterwaartse verzilting en verbeteren vuistregel voor de voorspelling <i>Methode: Literatuurstudie en data-analyse</i>
4 Stuurknop Haringvlietssluisen	Systematische analyse van hoe de vloed- en ebopening de waterbeweging en zoutverspreiding in het gebied sturen <i>Methode: Literatuurstudie en analyse bestaande berekeningen</i>
5 Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein	Analyse van de werking van de Volkeraksluizen (doorspoeling Volkerak-Zoommeer met water uit het Hollandsch Diep) en de stuw bij Hagestein (afvoervertrekking Waal naar Lek) voor het tegengaan van verzilting aan de noordrand. <i>Methode: numerieke 1D berekeningen met SOBEK</i>
6 Redeneerlijn	Aanscherping redeneerlijn: welke stuurknop kan wanneer worden ingezet. <i>Methode: op basis van hoofdstukken 4 en 5</i>
7 Conclusies en aanbevelingen	

Kleuren:

- onderdeel van SWM & Systeemanalyse
- onderdeel van Systeemanalyse
- onderdeel van SWM

2 Noord-Zuidrelaties

2.1 Achtergrond

Onder noord-zuidrelaties verstaan we het volgende:

“Hoe de zoutconcentraties aan de zuidrand beïnvloed worden door condities aan de noordrand en vice versa”

Voor kennis van verzilting in het systeem en de werking van de stuurknoppen is een gedegen begrip van de relatie tussen de noord- en de zuidrand essentieel. In dit hoofdstuk geven we op basis van literatuur en een systeembeschuwing inzicht in de algemene werking van de noord-zuidrelaties.

2.2 Verzilting noordrand

Zout vanuit zee komt het systeem binnen via de noordrand. Hoever het zout kan indringen wordt bepaald door de condities op zee en op de rivier. Aan de zee kant zorgen windopzet en hogere zoutconcentraties voor een grotere indringingslengte. Het effect van het getij is tweeledig. Enerzijds neemt met een grotere getijbeweging de afstand waarover zout kan bewegen toe en daarmee de maximale indringingslengte, anderzijds vindt er meer menging plaats waardoor de gemiddelde indringingslengte afneemt. Aan de rivierkant zorgt het rivierdebiet voor tegendruk. Bij lage rivierafvoeren kan zout dus verder indringen. Ook zijn bij lage rivierafvoeren de zoutconcentraties op de rivier verhoogd, waardoor de achtergrondconcentraties hoger zijn. Relaties hiervoor worden gegeven in Kranenburg (2015), zie ook Bijlage D.

Verzilting van de noordrand (Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en Lek) treedt met name op wanneer de rivierafvoer laag is, er stormopzet is of er sprake is van een combinatie van beide. Meer details hierover zijn te vinden in (K. Kuijper 2015; K. Kuijper 2016; Mens 2016).

De zuidrand beïnvloedt verzilting aan de noordrand met name via de stuurknoppen in het systeem. Het spuidebiet door de Haringvlietsluizen en de onttrekking richting Volkerak-Zoommeer beïnvloeden het restdebiet dat het systeem via de noordrand verlaat en daarmee de tegendruk die het systeem kan bieden aan het zout vanuit zee. Hierover volgt meer in Hoofdstuk 4 en 5.

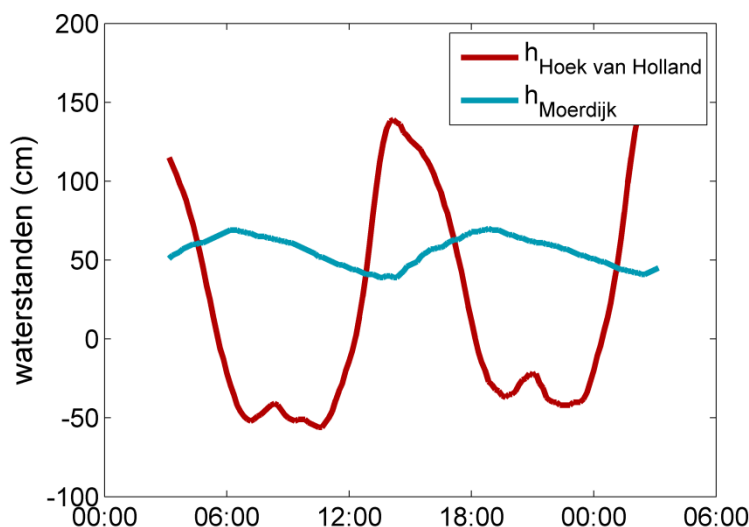
2.3 Verzilting zuidrand

Voor de verzilting aan de zuidrand (Haringvliet, Hollandsch Diep, Spui en Dordtsche Kil) maken we onderscheid in drie processen die hieronder per proces behandeld worden.

2.3.1 Achterwaartse verzilting

Door sluiting van de Haringvlietsluizen is de zuidrand overwegend zoet. Zout vanuit zee dringt alleen binnen via lekverliezen van de Haringvlietsluizen en de naastgelegen scheepvaartsluis van Stellingdam of in extreme condities via de noordrand. Dit laatste noemen we achterwaartse verzilting. Waar aan de noordrand het rivierdebiet en stormopzet maatgevend zijn voor het optreden van verzilting zijn het bij achterwaartse verzilting de waterstandsverschillen tussen de noord- en de zuidrand, welke sinds de sluiting van de Haringvlietsluizen sterk veranderd zijn. Voor sluiting van de Haringvlietsluizen waren de

waterstanden aan de noord- en de zuidrand vergelijkbaar, omdat beide in directe verbinding stonden met zee. Sinds de sluiting vult en ledigt de zuidrand zich via de noordrand. Als resultaat hiervan is het getij op de zuidrand gering (getijslag van typisch 30 cm) en zijn de waterstanden nagenoeg uit fase met de noordrand, zie Figuur 2.1.

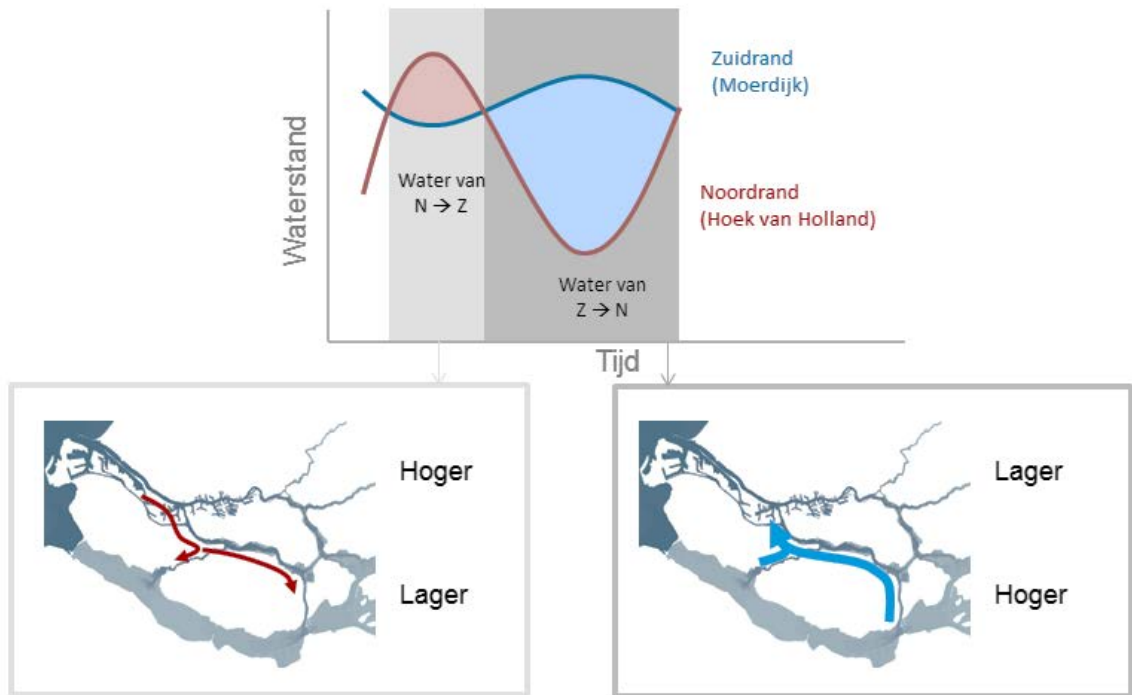


Figuur 2.1 Typische waterstanden aan de noord- en de zuidrand (voorbeeld van 2-3 juli 2004, data uit Waterbase).

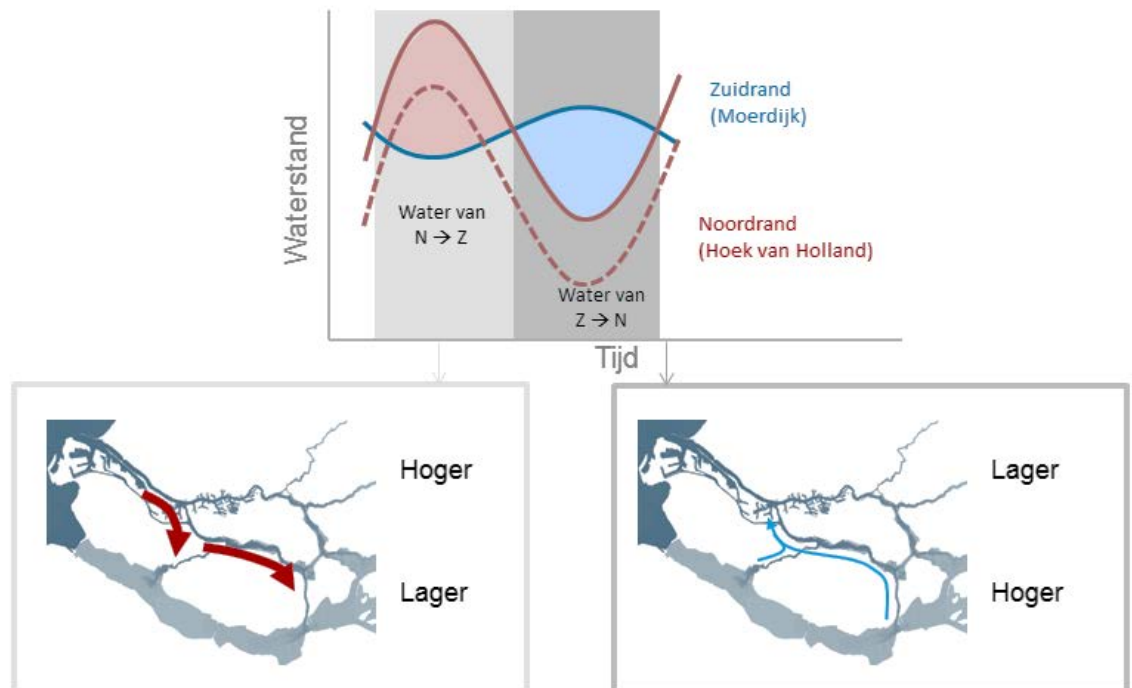
In Figuur 2.2 is geïllustreerd welk effect dit heeft op de waterbeweging en daarmee de zoutbeweging tussen de noord- en de zuidrand. Tijdens de eerste fase van het getij, wanneer de waterstand aan de noordrand hoger ligt dan de zuidrand, stromen water en zout van noord naar zuid. Tijdens de tweede fase van het getij daalt de waterstand van de noordrand onder de waterstand van de zuidrand en bewegen water en zout terug van de zuidrand naar noordrand. Omdat onder normale condities de eerste fase korter duurt en kleinere waterstandverschillen heeft dan de tweede, stroomt water netto naar het noorden en kan zout maar in beperkte mate indringen richting het zuiden. Tijdens extreme condities, bijvoorbeeld bij windopzet, stijgen de waterstanden aan de noordrand ten opzichte van de zuidrand, dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.3. Als resultaat hiervan is de periode waarin water van noord naar zuid stroomt langer geworden en zijn de waterstandverschillen vergroot. Zout zal dus verder het gebied in dringen en kan mogelijk de zuidrand bereiken. De periode waarin water weer terugstroomt van zuid naar noord is verkort en bovendien zijn de waterstandverschillen verkleind ten opzichte van de normale situatie. Zout stroomt dus minder verder terug naar de noordrand. Dit zijn de typische condities waaronder achterwaartse verzilting op kan treden: zout kan gedurende de eerste fase van het getij de zuidrand bereiken en stroomt gedurende de tweede fase van het getij in mindere mate terug. In extreme gevallen kan het zelfs voorkomen dat de waterstanden bij Moerdijk altijd lager liggen dan die van Hoek van Holland. In dat geval stroomt zout zelfs helemaal niet terug (van Spijk 2006).

Tot slot speelt de buffercapaciteit van het Haringvliet en Hollandsch Diep een rol bij het optreden van achterwaartse verzilting. Bij windopzet aan de noordrand zal er een groot verschil in waterstanden tussen de noord- en de zuidrand optreden. Omdat het Hollandsch Diep en Haringvliet groot zijn, reageren de waterstanden hier met een vertraging. Het duurt dus even voordat ook hier de waterstanden zullen toenemen door de windopzet aan de

noordrand. In een volgend getij met dezelfde opzet is het waterstandsverschil daarom kleiner en de "verziltingskracht" daarmee ook.



Figuur 2.2 Waterbeweging tussen noord en zuid onder normale condities



Figuur 2.3 Waterbeweging tussen noord en zuid onder extreme condities, zoals bijvoorbeeld peilopzet ten gevolge van wind

2.3.2 Zoutopslag in geulen en nalevering

Als zout eenmaal de zuidrand heeft bereikt kan zout terecht komen in de diepe geulen, Afhankelijke van de condities zal de ontzilting op verschillende wijze plaatsvinden:

- De rivierafvoeren zijn hoog genoeg, zodat er gespuid wordt door de Haringvlietsluizen. Zo kan de zuidrand via de sluisen ontzilten. Afhankelijk van de mate van gelaagdheid van het systeem en de stroomsnelheden, zal zout nog enige tijd achterblijven in de geulen of snel uitspoelen.
- De rivierafvoeren zijn zodanig laag dat er niet gespuid wordt. Zout zakt uit in de diepe geulen en kan daar, afhankelijk van de windcondities/ mate van stratificatie, lang in achterblijven. Bij elk getij zal een klein beetje zout vrijkomen en via het Spui weer terug naar de noordrand stromen, dit noemen we nalevering.

Details over zoutopslag in diepe geulen worden nader bestudeerd in deelproject "Functioneren voormalige getijgeulen m.b.t. zoutretentie" van de systeemanalyse (Tiessen 2016).

2.3.3 Verzilting zuidrand via Haringvlietsluizen (toekomst)

In 2018 zullen de sluisen gedeeltelijk open gaan bij vloed ("Kierbesluit"). Het Haringvliet zal dan ook deels verzilten. Afgesproken is dat zout hierbij niet verder komt dan de denkbeeldige lijn Spui-Middelharnis. Meer hierover volgt in Hoofdstuk 4.

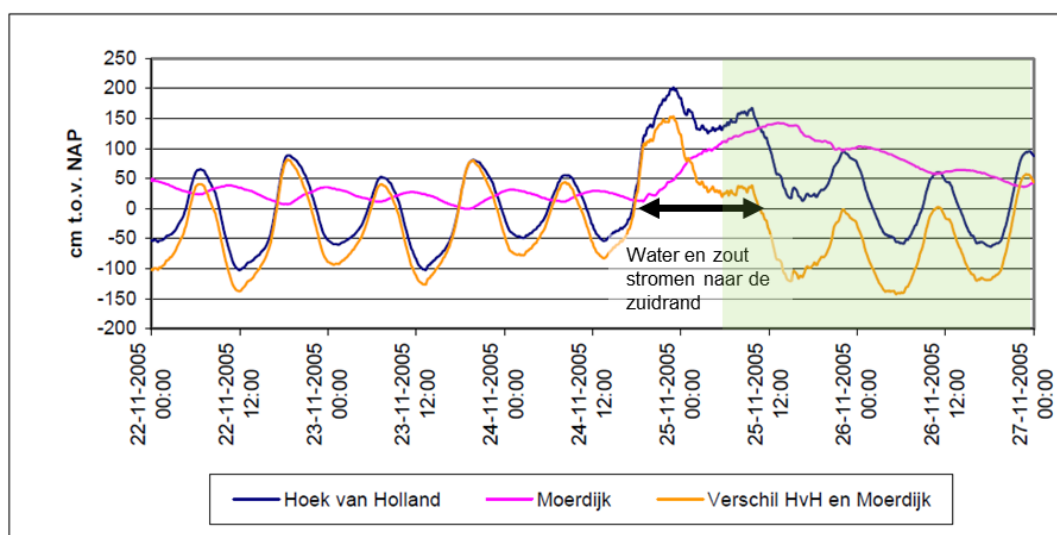
3 Achterwaartse verzilting

3.1 Achtergrond

In extreme gevallen kunnen bij achterwaartse verzilting het Hollandsch Diep en Haringvliet maandenlang verzilt blijven. Een voorbeeld hiervan is de achterwaartse verzilting van november 2005. In Figuur 3.1 is te zien dat de waterstanden bij Hoek van Holland bij vloed veel hoger lagen dan die in Moerdijk, zodat zout ver kon indringen. Tijdens eb bleven de waterstanden bij Hoek van Holland hoger, waardoor zout niet kon worden teruggedrongen en achterbleef in het Haringvliet. Door de langdurige lage rivierafvoeren was het moeilijk om extra te spuien via de Haringvlietsluizen en was de aanvoer van het verse rivierwater relatief zout, tot boven de 150 mg Cl/l. Zodoende bleef de zuidrand maandenlang verzilt, met als gevolg een langdurige innamestop bij enkele zoetwaterinnamepunten (van Spijk 2006).

Hoewel een achterwaartse verzilting van deze mate tot nog toe maar 1 keer is voorgekomen, kan een minder ernstige achterwaartse verzilting ook tot problemen of beperkingen leiden voor de zoetwaterinname, zoals de achterwaartse verzilting tijdens de Sint Nicolaasstorm in 2013 (De Vries 2014). Daarnaast wordt verwacht dat het optreden van achterwaartse verzilting vaker zal voorkomen, door zeespiegelstijging, frequentere stormen, lagere rivierafvoeren en de rivierbodemosie in de Oude Maas en het Spui, welke conform huidige trend in 2050 enkele meters lager zullen liggen in 2050 (Huisman 2013; Becker 2015).

Om de achterwaartse verzilting beter te begrijpen en te voorspellen is in dit hoofdstuk gekeken naar de opgetreden situaties van achterwaartse verzilting en geanalyseerd hoe goed de huidige vuistregel voor het optreden van achterwaartse verzilting werkt. Tot slot wordt op basis van de systeemkennis een eerste aanzet gegeven voor het opstellen van een nieuwe vuistregel.



Figuur 3.1 Opgetreden waterstandsverloop Hoek van Holland en Moerdijk 22 t/m 26 november 2005. Groene vlak geeft periode van achterwaartse verzilting weer. Bron: Van Spijk (2006)

3.2 Verziltingstypologieën verzilting zuidrand

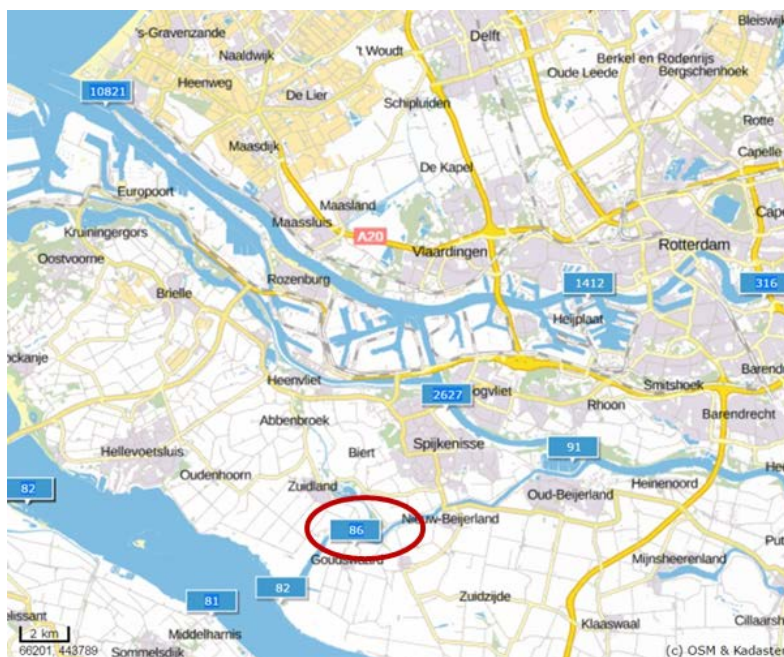
In eerdere studies zijn op basis van empirie de volgende verschijningsvormen van achterwaartse verzilting geduid (De Vries 2014):

1. Kortdurende maar extreme verzilting (enkele uren tot enkele getijperioden, tot $>> 500$ mg Cl/l). Deze 'achterwaartse' verzilting wordt veroorzaakt doordat de getijgolf (of preciezer: het getijdebiet) via Nieuwe Waterweg en Oude Maas ook doordringt tot in het Spui en zelfs tot in het Haringvliet. Deze verzilting ('type 1') komt vrijwel uitsluitend voor in najaar en winter door de combinatie van lage rivierafvoer en hoge zeewaterstand door windopzet.
2. Langdurige en forse verzilting (weken - maanden, 200-500 mg Cl/l). Deze verzilting wordt veroorzaakt doordat als na-ijleffect van type 1 verzilting een hoeveelheid zout water achterblijft in de bodemwaterlaag van het Haringvliet, die in de weken - maanden daarna via het Spui weer wordt afgevoerd. En een klein beetje zeewater geeft al een forse verzilting. Voor bijvoorbeeld een verhoging met 150-200 mg Cl/l boven het achtergrondniveau van de rivier is bijmenging van slechts 1% zeewater nodig. Ook deze verzilting ('type 2') komt vrijwel uitsluitend voor in najaar en winter, en wordt altijd voorafgegaan door extreme achterwaartse verzilting.
3. Zeer langdurige maar geringe verzilting ($>> 1$ maand, 150-200 mg Cl/l). Deze verzilting wordt veroorzaakt doordat bij langdurig lage rivierafvoeren gaandeweg de chloriniteit van het rivierwater steeds verder oploopt. Ook dit derde type verzilting zal vooral in najaar en winter gaan optreden.

In dit onderzoek richten we ons op type 1 en 2.

3.3 Historische gebeurtenissen van achterwaartse verzilting

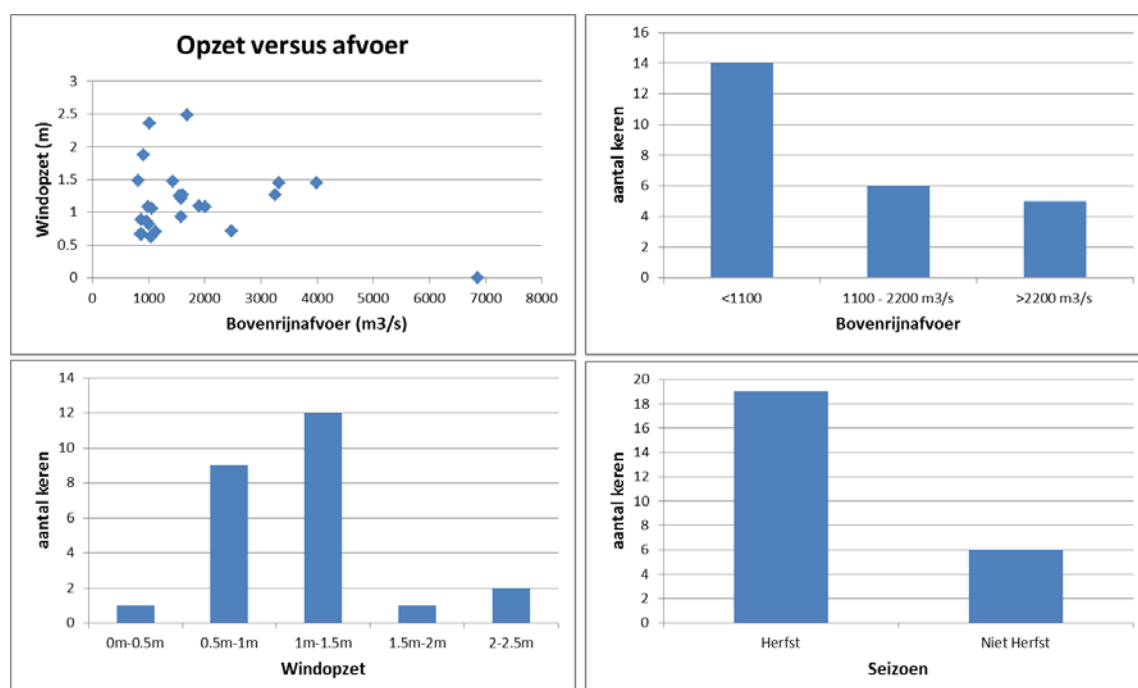
Uit een overzicht van Rijkswaterstaat (van Spijk 2006), blijkt dat in de periode 1990-2005 achterwaartse verzilting 25 keer is opgetreden, zie tabellen in Bijlage A². Als definitie is hierbij gehanteerd dat de chlorideconcentratie bij Bernisse meer dan 500 mg Cl/l bedraagt. De locatie van het meetpunt Bernisse is weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Huidige zoutmeetlocaties van Rijkswaterstaat. De locaties Bernisse is met rood gemarkeerd. Bron: <https://www.rijkswaterstaat.nl/kaarten/zoutgehalte.aspx>

² NB. uit latere analyse binnen een ander project blijkt dat deze tabel mogelijk niet compleet is (Mens 2016).

In Figuur 3.3 worden enkele statistieken gegeven ten aanzien van het optreden van de achterwaartse verzilting. Deze zijn afgeleid van de waarden uit de tabellen van Rijkswaterstaat (Bijlage A). Hieruit blijkt dat achterwaartse verzilting vaker voorkomt bij lage rivierafvoer, maar dat dit geen voorwaarde is. Ook bij bovengemiddelde Bovenrijnafvoeren ($>2200 \text{ m}^3/\text{s}$) kan achterwaartse verzilting optreden. Windopzet lijkt wel degelijk een voorwaarde, slechts in 1 geval treedt achterwaartse verzilting op bij 0 m windopzet, in alle overige gevallen is de windopzet minimaal 0.5 m. Omdat windopzet een belangrijke rol speelt blijkt bovendien dat achterwaartse verzilting met name in de herfst (september – december) optreedt.



Figuur 3.3 Enkele statistieken ten aanzien van de condities waarbij achterwaartse verzilting voor is gekomen in de periode 1990-2005.

3.4 Vuistregel handboek waterwacht

In het handboek waterwacht is de volgende vuistregel opgenomen³:

Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:

HL (Hoog water Hoek van Holland - Laag water Moerdijk) > 1 m

&

$Q_{\text{Bovenrijn}} (\text{Afvoer bij Lobith}) < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$

[Handboek Waterwacht]

³ Er is een uitgebreidere vuistregel beschikbaar (zie Bijlage A) welke bestaat uit een viertal voorwaarden. Omdat er geen logische "en" of "of" clausules bij horen, is deze vuistregel lastig te valideren of toe te passen.

Hierbij zijn de HL-parameter en de rivierafvoer de belangrijkste indicatoren. De theorie hierachter is dat de HL-parameter (het verschil tussen bijna gelijktijdig optredende hoge waterstand bij Hoek van Holland (H) en lage waterstand bij Moerdijk (L)) bepalend is voor hoe ver water en zout van noord naar zuid kan stromen, zie ook §2.3.1 en dat de rivierafvoer bepalend is voor hoe ver zout vanuit zee kan indringen.

Bij toepassing van de huidige vuistregel op de opgetreden situaties van achterwaartse verzilting tussen 1990 en 2005, zoals gerapporteerd in de tabel in Bijlage A, kan gesteld worden dan in 15 van de 25 gevallen achterwaartse verzilting niet wordt voorspeld, omdat:

- $Q_{\text{Bovenrijn}} > 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ (14x),
- $HL < 1 \text{ m}$ (1x).

De beperkte voorspelling met de vuistregel kan gerelateerd worden aan de volgende aspecten:

1. waterstandsverschillen gedurende het hele getij bepalen hoe ver zout kan indringen en weer teruggedrongen kan worden, zie systeembeschrijving in §2.3.1. De waterstandsverschillen gedurende het hele getij zijn daarom maatgevend. Omdat de HL-parameter en rivierafvoeren slechts twee componenten zijn in het bepalen van deze waterstandsverschillen (ook het spuidebiet van de Haringvlietsluizen, de afvoer over de Maas en wind dragen bij), is voorspelling op basis van deze twee niet toereikend.
2. de mate waarin het systeem is “opgeladen”, met andere woorden hoever zout al is binnengedrongen voor aanvang van een extreme situatie.

3.5 Verkennende analyse nieuwe vuistregel optreden Achterwaartse verzilting

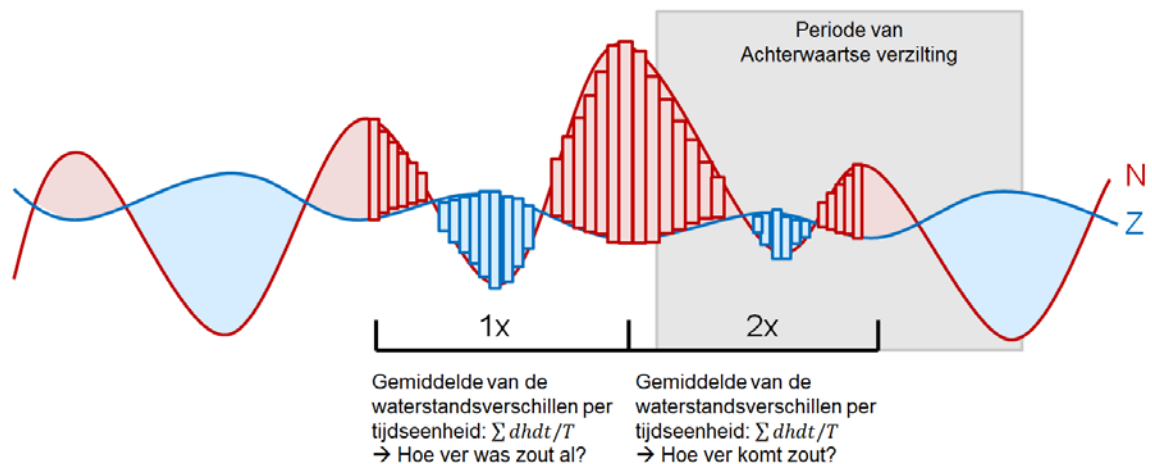
Op basis van de overwegingen uit §3.4 wordt in deze paragraaf een nieuwe parameter afgeleid en getest. Het gaat hierbij om een korte verkenning, met als doel om te bepalen of dit een kansrijke methode is. De parameter is dus nog niet getoetst op robuustheid en ook zijn bepaalde keuzes ingegeven door praktische aspecten van de implementatie, zoals de beschikbaarheid van informatie.

3.5.1 Theorie

Theoretisch zijn voor het optreden van achterwaartse verzilting de volgende twee parameters maatgevend:

- Aanvangssituatie: hoever is het zout al?
- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij (zie Figuur 2.3): hoe ver kan zout indringen tijdens vloed en hoever wordt het weer teruggebracht tijdens eb?

Door niet alleen de waterstandsverschillen van de huidige getijcyclus te nemen, maar ook die van de voorgaande cyclus, worden beide parameters ondervangen, zoals geïllustreerd in Figuur 3.4. De waterstandsverschillen van het voorgaande getij zijn een maat voor hoe ver zout gedurende het getij ervoor heeft kunnen komen en weer is teruggedrongen, dat wil zeggen de mate van oplading/ historie, de waterstandsverschillen van het huidige getij bepalen of zout daadwerkelijk Bernisse kan bereiken.



Figuur 3.4 Schematische weergave van waterstandsverschillen gedurende meerdere getijden en condities voor achterwaartse verzilting. Met de som van de waterstandsverschillen bedoelen we de integraal van de waterstandsverschillen, dat wil zeggen alle waterstandsverschillen maal de duur en gedeeld door de totale periode

3.5.2 Methode

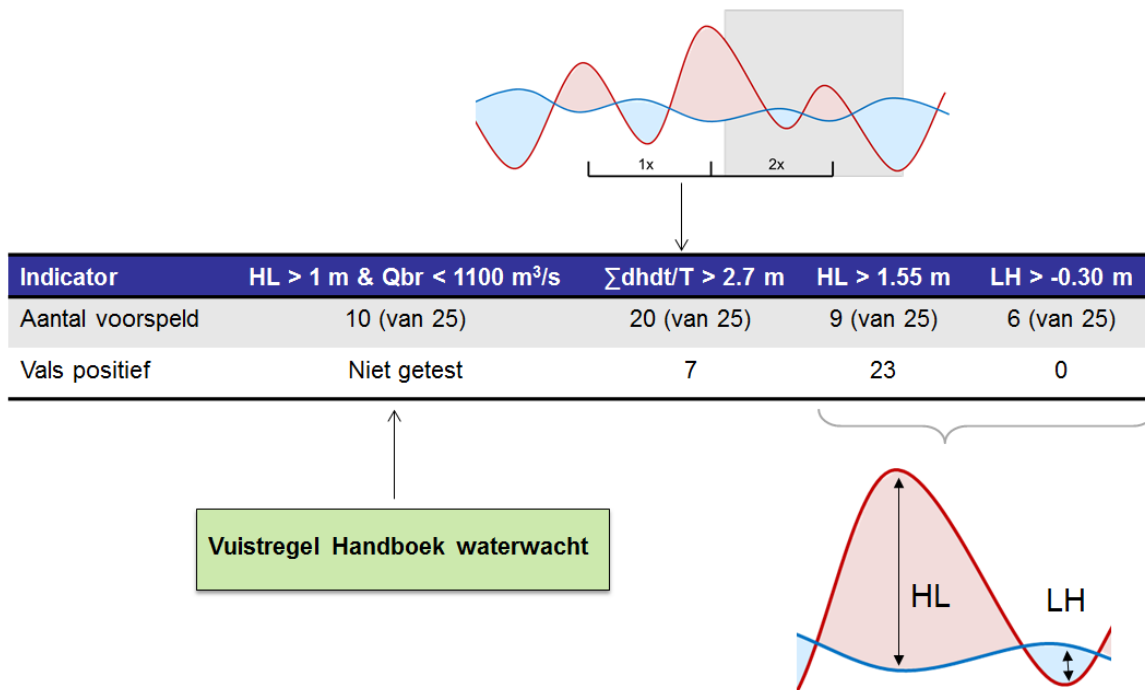
Voor het testen van de bovenstaande theorie is gebruik gemaakt van de waterstanden uit Waterbase voor Hoek van Holland en Moerdijk. Voor de situaties van achterwaartse verzilting is uitgegaan van de tabel uit Bijlage A, welke de situaties tussen 1990-2005 beschrijft. Vanwege het verkennende karakter van deze analyse is daarbij alleen gekeken of achterwaartse verzilting optrad en geen vergelijking gemaakt met de chlorideconcentraties. De beste verhouding tussen het gemiddelde van de waterstandsverschillen van de voorgaande getijcyclus (historie) en van de betreffende getijcyclus is verkregen op basis van uitproberen en kwam neer op 1x de voorgaande periode en 2x de huidige periode en voor een waarde van meer dan 2.7 m.

Op basis van de theorie zou het logisch zijn om als beginpunt het moment te kiezen waarop de waterstand aan de noordrand lager wordt dan de zuidrand, dan begint de volledige periode met eerst terugstroom naar de noordrand en daarna instroom naar de zuidrand. Omdat de waterstand bij Hoek van Holland niet altijd lager wordt dan de waterstand bij Moerdijk is dit punt niet altijd te vinden. Dit geldt met name voor situaties waarin achterwaartse verzilting optreedt, zie ook Figuur 3.1. Daarom is uitgegaan van het maximum bij Hoek van Holland, welke een veel eenduidigere definitie heeft, zie Figuur 3.4.

Voor overige details van de implementatie wordt naar de Matlab-code verwezen, welke in Bijlage B is toegevoegd.

3.5.3 Resultaat

Het resultaat is weergegeven in Figuur 3.4 en meer details worden gegeven in Bijlage C. Hieruit blijkt dat de nieuwe vuistregel, verkort aangeduid met $\sum dhdt/T > 2.7 m$, aanmerkelijk betere resultaten geeft dan de huidige vuistregel, 20 van de 25 situaties wordt correct voorspeld en er zijn slechts 7 vals positieven. Het lijkt er echter op dat zich in 2003 twee situaties van achterwaartse verzilting hebben voorgedaan die niet voorkwamen in de tabel uit Bijlage A. Indien dit klopt dan is het aantal correct voorspelde situaties 22 van de 27 en zijn er slechts 5 vals positieven.



Figuur 3.5 Resultaat nieuwe vuistregel, details achter de tabel worden gegeven in Bijlage C

Om een gevoel te krijgen voor de bruikbaarheid van de HL- en de LH-parameters zijn deze ook geëvalueerd. Omdat $HL > 1$ m, zeer veel vals positieve resultaten geeft is er een strengere norm gehanteerd. Met een norm van $HL > 1.55$ m worden slechts 9 van de 25 gebeurtenissen van achterwaartse verzilting voorspeld, terwijl het aantal vals positieven (23) hoog is. Met een norm van $LH > -0.3$ m treden er geen vals positieven op, maar worden slechts 6 gebeurtenissen van achterwaartse verzilting voorspeld. Met een lagere norm treden er wel vals positieven op. Uit bovenstaande kan geconcludeerd worden dat alleen HL of LH geen goede normen zijn en dat een $HL > 1$ m geregeld voorkomt. Of combinaties van HL en LH wel een goede maat kunnen zijn, eventueel gecombineerd met afvoeren, viel buiten deze korte verkennende analyse.

3.6 Discussie, conclusies en aanbevelingen

3.6.1 Conclusie

Op basis van de verkennende analyse blijkt dat voor het optreden van achterwaartse verzilting niet de combinatie van de rivierafvoer en de windopzet niet het meest bepalend is, maar gemiddelde waterstandverschillen gedurende meerdere getijperioden. De huidige vuistregel uit het handboek waterwacht heeft daarom een beperkte voorspelkracht. De nieuwe vuistregel die gebaseerd is op de gemiddelde waterstandverschillen gedurende twee getijperiodes lijkt kansrijk: de meeste gebeurtenissen worden voorspeld en het aantal vals positieven blijft beperkt. Omdat voorspellingen van waterstanden met enkele dagen vooruit redelijk betrouwbaar zijn, is de methode ook toe te passen in de praktijk. Men zou de vuistregelen hierbij op kunnen nemen in de operationele modellen, waarbij op basis van de voorspelde waterstanden ook de waarde voor de nieuwe vuistregel kan worden bepaald. Indien deze boven de 2.7 m komt kan er een waarschuwing worden afgegeven.

Tot slot kunnen de eerder gedefinieerde verziltingstypologieën (zie §3.2) worden aangescherpt met de in dit onderdeel verkregen systeemkennis ten aanzien van de condities waarbij achterwaartse verzilting optreedt.

3.6.2 Discussie

Vanwege het verkennende karakter zijn de volgende punten niet of beperkt getest:

- Keuze van de periode: van welk moment tot welk bepaal je het gemiddelde van de waterstanden in de tijd, van piek naar piek, van kentering naar kentering?
- Keuze voor lengte en "gewicht" voorgaande periode: deze is nu 1 getijcyclus met een gewicht van 1 ten opzichte van een gewicht van 2 voor de huidige periode. Er is niet uitgebreid onderzocht of dit de optimale verhouding is en de juiste lengte. Mogelijk zijn voor de mate van oplading meerdere voorgaande getijcycli beter, omdat de mate van oplading over een langere tijd wordt bepaald.
Dit zou onderzocht kunnen worden door de voorspelparameter te vergelijken met de gemeten chlorideconcentraties bij de Beerenplaat, Bernisse en Inloop Spui (zie ook volgende punt). Mogelijk dat hieruit blijkt dat de chlorideconcentraties bij Beerenplaat (enkele getijden voor aanvang van achterwaartse verzilting) een betere maat zijn voor de mate van oplading dan de waterstandsverschillen.
- Er is geen vergelijking gemaakt met de chlorideconcentraties, maar alleen gevalideerd op de perioden waarin volgens de tabel in Bijlage A achterwaartse verzilting optrad. Vergelijking met werkelijke chlorideconcentraties is nuttig, omdat gekeken kan worden naar de mate van correlatie tussen chlorideconcentratie en de waarde van de voorspelparameter. Bovendien zijn er aanwijzingen dat de tabel niet compleet is en daarmee een vertekend beeld geeft van het aantal opgetreden situaties van achterwaartse verzilting en daarmee het aantal positieven en vals positieven van de verschillende voorspelparameters.
- Voor de definitie van achterwaartse verzilting is uitgegaan van het optreden van chlorideconcentratie van meer dan 500 mg Cl/l bij Bernisse, conform eerder onderzoek (van Spijk 2006). Achterwaartse verzilting vormt pas een probleem als de concentraties langere tijd boven een bepaalde norm blijven bij Bernisse of als de zoutconcentraties in het Haringvliet te hoog worden.
- De voorspelparameter is nu gebaseerd op één limiet. Om het aantal vals positieven te beperken worden hierdoor sommige gebeurtenissen van achterwaartse verzilting gemist. Dit kan ondervangen worden door uit te gaan van meerdere limieten; bijvoorbeeld "verhoogde kans op achterwaartse verzilting" (limiet waarbij wel vals positieven optreden) en "zeer grote kans op achterwaartse verzilting" (limiet waarbij geen/nauwelijks vals positieven optreden).

Hoewel het op basis van de systeembeschouwing het meest logisch is om uit te gaan van de waterstandsverschillen gedurende meerdere getijperiodes, volgt hieronder een beschouwing van mogelijke alternatieven:

- Hoewel de waterstandverschillen eenvoudig te berekenen zijn, is een vuistregel idealiter gebaseerd op criteria waarvoor geen of slechts zeer beperkte berekening hoeft te worden uitgevoerd. Hierbij kan gedacht worden aan een combinatie tussen HL en LH voor meerdere getijden (combineren van HL en LH voor maar een getij levert geen bruikbare parameter op zoals blijkt uit huidige verkenning).
- Een combinatie van de Bovenrijnafvoer (zekere correlatie waterstanden aan de zuidrand), de windopzet (correlatie waterstanden aan de noordrand) en zoutconcentratie (historie) kan mogelijk ook tot een bruikbare parameter kan leiden. Daarbij zal bij een lage Bovenrijnafvoer weinig windopzet nodig zijn om zout ver het gebied in te laten dringen en bij een hoge Bovenrijnafvoer een hoge windopzet nodig zijn. Idem voor de relatie met de zoutconcentratie: is het gebied al "opgeladen" dan zijn minder lage debieten en minder hoge windopzet nodig om zout het hoekje om te laten gaan. Zo'n parameter zou dus uit een verhouding tussen deze drie eenheden bestaan. Deze optie is niet onderzocht, omdat deze complexer is dan uitgaan van

enkel de waterstandsverschillen en de waterstand aan de zuidrand niet alleen door de Bovenrijnafvoer wordt bepaald.

- In plaats van een vuistregel zou een voorspelling ook gebaseerd kunnen worden op berekeningen met het (operationele) SOBEK model. Uiteraard dient hiervoor eerst onderzocht te worden hoe goed SOBEK historische gebeurtenissen van achterwaartse verzilting weergeeft en hoeveel vals positieven er voorkomen.

3.6.3 Aanbevelingen

- Gebeurtenissen van achterwaartse verzilting aanvullen tot en met 2015 en nagaan of de tabel compleet is voor de periode 1990 tot en met 2005.
- Optimaliseren voorspelparameter op basis van de punten uit de discussie, gevolgd door een validatie op basis van een correlatie met de chlorideconcentraties.
- Aanscherping definitie van achterwaartse verzilting voor een nauwere aansluiting met de praktijk.
- Inbouwen vuistregel in het operationele model van de Rijn-Maasmonding. Op basis van de in het model voorspelde waterstanden kan de waarde voor de voorspelparameter worden berekend en kan bij dreigende verzilting door het model een waarschuwing worden gegeven.

4 Stuurknop Haringvlietsluizen

4.1 Achtergrond

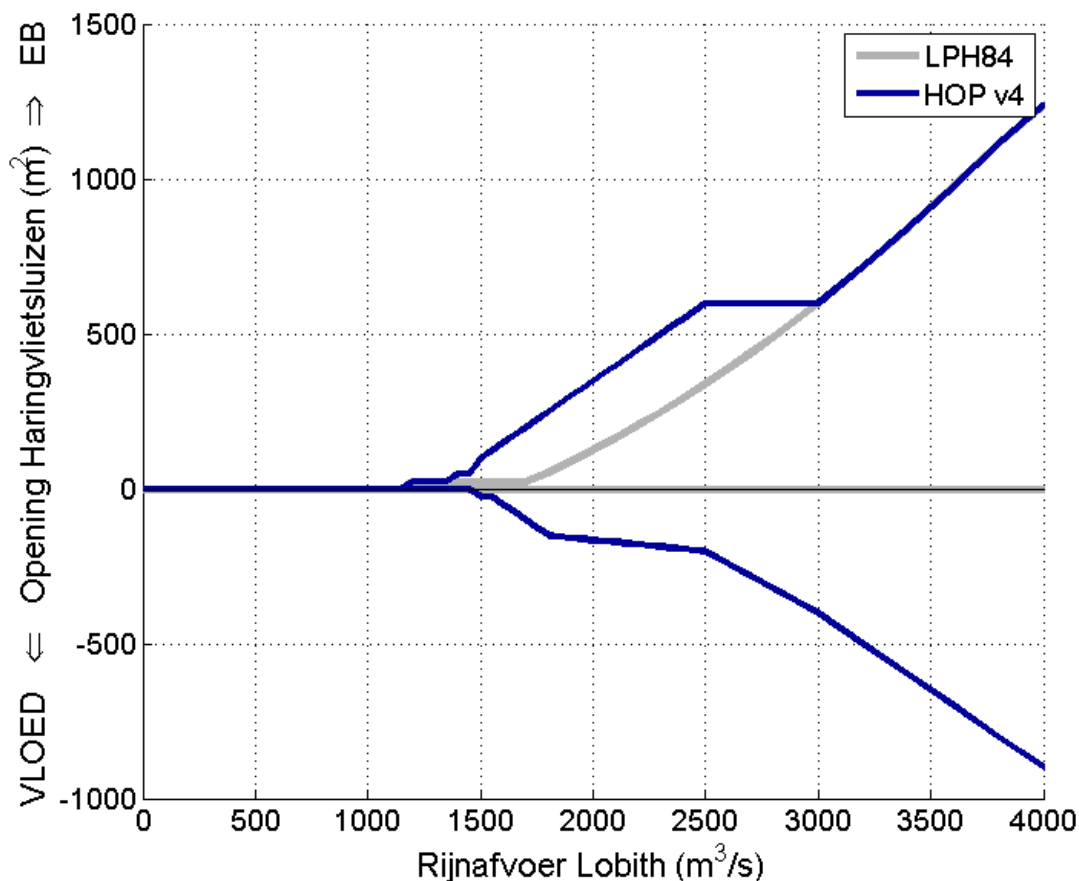
Door aanleg van de Haringvlietsluizen als onderdeel van de Deltawerken (zie Figuur 4.1), staat het Haringvliet niet langer in open verbinding met zee en is de zuidrand van de Rijn-Maasmonding zoet geworden. Zout bereikt de zuidrand alleen via de noordrand of via lekverliezen door de sluizen. Bij een Bovenrijnafvoer boven de 1100 m³/s worden tijdens eb de sluizen in beperkte mate opengezet (25 m²). Vanaf 1700 m³/s gaan de sluizen verder open waarbij de grootte van de opening gekoppeld is aan de afvoer. Dit operationeel beheer is vast gelegd in het LPH'84, het LozingsProgramma Haringvlietsluizen 1984, zie Figuur 4.2. De Haringvlietsluizen kunnen als grote regelstuurknop van de Rijn-Maasmonding worden beschouwd, omdat ze de waterstanden en debietverdeling reguleert. Afhankelijk van de opening kan dit over honderden kuubs per seconde gaan.

Om de visintrek te bevorderen zullen in 2018 de sluizen “op een kier gaan”. Dit houdt in dat bij vloed de sluizen in beperkte mate zullen openen. Hierbij is afgesproken dat de zuidrand voorbij de denkbeeldige lijn Spui Middelharnis niet mag verzilten, dat wil zeggen dat zoetwaterinnamepunten geen hinder mogen ondervinden van het nieuwe programma. Daarnaast is afgesproken dat de haven van Moerdijk bereikbaar blijft wat inhoudt dat de waterstanden op het Haringvliet zoveel mogelijk boven NAP dienen te blijven. Omdat berekeningen ten aanzien van zoutconcentraties op de zuidrand beperkte betrouwbaarheid hebben, is besloten het kieren via het “Lerend Implementeren” principe in te voeren. Dit houdt in dat de gedurende vijf jaar de opening van de Haringvlietsluizen stap voor stap vergroot zal worden en de zoutconcentraties gemonitord zullen worden. Het huidige LPH'84 en het kandidaat kierprogramma zijn weergegeven in Figuur 4.2.

Doel van dit hoofdstuk is om systeeminzicht te verkrijgen over het effect van de opening op de verschillende verziltingsprocessen, zowel voor de huidige als de toekomstige situatie. Deze kennis levert toe aan een handelingsperspectief voor verziltingsscenario's in de huidige situatie en aan het proces van het “Lerend Implementeren” in de toekomst.



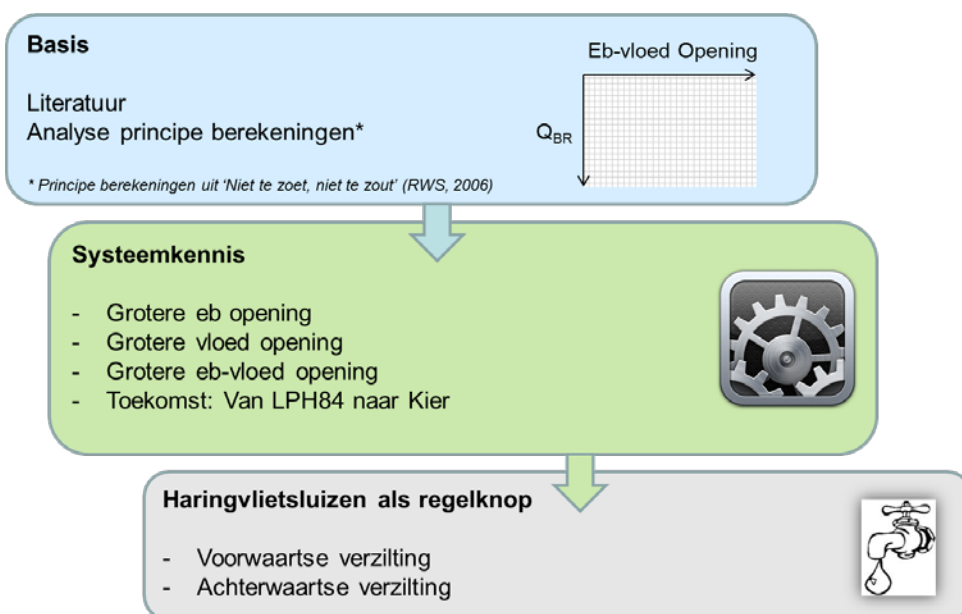
Figuur 4.1 Haringvlietsluizen in aanbouw: overzichtsfoto van de bouwput na inundatie. In november 1958 is met de aanleg begonnen en in 1971 was de aanleg voltooid. Foto uit archief van Rijkswaterstaat: <http://www.deltawerken.com/De-sluizen/202.html>



Figuur 4.2 Huidig stuurprogramma Haringvlietsluizen (LPH'84) en kandidaat kierprogramma (HOPv4)

4.2 Methode

De in dit hoofdstuk gehanteerde methode is visueel weergegeven in Figuur 4.3. Op basis van literatuur en een nadere analyse van de principe berekeningen (zie kader) is systematisch het effect van een grotere eb-opening, vloed-opening, en gecombineerde eb-vloed opening op de waterbeweging en verzilting onderzocht. Ook wordt een doorkijk gegeven naar de toekomst ("de Kier"). Vanwege de beperkte betrouwbaarheid van de berekende zoutverspreiding aan de zuidrand wordt in de analyse voornamelijk de hydrodynamica beschouwd en vindt een vertaling naar zout in kwalitatieve zin plaats op basis van kennis over zoutverspreidingsprocessen in de Rijn-Maasmond. Tot slot wordt op basis van de verkregen systeemkennis kwalitatieve uitspraken gedaan over de Haringvlietsluizen als stuurknop.



Figuur 4.3 Visuele weergave methode onderdeel "stuurknop Haringvlietsluizen". Nadere toelichting wordt gegeven in de hoofdstekst

Principe-berekeningen

Voor het afleiden van het kandidaat kierbesluit zijn vele berekeningen uitgevoerd met het SOBEK-RE NDB model, waarbij systematisch de rivierafvoer en de opening van de Haringvlietsluizen zijn gevarieerd (de Goederen et al. 2006). Een overzicht van de uitgevoerde berekeningen wordt gegeven in Tabel 4.1. Voor de analyse van het effect van een grotere vloedopening zijn in dit onderzoek de blauw- en groen-gearceerde berekeningen gebruikt, voor het effect van een grotere eb-opening is variant d1 gebruikt.

Tabel 4.1 Overzicht principe berekeningen voor het afleiden van het kandidaat-kierprogramma [Bron: Rapport "Niet te zoet, niet te zout"]

	Q_{br} (m ³ /s)	Eb/Vloed opening (m ²)	Aantal sommen
Variant d1	1000 – 3500	0/0, 100/100, 200/200, 300/300	105
Variant d1x	3500 m ³ /s – 9500 m ³ /s	400/400, 500/500, 600/600	132
Variant d2	1000 m ³ /s – 3500 m ³ /s	0/0, 120/80, 240/160, 360/240, 480/320, 600/400, 720/480	105
Variant d5	1000 m ³ /s – 3500 m ³ /s	0/0, 150/50, 300/100, 450/150, 600/200, 750/250, 900/300	105
Variant d5a	1000 m ³ /s – 3500 m ³ /s	0/0, 150/25, 300/25, 450/150, 600/200, 750/250, 900/300	105
Variant d5b	1000 m ³ /s – 3500 m ³ /s	0/0, 75/12.5, 150/25, 225/25, 300/25, 375/87.5, 450/150	105

Nb. In de berekeningen is de betrouwbaarheid van de zoutverspreiding langs de zuidrand zeer beperkt omdat:

- het model langs de zuidrand niet is afgeregeld voor zout. Op basis van 3D berekeningen had men het idee dat de zoutindringing voorspeld met het 1D model te groot was.
- de sommen stationair zijn (vaste afvoer, vaste opening), terwijl de verspreiding van zout sterk afhangt van de historie.

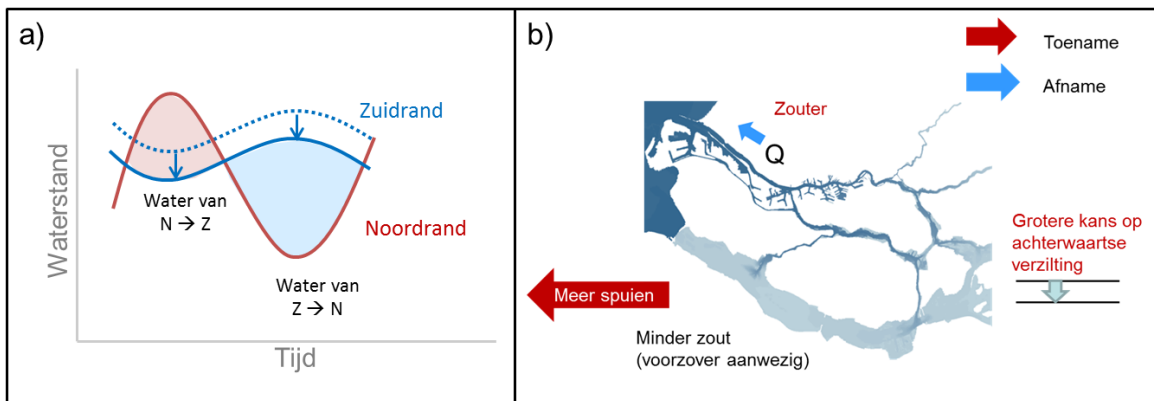
4.3 Systemwerking Haringvlietsluizen

Hieronder worden de effecten van een grotere ebopening, vloedopening en gecombineerde eb-vloedopening stap voor stap besproken. Omdat de waterstandsverschillen leidend zijn voor de waterbeweging en zoutverspreiding in het gebied, wordt steeds eerst het effect op de waterstanden besproken en daarna een doorvertaling gemaakt naar de restdebieten en zout.

4.3.1 Grotere ebopening

Bij een grotere ebopening (en gelijkblijvende vloedopening) daalt de waterstand op het Haringvliet (Figuur 4.4a) en verlaat meer water het gebied via de zuidrand en minder via de noordrand (Figuur 4.4b). Indien er zout aanwezig is aan de zuidrand (ten gevolge van achterwaartse verzilting of in de toekomst door het “kieren”), daalt hier de zoutconcentratie. Hoe sterk deze daling is niet alleen afhankelijk van de grootte van de toename in debiet via de sluisen, maar ook van de verdeling van zout in het Haringvliet. Indien het zout zich voornamelijk in de diepe geulen bevindt en het systeem een hoge mate van gelaagdheid heeft, is de daling van de concentraties geringer dan bij een gemengd systeem. Naar verwachting kan het in bijzondere situaties zelfs zijn dat een toename in afvoeren geen verzoeting oplevert.

Omdat de afvoer via de noordrand afneemt nemen de zoutconcentraties daar juist toe. Om het effect op achterwaartse verzilting in te schatten kijken we naar de verandering in waterstandsverschillen. Door de grotere ebopening dalen de waterstanden aan de zuidrand. Tijdens vloed aan de noordrand zal nu meer water naar het zuiden stromen en tijdens eb zal minder water terugstromen naar de noordrand, zie Figuur 4.4a. Hierdoor zal de kans op achterwaartse verzilting toenemen.

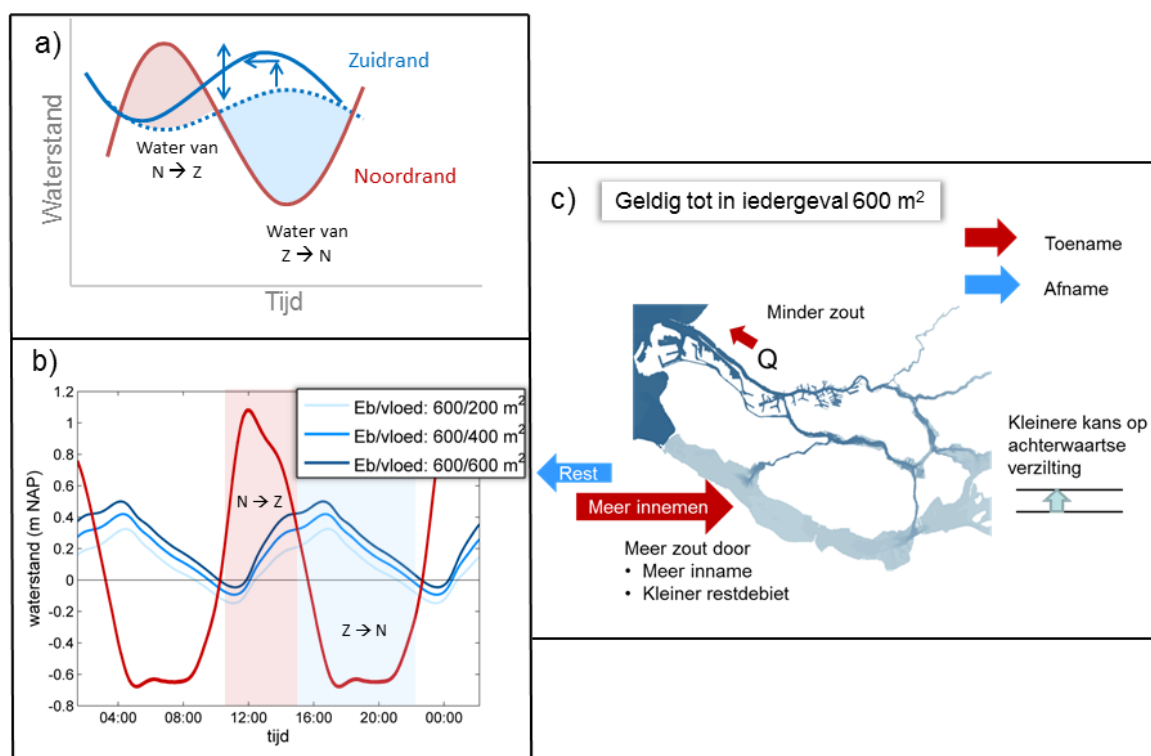


Figuur 4.4 Schematische weergave van het effect van een grotere ebopening op a) de waterstanden en daarmee b) de waterbeweging en zoutverspreiding in de Rijn-Maasmond. NB. Omdat er geen berekeningen beschikbaar waren zijn de effecten op de waterstanden alleen schematisch weergegeven en niet verder gekwantificeerd

4.3.2 Grotere vloedopening

De effecten van een grotere vloedopening (en gelijkblijvende ebopening) zijn geïllustreerd in Figuur 4.5. Wanneer de vloedopening wordt vergroot, zal de invloed van getij groter worden. Dit vertaalt zich op de zuidrand in een vergroting van de getijslag en het verschuiven van de fase, dat wil zeggen het tijdsverschil tussen hoogwater bij Hoek van Holland en hoogwater bij Moerdijk. Door de inname van water tijdens vloed neemt ook de middenstand (gemiddelde waterstand) toe. Getallen zijn weergegeven in Tabel 4.2. Zoutconcentraties aan de zuidrand zullen toenemen doordat minder water het systeem via de zuidrand verlaat en doordat tijdens

vloed zoutwater wordt ingenomen. Omdat op de noordrand het restdebiet toeneemt, zullen daar juist de zoutconcentraties afnemen. In Figuur 4.5a is te zien dat de waterstandsverschillen tijdens vloed zullen afnemen, wat betekent dat minder water naar de zuidrand zal stromen. Omgekeerd zullen de waterstandsverschillen tijdens eb toenemen, wat betekent dat meer water terug zal stromen naar het noorden. Beide effecten zijn gunstig voor het tegengaan van achterwaartse verzilting, maar zorgen voor een verhoging van de chlorideconcentraties aan de zuidrand via inname via de sluizen.



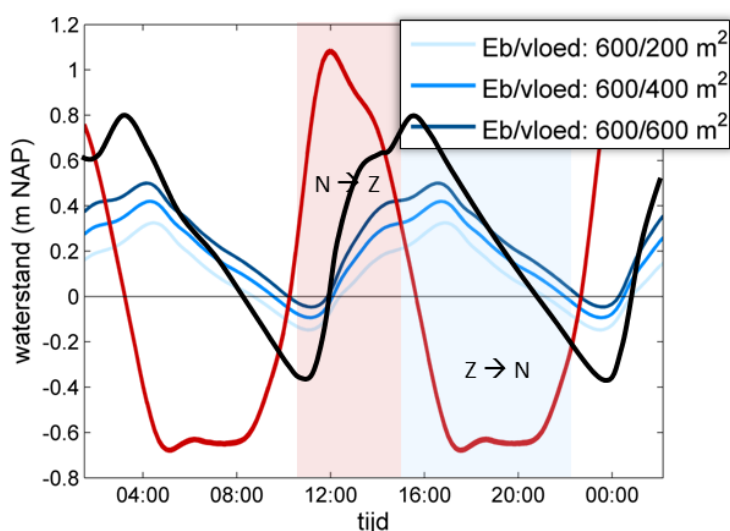
Figuur 4.5 Weergave van het effect van een grotere vloed-opening op de waterstanden conceptueel (a) en volgens het model (b) en daarmee de waterbeweging en zoutverspreiding in de Rijn-Maasmonding (c).

Tabel 4.2 Kwantificatie effecten grotere vloed-opening op waterstanden, fase en restdebieten. Keuze voor bestudeerde openingen vloeit voort uit beschikbaarheid van de berekeningen, zoals aangegeven in het kader op pagina 17

$Q_{BR} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$	$25 \text{ m}^2 \rightarrow 300 \text{ m}^2$	$200 \text{ m}^2 \rightarrow 600 \text{ m}^2$
Middenstand	+11 cm	+15 cm
Getijslag	+4 cm	+7 cm
Fase (gebaseerd op minima)	+10 min	+5 min
Fase (gebaseerd op maxima)	-10 min	-15 min
Restdebiet NWW	+267 m ³ /s	+331 m ³ /s
Restdebiet Haringvliet	-316 m ³ /s	-399 m ³ /s

Bovenstaande effecten gelden overigens alleen voor het bestudeerde bereik van openingen tot 600 m². Bij een nog grotere vloedopening zal de getijamplitude nog verder toenemen en de fase verder verschuiven. Het mogelijke effect is geïllustreerd in Figuur 4.6. Waar tijdens

vloed (rood gearceerde deel) de som van de waterstandverschillen afnam bij het vergroten van de opening van 200 naar 600 m² (minder water en minder zout van noord- naar zuid), neemt deze mogelijk niet langer af bij een nog grotere opening⁴. De kans op achterwaartse verzilting neemt daarmee niet langer af. Ook de afname van verzilting aan de noordrand zal niet doorzetten, omdat de restdebieten langs de noordrand niet langer toe zullen nemen bij grotere opening. Het zijn immers de waterstandverschillen die bepalen hoeveel water van noord naar zuid stroomt en vice versa, en hoeveel water dus het gebied via de noord- of zuidrand verlaat. Bovenstaande toont aan dat men voorzichtig moet zijn met het extrapoleren van effecten. Omdat volgens het huidige kandidaat kierprogramma de opening pas bij hele hoge rivierafvoer groter zal worden dan 600 m² (zie Figuur 4.2), lijkt met dit soort niet-lineariteiten geen rekening te hoeven worden gehouden in de nabije toekomst.



Figuur 4.6 Effect grotere vloed-opening op de waterstanden. In zwart een mogelijke extrapolatie van het effect van een nog grotere vloed-opening op de waterstanden aan de zuidrand. NB. het gaat hierbij niet om het kierbesluit, maar om de werking van de vloedopening in het algemeen.

4.3.3 Grotere eb-vloed opening

Indien de eb- en vloedopening beide verder opengaan, zullen de effecten een combinatie worden van de in paragraaf 4.3.1 en 4.3.2 behandelde effecten⁵:

- Zuidrand: Lagere middenstand en grotere kans op achterwaartse verzilting door grotere ebopening, hogere middenstand en kleinere kans op achterwaartse verzilting door grotere vloedopening.
- Zuidrand: Hoger restdebiet en minder zout bij grotere ebopening, lager restdebiet en meer zout bij grotere vloedopening.
- Noordrand: Lager restdebiet en meer zout bij grotere ebopening, hoger restdebiet en minder zout bij grotere vloedopening.

⁴ Het hangt af van hoe de amplitude en fase veranderen wat het effect zal zijn op de waterstandsverschillen en daarmee de waterbeweging en zoutverspreiding.

⁵ In het bestudeerde bereik tot 600 m². Bij grotere openingen, kunnen verschuiving in fase en verandering in amplitude voor niet-lineariteiten zorgen, zoals besproken in §4.3.3.

De effecten van een grotere eb- en vloedopening zijn geïllustreerd in Figuur 4.7 en Tabel 4.3. Bij grotere eb-vloedopening zal de middenstand dalen, de getijslag toenemen en de fase verschuiven. De effecten op getijslag en fase zijn het gevolg van de grotere vloedopening. De middenstands daling wordt veroorzaakt door het gecombineerde effect van de grotere vloedopening (verhoging middenstand) en ebopening (verlaging middenstand), waarbij de tweede sterker is. Omdat de middenstand netto daalt nemen de restdebieten door de Haringvlietsluizen toe en door de Nieuwe Waterweg af. Dit gedrag is niet lineair: hoe groter de opening, hoe kleiner de verandering in restdebieten, zie Figuur 4.8.

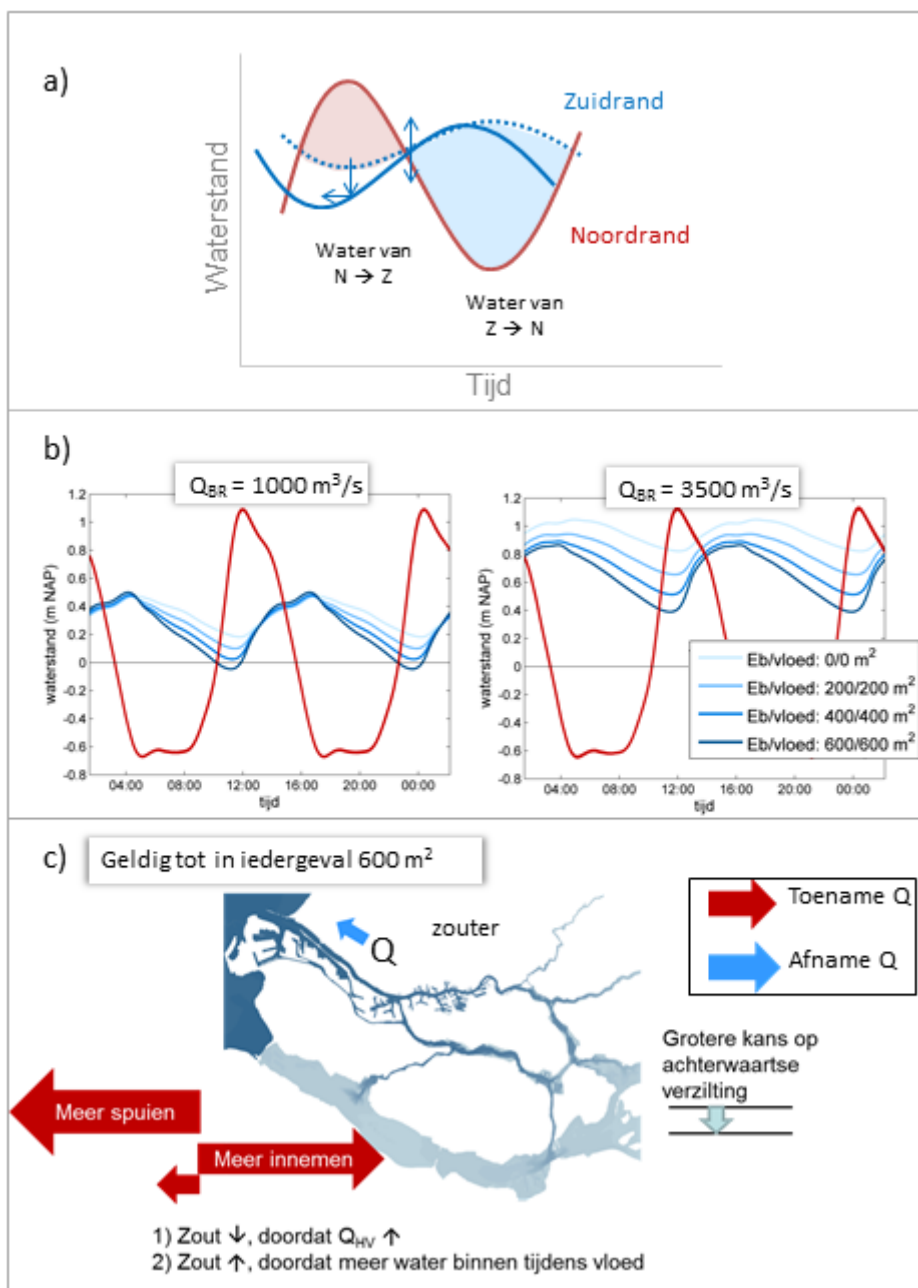
Voor zout heeft dit de volgende consequenties. Aan de noordrand zullen de zoutconcentraties toenemen doordat minder water het systeem via de noordrand verlaat, waarbij hier ook geldt dat hoe groter de opening, hoe kleiner de toename. Omdat de middenstand zal dalen, is de verwachting dat achterwaartse verzilting toe zal nemen. Tot slot spelen voor de zoutindringing aan de zuidrand via de Haringvlietsluizen twee effecten een rol:

- 1 toename zoutconcentraties doordat meer zoutwater wordt ingenomen tijdens vloed,
- 2 afname zoutconcentraties doordat de afvoer door de Haringvlietsluizen toeneemt en meer zout wordt uitgespoeld.

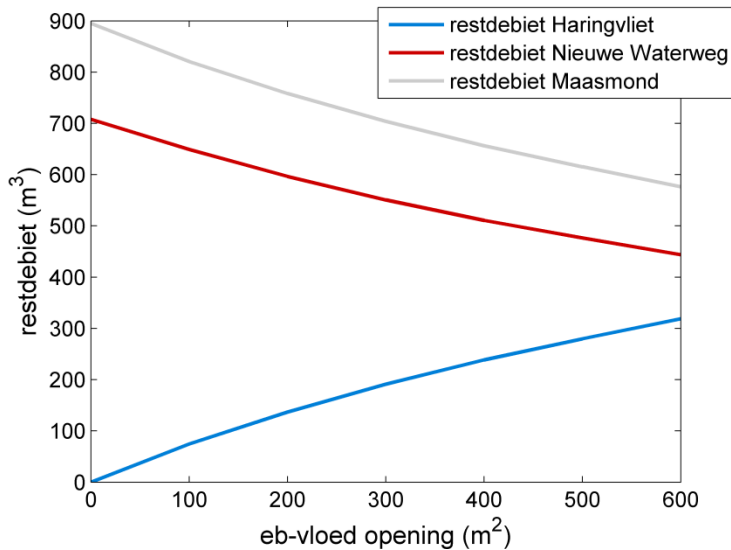
Hierdoor kan het gebeuren dat de zoutconcentraties afnemen in plaats van toenemen bij een grotere eb-vloedopening. Dit is waargenomen in de principe berekeningen, zoals uitgebreid besproken en geanalyseerd in het rapport "Niet te zoet, niet te zout" (de Goederen et al. 2006). Het effect van een grotere opening op de zoutconcentraties is geïllustreerd in Figuur 4.9. Hierin is te zien dat aanvankelijk de zoutconcentraties toenemen doordat het Haringvliet zoet was en er door de vloedopening zout kan binnendringen. De grotere restdebieten zijn hierbij niet sterk genoeg om het zout buiten te houden. Bij grotere opening nemen de zoutconcentraties af, omdat het effect van de toename in restdebiet op de zoutconcentraties grotere is dan de hoeveelheid zout die extra wordt ingenomen tijdens vloed. Omdat bij nog grotere opening de restdebieten steeds minder sterk toenemen (Figuur 4.8), zal het effect van de inname van zout tijdens vloed sterker zijn en zullen de zoutconcentraties weer toenemen. Hoewel het theoretisch gezien aannemelijk is dat een dergelijk effect op kan treden, is het vanwege de zeer beperkte betrouwbaarheid van de berekende zoutconcentraties aan de zuidrand niet mogelijk om te concluderen of dit effect in de praktijk daadwerkelijk zal optreden en bij welke grootte van de eb- en vloedopeningen dit zou gebeuren.

Tabel 4.3 Kwantificatie effecten grotere eb- en vloed-opening (0-600 m²) op waterstanden, fase en restdebieten

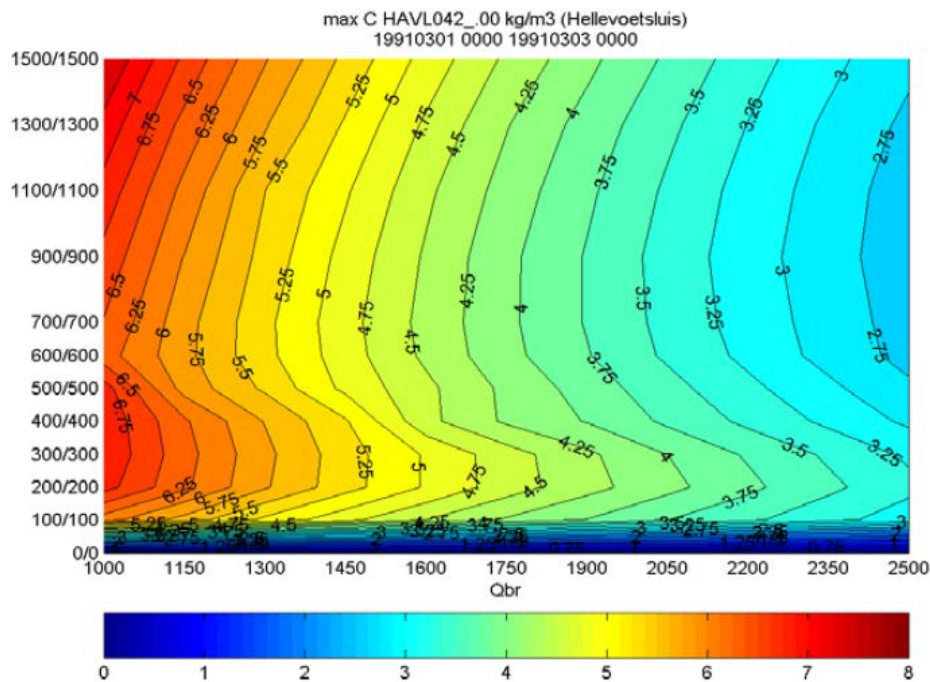
EV-opening: 0 → 600 m²	Q_{BR} = 1000 m³/s	Q_{BR} = 3500 m³/s
Middenstand HV	-10 cm	-30 cm
Getijslag HV	+25 cm	+25 cm
Fase HV (gebaseerd op minima)	-40 min	-40 min
Fase HV (gebaseerd op maxima)	-25 min	-70 min
Restdebiet NWW	-264 m ³ /s	-912 m ³ /s
Restdebiet Haringvliet	+319 m ³ /s	+1015 m ³ /s



Figuur 4.7 Weergave van het effect van een grotere vloed-opening op de waterstanden conceptueel (a) en volgens het model (b) en daarmee de waterbeweging en zoutverspreiding in de Rijn-Maasmonding (c).



Figuur 4.8 Effect grotere eb-vloed opening op de restdebieten



Figuur 4.9 Zoutconcentraties als functie van de eb-vloedopening en rivierafvoer

4.3.4 Van LPH'84 naar de Kier

In 2018 gaan de sluisen “op een kier”. Dit houdt in dat bij vloed de sluisen in beperkte mate zullen openen en ook de ebopening verder open zal gaan. Het doel van de “kier” is het bevorderen van de visintrek. Het kandidaat stuurprogramma is weergegeven in Figuur 4.2 en zal worden ingevoerd volgens het “Lerend Implementeren” principe.

Hoewel de effecten op de chlorideconcentraties en de waterstanden zijn berekend (de Goederen et al. 2006), illustreren we in deze paragraaf hoe met de systeemkennis een eerste schatting kan worden gemaakt. Hierbij gaan we uit van het kandidaat stuurprogramma zonder zoetspoelen⁶ en maken we onderscheid tussen de volgende drie situaties:

1. Bovenrijnafvoeren tussen de 1350 m³/s en de 2500 m³/s, waarbij de toename in ebopening gemiddeld iets groter is dan de toename in vloedopening (in vergelijking met het huidige LPH'84).
2. Bovenrijnafvoeren tussen de 2500 m³/s en de 3000 m³/s, waarbij de toename in vloedopening groter is
3. Bovenrijnafvoeren boven de 3000 m³/s, waarbij alleen de vloedopening vergroot.

Onder de 1350 m³/s zijn LPH'84 en het kandidaat stuurprogramma identiek.

1. Bovenrijnafvoeren tussen de 1350 m³/s - 2500 m³/s

Deze situatie is vergelijkbaar met het in gelijke mate vergroten van de eb- en vloedopening (§4.3.3), met als verschil dat de ebopening iets meer wordt vergroot (§4.3.1). Aan de noordrand zorgt het in gelijke mate vergroten van de eb-vloedopening voor een lager restdebit en dus een toename van de gemiddelde zoutconcentraties. Als hierbij de ebopening in sterkere mate opengaat verwachten we dat dit effect nog iets versterkt wordt. Dit ten gunste van de zuidrand, welke in de huidige situatie doorgaans zoet is, maar door de vloedopening gedeeltelijk zout zal worden. Door de ebopening ook te vergroten, zal de zoutconcentratie minder sterk toenemen. Dit zal nodig zijn om de verzilting aan de zuidrand binnen de toegestane marges te houden. Tot slot zorgt een grotere eb-vloedopening voor een afname van de gemiddelde waterstanden bij Moerdijk, waardoor de kans op achterwaartse verzilting zal toenemen. Als hierbij de ebopening in sterkere mate opengaat verwachten we dat dit effect nog iets versterkt wordt.

Samengevat zullen de verzilting aan de zuidrand en noordrand dus toenemen, de kans op achterwaartse verzilting toenemen en voor de scheepvaart de waterstanden bij Moerdijk gemiddeld dalen en sterkere fluctuaties vertonen (meer getijwerking).

2. Bovenrijnafvoeren tussen de 2500 m³/s - 3000 m³/s

Deze situatie is een combinatie van het in gelijke mate vergroten van de eb- en vloedopening (§4.3.3) en het vergroten van alleen de vloedopening (§4.3.2). Omdat deze tegengestelde effecten hebben is op basis van alleen de kennis van het systeemgedrag niet goed te voorspellen welke effect de doorslag zal geven. Hier zijn berekeningen voor nodig.

3. Bovenrijnafvoeren boven de 3000 m³/s

Deze situatie is gelijk aan het vergroten van alleen de vloedopening (§4.3.2). Dit betekent toename verzilting Haringvliet, afname aan de noordrand en afname kans op achterwaartse verzilting. Voor de scheepvaart zullen bij Moerdijk de gemiddelde waterstanden toenemen, maar zal ook de getijwerking toenemen, dus sterkere variaties in waterstand.

⁶ Zoetspoelen is een essentieel onderdeel van het kandidaat kierprogramma. Wanneer de Bovenrijnafvoer daalt en naar verwachting langere tijd onder de 1500 m³/s zal blijven wordt er extra gespuid op het Haringvliet om deze zoet te spoelen. Hoewel hiermee de chlorideconcentraties aan de noordrand zullen verhogen, is het belangrijk de zuidrand zoet te krijgen alvorens de sluisen voor langere tijd dichtgaan. Indien bij dichte sluisen het Haringvliet nog zout is kan het zout door diverse mengingsprocessen zich op oncontroleerbare wijze door het Haringvliet en Spui gaan verspreiden.

Verwachte totale effect

Omdat verzilting van de noordrand voornamelijk voorkomt bij lage rivierafvoer zal situatie 1 hiervoor maatgevend zijn, dit betekend een (beperkte) toename van de verzilting, welke door zoetspoelen nog wat versterkt zal worden. Dit wordt bevestigd door de berekeningen van Rijkswaterstaat (de Goederen et al. 2006), die voor de noordrand een lichte toename in chlorideconcentraties laten zien. Voorbeelden zijn de Noodinlaat Kralingen, met een overschrijding van het achtergrondgehalte met meer dan 25 mg Cl/l gedurende meer dan 8 uur in de periode van 1988-1990 van in totaal 2229 uur (LPH'84) versus 2418 uur (kandidaat stuurprogramma) en Gouda, met een overschrijding van het achtergrondgehalte met meer dan 25 mg Cl/l gedurende meer dan 48 uur in de periode van 1988-1990 van in totaal 3695 uur (LPH'84) versus 3898 uur (kandidaat stuurprogramma), 4357 uur (kandidaat stuurprogramma met zoetspoelen)⁷.

Waterstanden onder de 0 m NAP zullen ook voornamelijk voorkomen bij lage rivierafvoeren (situatie 1). Op basis van de systeemwerking verwachten we een afname van de gemiddelde waterstanden bij lage rivierafvoeren en daarmee een toename van de onderschrijding van 0 m NAP bij Moerdijk, welke door het zoetspoelen (extra open met eb) nog wat versterkt zullen worden⁸. Ook dit wordt bevestigd door de berekeningen. Totale duur waterstanden onder 0 m NAP 274 uur (LPH'84) versus 321 uur (kandidaat stuurprogramma), 377 uur (kandidaat stuurprogramma met zoetspoelen).

Aan de zuidrand verwachten we een toename van de chlorideconcentraties door het binnenkomen van zeewater via de sluizen tijdens vloed. Voor achterwaartse verzilting verwachten we voor afvoeren tussen de 1350 m³/s en de 2500 m³/s een toename (zoetspoelen zal dit versterken) en voor afvoeren boven de 3000 m³/s een afname van de ten opzichte van het huidige spuiregime. Omdat zoutconcentraties nabij de zuidrand in het SOBEK-RE model niet voldoende betrouwbaar zijn en niet zijn uitgesplitst naar voorwaartse verzilting door de Haringvlietsluizen en achterwaartse verzilting via de noordrand kan hier geen vergelijking voor worden gemaakt met de kwalitatieve analyse.

4.4 Haringvlietsluizen als stuurknop

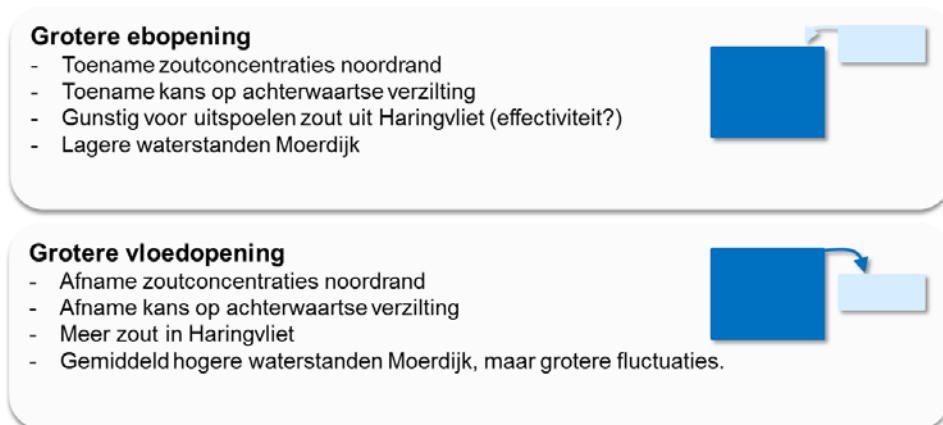
De Haringvlietsluizen kunnen beschouwd worden als de grote stuurknop van de Rijn-Maasmonding. Hiermee kunnen de waterbeweging en zoutconcentraties beïnvloed worden en daarmee de bereikbaarheid van de haven van Moerdijk en de zoetwaterbeschikbaarheid voor drinkwaterbedrijven, landbouw, industrie en de waterhuishouding in de polders.

De Haringvlietsluizen reguleren primair de waterstanden in de Rijn-Maasmonding. Bij een grotere opening kunnen de middenstand, getijslag en fase veranderen. Die tezamen bepalen de waterstandsverschillen tussen de noord- en de zuidrand en daarmee de debietverdeling en zoutverspreiding. In de voorgaande paragrafen zijn deze effecten bestudeerd, welke in één figuur worden samengevat in Figuur 4.10.

⁷ Deze getallen zijn gebaseerd op SOBEK berekeningen. Door de inherente onzekerheid in 1D modellering van zout zijn de resultaten alleen in kwalitatieve zin betrouwbaar.

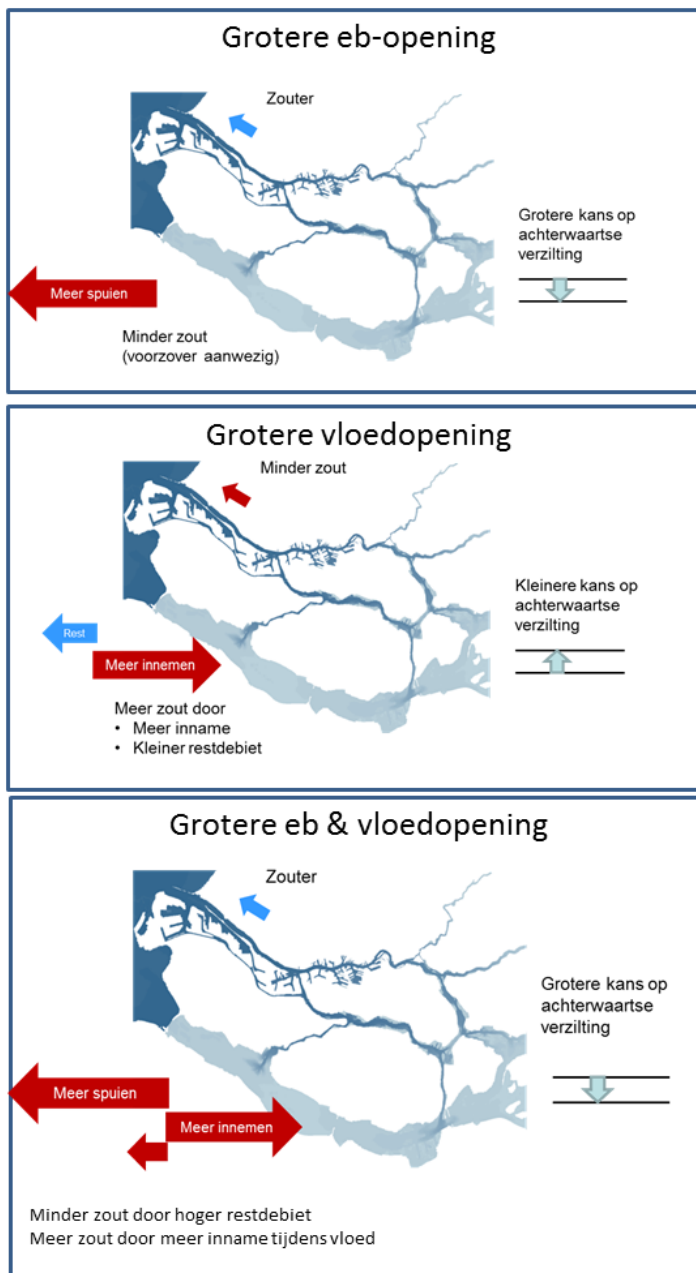
⁸ NB. Ten gevolge van zeespiegelstijging zullen de gemiddelde waterstanden hoger worden, waardoor in de toekomst de waterstand minder vaak onder 0 m NAP zal komen.

Op basis hiervan kan de werking van de stuurknop als volgt worden samengevat:



Bovenstaande is geldig voor het vergroten van de opening tot 600 m². Omdat effecten niet lineair zijn⁹, valt niet op voorhand te zeggen of ze ook gelden voor nog grotere openingen. Omdat de eb- en vloedopening meest tegengestelde effecten hebben, hangt het af van de verhouding wat de netto effecten zijn. Bij de implementatie van het kierbesluit, kan hier dan ook mee gevarieerd worden.

⁹ Voorbeeld: het vergroten van de opening van 0 naar 200 m² heeft dus niet hetzelfde effect op restdebieten en verzilting als het vergroten van de opening van 200 naar 400 m².



Figuur 4.10 Schematische weergave van het effect van een grotere ebopening (bovenste figuur), grotere vloedopening (middelste figuur) en grotere eb- en vloedopening (onderste figuur) op de hydrodynamica en zoutverspreiding. Een en ander is onderzocht en geldig tot een opening van maximaal 600 m². Door niet-lineairiteiten kan gedrag bij grotere openingen afwijken

5 Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein

5.1 Achtergrond

In geval van dreigende verzilting zijn er in de Rijn-Maasmonding een aantal stuurknoppen beschikbaar om de debietverdeling te beïnvloeden en daarmee de zoutconcentraties te verlagen, zie Figuur 1.1. De werking van de grootste stuurknop, de Haringvlietsluizen, is in het vorige hoofdstuk besproken. In dit hoofdstuk gaan we in op de werking van de twee kleinere stuurknoppen van het hoofdwatersysteem, de Volkeraksluizen en de stuw bij Hagestein. Het Volkerak-Zoommeer is een belangrijke zoetwatervoorziening voor landbouwgebieden en de waterhuishouding in de regio. Volgens het waterakkoord mag de chlorideconcentratie in het groeiseizoen (15 maart - 15 september) niet boven de 450 mg Cl/l komen (Rijkswaterstaat Zee en Delta et al. 2016). Om dit te bewerkstelligen wordt het Volkerak-Zoommeer doorgespoeld met water uit het Hollandsch Diep via de Volkeraksluizen. Wanneer doorspoeling wordt beperkt bij verzilting van de noordrand zal bij gesloten Haringvlietsluizen (QBR < 1100 m³/s) meer water het systeem via de Maasmond verlaten. Met de grotere restdebieten wordt de tegendruk aan het zout vanuit zee vergroot, waardoor de chlorideconcentraties lager zullen worden. Vanuit deze gedachte is het beperken van de doorspoeling naar het Volkerak-Zoommeer opgenomen als één van de maatregelen om verzilting langs de noordrand tegen te gaan (Hydrologic 2015a).

De tweede stuurknop, de stuw bij Hagestein, reguleert de afvoer over de Lek. Bovenstreams van de stuw bij Hagestein staan de Waal en de Lek met elkaar in verbinding via het Amsterdam-Rijnkanaal. Bij normale omstandigheden (> 1300 m³/s Rijnafvoer Lobith) zijn de Prins Bernhardsluizen in het Betuwepand bij Tiel gesloten en is de waterstand in stuwpannd Hagestein 3m + NAP. Als de waterstand op de Waal bij Tiel beneden de 3 m + NAP daalt, staan de Prins Bernhardsluizen open en staat het stuwpannd Hagestein in open verbinding met de Waal. Als onder deze omstandigheden meer afvoer is over de stuw Hagestein dan aanvoer over de stuw Amerongen, zal het verschil aangevuld worden via het Betuwepand uit de Waal (Van der Vat 2016). Er komt dus evenveel water de Rijn-Maasmonding binnen, maar met een andere verdeling over de Lek en de Waal. Dit noemen we een "afvoervertrekking". Bij dreigende verzilting aan de noordrand kan via de stuw bij Hagestein meer water over de Lek worden gestuurd, waardoor ook de afvoer over de Nieuwe Maas zal toenemen met het idee dat de chlorideconcentraties aan de noordrand zullen afnemen. In de redeneerlijn van 2015 (Hydrologic 2015a) is ook deze als maatregel opgenomen om verzilting langs de noordrand tegen te gaan.

De effectiviteit van beide maatregelen is tot op heden niet onderzocht. In dit project onderzoeken we de systeemwerking van beide stuurknoppen, middels numerieke berekeningen met het 1D SOBEK-RE NDB_1_1_0 model (Kraaijeveld 2003). Hierbij wordt gekeken naar hoe de stuurknoppen de debietverdeling in het systeem veranderen, welke effect dit heeft op de chlorideconcentraties aan de noordrand en welke tijdschalen hiermee gepaard gaan.

5.2 Methode

Om de systeemwerking van beide stuurknoppen te onderzoeken zijn 1D berekeningen uitgevoerd met het SOBEK-RE model van het Noordelijke Deltabekken (d.w.z. de Rijn-Maasmonding). Om de veranderingen in afvoerverdeling en zoutconcentraties goed te kunnen volgen is daarbij gekozen voor een vaste rivierafvoer en een cyclisch getij (dus geen spring-doodtij variaties). De effectiviteit van de stuurknoppen is onderzocht voor de situatie van dreigende verzilting van de monding van de Hollandsche IJssel. Hierbij is de definitie uit het waterakkoord gebruikt (Rijkswaterstaat Zuid-Holland 2005):

Verzilting: een verhoging van het chloridegehalte in de Hollandsche IJssel nabij de Stormvloedkering door zee-invoed, zoals die verhoging blijkt uit de routinematige bemonstering door het Rijk, dan wel uit specifieke bemonstering, en welke verhoging (minimaal 50 mg chloride/l) vergeleken wordt met het chloridegehalte van de Rijn te Lobith, met een faseverschil van twee dagen.

[Waterakkoord Hollandsche IJssel]

Volgens de SOBEK-berekeningen treedt dit op bij een Bovenrijnafvoer van 980 m³/s, wanneer het chloridegehalte van de Rijn rond de 125 mg Cl/l ligt. De grens voor verzilting is dan rond de 175 mg Cl/l. Voor deze condities zijn de volgende situaties doorgerekend:

1. Referentie situatie (T0): Onttrekking van 50 m³/s naar het Volkerak-Zoommeer en geen afvoer over de Lek.
2. Stopzetten onttrekking Volkerak-Zoommeer (T1): Na ruim voldoende inspeeltijd (3 maanden) wordt de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer teruggebracht van 50 m³/s naar 0 m³/s. De afvoerverdeling over de Lek en Waal blijft identiek aan de T0-berekening.
3. Afvoervertrekking van de Waal naar de Lek (T2): Na ruim voldoende inspeeltijd (3 maanden) wordt er 50 m³/s over de Lek geleid en het Waaldebiet met 50 m³/s verminderd. Net als in de T0-berekening wordt er 50 m³/s onttrokken voor het Volkerak-Zoommeer.

De keuze voor een variatie van 50 m³/s is afgestemd met Rijkswaterstaat en gebaseerd op de volgende argumenten:

- Capaciteit Volkeraksluizen is 50 m³/s, dit is dus potentieel de orde grootte van de onttrekking.
- In de praktijk zal de onttrekking vaak lager liggen, maar omdat systeeminzicht het doel is van deze berekeningen, is besloten om niet met kleinere afvoeren te werken, zodat de effecten voldoende groot zijn om goed te kunnen evalueren.
- Het is niet bekend welke afvoervertrekking van de Waal naar de Lek realistisch haalbaar is, maar om beide stuurknoppen goed met elkaar te kunnen vergelijken gaan we ook voor de afvoervertrekking uit van 50 m³/s.

Meer details over het model en de gekozen randvoorwaarden zijn te vinden Bijlage D.

5.3 Effect stopzetten onttrekking naar Volkerak-Zoommeer

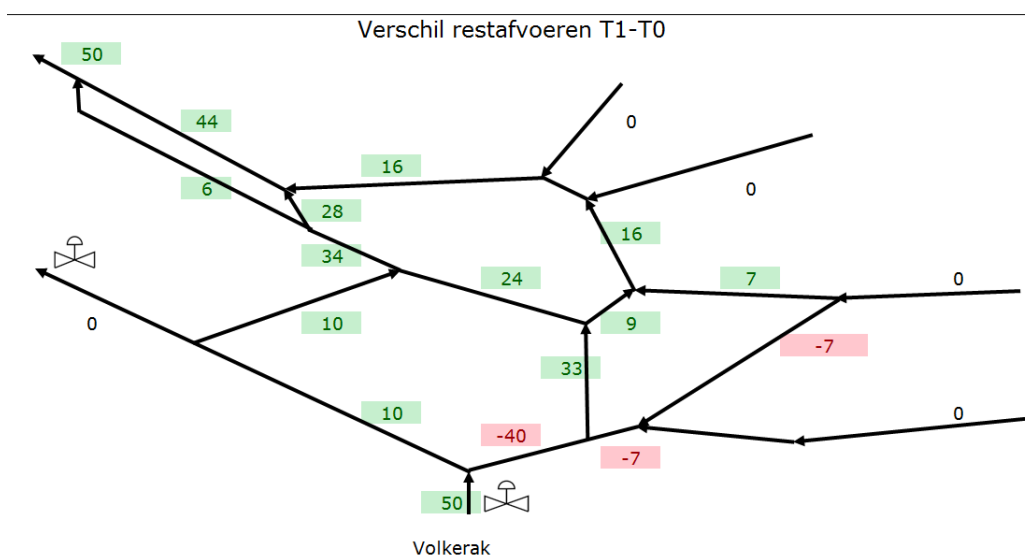
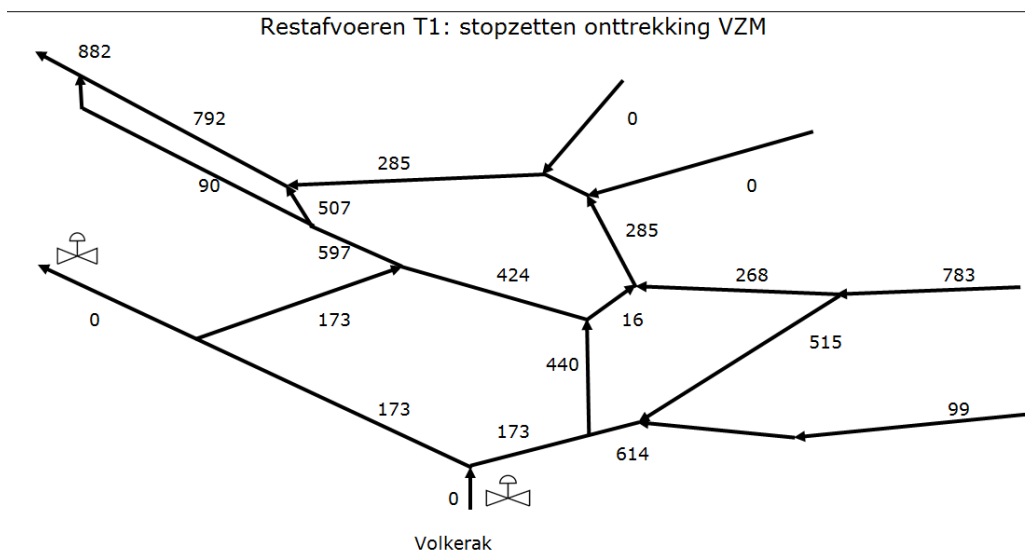
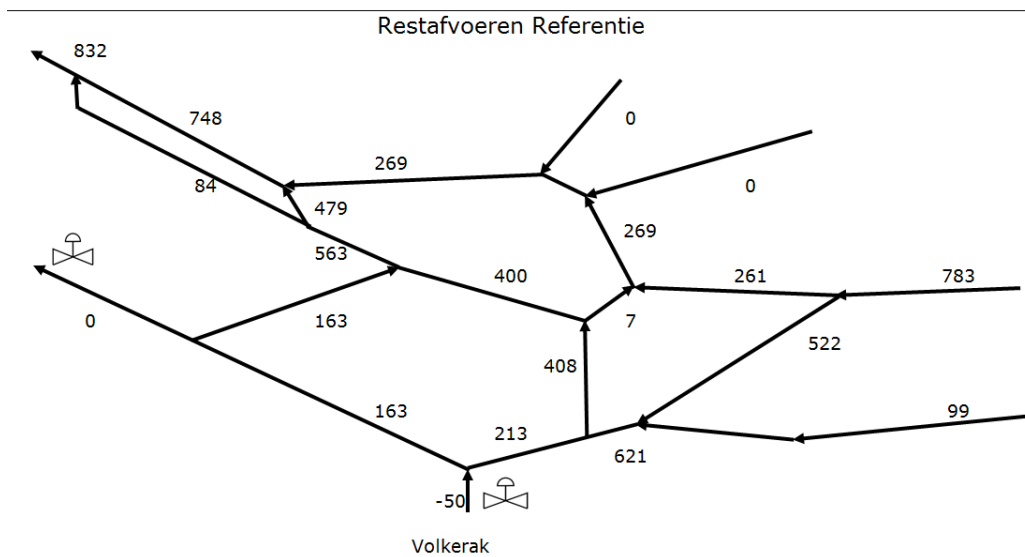
5.3.1 Effect op restdebieten

In Figuur 5.1 zien we de restdebieten in het systeem voor de referentiesituatie en de situatie zonder onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer. Ook zijn de verschillen gepresenteerd. Van de 50 m³/s die extra beschikbaar komt stroomt 10 m³/s via het Spui naar de noordrand en 33 m³/s via de Dordtsche Kil naar de Noordrand. De ontbrekende 7 m³/s is Waalwater dat door de hogere waterstanden op het Hollandsch Diep/ Haringvliet nu via de Beneden Merwede de Rijn-Maasmonding binnenstroomt in plaats van via de Nieuwe Merwede. Dit alles resulteert in een toename van restdebieten op de Oude Maas (zeewaarts van het Spui) van 28-34 m³/s en op de Nieuwe Maas van 16 m³/s, dus van de 50 m³/s stroomt een-derde via de Nieuwe Maas en twee-derde via de Oude Maas. Deze verhouding is gelijk aan in de jaren 80 bepaalde verhouding (C. Kuijper 1985), voor situaties met een Bovenrijnafvoer van 800 m³/s en 1100 m³/s.

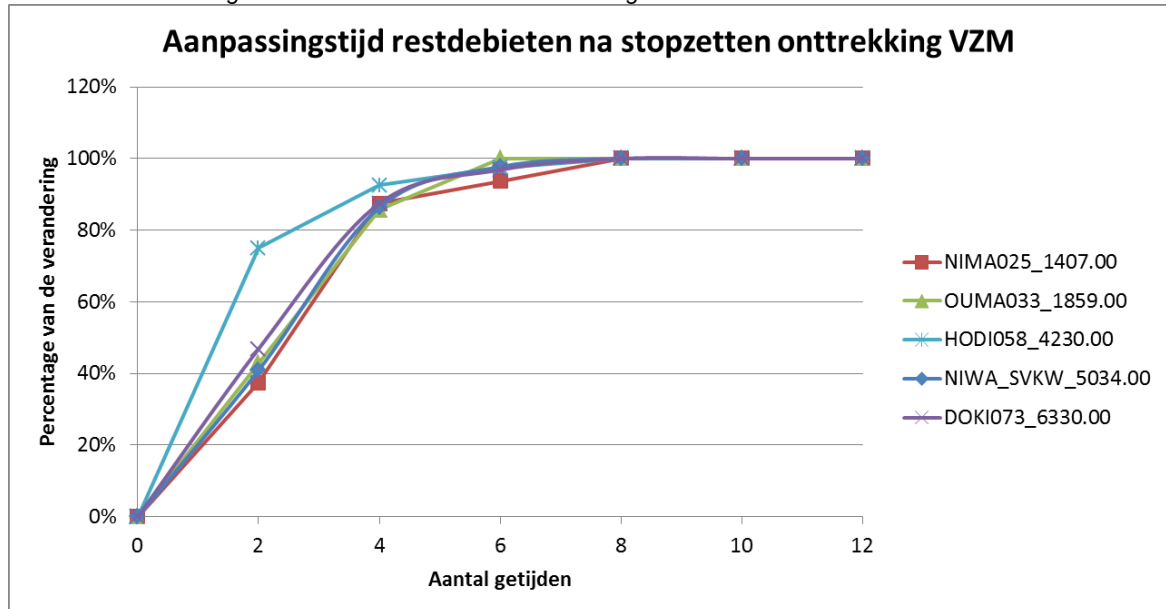
Tot slot neemt de afvoer in de Maasmond toe met dezelfde 50 m³/s die aan de zuidrand minder onttrokken wordt, omdat de Haringvlietsluizen gesloten zijn.

Het duurt echter even voordat de nieuwe restdebieten zich hebben ingesteld. In Figuur 5.2 zijn de aanpassingstijden van de restdebieten geïllustreerd, middels het weergeven van het percentage van de verandering in de tijd. Als op een tak de afvoer met uiteindelijk 30 m³/s toeneemt, is dit de 100% van de verandering. Wanneer de toename na 3 getijdeperiodes bijvoorbeeld 10 m³/s is, dan is dit 33% van de verandering.

Uit de aanpassingstijden valt op te maken dat het debiet op het Hollandsch Diep (ten oosten van de Volkeraksluizen) na 2 getijperioden op 75% zit van het nieuwe debiet. Voor de Dordtsche Kil is na 2 getijperioden slechts 50% van de nieuwe debietwaarde bereikt, op de Nieuwe Waterweg 41% en op de Nieuwe Maas 38%. Deze vertraging wordt onder andere gerelateerd aan de grote buffercapaciteit van het Haringvliet en Hollandsch Diep. Door hun grootte duurt het even voordat na een debietverandering de waterstanden zijn aangepast (Winterwerp 1982, pg. 13-14) en daarmee ook de debietverandering door gaat werken in de andere takken. Ook speelt de afstand tussen de zuid- en de noordrand mee, van de Volkeraksluizen naar de monding Hollandsche IJssel, via Hollandsch Diep - Dordtsche Kil - Noord, is ongeveer 45 km.



Figuur 5.1 Bovenste figuur: Restafvoeren voor de referentiesituatie. Middelste figuur: Restafvoeren bij stopzetting onttrekking naar Volkerak-Zoommeer. Onderste figuur: verschil in restafvoeren



Figuur 5.2 Percentage van de verandering in restdebieten na stopzetten onttrekking naar VZM, voor de Nieuwe Waterweg (NIWA_SVKW_5034.00), Nieuwe Maas (NIMA025_1407.00), Spui (SPU084_6279.00) en Hollandsch Diep oostelijk van de Volkerak Sluizen (HODI058_4230.00). De punten geven de uitkomsten weer van de berekening. Vanwege de tijdstap in de berekening (10 min), konden de restdebieten alleen per twee getijperioden worden berekend (duur 1 getijperiode is 12 uur en 25 min). Voor het oog zijn daarom lijnen tussen de punten aangebracht

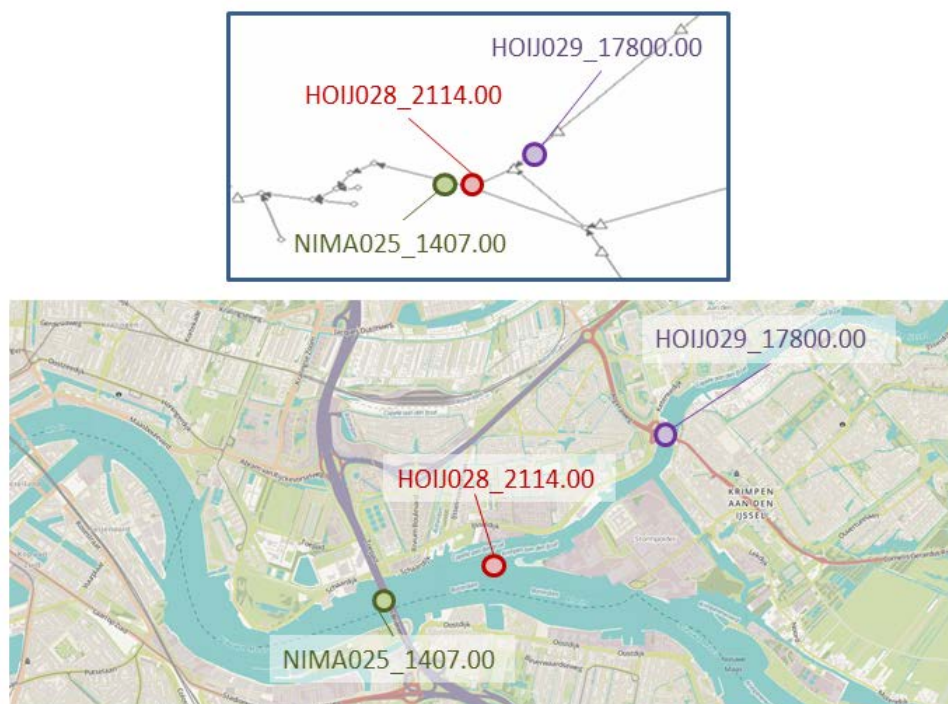
5.3.2 Effect op zout

Doordat er $50 \text{ m}^3/\text{s}$ extra door de Maasmond naar buiten stroomt, zal er minder zout de Rijn-Maasmonding binnenstromen en dus ook de zoutconcentratie in de Hollandsche IJssel afnemen. Omdat daarnaast de afvoer over de Nieuwe Maas met $16 \text{ m}^3/\text{s}$ toeneemt, zal deze extra tegendruk helpen om de zoutconcentraties op de Nieuwe Maas, en daarmee de Hollandsche IJssel, te verlagen. Dit zien we terug in de chloridedata. Hierbij zijn de chlorideconcentraties aan de noordrand geëvalueerd op drie locaties nabij de Hollandsche IJssel (zie Figuur 5.3) en op één locatie in de Nieuwe Waterweg. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5.4 en Tabel 5.1. Hieruit blijkt dat de maximumchlorideconcentratie in de Hollandsche IJssel nabij de stormvloedkering met 13% daalt (22 mg Cl/l) daalt, in de monding van de Hollandsche IJssel en op de Nieuwe Maas bij de van Brienoordbrug met zo'n 20% daalt en op de Nieuwe Waterweg met 3%.

Omdat zoutconcentraties met een vertraging reageren op veranderingen in de hydrodynamica, zien we dat het geruime tijd duurt voordat de chlorideconcentraties een nieuw evenwicht bereiken en dat deze periode langer is dan voor de hydrodynamica. Waar voor de restdebieten op de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg na ongeveer 3 getijden meer dan 50% van de verandering is bereikt, duurt dit voor zout 4 tot 8 getijden. Hierbij is de aanpassingstijd op de Hollandsche IJssel nabij de stormvloedkering het langst, pas na 8 getijden is meer dan 50% van de verandering bereikt (dat wil zeggen dat de daling na 8 getijden voor het eerst meer is dan 11 mg Cl/l op een totale daling van 22 mg Cl/l) en pas na 21 getijden is meer dan 90% van de verandering bereikt. Dat de aanpassingstijden nabij de stormvloedkering in de Hollandsche IJssel langer zijn dan op de Nieuwe Maas en in de monding van de Hollandsche IJssel komt doordat veranderingen in debiet en

zoutconcentratie primair op de Nieuwe Maas plaatsvinden en pas later doorwerken naar de zijtak Hollandsche IJssel.

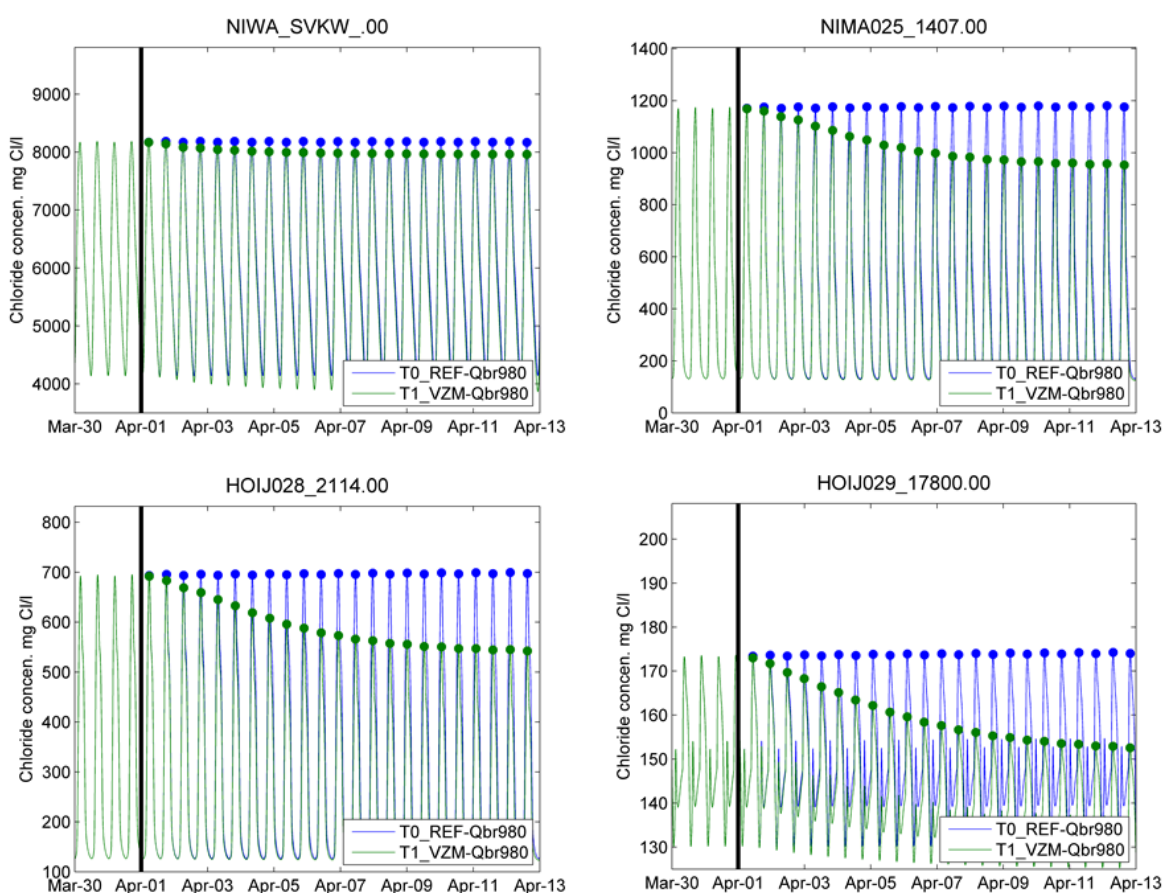
Op de Nieuwe Waterweg zijn de aanpassingstijden aanzienlijk korter dan op de Nieuwe Maas en de Hollandsche IJssel; binnen 4 getijden wordt meer dan 50% van de verandering bereikt, dit is één getijperiode langer dan de 50% aanpassingstijd van het restdebiet aldaar. De trage responstijd nabij de Hollandsche IJssel komt doordat de zoutconcentratie op de Nieuwe Maas door twee effecten wordt beïnvloed: 1) het hogere restdebiet op de Nieuwe Maas, waardoor de oprukkende zouttong meer tegendruk ondervindt en 2) het hogere restdebiet op de Nieuwe Waterweg, waardoor minder zout de Rijn-Maasmonding binnen zal komen. Dit laatste effect duurt langer voordat deze helemaal doorwerkt tot nabij de Hollandsche IJssel. De kombegende werking van de vele havens langs de Nieuwe Maas heeft hier waarschijnlijk een grote invloed op (Winterwerp 1982). Hiermee kunnen de langere aanpassingstijden goed worden verklaard. Of de berekende tijden daarbij kloppen met de werkelijkheid is echter niet met zekerheid te stellen, maar de orde grootte lijkt realistisch. Op de onzekerheden wordt nader ingegaan in §5.5.



Figuur 5.3 *Indicatie locatie uitvoerlocaties. Bovenste figuur: locaties in de SOBEK schematisatie. Onderste figuur: geografische locaties. Kaart: Openstreetmaps ©. HOIJ029_17800.00 is hierbij de Hollandsche IJssel ter hoogte van de stormvloedkering, HOIJ028_2114.00 de monding van de Hollandsche IJssel en NIMA025_1407.00 de Nieuwe Maas ter hoogte van de van Briene noordbrug*

Tabel 5.1 Overzicht maximum chlorideconcentraties en ontwikkeling in de tijd. Per locatie staat aangegeven wat de chlorideconcentraties zijn voor de situatie met en zonder onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer. In de laatste drie kolommen staat na hoeveel getijden een zeker percentage van de verandering is overschreden. NB. Zoutconcentraties zijn bepaald met een 1D model. Dit kent onzekerheden, zie discussie in §5.5. Resultaten moeten daarom in kwalitatieve zin beschouwd worden.

Locatie	Chlorideconcentraties (mg Cl/l)		Verschillen		Percentage van de verandering, na x getijden		
	referentie	maatregel	Abs.	Rel.	>50%	>90%	>95%
NIWA_SVKW_00	8173	7961	-212	3%	4	12	25
NIMA025_1407.00	1171	940	-231	20%	8	17	30
HOIJ028_2114.00	693	534	-159	23%	8	17	30
HOIJ029_17800.00	173	151	-22	13%	8	21	40



Figuur 5.4 Ontwikkeling zoutconcentraties voor de referentie situatie (T_0) en voor wanneer de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer wordt stopgezet: $50 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 0 \text{ m}^3/\text{s}$ (T_1). De schaal van de verticale as is verschillend voor de 4 figuren

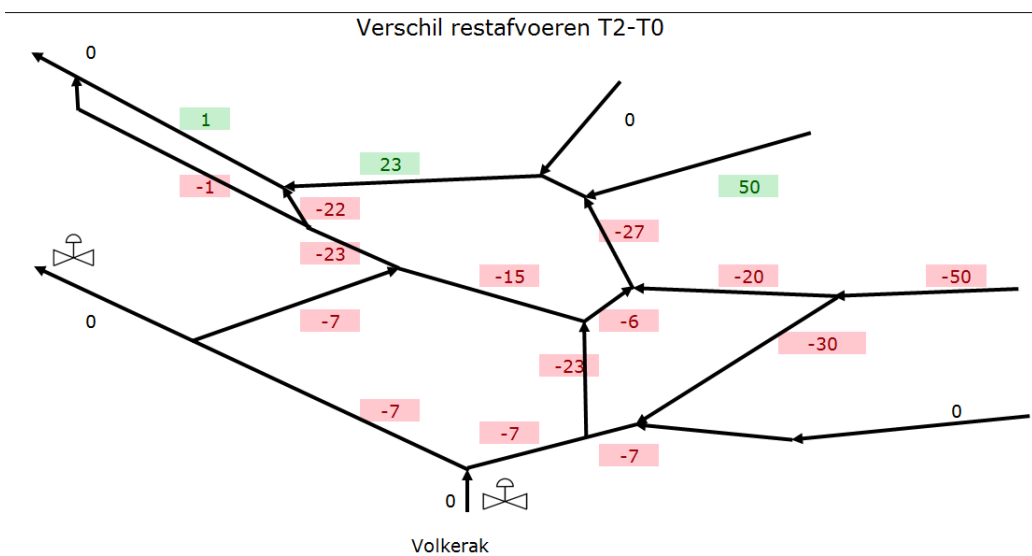
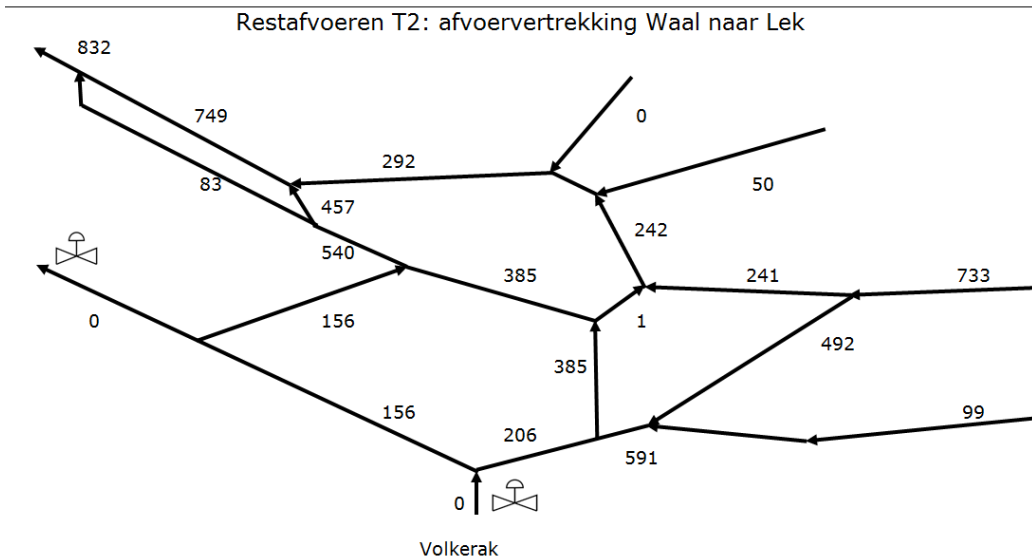
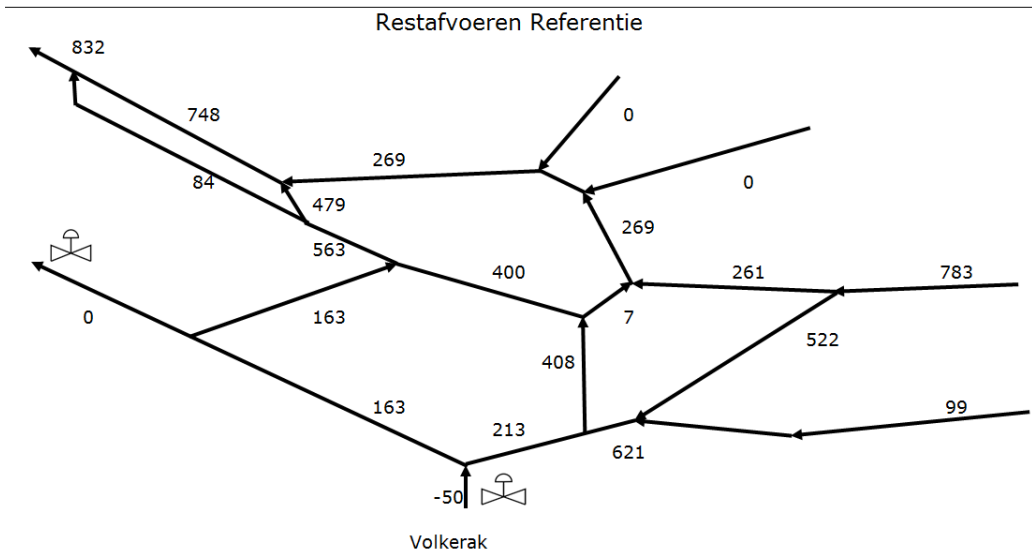
5.4 Effect afvoervertrekking Waal naar Lek

5.4.1 Effect op restdebieten

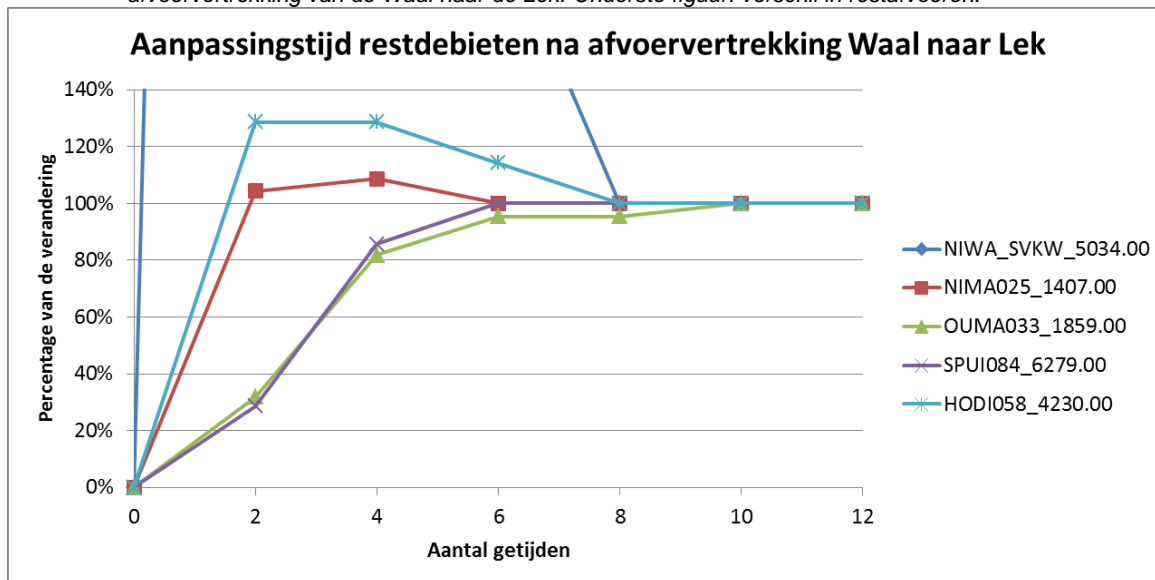
In Figuur 5.5 zien we de restdebieten in het systeem voor de referentiesituatie en de situatie waarbij er $50 \text{ m}^3/\text{s}$ extra via de Lek binnenkomt en $50 \text{ m}^3/\text{s}$ minder over de Waal. Deze afvoervertrekking zorgt ervoor dat de restdebieten voor bijna alle takken zullen afnemen, met uitzondering van de Lek en Nieuwe Maas aan de noordrand. De toename van $50 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Lek resulteert hierbij in een toename van $23 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Nieuwe Maas. De overige $27 \text{ m}^3/\text{s}$ stroomt richting het zuiden, waar het de afname in restdebieten ten gevolge van de reductie van $50 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Waal gedeeltelijk compenseert.

In Figuur 5.6 zijn de aanpassingstijden geïllustreerd. Ook hier zien we dat het 10 getijperioden duurt voordat het systeem weer volledig in evenwicht is. Net als voor het T1-scenario geldt ook hier dat er in de hele Rijn-Maasmonding een nieuw evenwicht moet worden bereikt en dat dit vele getijperioden kan duren door de grote afstanden en de buffercapaciteit van het Haringvliet en Hollandsch Diep. Aan de noordrand en op het oostelijke deel van het Hollandsch Diep zien we daarbij dat de verandering eerst doorschiet.

Op het Oostelijke deel van het Hollandsch Diep gaat het hier om kleine veranderingen waarbij eerst de afvoer afnemen van $213 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $204 \text{ m}^3/\text{s}$ en na een tijdje weer toenemen tot $206 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit komt doordat de afname in afvoer op de Waal snel doorwerkt op dit stuk en pas enige tijd later doorwerkt in de rest van de Rijn-Maasmonding. Op de noordrand zien we ook dat de waarde eerst doorschiet. Omdat het op de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg om een toename gaat, betekent dit dat de toename eerst heel sterk is en daarna weer afzwakt. Op de Nieuwe Maas is na 4 getijden de afvoer met $25 \text{ m}^3/\text{s}$ toegenomen van $269 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $294 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit neemt uiteindelijk af naar $292 \text{ m}^3/\text{s}$, waardoor de netto toename $23 \text{ m}^3/\text{s}$ is. De golf extra water die via de Nieuwe Maas komt, zorgt in eerste instantie voor een toename op de Nieuwe Waterweg met $16 \text{ m}^3/\text{s}$. Daarna neemt het restdebiet weer af, zodat de netto toename slechts $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (verwaarloosbaar op het totale debiet). Percentueel zorgt dit voor een enorm doorschietend effect (1600%).



Figuur 5.5 Bovenste figuur: Restafvoeren voor de referentiesituatie. Middelste figuur: Restafvoeren bij afvoervertrekking van de Waal naar de Lek. Onderste figuur: verschil in restafvoeren.



Figuur 5.6 Percentage van de verandering in restdebieten na stopzetten onttrekking naar VZM, voor de Nieuwe Waterweg (NIWA_SVKW_5034.00), Nieuwe Maas (NIMA025_1407.00), Spui (SPUI084_6279.00) en Hollandsch Diep, oostelijk van de Volkerak Sluizen (HODI058_4230.00). De punten geven de uitkomsten weer van de berekening. Vanwege de tijdstap in de berekening (10 min), konden de restdebieten alleen per twee getijperioden worden berekend (duur 1 getijperiode is 12 uur en 25 min). Voor het oog zijn daarom lijnen tussen de punten aangebracht

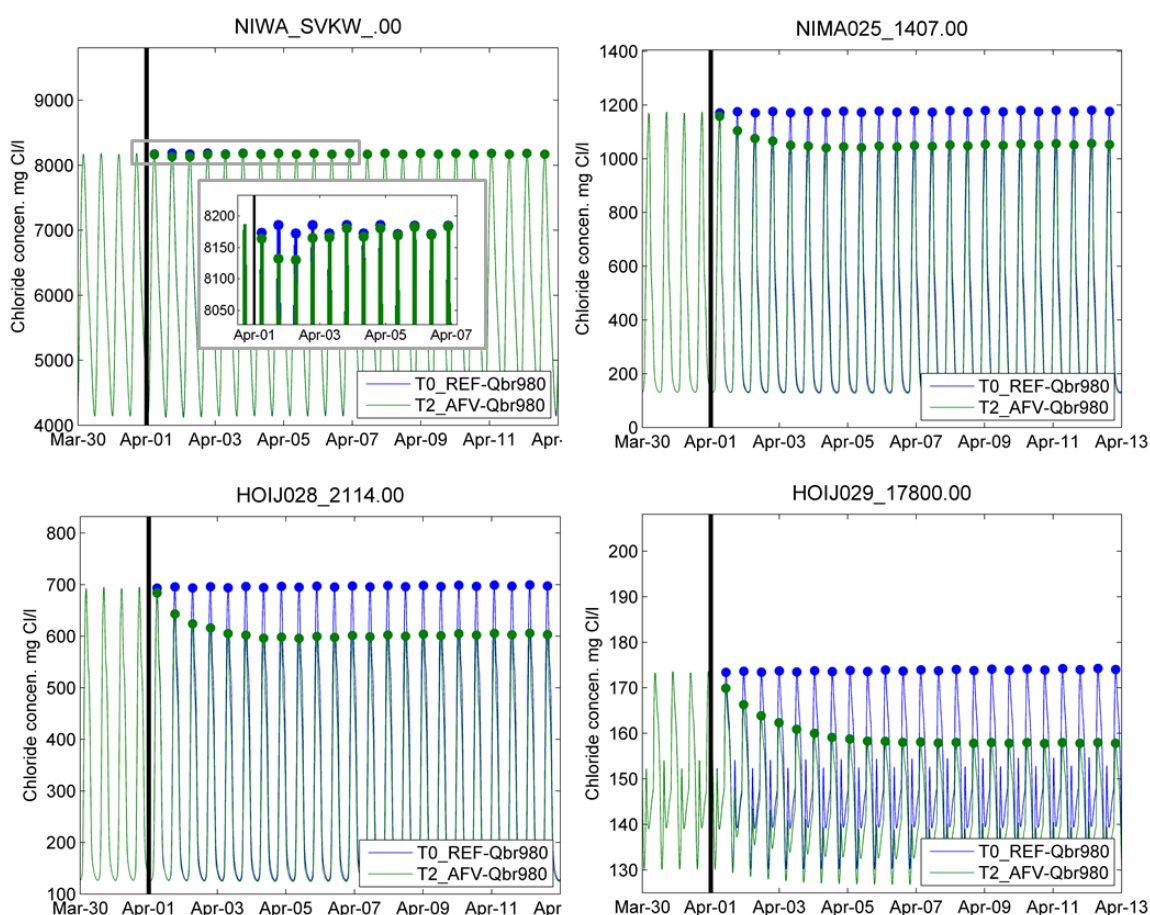
5.4.2 Effect op zout

In Tabel 5.2 en Figuur 5.7 zijn de effecten op de zoutconcentraties op verschillende locaties nabij de noordrand weergegeven. Omdat bij een afvoervertrekking evenveel water het gebied via de Maasmond verlaat als in de referentiesituatie, blijven de zoutconcentraties op de Nieuwe Waterweg nagenoeg gelijk (toename van minder dan 1%). Doordat in eerste instantie de afvoergolf op de Lek, via de Nieuwe Maas tot een tijdelijke toename zorgt in de restdebieten op de Nieuwe Waterweg, neemt in eerste instantie de zoutconcentratie licht af. Dit is te zien in Figuur 5.7.

Doordat de afvoer over de Nieuwe Maas toeneemt met 23 m³/s, nemen de zoutconcentraties rond de monding van de Hollandsche IJssel af met ongeveer 10%. Binnen 2 à 3 getijperioden is meer dan 50% van de verandering bereikt. Deze snelle respons is te danken aan het doorschieten van de afvoeren op de Nieuwe Maas, waardoor de toename in afvoeren op de Nieuwe Maas na 2 getijden al 24 m³/s is. Van de drie locaties nabij de monding van de Hollandsche IJssel, duurt het wederom het langst bij de stormvloedkering in de Hollandsche IJssel (HOIJ029_17800.00) voordat de nieuwe concentraties zijn ingesteld. Dit vanwege het feit dat de veranderingen primair doorwerken op de Nieuwe Maas en de Hollandsche IJssel hiervan een zijtak is.

Tabel 5.2 Overzicht maximum chlorideconcentraties en ontwikkeling in de tijd. Per locatie staat aangegeven wat de chlorideconcentraties zijn voor de situatie zonder en met afvoervertrekking. In de laatste drie kolommen staat na hoeveel getijden een zeker percentage van de verandering is overschreden. NB. Zoutconcentraties zijn bepaald met een 1D model. Dit kent onzekerheden, zie discussie in §5.5. Resultaten moeten daarom in kwalitatieve zin beschouwd worden.

Locatie	Chlorideconcentraties (mg Cl/l)		Verschillen		Percentage van de verandering, na x getijden		
	referentie	maatregel	Abs.	Rel.	>50%	>90%	>95%
NIWA_SVKW_00	8173	8175	2	0%	17	25	33
NIMA025_1407.00	1171	1048	-123	-10%	2	5	6
HOIJ028_2114.00	693	600	-93	-13%	2	5	6
HOIJ029_17800.00	173	157	-16	-9%	3	8	22



Figuur 5.7 Ontwikkeling zoutconcentraties voor de referentie situatie (T0) en voor wanneer de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer wordt stopgezet: $50 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 0 \text{ m}^3/\text{s}$ (T2)

5.5 Discussie

Uit de SOBEK-berekeningen volgt dat het verminderen van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer met $50 \text{ m}^3/\text{s}$ een groter effect heeft op de zoutconcentraties nabij de monding van de Hollandsche IJssel (~20%) en nabij de stormvloedkering in de Hollandsche IJssel (~13%), dan de afvoervertrekking van $50 \text{ m}^3/\text{s}$ van de Waal naar de Maas, reductie nabij de monding van de Hollandsche IJssel en nabij de stormvloedkering met ~10%.

Bij het verminderen van de onttrekking zorgen twee effecten voor een daling in de chlorideconcentraties: 1) door de toename in restdebiet door de Maasmond komt minder zout het gebied binnen, 2) door de toename in restdebiet op de Nieuwe Maas is er bovenstrooms meer tegendruk. Bij de afvoervertrekking verlaat evenveel water het systeem via de Maasmond en blijven de chlorideconcentraties op de Nieuwe Waterweg gelijk. De afname in concentraties nabij en in de Hollandsche IJssel zijn alleen te danken aan de toename in restdebieten op de Nieuwe Maas.

Er zit echter een groot verschil in de tijdschalen van de verandering. Bij het stopzetten van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer duurt het 8 getijperioden voordat 50% van de verandering in maximale zoutconcentraties is bereikt, terwijl dit voor de afvoervertrekking al in 2-3 getijperioden het geval is. Dit verschil kan toegeschreven worden aan de volgende effecten:

- Doordat de onttrekking zich nabij de zuidrand bevindt, duurt het meerdere getijperioden voordat de afvoerverdeling aan de noordrand zich heeft aangepast. Dit komt enerzijds door de grote buffercapaciteit van het Haringvliet/Hollandsch Diep, anderzijds door de afstand tussen de Volkerak-sluizen en de monding van de Hollandsche IJssel. Omdat de zoutconcentraties weer met enige vertraging reageren op de hydrodynamica, duurt dit dus nog langer. Extra vertragende component hierbij is dat de concentraties nabij en in de Hollandsche IJssel door twee effecten worden verlaagd 1) hogere restdebiet Nieuwe Maas, dus meer tegendruk en 2) minder zout vanuit zee door het hogere restdebiet op de Nieuwe Waterweg. Dit laatste effect duurt langer voordat deze doorwerkt tot bij de monding van de Hollandsche IJssel.
- Bij een afvoervertrekking naar de Lek nemen de afvoeren aan de noordrand snel toe, waarbij ze bovendien eerst doorschieten. Dit is gunstig voor een snelle afname van de zoutconcentraties.

Hoewel we de responstijd in het systeem met betrekking tot de hydrodynamica en zout goed kunnen verklaren, dient hier wel een kanttekening te worden gemaakt. Met betrekking tot de hydrodynamica zijn de modelresultaten ten aanzien van de aanpassingstijden betrouwbaar. Voor zout is dit in mindere mate het geval. In 1D worden alle 3D-zoutverspreidingsprocessen gemodelleerd met behulp van een dispersieformulering. Het advectieve gedrag (met de "hoofdstroom" mee) zal goed gaan. Dit is een belangrijke deel van aanpassing in zoutconcentraties bij veranderende debieten. Maar het dispersieve deel zal ook een grote rol spelen. Of SOBEK dit goed representeert is niet met zekerheid te stellen. Exacte aanpassingstijden en zoutconcentraties zijn dus onzeker, maar in *kwantitatieve* zin zijn de hierboven genoemd resultaten en conclusies correct.

Tot slot zijn de berekeningen uitgevoerd voor geschematiseerde condities, waarbij voor de afvoerverdeling bij een bepaalde Bovenrijnafvoer de stuwtafel is gebruikt voor de afvoeren over de Lek en de Waal en de 50% relatie voor de afvoeren over de Maas. Met name de laatste kunnen sterk variëren bij eenzelfde Bovenrijnafvoer, omdat de Rijn en de Maas niet uit hetzelfde gebied water ontvangen en daarmee de lage (en hoge) afvoeren vaak niet samenvallen. In de praktijk zal dus elke situatie anders zijn.

5.6 Synthese en toepasbaarheid van de resultaten

Samengevat kan dus gesteld worden dat bij de beschouwde condities het verminderen van de onttrekking naar het Volkerak-Zoomer met 50 m³/s effectiever is voor het reduceren van de chlorideconcentraties dan de afvoervertrekking van 50 m³/s van de Waal naar de Lek. Bij het stopzetten van de onttrekking duurt het echter vele malen langer voordat de nieuwe concentraties bereikt zijn. Welke maatregel effectiever is, hangt dus af van de situatie (zie ook de redeneerlijn in Hoofdstuk 6).

Wanneer het urgent is en de chlorideconcentraties binnen enkele dagen moeten dalen, dan is de afvoervertrekking effectiever. Als bijeffect zullen de afvoeren over de Oude Maas echter afnemen, wat het verziltingsrisico voor het midden en zuidelijke deel van de Rijn-Maasmonding zal doen toenemen. Deze maatregel kan dus alleen worden ingezet als er geen sprake is van een dreigende verzilting van de zuidrand.

De volgende stap is nu om op basis van de verkennende berekeningen een *eerste schatting* te maken van de effectiviteit en de praktische toepasbaarheid. Dit is samen met de (regionale) beheerders en drinkwaterbedrijven gedaan in de workshop van 21 november 2016. Hierbij zijn de volgende discussiepunten aan bod gekomen:

Is de afname voldoende en voldoende snel?

Vraag: Als we ervan uitgaan dat de voorspelde effecten op de chlorideconcentraties de juiste orde hebben, dan nemen bij het verminderen van de onttrekking met 50 m³/s of een afvoervertrekking van 50 m³/s de chlorideconcentraties nabij de stormvloedkering met orde grootte 5-15 mg Cl/l af, waarbij in het meest gunstige geval 5 mg Cl/l reductie wordt behaald in 1 dag. De vraag is of dit voldoende is en hoe snel de afnames in chlorideconcentraties moeten doorwerken om toepasbaar te zijn.

Belangrijkste uitkomsten discussie:

- Voorspelling van de hydrodynamica gaat tot 10 dagen vooruit. Op basis hiervan kan worden geschat of er risico is op dreigende verzilting, zij het met de nodige onzekerheid. Anticiperen is daarom zeker haalbaar (orde meerdere dagen tot een week), mits de sturing van de sluizen en de stuw op korte termijn kan worden gerealiseerd.
- Afname van 5 – 15 mg/l is een zeer beperkt effect. In de meeste gevallen zal dit de verzilting niet voorkomen en hooguit de periode ietwat verkorten. Slechts in enkele gevallen kan het net het beetje zijn dat ervoor zorgt dat de monding van de Hollandsche IJssel niet verzilt. Dit is gunstig, want als de chlorideconcentraties in de monding ook verhoogd raken tijdens eb, kan door het dispersieve karakter van de zoutverspreiding op de Hollandsche IJssel het zout richting Gouda trekken (Kuijper 2015). Hoe vaak deze situatie voorkomt is niet bekend. Door meerdere jaren door te rekenen met en zonder maatregelen, kan een beter schatting worden gemaakt van de effectiviteit van de twee knoppen.

Is 50 m³/s haalbaar¹⁰?

Vraag: De maximale capaciteit van de Volkeraksluizen is 75 m³/s, maar deze wordt lang niet altijd ingezet. Daarbij is recent afgesproken om vanaf 2016 het Volkerak-Zoommeer zo veel mogelijk gedurende de winter door te spoelen, wanneer er in de regel voldoende water beschikbaar is. Dit is een goede keuze, gezien het feit dat het effect van de onttrekking pas na dagen doorwerkt op de noordrand en daarom het stopzetten een weinig effectieve maatregel zal zijn wanneer op korte termijn verzilting dreigt. Omdat er bij winterdoorspoeling in de zomer niet of in beperkte mate onttrokken wordt is gedurende deze droge periode standaard de afvoer over de Nieuwe Waterweg Nieuwe Maas hoger, wat gunstig is voor het tegengaan van verzilting. Gevolg is wel dat het niet vaak zal voorkomen dat bij een gebeurtenis van dreigende verzilting de onttrekking teruggebracht kan worden met 50 m³/s, zoals in de berekening is gedaan. Ook is niet bekend hoe haalbaar het is om 50 m³/s over de Lek te laten gaan ten koste van de Waal.

Belangrijkste uitkomsten discussie:

- De maximale capaciteit van de Volkeraksluizen betreft 3 kokers van elke 25 m³/s, dus 75 m³/s. Ook buiten de winterperiode zullen er meestal nog 1 of 2 kokers worden ingezet. Met hoeveel de doorspoeling kan worden beperkt hangt af van de waterstand en waterkwaliteit op het Volkerak-Zoommeer, maar kan nooit teruggebracht worden naar 0 m³/s. De door de beheerder geschatte maximale beperking is ongeveer de helft van het onttrokken debiet, maar dit kan per situatie verschillen.
- Momenteel lopen er diverse onderzoeken naar het vergroten van de afvoer over de Lek: of via de Prins Bernhard sluizen in het Betuwepand (meer water over de Lek ten koste van de Waal) of via de stuw bij Driel (meer water over de Lek ten koste van de IJssel). Ten aanzien van de eerste optie wordt momenteel onderzocht wat de effecten zijn van 25, 50, 75 en 100 m³/s door het Betuwepand: kan het erdoorheen en wat zijn de effecten voor de scheepvaart? Indien er extra water door het Betuwepand wordt gestuurd zal hiervan naar schatting de helft worden gebruikt voor IJsselmeer. Het overige kan gebruikt worden voor de Lek.

Overige punten

- Het is mogelijk interessant om beide knoppen (beperking onttrekking en afvoervertrekking) te combineren.
- Het vergroten van de afvoer over de Lek is naar verwachting een zeer effectieve maatregel voor het tegengaan van verzilting van de Lek.
- Indien de stuurknoppen ingezet gaan worden is het nodig om de neveneffecten goed te kwantificeren.
- Voor Slim Water Management dienen uiteindelijk alle puzzelstukjes bij elkaar te worden gebracht en niet elke maatregel apart te worden beschouwd.

¹⁰ Zoals eerder benoemd in dit hoofdstuk is in deze studie gekozen voor 50 m³/s voor beide maatregelen om ze a) goed met elkaar te kunnen vergelijken, b) de effecten duidelijk te kunnen onderscheiden. Bij kleinere afvoeren worden sommige effecten wellicht te klein om te evalueren.

Op basis van deze discussie kan gesteld worden dat de effectiviteit van beide stuurknoppen voor het tegengaan van verzilting naar verwachting gering is, maar dat de tijdschalen van dagen tot een week hierin waarschijnlijk geen belemmering hoeven te vormen. Of beide stuurknoppen kunnen bijdragen om in periodes van droogte net wat extra ruimte te creëren kan onderzocht worden door met een 1D model meerdere jaren door te rekenen en het aantal dagen overschrijding van de chloridenorm voor de situatie met en zonder maatregelen met elkaar te vergelijken. Het kwantificeren van het gecombineerde effect van het beperken van de onttrekking en het vergroten van de afvoer over de Lek is hierbij interessant. Keuzes voor de grootte van de afvoervertrekking en de grootte van de beperking van de onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer moeten hierbij worden afgestemd met lopende onderzoeken en de beheerders. Vanwege de grote onzekerheid van voorspelling van de chlorideconcentraties met een 1D model is het goed om met een 3D model te verifiëren of het 1D model realistische schattingen geeft van zoutconcentraties en de tijdschalen.

5.7 Aanbevelingen

Uit bovenstaande komen de volgende aanbevelingen:

- Betrouwbaarheid 1D model bepalen door een 3D berekening uit te voeren en de berekende tijdschalen en effecten op de chlorideconcentraties met elkaar te vergelijken.
- Kwantificeren effectiviteit van de maatregelen, door meerdere jaren door te rekenen met een 1D model en het aantal dagen overschrijding van de chloridenorm met en zonder maatregelen met elkaar te vergelijken. Op basis van lopende studies en afstemming met de beheerders kunnen hierbij realistische waarden worden bepaald voor de afvoervertrekking van de Waal naar de Lek en de beperking van de onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer.

6 Handelingsperspectief

6.1 Overzicht

In onderstaand schema is voor de stuurknoppen Haringvlietsluizen (A), Volkeraksluizen (B) en stuw bij Hagestein (C) schematisch weergegeven wanneer deze ingezet kunnen worden. Nadere toelichting en detaillering bij het schema volgen in §6.2 - 6.4.

Verziltzing monding Hollandsche IJssel

Creëren juiste uitgangssituatie

B – Winterdoorspoeling

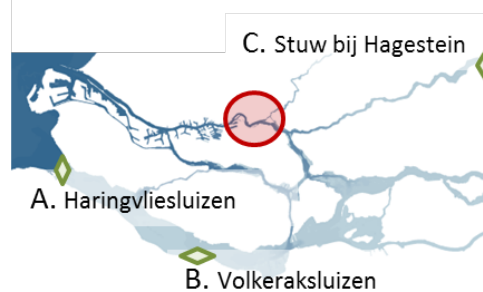
Bij verwachte verziltzing over 1 à 2 weken:

A – Beperking restafvoeren met minimaal enkele tientallen m³/s (indien mogelijk).

B – Beperking van doorspoeling met minimaal enkele tientallen m³/s (indien mogelijk).

Bij acuut dreigende verziltzing (1 à 2 dagen)

C – Verhogen afvoer over de Lek met minimaal enkele tientallen m³/s (indien mogelijk).



Tegengaan achterwaartse verziltzing

Risico inschatten met behulp van nieuwe vuistregel.

Creëren juiste uitgangssituatie

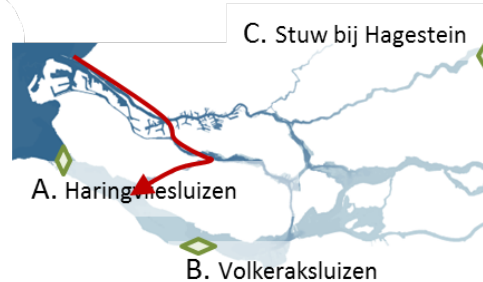
B – Doorspoelen buiten stormseizoen

Bij verwachte achterwaartse verziltzing

A – Minder spuien (indien mogelijk)

B – Beperken doorspoeling (indien mogelijk)

C – Verhogen afvoer over de Waal (indien mogelijk)



Ontziltzing Haringvliet

(na achterwaartse verziltzing of bij voorwaartse verziltzing zuidrand tgv Kier)

Creëren juiste uitgangssituatie

A – zoetspoelen (toekomst).

Na verziltzing

A – zo mogelijk meer spuien, minder innemen met vloed.



6.2 Verzilting monding Hollandsche IJssel

Stuurknop Haringvlietsluizen:

Vermindering van het restdebiet door de Haringvlietsluizen leidt naar verwachting tot het zelfde effect aan de noordrand als het verminderen van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer. Beide stuurknoppen zitten namelijk aan de zuidrand en kunnen ervoor zorgen dat er meer water via de noordrand naar zee stroomt. Volgens de geïdealiseerde SOBEK-berekeningen leidt een vermindering van het restdebiet door de Haringvlietsluizen met enkele tientallen m³/s tot een afname van de chlorideconcentraties van 5-15% nabij de monding Hollandsche IJssel, bij een situatie van dreigende verzilting¹¹. Dit effect is pas na orde een week merkbaar. De verlaging van de chlorideconcentraties op de Nieuwe Waterweg is al binnen enkele dagen merkbaar. Deze maatregel is daarom alleen effectief als deze dagen voor aanvang van de verzilting kan worden ingezet om de chlorideconcentraties op de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas zo laag mogelijk te houden en daarmee de uitgangssituatie verbeteren. Vermindering van het restdebiet door de sluisen kan verkregen worden door óf minder te spuien óf meer in te nemen tijdens vloed (toekomstige situatie met "de Kier"):

Minder spuien

Praktisch: In huidige situatie is dit alleen mogelijk voor Bovenrijnafvoeren groter dan 1100 m³/s als de Haringvlietsluizen in bedrijf zijn. Tussen 1100 en 1700 m³/s beperkte ebopening, met spuidebieten van enkele tientallen m³/s.

Bijeffecten: Ongunstig voor het eventueel zoetspoelen van het Haringvliet. Gunstig voor het tegengaan van achterwaartse verzilting (effectiviteit onbekend). Hogere waterstanden voor de scheepvaart naar Moerdijk (effectiviteit onbekend).

Inzetten: Bij voorziene verzilting die pas na 1 à 2 weken zal optreden en als Haringvliet niet hoeft te worden zoetgespoeld.

Kennishiaten: Effectiviteit minder spuien voor aanvang van een periode van verzilting is niet onderzocht. Effect op waterstanden niet gekwantificeerd.

Meer innemen met vloed (*toekomst*)

Praktisch: Toekomstige operationeel beheer ligt nog niet vast (§4.1).

Bijeffecten: Toename verzilting zuidrand via Haringvlietsluizen. Gemiddeld hogere waterstanden voor de scheepvaart naar Moerdijk, maar wel sterkere variaties in waterstand.

Inzetten: Bij voorziene verzilting die pas na 1 à 2 weken zal optreden en als geen langdurige lage rivierafvoer wordt verwacht en de toename in zoutconcentraties aan de zuidrand geen belemmering vormen voor de innamepunten.

Kennishiaten: Geen van bovengenoemde effecten is gekwantificeerd.

Stuurknop Volkeraksluizen:

Bij verzilting monding Hollandsche IJssel¹¹ leidt een afname van de VZM-onttrekking met enkele tientallen m³/s naar schatting tot een afname van de chlorideconcentraties van 5-15% nabij de monding Hollandsche IJssel. Effect pas na orde een week merkbaar. Door het Volkerak-Zoommeer zoveel mogelijk tijdens de winter door te spoelen, hoeft er minder onttrokken te worden tijdens de zomerperiode wanneer er in de regel vaker een watertekort optreedt.

¹¹ Conform definitie in het waterakkoord Hollandsche IJssel en Lek, zie §5.2

Mogelijke stuurmogelijkheden:**Winterdoorspoeling**

- Praktisch:** Alleen effectief als hiermee in droge periodes de inname met minimaal enkele tientallen m^3/s minder is ten opzichte van de situatie zonder winterdoorspoeling.
- Bijeffecten:** Hogere kans achterwaartse verzilting tijdens winterdoorspoeling, lagere kans tijdens overige periode. NB. Achterwaartse verzilting komt met name voor tijdens de herfst/ winterperiode.
Iets lagere waterstanden bij Moerdijk tijdens winterdoorspoeling, gemiddeld hogere waterstanden in de overige periode.
- Inzetten:** In de winter, als er geen lage rivierafvoeren zijn en geen stormopzet, voor het creëren van een goede uitgangssituatie.
- Kennishiaten:** Verdere kwantificatie effectiviteit voor tegengaan verzilting noordrand. Neveneffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel vermindering in onttrekking gerealiseerd kan worden.

Beperken onttrekking voor doorspoelen Volkerak-Zoommeer:

- Praktisch:** Alleen effectief als de onttrekking met tientallen m^3/s beperkt kan worden (bijvoorbeeld tijdens de winter) en effect pas na orde grootte een week merkbaar hoeft te zijn.
- Bijeffecten:** Gunstig voor het tegengaan van achterwaartse verzilting.
Iets hogere waterstanden bij Moerdijk.
- Inzetten:** Bij voorziene verzilting die pas na 1 à 2 weken zal optreden en wanneer de onttrekking met minimaal enkele tientallen m^3/s verminderd kan worden.
- Kennishiaten:** Verdere kwantificatie effectiviteit voor tegengaan verzilting noordrand. Neveneffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel vermindering in onttrekking gerealiseerd kan worden.

Stuurknop stuw bij Hagestein:

Bij verzilting monding Hollandsche IJssel¹¹ leidt verhoging van de afvoer via de Lek (ten koste van de Waal) met enkele tientallen m^3/s naar schatting tot een afname van de chlorideconcentraties van 5-10% nabij de monding Hollandsche IJssel. Effect al na 1 à 2 dagen merkbaar.

- Praktisch:** Kan ingezet worden om op korte termijn de chlorideconcentraties te verlagen. Niet bekend hoeveel afvoervertrekking er gerealiseerd kan worden.
- Bijeffecten:** Verhoging chlorideconcentraties zuidrand en kans op achterwaartse verzilting. Lagere waterstanden op de Waal en aan de zuidrand.
- Inzetten:** Indien de verzilting al binnen enkele dagen zal optreden en wanneer de afvoer over de Lek met minimaal enkele tientallen m^3/s kan worden verhoogd en er geen achterwaartse verzilting dreigt.
- Kennishiaten:** Verdere kwantificatie effectiviteit voor tegengaan verzilting noordrand. Neveneffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel afvoervertrekking er gerealiseerd kan worden.

6.3 Tegengaan achterwaartse verzilting

Voorspelling

Op basis van de nieuwe vuistregel (§3.5) inschatten of er sprake is van een dreigende achterwaartse verzilting. Indien dit het geval is overwegen om één van de onderstaande stuurknoppen in te zetten.

Stuurknop Haringvlietsluizen:

Achterwaartse verzilting kan tegen worden gegaan door de gemiddelde waterstanden aan de zuidrand te verhogen ten opzichte van de noordrand (§2.3.1), dit kan door of minder water te spuien of meer water in te nemen tijdens vloed. Omdat de laatste optie leidt tot verzilting Haringvliet via de Haringvlietsluizen, is deze niet effectief. Dus blijft minder spuien over:

Minder spuien

Praktisch: Alleen mogelijk als de Haringvlietsluizen in bedrijf zijn ($Q_{BR} \geq 1100 \text{ m}^3/\text{s}$). Tussen 1100 en 1700 m^3/s beperkte ebopening, met spuidebieten van enkele tientallen m^3/s . NB. Achterwaartse verzilting treedt geregeld op voor rivierafvoeren boven de 1700 m^3/s .

Bijeffecten: Ongunstig voor het eventueel zoetspoelen van het Haringvliet. Gunstig voor tegengaan verzilting noordrand.

Inzetten: Bij dreigende achterwaartse verzilting als het Haringvliet zoet is.

Stuurknop Volkeraksluizen:

Door minder te onttrekken worden de afvoeren door o.a. de Oude Maas en Nieuwe Waterweg verhoogd, waardoor minder zout kan binnendringen en over de Oude Maas richting de zuidrand kan stromen. Dit kan helpen in het verlagen van de kans op achterwaartse verzilting. Omdat achterwaartse verzilting met name optreedt bij windopzet kan worden overwogen om zoveel mogelijk buiten het stormseizoen (herfst) door te spoelen:

Doorspoeling na stormseizoen:

Praktisch: Effectiviteit en tijdschalen nog niet onderzocht.

Bijeffecten: Gunstig voor het creëren van een goede uitgangssituatie voor verzilting noordrand (zie §6.2) tijdens periodes van lage rivierafvoer (m.n. de zomer). Gedurende de doorspoeling iets lagere waterstanden bij Moerdijk.

Inzetten: Na de herfst als er in de regel minder stormen zijn voor het creëren van een goede uitgangssituatie.

Kennishiaten: Effectiviteit en bijeffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel vermindering in onttrekking gerealiseerd kan worden.

Beperken onttrekking voor doorspoelen Volkerak-Zoommeer:

Praktisch: Effectiviteit en tijdschalen nog niet onderzocht.

Bijeffecten: Gunstig voor het tegengaan van verzilting monding Hollandsche IJssel, mits geruime tijd voorzien. Iets hogere waterstanden bij Moerdijk.

Inzetten: Bij voorziene achterwaartse verzilting.

Kennishiaten: Effectiviteit en bijeffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel vermindering in onttrekking gerealiseerd kan worden.

Stuurknop Hagestein:

Door de stuw verder dicht te zetten zal meer water via de Waal stromen. Hierdoor zullen de waterstanden aan de zuidrand hoger worden en de afvoeren door de Oude Maas, Spui en Dordtsche Kil toenemen. Dit is gunstig voor het tegengaan van achterwaartse verzilting.

Praktisch: Alleen mogelijk als de stuw niet al dichtstaat. Effectiviteit en tijdschalen nog niet onderzocht.

Bijeffecten: Verhoging chlorideconcentraties noordrand.
Hogere waterstanden op de Waal en aan de zuidrand, lagere waterstanden Lek en noordrand.

Inzetten: Bij voorziene achterwaartse verzilting.

Kennishiaten: Effectiviteit en bijeffecten niet gekwantificeerd. Niet bekend hoeveel afvoervertrekking in de praktijk gerealiseerd kan worden.

6.4 Ontzilting Haringvliet

Indien na achterwaartse verzilting of in de toekomst met de vloedopening¹² de zuidrand verzilt is geraakt dient deze ontzilt te worden. Hiervoor kunnen alleen de Haringvlietsluizen worden ingezet. Door meer te spuien en minder in te nemen tijdens vloed (toekomst) kunnen de chlorideconcentraties verlaagd worden. Effectiviteit niet onderzocht. Bijeffecten zijn: toename chlorideconcentraties noordrand en verlaging waterstanden bij Moerdijk.

¹² Ook met zoetspoelen kan er zout achterblijven in het Haringvliet.

7 Conclusies en Aanbevelingen

Voor de verschillende verziltingsprocessen in de Rijn-Maasmonding is het van belang het systeem als geheel te beschouwen, omdat de noord- en zuidrand elkaar sterk beïnvloeden, zowel via natuurlijke processen als via de stuurknoppen.

In dit rapport is eerst een systeembeschouwing opgesteld, waarna vervolgens in meer detail is gekeken naar het proces van achterwaartse verzilting en de werking van de verschillende stuurknoppen. Op basis hiervan kan het volgende worden geconcludeerd:

7.1 Systeembeschouwing

Op basis van de systeembeschouwing zijn de volgende zaken geconcludeerd ten aanzien van verzilting in de Rijn-Maasmonding en de noord-zuidrelaties.

- De noordrand verzilt onder invloed van windopzet en lage rivierafvoer. De zuidrand beïnvloedt de verzilting langs de noordrand met name via de stuurknoppen in het systeem: de Haringvlietsluizen en de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer. Deze bepalen het restdebiet op de noordrand en daarmee de hoeveelheid zout die via de noordrand het systeem kan binnen dringen.
- Aan de zuidrand kunnen drie verziltingstypen worden onderscheiden:
 - o Achterwaartse verzilting, waarbij zout via de noordrand de zuidrand bereikt. Hiervoor zijn de waterstandsverschillen tussen de noord- en zuidrand bepalend. Deze bepalen hoever zout tijdens vloed aan de noordrand het gebied kan indringen richting het zuiden en hoever zout tijdens eb weer kan terugstromen naar het noorden.
 - o Nalevering: Als zout eenmaal de zuidrand heeft bereikt kan het worden opgeslagen in de diepe geulen in het Haringvliet. Hier kan het blijven tot er bij eb gespuid wordt door de Haringvlietsluizen en de snelheden hoog genoeg zijn. Indien er niet gespuid wordt, zal zout achterblijven en onder invloed van getij en wind de geulen verlaten en via het Spui terug naar de noordrand stromen.
 - o Voorwaartse verzilting: in de toekomst, als de sluisen ook bij vloed zullen openen kan zout weer direct vanuit zee het Haringvliet op komen. De hoeveelheid zal bepaald worden door de mate van opening.

7.2 Vuistregel achterwaartse verzilting

Onder extreme omstandigheden kan zout via de noordrand de zuidrand bereiken, dit noemen we achterwaartse verzilting. Dit kan tot hinderlijke situaties leiden voor de inname van zoetwater. Voor het optreden van achterwaartse verzilting is daarom een vuistregel opgenomen in het "Handboek Waterwacht". Deze is gebaseerd op het optreden van een lage rivierafvoer ($Q_{br} < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$) en een $HL > 1 \text{ m}$ (HL = het verschil tussen bijna gelijktijdig optredende hoge waterstand bij Hoek van Holland (H) en lage waterstand bij Moerdijk (L)). In dit onderzoek is deze vuistregel gevalideerd. Hieruit blijkt dat deze in 15 van de 25 gevallen de achterwaartse verzilting niet voorspelt. Uit een theoretische beschouwing volgt dat de volgende twee aspecten waarschijnlijk maatgevend zijn: waterstandsverschillen gedurende het hele getij en de mate van verzilting voorafgaand aan een gebeurtenis van achterwaartse verzilting. Op basis van deze twee processen is een nieuwe vuistregel opgesteld, welke is gebaseerd op de som van de waterstandsverschillen gedurende het hele voorgaande getij (mate van oplading) en huidige getij (mate van indringing gedurende de gebeurtenis zelf). De

nieuwe vuistregel voorspelt in 20 van de 25 gevallen de achterwaartse verzilting en geeft slechts 7 vals-positieven.

Omdat het om een verkennend onderzoek ging is de nieuwe vuistregel nog niet geoptimaliseerd en alleen gekeken of de situatie van achterwaartse verzilting optreedt en geen vergelijking gemaakt met de werkelijke chlorideconcentraties. Dit laatste is om twee redenen relevant. Ten eerste zijn er aanwijzingen dat niet alle situaties van achterwaartse verzilting zijn opgenomen in de tabel van Rijkswaterstaat (Bijlage A), waardoor er een vertekend beeld ontstaat van hoe de voorspelparameters presteren. Mogelijk presteren ze zelfs beter dan in de huidige analyse gesteld. Ten tweede kan de voorspelparameter makkelijker worden geoptimaliseerd door de overeenkomst te zoeken in de chlorideconcentratie en de grootte van de parameter.

Tot slot lijkt de mate van oplading van het systeem erg belangrijk. Over de tijdschalen die hiermee gepaard gaan is weinig bekend. Op basis van data-analyse, mogelijk aangevuld met numeriek modelonderzoek, zouden deze tijdschalen nader onderzocht kunnen worden.

7.3 Stuurknop Haringvlietsluizen

De Haringvlietsluizen kunnen beschouwd worden als de “grote kraan van Nederland”. Hiermee kunnen de waterbeweging en zoutconcentraties in de Rijn-Maasmonding beïnvloed worden en daarmee de bereikbaarheid van de haven van Moerdijk en de zoetwaterbeschikbaarheid voor drinkwaterbedrijven, landbouw, industrie en de bemaling van de polders.

De Haringvlietsluizen reguleren primair de waterstanden in de Rijn-Maasmonding. Bij een grotere opening kunnen de middenstand, getijslag en fase veranderen. Die tezamen bepalen de waterstandsverschillen tussen de noord- en de zuidrand en daarmee de debietverdeling en zoutverspreiding. De werking van de stuurknop kan als volgt worden samengevat:

Een grotere ebopening leidt tot een verlaging van de middenstand en grotere restdebieten op de zuidrand en kleinere restdebieten op de noordrand. Hierdoor is er een:

- toename van de zoutconcentraties op de noordrand.
- toename van de kans op achterwaartse verzilting.
- afname van zout op het Haringvliet (voor zover aanwezig).
- afname van de waterstanden Moerdijk (ongunstig voor scheepvaart).

Een grotere vloedopening leidt tot een verhoging van de middenstand, een toename van de getijslag en een verandering van de fase van het getij. Hierdoor is er een

- afname van de zoutconcentraties op de noordrand.
- afname van de kans op achterwaartse verzilting.
- toename van zout in het Haringvliet.
- toename van de gemiddelde waterstanden bij Moerdijk, maar grotere fluctuaties.

Bovenstaande is geldig voor het vergroten van de opening tot 600 m². Omdat effecten niet lineair zijn, valt niet op voorhand te zeggen of ze ook gelden voor nog grotere openingen.

Omdat de eb- en vloedopening meest tegengestelde effecten hebben, hangt het af van de verhouding wat de netto effecten zijn. Bij de implementatie van het kierbesluit, kan hier dan ook mee gevarieerd worden. Het gedrag van zout aan de zuidrand is hierbij moeilijk te voorspellen.

Tot slot verwachten we op basis van de systeemkennis ten aanzien van de stuurknop Haringvlietsluizen en de kennis van achterwaartse verzilting dat de kans op achterwaartse verzilting met de Kier gelijk zal blijven voor lage Bovenrijnafvoeren, zal toenemen voor gemiddelde Bovenrijnafvoeren, en zal afnemen voor hoge Bovenrijnafvoeren.

7.4 Stuurknoppen Volkeraksluizen en stuw bij Hagestein

De Volkeraksluizen en de stuw bij Hagestein kunnen beschouwd worden als de kleinere stuurknoppen van het hoofdwatersysteem. Via de Volkeraksluizen wordt water aan het Hollandsch Diep onttrokken ten behoeve van de doorspoeling van het Volkerak-Zoommeer. Met de stuw bij Hagestein kan de afvoerverdeling over de Lek en de Waal bepaald worden binnen zekere grenzen. De vraag is in hoeverre deze stuurknoppen effectief kunnen worden ingezet voor het tegengaan van verzilting aan de noordrand. Als eerste stap hierin is in dit project de systeemwerking van beide stuurknoppen onderzocht en vergeleken. Dit is gedaan middels numerieke 1D berekeningen voor vaste afvoer en cyclisch getij en voor een situatie van dreigende verzilting van de monding van de Hollandsche IJssel.

Uit de SOBEK-berekeningen volgt dat het verminderen van de onttrekking richting het Volkerak-Zoommeer met 50 m³/s een groter effect heeft op de zoutconcentraties nabij de stormvloedkering in de Hollandsche IJssel (~-13%), dan de afvoervertrekking van 50 m³/s van de Waal naar de Lek (~-10%). Bij het verminderen van de onttrekking duurt het echter vele malen langer voordat de nieuwe concentraties bereikt zijn. Deze verschillen in chlorideconcentraties en tijdschalen kunnen goed verklaard worden. Welke maatregel effectiever is, hangt dus af van de situatie: wanneer verzilting pas op lange termijn wordt verwacht (~10 dagen) is het verminderen van de onttrekking een effectievere maatregel, maar wanneer het urgent is en de chlorideconcentraties binnen enkele dagen moeten dalen, dan is de afvoervertrekking effectiever.

Op basis van de workshop met de beheerders is een discussie gevoerd ten aanzien van de praktische toepasbaarheid van beide knoppen. Hieruit is geconcludeerd dat de effectiviteit van beide stuurknoppen voor het tegengaan van verzilting naar verwachting gering is, maar dat tijdschalen van dagen tot een week hierin geen belemmering hoeven te vormen. Of beide stuurknoppen kunnen bijdragen om in periodes van droogte net wat extra ruimte te creëren is moeilijk vast te stellen op basis van huidige berekeningen. Hiertoe zouden meerdere jaren kunnen worden doorgerekend waarin verzilting is opgetreden. Tot slot is het vanwege de grote onzekerheid van voorspelling van de chlorideconcentraties met een 1D model aan te bevelen om met een 3D model te verifiëren of het 1D model realistische schattingen geeft voor de zoutconcentraties en de tijdschalen.

7.5 Redeneerlijn/ Handlingsperspectief

Op basis van de verkregen kennis en inzichten is de bestaande redeneerlijn (Hydrologic 2015a) verder aangescherpt voor de stuurknoppen Harinvlietsluizen, Volkeraksluizen en de stuw bij Hagestein.

7.6 Aanbevelingen op een rij:

Hieronder worden per categorie de aanbevelingen gegeven. Het verbeteren en implementeren van de vuistregel voor achterwaartse verzilting, het verbeteren van het 3D modelinstrumentarium en het nader kwantificeren van de effectiviteit van de stuurknoppen zijn hierbij vanuit ons oogpunt de belangrijkste aanbevelingen.

Vergroten van de systeemkennis

- Onderzoeken tijdschaaleffecten verzilting/ mate van oplading, op basis van data-analyse (voorbeeld lage rivierafvoer die weinig varieert en gesloten Haringvlietsluizen), mogelijk aangevuld met analytische en numerieke modelstudies - *Hoofdstuk 3*.
- Effect rivierbodemerrosie Oude Maas/ Spui op toename achterwaartse verzilting onderzoeken - *Hoofdstuk 3*
- Niet lineair gedrag zoutindringing langs de zuidrand bij grotere eb- en vloedopening onderzoeken met een 3D model – *Hoofdstuk 4*.

- Effectiviteit van spuien voor ontzilten Haringvliet nader onderzoeken op basis van data-analyse – *Hoofdstuk 4*.

Verbeteren modelinstrumentarium

- Verbeteren van het huidige 3D instrumentarium, zodat de relevante detailprocessen, zoals de zoutverspreiding Haringvliet en tijdschaaleffecten beter bestudeerd kunnen worden – *Hoofdstuk 4 en 5*.

Verbeteren vuistregel (achterwaartse) verzilting

- Gebeurtenissen van achterwaartse verzilting aanvullen tot en met 2015 en nagaan of de tabel compleet is voor de periode 1990 tot en met 2005 - *Hoofdstuk 3*.
- Optimalisatie voorspelparameter achterwaartse verzilting (of het onderzoeken van een alternatief, zoals voorspelling met het 1D SOBEM model) en herdefinitie achterwaartse verzilting voor de aansluiting bij de beheerpraktijk (wanneer vormt achterwaartse verzilting een probleem?) - *Hoofdstuk 3*.
- Opstellen vuistregel voor verzilting noordrand.

Verbetering stuurmogelijkheden voor het tegengaan van verzilting

- Inbouwen nieuwe vuistregel voor achterwaartse verzilting in het operationeel model. – *Hoofdstuk 3*
- Effectiviteit van de stuurknoppen Haringvlietsluizen, Volkeraksluizen en Hagestein voor het tegengaan van verzilting noordrand en achterwaartse verzilting verder kwantificeren middels 3D berekeningen en aanvullende 1D of 3D berekeningen van werkelijk opgetreden situaties – *Hoofdstuk 5 en 6*.

Ontsluiten kennis voor de beheerders

- Ontsluiten kennis via een Wiki. Deze kan als basis dienen om informatie uit volgende projecten hieraan toe te voegen. Dit biedt bovendien de mogelijkheid voor beheerders om kennis met betrekking tot het beheer aan te vullen.
- Ontsluiten kennis van de stuurknoppen en de vuistregel voor achterwaartse verzilting via een "Serious Game". Een situatie van dreigende verzilting kan worden nagespeeld, waarbij spelers met behulp van de verschillende stuurknoppen kunnen proberen de verzilting zo veel mogelijk tegen te gaan. In verband met de onzekerheid van 1D modellen ten aanzien van de voorspelling van zout, zal dit spel een zeer grove benadering zijn van de werkelijkheid. Functie van dit spel is daarom gericht op het bij brengen van de *systeemwerking* en de interactie tussen de beheerders na te spelen.

8 Referenties

- Becker, Anke. 2015. "Sediment in (Be)weging, Deel 2 (Periode 2000-2012)." 1208925-0-NaN-23. Advies Beheer Rivierbodem RMM. Deltares.
- Boogaard, Henk van den. 2015. "Effectbepaling Verdieping Nieuwe Waterweg Op KWA." 1220833-000. Deltares.
- De Vries, Ies. 2014. "Toetsing Robuustheid Brielse Meer Voor Zoetwatervoorziening - Fase 2: Definitieve Toetsing." 1209018-000. Deltares.
- Goederen, Sacha de, Aad Bavelaar, Pieter Jacobs, Marloes Kraaijenveld, Jeroen Ligtenberg, and Ton Visser. 2006. "Niet Te Zoet, Niet Te Zout. HOP2008, Een Nieuw Bedieningsprogramma Voor de Haringvlietsluizen." RIZA-werkdocument 2006.045X.
- Huismans, Ymkje. 2013. "Effect van Bodemdaling in Het Rijn-Maasmondinggebied Op de Zoutindringing." 1207770-001. Deltares.
- Hydrologic. 2015a. "Inventarisatie Slim Watermanagement Rijn-Maasmonding." P720.
- . 2015b. "Verzilting Door Verdieping Nieuwe Waterweg En Botlek." Eindrapport P716. Deelonderzoek MER Havenbedrijf Rotterdam.
- Klijn, Frans, Emiel Van Velzen, Judith Ter Maat, and Joachim Hunink. 2012. "Zoetwatervoorziening in Nederland - Aangescherpte Landelijke Knelpuntenanalyse 21e Eeuw." 1205970-000. Deltares.
- Kraaijenveld, M. 2003. "Een SOBEK-Model van Het Noordel Ijk Deltabekken; Kalibratie En Verificatie Zoutbeweging Noordrand." RIZA werkdocument 2003.047X. RIZA.
- Kranenburg, Wouter, Marjolein Mens, Frans Buschman, Carine Wesselius, Ymkje Huismans, Judith Ter Maat, and Ferdinand Diermanse. 2015. "Systeemanalyse van de Rijn-Maasmonding Voor Verzilting (Factsheets Proceskennis, Systeemkennis, Modelinstrumentarium En Statistiek)." 1220107-002. Deltares.
- Kuijper, C. 1985. "Waterloopkundig Systeemonderzoek Noordelijke Deltabekken - Lozingen/onttrekkingen En Afvoervertrekkingen Deel 1; Variaties Restafvoeren." M2030-1. Waterloopkundig Laboratorium.
- Kuijper, Kees. 2015. "Analyse Debiet- En Zoutmetingen Hollandsche IJssel." 1220106-003. Deltares.
- . 2016. "Analyse van de Zoutmetingen in November 2015 Langs de Hollandsche IJssel - Afleiding Dispersiecoefficient." 1230077-001. Systeemanalyse Rijn-Maasmonding. Deltares.
- Leeuwen, Bas van. 2015. "Effectbepaling Verdieping Nieuwe Waterweg Op Verzilting in Benedenrivierengebied - Op Basis van TRIWAQ Simulaties OSR Model." 1712. Svasek.
- Mens, Marjolein. 2016. "Karakterisering van Deelgebieden in de Rijn-Maasmonding Naar Type Verziltingsproces." Memo 1230077-001. Systeemanalyse Rijn-Maasmonding. Deltares.
- Rijkswaterstaat. 1998. "MER Beheer Haringvlietsluizen. De Sluizen Op Een Kier."
- . 2013. "Kenmerkende Waarden, Getijgebied 2011.0." RWS Centrale Informatievoorziening.
- Rijkswaterstaat Zee en Delta, Waterschap Brabantse Delta, Waterschap Hollandse Delta, Waterschap Scheldestromen, Rijkswaterstaat West-Nederland Zuid, Rijkswaterstaat Zuid Nederland, and Rijkswaterstaat Zee en Delta. 2016. "Waterakkoord Volkerak-Zoommeer." http://www.scheldestromen.nl/het_waterschap/projecten/projecten_water/waterakkoord.
- Rijkswaterstaat Zuid-Holland. 2005. "Waterakkoord Hollandsche IJssel En Lek."
- Spijk, A. van. 2006. "Evaluatie Verzilting En Ontzilting van Het Haringvliet Na de Storm van 24/25 November 2005." Definitief AP/2006/03. Rijkswaterstaat Zuid-Holland.
- Tiessen, Meinard. 2016. "Zoutverspreiding in Het Haringvliet - Hypothese Vorming." Memo 1230077-001. Deltares.
- Van der Vat, Marnix. 2016. "Nader Onderzoek Verzilting Lek." Memo 1230077-4-NaN-2. Deltares.

- Vuik, Vincent, Eddy Collard, Marc Rotsaert, and Joana Vieira Da Silva. 2011. "WAQUA-Productieberekeningen Benedenrivierengebied Voor WTI-2011: Rapportage Fase 1." PR1876.30. HKV en Svasek Hydraulics.
- Winterwerp, H. 1982. "Probleemanalyse van de Tijdschaaleffecten in Het Noordelijk Deltabekken." M896-49. Waterloopkundig Laboratorium.

A Tabellen achterwaartse verzilting en uitgebreide vuistregel

Tabel met overzicht van het optreden van chlorideconcentraties > 500 mg/l bij Bernisse in de periode 1990 – 2005.

Bron: rapport “evaluatie verzilting Haringvliet 2005” (van Spijk 2006).

Onderaan deze tabellen volgt een uitgebreide vuistregel voor het optreden van achterwaartse verzilting zoals opgesteld door A. van Spijk.

Datum	Afvoer Rijn (m ³ /s)	Waterstand (m .o.v. NAP)			Chlorideconcentratie (mg Cl ⁻ /l)			
		Hoek v. Holland		Moerdijk	HL	Bernisse	Wieldrecht ¹⁾	Alblasserdam ¹⁾
		opgetreden	opzet					
26/02/90	3987	+2,49	+1,12	+0,61	1,88	730	104	140
max.	3488	+2,84	+1,45	+1,21	1,63	4.883	124	175
02/03/90	3049	+2,29	+1,05	+0,87	1,42	747		
19/09/90	1014	+1,91	+0,77	+0,38	1,53	768		1.178
max.		+2,36	+1,04	+0,72	1,64	5.887	1.421	2.044
21/09/90	978	+2,20	+0,95	+0,91	1,29	2.049		
12/12/90	1686	+2,49	+1,63	+0,73	1,76	10.924	996	
13/12/90	1639	+1,95	+0,89	+1,50	0,45	11.314	2.216	
14/12/90	1622	+0,82	-0,25	+0,16	0,66	309	450	
22/09/91	823	+1,48	+0,42	+0,19	1,29	1.177	264	1.303
23/09/91	821	+1,40	+0,10	+0,34	1,06	362	265	935
02/10/91	1005	+1,60	+0,82	+0,85	0,75	220	252	570
max.	1005	+0,79	-0,20	+0,79	0,00	3.596	409	1.095
04/10/91	1043	+1,54	+0,51	+0,18	1,36	237	258	790
17/10/91	1091	+1,44	+0,67	+0,81	0,63	5.608	1.630	1.163
18/10/91	1060	+1,68	+1,06	+1,11	0,57	2.909	1.375	985
		+1,33	+0,41	+1,10	0,23	4.600	1.522	991
02/11/91	931	+1,34	+0,14	+0,23	1,11	806	242	330
max.	884	+1,81	+0,55	+0,41	1,40	880	264	2.030
05/11/91	899	+1,94	+0,67	+0,62	1,32	578	282	1.692
18/12/91	897	+1,88	+0,89	+0,66	1,22	5.698	2.687	2.149
19/12/91	876	+0,97	-0,21	+0,74	0,23	1.131	806	1.045
03/02/92	1119	+1,86	+0,70	+0,33	1,53	1.014	226	975
15/10/92	909	+1,78	+0,46	+0,32	1,46		227	585
max.	909	+1,87	+0,52	+0,50	1,37		248	701
16/10/92	899	+1,60	+0,33	+0,58	1,02		232	368

Datum	Afvoer Rijn (m ³ /s)	Waterstand (m .o.v. NAP)				Chlorideconcentratie (mg Cl ⁻ /l)		
		Hoek v. Holland opgetreden	Moerdijk opzet	HL	Bernisse	Wieldrecht ¹⁾	Alblasserdam ¹⁾	
21/02/93	1438	+2,54	+1,47	+0,72	1,82	stijgend	stijgend	1.155
		+2,49	+1,25	+1,48	1,01	7.808	2.298	1.253
14/11/93	1625	+2,65	+1,21	+0,54	2,11	5.570	154	
15/11/93	1583	+2,45	+1,05	+1,33	1,12	7.640	1.523	325
		+1,54	+0,04	+1,08	0,46	369	201	226
28/01/94	3148	+2,88	+1,45	+1,64	1,24	717	93	166
29/01/94	3316	+1,66	+0,44	+0,87	0,79	357	87	164
14/03/94	2478	+1,92	+0,71	+0,83	1,09	1.000	112	192
29/10/96	2004	+2,53	+1,09	+0,99	1,54	3.410	792	333
30/10/96	1901	+1,62	+0,32	+0,98	0,64	343	155	116
02/10/97	1046	+1,96	+0,62	+0,38	1,58	580	174	1.164
		+1,65	+0,41	+0,65	1,00	536	188	741
25/10/98	2064	+2,33	+1,08	+1,10	1,23	1.794	132	166
26/10/98	2005	+1,79	+0,60	+1,19	0,60	367	136	138
03/11/98	6849	+1,47	0,00	-0,01	1,48	3.103	71	79
05/02/99	3257	+2,38	+1,26	+1,06	1,32	1.478	130	131
		+2,15	+0,92	+1,28	0,87	717	131	134
06/11/99	1607	+2,42	+1,26	+0,74	1,68	4.631	1.755	600
07/11/99	1644	+2,05	+0,70	+1,19	0,86	3.335	862	399
01/12/99	1574	+1,77	+0,93	+0,70	1,07	1.653	168	644
04/12/99	1552	+2,42	+1,25	+0,72	1,70	1.044	163	484
23/09/03	851	+1,68	+0,67	+0,30	1,38	2.234	161	3.019
07/10/03	980	+1,97	+0,78	+0,53	1,44	2.534	2.367	259
08/10/03	991	+2,09	+0,79	+1,09	1,00	3.799	1.938	687
09/10/03	969	+2,21	+0,86	+0,71	1,50	209	1.058	215
10/10/03	1049	+1,61	+0,40	+0,60	1,01	179	176	154

Datum	Afvoer Rijn (m ³ /s)	Waterstand (m .o.v. NAP)			Chlorideconcentratie (mg Cl ⁻ /l)		
		Hoek v. Holland	Moerdijk	HL	Bernisse	Inloop Spui ²⁾ (NAP -1m/-5m)	Middelharnis ²⁾ (NAP -2m/-8/-15m)
		opgetreden	opzet				
24/11/05	1003	+2,02	+1,08	+0,12	1,90	134	135/134
25/11/05	996	+1,68	+0,98	+1,29	0,29	9.793	8.237/8.968
16/12/05	1299	+2,47	+1,16	+0,68	1,79	351	371/369
17/12/05	138	+2,21	+0,78	+1,07	1,14	327	dalend
18/12/05	1226	+1,37	+0,04	+0,70	0,67	313	265/264

Opmerkingen:

- 1) deze stations zijn in 2004 ontmanteld in het kader van bezuinigingen en heroverweging regionaal zoutmeetnet
- 2) deze stations zijn sinds 2004 operationeel in het kader van de invoering van de Kier (ander beheer Haringvlietstuizen)

Uitgebreide vuistregel optreden achterwaartse verzilting

Verhoogde verziltingsrisico's in de Rijn-Maasmonding indien:

- Hoogwater Hoek van Holland > 1.50 m NAP
- Qbr < 1500 m³/s
- HL > 90 à 100 cm
- Hoogwater Hoek van Holland meer dan 30 cm hoger dan voorgaande hoogwater
-

Uiteraard rekening houdende met interactie tussen afvoer en getij.

[Ary van Spijk]

B Matlab code voor nieuwe vuistregel achterwaartse verzilting

Matlab code voor valideren nieuwe vuistregel achterwaartse verzilting.

```

close all
clear all
clc

%%
path = 'p:\1230077-verzilting\Systeemanalyse RMM\Onderdeel2_Noord-
Zuidrelaties\Analyse Achterwaartse Verzilting\01_Data';
file = '\WaterstandenMoerdijkHvH2003.xls';

x = 0;
dhlim = 2.7;

% tijden van achterwaartse verzilting
%
% NB. de tweede datum is de datum waarop de verzilting voorbij is, de
% eerste en tweede datum geven dus het tijdvenster aan waarbinnen
% verzilting is opgetreden.

% tav = {'26-feb-90', '3-mar-90', '19-sep-90', '22-sep-90', '12-dec-90',
'15-dec-90'};
% tav = {'22-sep-91', '24-sep-91', '02-oct-91', '05-oct-91', '17-oct-
91', '19-oct-91', '02-nov-91', '06-nov-91', '18-dec-91', '20-dec-91'};
% tav = {'03-feb-92', '04-feb-92', '15-oct-92', '17-oct-92'};
% tav = {'21-feb-93', '22-feb-93', '14-nov-93', '16-nov-93'};
% tav = {'28-jan-94', '30-jan-94', '14-mar-94', '15-mar-94'};
% tav = {};
% tav = {'29-oct-96', '31-oct-96'};
% tav = {'02-oct-97', '03-oct-97'};
% tav = {'25-oct-98', '27-oct-98', '03-nov-98', '04-nov-98'};
% tav = {'05-feb-99', '06-feb-99', '06-nov-99', '08-11-99', '01-dec-99',
'02-dec-99', '04-dec-99', '05-dec-99'};
% tav = {};
% tav = {};
tav = {'23-sep-03', '24-sep-03', '07-oct-03', '11-oct-03'};
% tav = {};
% tav = {'24-nov-05', '26-nov-05', '16-dec-05', '19-dec-05'};

% tijdformat
timefmt = 'yyyy/mm/dd';

%% read files
H = xlsread([path file], 'HvH');
M = xlsread([path file], 'Moerdijk');
```

```
%% tijdconversie excel naar matlab
diff = 693960; % conversion excel date to matlab date
tH = H(:,1)+H(:,2)+diff;
tM = M(:,1)+M(:,2)+diff;

% controle of tijden van Hoek van Holland identiek zijn aan Moerdijk
figure(1)
plot(tH-tM)
title('controle of tijdseries HvH en Moerdijk identiek zijn')
legend('tH-tM')

%% figuren van waterstanden en waterstandverschillen

% plot waterstanden Moerdijk en Hoek van Holland
figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(tH, H(:,4))
hold all
plot(tM, M(:,4))
datetick('x', 'dd mmm yy', 'keepticks')
title('waterstanden (cm)')
legend('h_{Hoek van Holland}', 'h_{Moerdijk}')
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [0, 0], 'Color', 'k')
datetick('x', timefmt, 'keepticks')

% plot verschilwaterstanden Moerdijk en Hoek van Holland
dh = H(:,4) - M(:,4);
subplot(2,1,2)
plot(tH, dh)
line([tH(1), tH(end)], [100, 100], 'color', 'k')
datetick('x', 'dd mmm yy', 'keepticks')
title(['waterstandsverschillen (cm) --> gemiddelde dh = '
num2str(mean(dh)) ' cm'])
legend('h_{Hoek van Holland} - h_{Moerdijk}')

% verdeling van waterstandverschillen
figure(3)
hist(dh, 50);
xlabel('waterstandverschil h_{Hoek van Holland} - h_{Moerdijk} in cm')
ylabel('aantal keren van voorkomen')
title('verdeling van waterstandsverschillen Hoek van Holland -
Moerdijk')
```

```
%% bepalen van het cumulatieve waterstandverschil - gemiddelde
waterstandsverschil

dhcum = 0;
for j = 1:length(dh)
    if j == 1
```

```

        dhcum(j) = dh(j)-mean(dh);
    else
        dhcum(j) = dhcum(j-1) + dh(j)-mean(dh);
    end
end

%
figure(4)
plot(tH, dhcum)
t32 = datenum('14-dec-90','dd-mmm-yy');
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j},'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
xlabel('tijd')
ylabel('waterstandverschil SOM(h_{Hoek van Holland}(i) - h_{Moerdijk}(i)-dh_{gemiddeld}) in cm')
title('cumulatieve waterstandsverschillen Hoek van Holland - Moerdijk, min het gemiddelde waterstandsverschil')

%% bepaal HL, LH en de cumulatieve dh per getijperiode

% define number of tidal periods in one year
% 365 days = 525600 minutes
% 12 hours and 25 minutes = 745 minutes
% 525600/745 = 705.5 tidal periods

TPpy = 704;
ind = 1;
TP = 74;
w = 40;

for j = 1:TPpy
    % define start
    [maxH(j), imax] = max(H(ind:ind+TP,4));
    imaxc = ind+imax-1;
    tmaxH(j) = tH(imaxc);

    % vind bijbehorende laag water bij Moerdijk (max 3 uur verschoven
van
    % hoogwater Hoek van Holland)
    if imaxc-w < 0
        inm = 1;
    else
        inm = imaxc-w;
    end
    [minM(j), iminM] = min(M(inm:imaxc+w,4));
    iminMc = inm+iminM-1;

    % als de minimum waarde aan de rand gevonden is, behoort deze
    % waarschijnlijk niet tot het minimum en is er sprake van een
    % afwijkende vorm (bijvoorbeeld geen minimum omdat de waterstand
blijft

```

```

% stijgen. In dit geval wordt de waterstand genomen op het momen van
% HvH Hoogwater
if iminM == 1 || iminM == length(M(inm:imaxc+w,4))
    minM(j) = M(imaxc,4);
    iminMc = imaxc;
end

tminM(j) = tM(iminMc);

% vind laagwater HvH volgend op vorig hoogwater (maximaal 9 uur
% verschoven van het hoogwater van HvH)
[minH(j), imin] = min(H(imaxc:imaxc+54,4));
iminc = imaxc+imin-1;
[maxM(j), imaxM] = max(M(iminc-w:iminc+w,4));
tminH(j) = tH(iminc);
imaxMc = iminc-w+imaxM-1;

% als de maximum waarde aan de rand gevonden is, behoort deze
% waarschijnlijk niet tot het maximum, zie toelichting voor minimum
% hierboven
if imaxM == 1 || imaxM == length(M(iminc-w:iminc+w,4))
    maxM(j) = M(iminc,4);
    imaxMc = iminc;
end
tmaxM(j) = tM(imaxMc);

timeTP(j) = tH(imaxc);

% imaxc = maximum waterstand HvH
% als je wilt beginnen bij waar waterstand HvH > waterstand
Moerdijk, dan x = -17 (3 uur).
% als je wilt beginnen bij waar waterstand HvH < waterstand
Moerdijk, dan x = +17 (3 uur).
if (imaxc + x) < 0
    dhTP(j) = sum(dh(1:TP))*10/(74*10);
else
    dhTP(j) = sum(dh(imaxc+x:imaxc+TP+x))*10/(74*10);
end

% dhTP(j) = sum(dh(imaxc+x:imaxc+TP+x));
% sum(dh(j-1)dt+2dh(j)dt)/dT, with dt and dT in minutes
if j == 1
    dhTP2(j) = dhTP(j);
else
    dhTP2(j) = (dhTP(j-1)+2*dhTP(j))/3;
end

ind = imaxc+40;
end

HL = maxH-minM;
LH = minH-maxM;

figure(6)
plot(tmaxH, maxH, '*')

```

```

hold all
plot(tminM, minM, 'r*')
plot(tH, H(:,4))
hold all
plot(tM, M(:,4))
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [0, 0], 'Color', 'k')
datetick('x', timefmt, 'kepticks')
xlabel('tijd')
ylabel('waterstand in cm')
legend('maximale waterstanen HvH', 'minimale waterstanden Moerdijk')
title('maximale waterstanen HvH en minimale waterstanden Moerdijk')

figure(7)
plot(tminH, minH, '*')
hold all
plot(tmaxM, maxM, 'r*')
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [0, 0], 'Color', 'k')
datetick('x', timefmt, 'kepticks')
xlabel('tijd')
ylabel('waterstand in cm')
legend('minimale waterstanden HvH', 'maximale waterstanden Moerdijk')
title('minimale waterstanden HvH en maximale waterstanden Moerdijk')

figure(8)
plot(tmaxH, HL, '*')
hold all
plot(tminH, LH, 'r*')
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [155, 155], 'Color', 'k')
line([tH(1), tH(end)], [-30, -30], 'Color', 'k')
datetick('x', timefmt, 'kepticks')
xlabel('tijd')
ylabel('LH en HL in cm')
legend('HL', 'LH')
title('LH en HL parameters')

figure(9)
plot(timeTP, dhTP)
hold all
plot(timeTP, dhTP2, 'LineWidth', 3)
plot(timeTP, moving(dhTP,2), '--', 'LineWidth', 2)
for j = 1:length(tav)
    t = datenum(tav{j}, 'dd-mmm-yy');
    line([t, t], ylim, 'Color', 'k')
end
line([tH(1), tH(end)], [dhlim, dhlim], 'Color', 'k')

```

```
datetick('x', timefmt, 'keepticks')
xlabel('tijd')
ylabel('cumulatieve waterstandsverschillen per getijperiode in cm')
legend('cumulatieve waterstandsverschillen per getijperiode', '2*cumdh
TP(j) + cumdh TP(j-1)', 'lopend gemiddelde (2) cum
waterstandsverschillen')
title('cumulatieve waterstandsverschillen per getijperiode')

%% print events where HL > 155 cm

iHL = find(HL>155);
for j = 1:length(iHL)
    disp(['Hmax = ' num2str(maxH(iHL(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tmaxH(iHL(j))))])
    disp(['Mmin = ' num2str(minM(iHL(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tminM(iHL(j))))])
    fprintf(['HL = ' num2str(HL(iHL(j))) ' cm \n\n'])
end

ix = find(dhTP2>200);
for j = 1:length(ix)
    disp(['dhTP2 = ' num2str(dhTP2(ix(j))) ' cm at '
datestr(timeTP(ix(j))))])
    disp(['Hmax = ' num2str(maxH(ix(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tmaxH(ix(j))))])
    disp(['Mmin = ' num2str(minM(ix(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tminM(ix(j))))])
    disp(['Hmin = ' num2str(minH(ix(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tminH(ix(j))))])
    disp(['Mmax = ' num2str(maxM(ix(j))) ' cm NAP, at '
datestr(tmaxM(ix(j))))])
    fprintf(['\n'])
end
```


C Details validatie vuistregels

Hieronder volgen printscreens van de Excel tabel die gebruikt is voor de evaluatie van de criteria. Hierbij staat 1990 – 1 voor de eerste periode in 1990 waarin achterwaartse verzilting optrad volgens de tabel in Bijlage A.

		TP(j-1)+2*TP(j), lim + 2.7 m	HL > + 155	LH > - 30	Opm
1990	1	1	1	0	
	2	1	1	0	
	3	1	1	1	
false positives		1	0	0	
1991	1	1	0	0	
	2	1	0	0	
	3	0	0	1	
	4	1	0	0	
	5	1	0	1	
false positives		0	1	0	
1992	1	1	0	0	
	2	1	0	0	
false positives		0	2	0	
1993	1	1	1	1	
	2	1	1	0	
false positives		0	1	0	
1994	1	0	1	0	
	2	1	1	0	
false positives		0	1	0	
1995	geen achterwaartse verzilting				
false positives		0	1	0	
1996	1	1	0	0	
false positives		0	0	0	
1997	1	1	1	0	
false positives		0	1	0	
1998	1	1	0	0	
	2	0	1	0	
false positives		1	2	0	
1999	1	1	0	0	
	2	1	0	0	
	3	0	0	1	
	4	0	0	0	
false positives		0	0	0	

2000 geen achterwaartse verzilting				
false positives		1	1	0
2001 geen achterwaartse verzilting				
false positives		0	3	0
2002 geen achterwaartse verzilting				
false positives		0	1	0
2003	1	1	0	0
	2	1	0	0
false positives		2	1	0 2x wel achterwaartse verzilting?
2004 geen achterwaartse verzilting				
false positives		1	5	0
2005	1	1	1	1
	2	0	1	0 geen achterwaartse verzilting
false positives		1	2	0
number correct		20	10	6
number wrong		6	16	20
number false positiv		7	22	0
		26		
correctie 2005				
number correct		20	9	6
number wrong		5	16	20
number false positiv		7	23	0
correctie 2003?				
number correct		22	10	6
number wrong		5	17	22
number false positiv		5	22	0

D Model

Voor het berekenen van de werking van de stuurknoppen Haringvlietsluizen en stuw bij Hagestein is het SOBEK-RE NDB 1_1_0 gebruikt (Kraaijeveld 2003). Hierbij is uitgegaan van de variant die wordt gebruikt voor het doorrekenen van de jaarsommen.

In de principe berekeningen is uitgegaan van stationaire condities (dat wil zeggen een vaste rivierafvoer en een cyclisch getij), waarbij de monding Hollandsche IJssel (bijna) verzilt. Hierbij is de definitie uit het waterakkoord gebruikt (Rijkswaterstaat Zuid-Holland 2005).

Verziltig: een verhoging van het chloridegehalte in de Hollandsche IJssel nabij de Stormvloedkering door zee-Invloed, zoals die verhoging blijkt uit de routinematige bemonstering door het Rijk, dan wel uit specifieke bemonstering, en welke verhoging (minimaal 50 mg chloride/l) vergeleken wordt met het chloridegehalte van de Rijn te Lobith, met een faseverschil van twee dagen.

[Waterakkoord Hollandsche IJssel]

In de SOBEK-berekeningen treedt dit op bij een Bovenrijnafvoer van 980 m³/s, wanneer het chloridegehalte van de Rijn rond de 125 mg Cl/l ligt. De grens voor verziltig is dan rond de 175 mg Cl/l. Voor de Hollandsche IJssel nabij de stormvloedkering is hierbij de SOBEK-RE locatie "HOIJ029_17800.00" gebruikt.

In het model moeten de volgende rivierrandvoorwaarden worden gekozen: afvoer en chlorideconcentratie bij Tiel (Waal), Hagestein (Lek), Lith (Maas) en Gouda (Hollandsche IJssel). Voor de afvoerverdeling over de Rijntakken bij een bepaalde Bovenrijnafvoer is gebruik gemaakt van de stuw tabel 2016 van Dienst Oost Nederland, zie onderaan in deze bijlage. Bij een Bovenrijnafvoer van 980 m³/s is dit 798 m³/s over de Waal en 22 m³/s over de Lek¹³. Omdat in het model de randvoorwaarde op de Waal bij Tiel ligt, moet de hoeveelheid water die naar het Amsterdam Rijn-kanaal vloeit hier nog vanaf. Conform eerdere studies [REFS] gaan we hierbij uit van ~15 m³/s. Voor de Lek ligt de modelrandvoorwaarde bij Hagestein. Er is momenteel discussie gaande over hoeveel water er bij lage rivierafvoer daadwerkelijk wordt doorgelaten (Van der Vat 2016). Volgens de beheerder is het beheer van de stuw de afgelopen jaren aangepast om een minimale afvoer van 25-30 m³/s te handhaven. Dit blijkt echter niet eenduidig uit een eerste inventarisatie van de meetreeksen uit 2014 en 2015.. Ook is niet bekend hoeveel water er benedenstreams van de stuw precies wordt onttrokken tijdens lage rivierafvoer. Omdat de orde groottes vermoedelijk gelijk zijn, gaan we in deze studie uit van 0 m³/s over de Lek. Voor het bepalen van de afvoer over de Maas bij Lith, wordt gebruik gemaakt van de 50% relatie (Vuik et al. 2011), waarmee we uitkomen op 99 m³/s. Tot slot is de afvoer over de Hollandsche IJssel op 0 m³/s gesteld, omdat bij lage rivierafvoer weinig tot geen water over de Hollandsche IJssel stroomt en onttrekkingen beperkt worden.

Omdat we een geïdealiseerde situatie bestuderen (stationaire sommen) en in de praktijk de afvoeren over de Waal, Lek en Maas bij een Bovenrijnafvoer van 980 m³/s altijd een beetje

¹³ 980 m³/s komt niet voor in de stuw tabel. Om de afvoerverdeling bij deze afvoer te bepalen is gebruik gemaakt van lineaire extrapolatie.

anders zullen zijn, zijn de exacte waarden voor de afvoeren op de randen niet zo belangrijk, zolang ze maar realistisch zijn.

Voor het bepalen van de chlorideconcentraties van het rivierwater is gebruik gemaakt van de volgende regressierelaties (Kranenburg et al. 2015):

$$C_{\text{Maas}}(t) = 31,9 + 1000 \times 1,726 / Q_{\text{Lith}}(t)$$

En

$$C_{\text{Rijn}}(t) = 46.9 + 1000 \times 75,532 / Q_{\text{Lobith}}(t)$$

Waarbij de chlorideconcentraties C in [mg Cl/l] wordt uitgedrukt en de afvoer Q in [m³/s].

Voor de zeerand is uitgegaan van het slotgemiddeld getij van 2011 (Rijkswaterstaat 2013), zoals ontvangen van Sacha de Goederen¹⁴. Dit is een cyclisch getij, zonder springtij doodtij variaties. Omdat dit slotgemiddeld getij een duur had van 12 uur en 26 minuten, is conform overleg met Sacha de Goederen hier één tijdstap uit verwijderd, zodat de duur weer overeenkomt met de eigenlijke duur van 12 uur en 25 minuten. Voor de zoutconcentraties in de Maasmond en HA-10 zijn respectievelijk 31 en 34 kg/m³. Dit zijn de instellingen, zoals ook gebruikt in de Goederen (2006). Voor de "Thatcher Harleman timelag" is 1.5 uur gebruikt.

¹⁴ Het slotgemiddeld getij 2011 is ook opgevraagd bij de datadienst van RWS, deze moest echter nog bewerkt worden. Het slotgemiddeld getij 2011 is ook beschikbaar binnen WBI. Deze is voor het Haringvliet echter afgeleid van modelresultaten en wijkt daardoor af van de in (Rijkswaterstaat 2013) gerapporteerde minimale en maximale waterstanden.

Stuwprogramma Nederrijn-Lek (Stuwen Driel, Amerongen en Hagestein): Uitgebreide tabel Maart 2016

Lobht [m+ NAP]	IJsselkop [m+ NAP]	Waterstanden				Driel-boven [m+ NAP]	Afvoeren				
		Hagestein Boven [m+ NAP]	Amerongen Boven [m+ NAP]	Boverrijn (m ² /s)	Waal (m ² /s)		Pannerdens Kanaal (m ² /s)	Nederrijn (m ² /s)	IJssel (m ² /s)		
12,00	10,54	2,01	4,76	8,82	4190	2812	1378	792	586		
11,90	10,45	1,96	4,68	8,75	4091	2746	1345	771	574		
11,80	10,37	1,91	4,61	8,67	3995	2680	1315	753	563		
11,70	10,28	1,86	4,53	8,60	3903	2621	1282	732	550		
11,60	10,20	1,81	4,46	8,52	3811	2558	1253	714	539		
11,50	10,11	1,77	4,38	8,45	3719	2498	1221	694	527		
11,40	10,03	2,70	5,50	8,38	3630	2441	1190	675	515		
11,30	9,94	2,70	5,50	8,30	3550	2387	1160	655	505		
11,20	9,85	2,70	5,50	8,23	3465	2337	1128	635	490		
11,10	9,77	2,70	5,55	8,16	3390	2286	1100	620	480		
11,00	9,68	2,70	5,55	8,08	3310	2241	1070	600	470		
10,90	9,59	2,70	5,55	8,01	3235	2194	1040	585	455		
10,80	9,50	2,70	5,60	7,94	3160	2148	1010	565	445		
10,70	9,42	2,75	5,65	7,87	3090	2104	985	550	435		
10,60	9,33	2,75	5,65	7,79	3015	2058	960	535	425		
10,50	9,24	2,80	5,70	7,72	2940	2013	930	515	415		
10,40	9,15	2,80	5,75	7,65	2870	1971	900	500	400		
10,30	9,06	2,85	5,75	7,57	2800	1926	875	485	390		
10,20	8,98	2,85	5,80	7,53	2730	1881	850	470	380		
10,10	8,89	2,90	5,85	7,51	2665	1840	825	455	370		
10,00	8,80	2,90	5,85	7,50	2600	1795	800	440	360		
9,90	8,75	2,95	5,85	7,55	2535	1748	785	425	350		
9,80	8,65	2,95	5,90	7,60	2465	1710	755	415	340		
9,70	8,60	2,95	5,90	7,65	2395	1667	730	395	335		
9,60	8,50	3,00	5,90	7,75	2320	1626	695	370	325		
9,50	8,45	3,00	5,95	7,80	2245	1584	660	340	320		
9,40	8,40	3,00	5,95	7,90	2170	1546	625	310	315		
9,30	8,35	3,00	5,95	7,95	2095	1507	590	280	310		
9,20	8,30	3,00	5,95	8,05	2015	1470	545	240	305		
9,10	8,30	3,00	6,00	8,15	1940	1437	505	200	305		
9,00	8,30	3,00	6,00	8,20	1865	1402	465	160	305		
8,90	8,30	3,00	6,00	8,25	1790	1365	385	80	305		
8,80	8,30	3,00	6,00	8,30	1700	1350	345	40	305		
8,70	8,20	3,00	6,00	8,20	1645	1308	330	35	295		
8,60	8,10	3,00	6,00	8,10	1590	1264	315	30	285		
8,50	8,01	3,00	6,00	8,01	1530	1221	310	35	275		
8,40	7,91	3,00	6,00	7,91	1478	1181	297	34	263		
8,30	7,81	3,00	6,00	7,81	1424	1140	284	32	251		
8,20	7,71	3,00	6,00	7,71	1372	1101	271	31	240		
8,10	7,61	3,00	6,00	7,61	1324	1064	260	30	230		
8,00	7,51	3,00	6,00	7,51	1278	1029	249	29	220		
7,90	7,42	3,00	6,00	7,42	1233	993	240	28	211		
7,80	7,32	3,00	6,00	7,32	1190	961	229	27	202		
7,70	7,22	2,92	6,00	7,22	1146	928	219	26	192		
7,60	7,13	2,81	6,00	7,13	1104	894	209	25	184		
7,50	7,04	2,71	6,00	7,04	1061	861	200	24	176		
7,40	6,94	2,61	6,00	6,94	1019	829	191	23	167		
7,30	6,85	2,50	6,00	6,85	979	797	182	22	160		
7,20	6,76	2,40	6,00	6,76	938	765	173	21	152		
7,10	6,67	2,30	6,00	6,67	898	734	165	20	144		
7,00	6,58	2,19	6,00	6,58	859	703	156	19	137		
6,90	6,49	2,09	6,00	6,49	820	672	148	18	130		
6,80	6,41	1,99	6,00	6,41	783	642	141	17	123		
6,70	6,32	1,89	6,00	6,32	745	612	133	16	116		

vollig gestuwd

start van stuwen (Driel)

start van stuwen (Amerongen & Hagestein)

B.2 Presentatie (RMM Systeemanalyseoverleg, 15 september 2016)



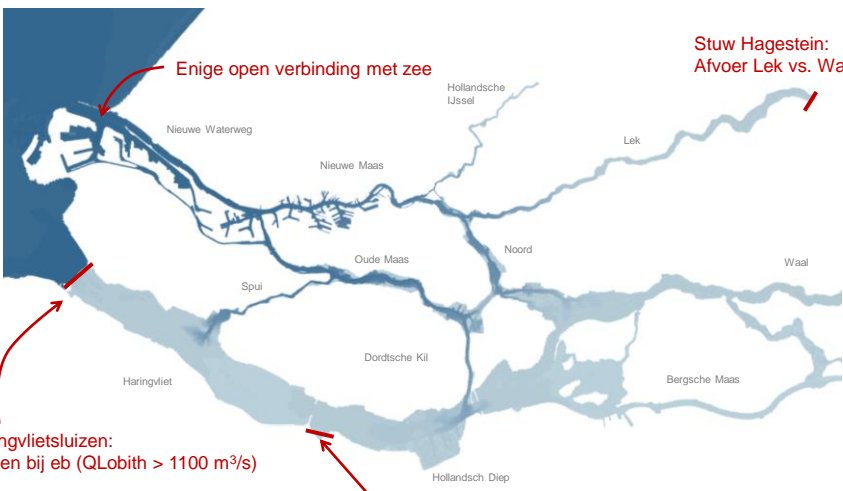
Noord-Zuidrelaties RMM m.b.t. verzilting

Verzilting & de werking van grote en kleine knoppen

Deelprojecten van:
Systeemanalyse en Slim Watermanagement

20 december 2016

Gebiedsbeschrijving



Enige open verbinding met zee

Stuw Hagestein:
Afvoer Lek vs. Waal

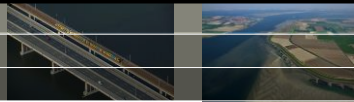
Haringvlietsluizen:
Spuien bij eb ($Q_{Lobith} > 1100 \text{ m}^3/\text{s}$)

Onttrekking Volkerak Zoommeer

Deltares

20 december 2016

Noord-Zuid relaties



Noord-Zuid relaties:

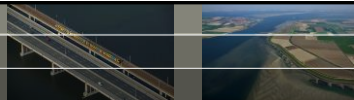
*“Hoe de zoutconcentraties aan de Zuidrand
beïnvloed worden door condities aan de Noordrand
en vice versa”*

	Onderdeel	[dg]	Doel	Methodiek	Toeleverend aan
2	Noord-zuid relaties	18 ³	Complexe verbanden inzichtelijk maken	Literatuur, Modeldata, Visualisatie	SWM RMM, POA, ...

Deltares

20 december 2016

Opzet presentatie



1) Algemene Systeemwerking

Deel 1: Achtergrond en systeemkennis

2) Achterwaartse verzilting & voorspelling daarvan

- 3) Stuurknoppen + effecten
→ Grote knop HVLSLZ
→ Kleine knoppen

Deel 2: Nadere Analyse en Toepassing

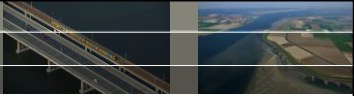
4) Conclusies

Deel 3: Conclusies

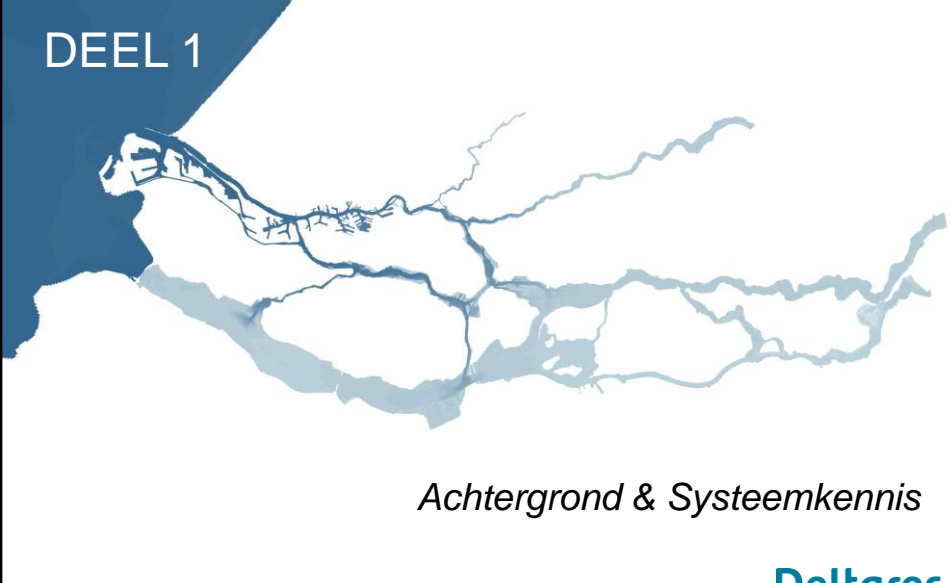


Deltares

20 december 2016



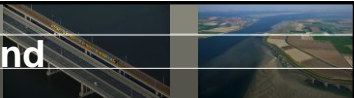
DEEL 1



Achtergrond & Systeemkennis

Deltares

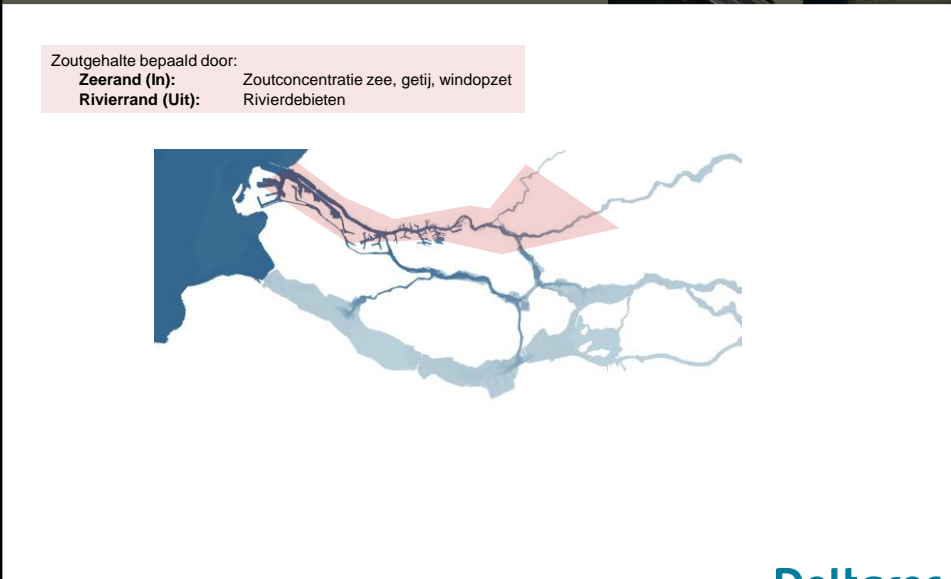
20 december 2016



Verziltingsprocessen Noordrand

Zoutgehalte bepaald door:

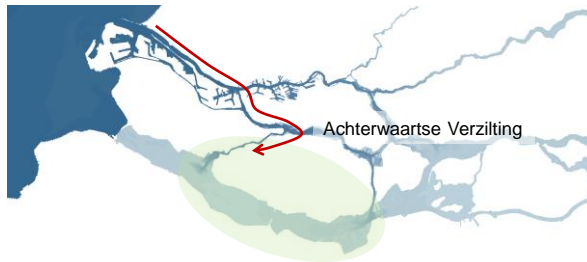
Zeerand (In):	Zoutconcentratie zee, getij, windopzet
Rivierand (Uit):	Rivierdebieten



Deltares

20 december 2016

Verziltingsprocessen Zuidrand



Huidige situatie:

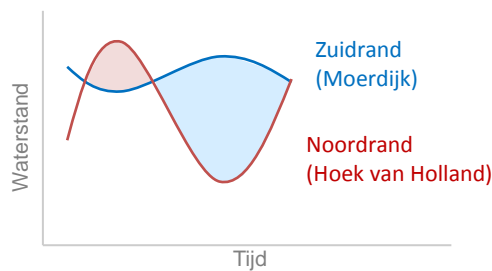
- Verziltion Zuidrand via Noordrand → Achterwaartse Verziltion
- Onder welke condities? Waterstand bepalend

20 december 2016

Deltares

Wanneer treedt achterwaartse verziltion op?

Waterstanden onder normale condities

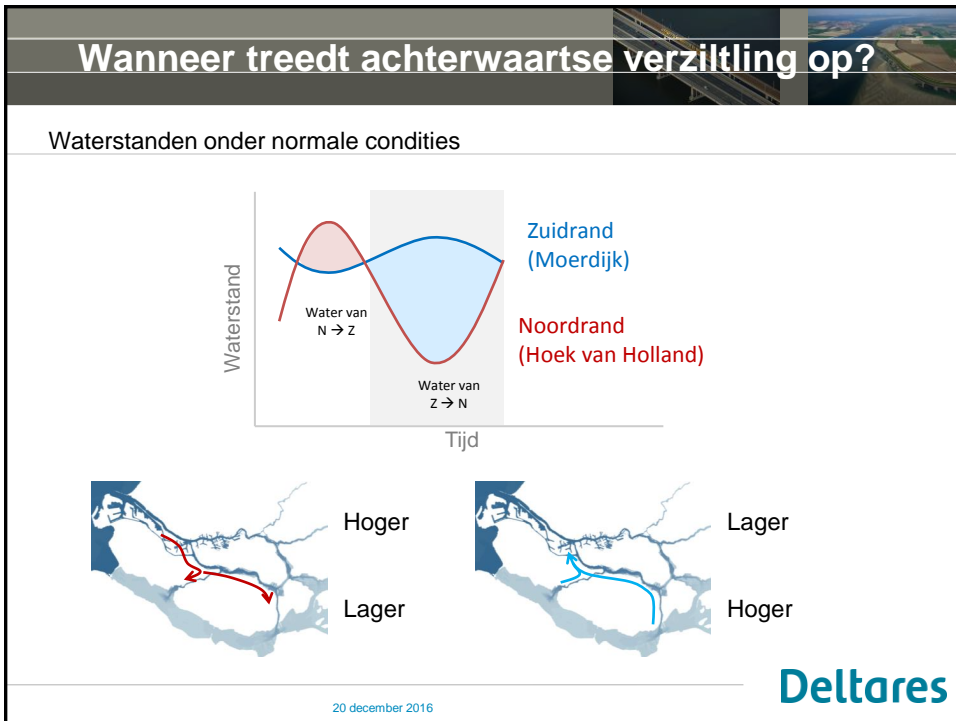
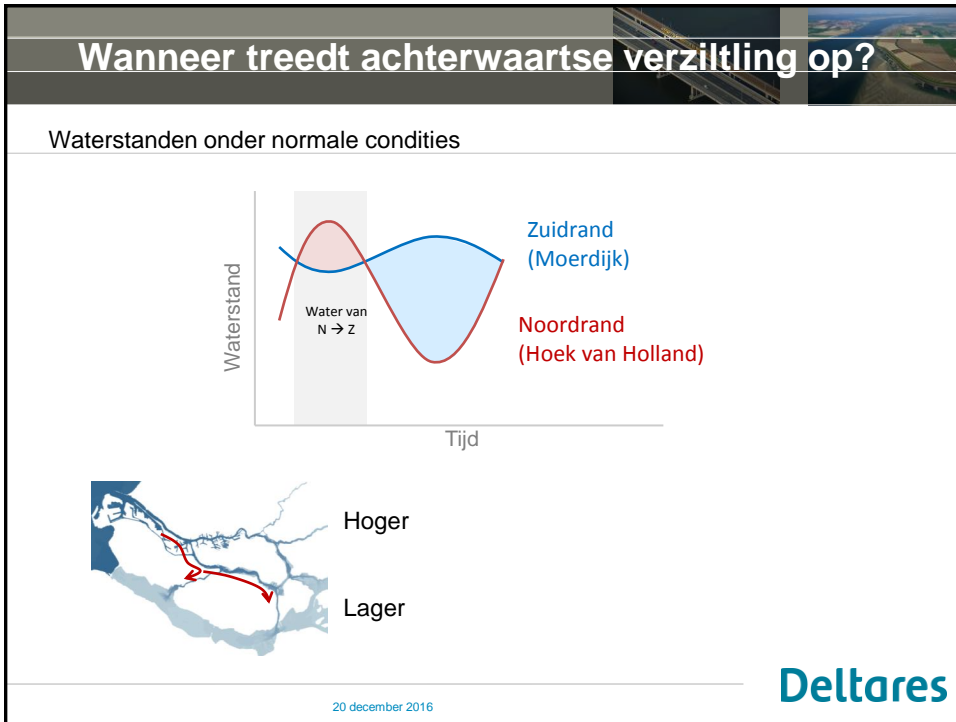


Onder normale condities:

- Noordrand: grootste getijslag
- Zuidrand: kleine getijslag, fase, middenstand

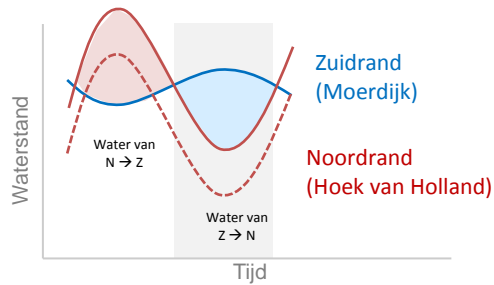
20 december 2016

Deltares



Wanneer treedt achterwaartse verziltling op?

Waterstanden onder extreme(re) condities: bv peilopzet tgv Westenwind



Periode N→Z: langer
Periode Z→N: korter



Hoger

Lager



Lager

Hoger

20 december 2016

Deltares

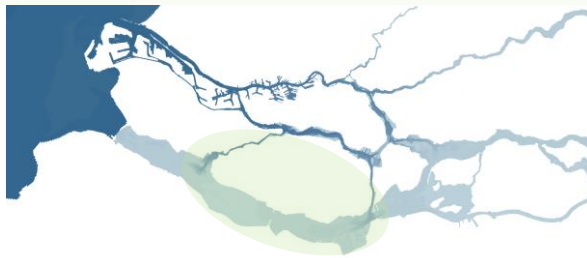
Verziltingsprocessen Zuidrand (resumé)

Verziltling (In):

- Zoutconcentratie Noordrand
- Hoge waterstand Noordrand t.o.v. zuidrand

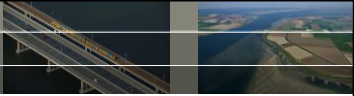
Ontziltling (Uit):

- Hoge waterstand zuidrand t.o.v. de noordrand
- Vrijkomen van zout uit diepe geulen onder invloed van wind en stroming
- Spuien via de Haringvlietsluizen

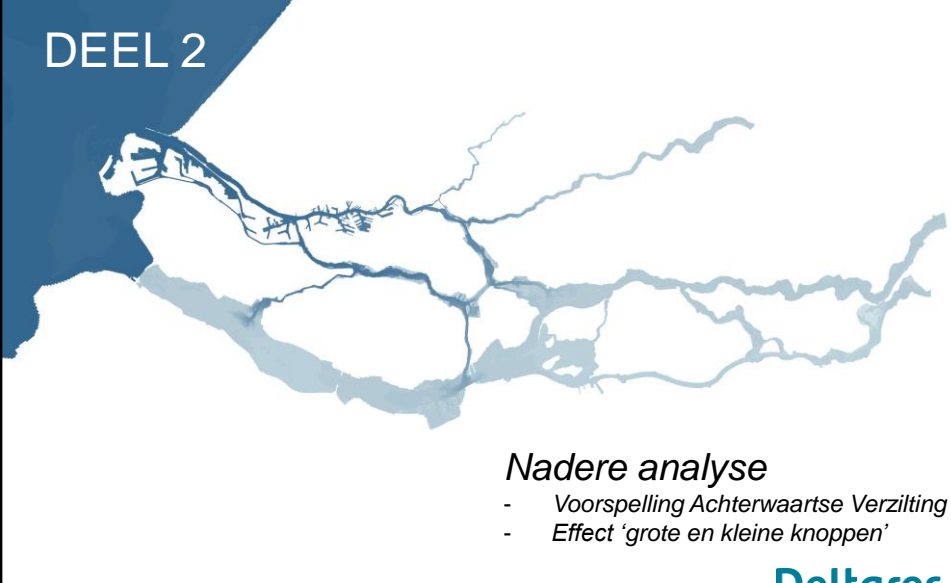


20 december 2016

Deltares



DEEL 2

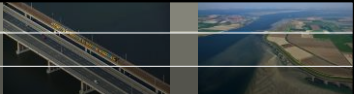


Nadere analyse

- *Voorspelling Achterwaartse Verzilting*
- *Effect 'grote en kleine knoppen'*

20 december 2016

Deltares



Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

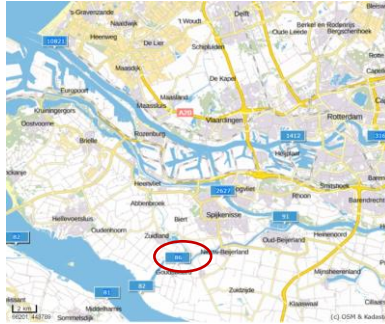
20 december 2016

Deltares

Achterwaartse verzilting: wanneer opgetreden

25x Achterwaartse Verzilting tussen 1990 en 2005

Definitie: Chlorideconcentratie bij Bernisse > 500 mg/l



20 december 2016

Deltares

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:

HL (Hoog water Hoek van Holland - Laag water Moerdijk) > 1 m

&

$Q_{\text{Bovenrijn}}$ (Afvoer bij Lobith) < 1100 m³/s

[Handboek Waterwacht]

20 december 2016

Deltares

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:

HL (Hoog water Hoek van Holland - Laag water Moerdijk) > 1 m
&
 $Q_{\text{Bovenrijn}}$ (Afvoer bij Lobith) < 1100 m³/s

[Handboek Waterwacht]

25x Achterwaartse Verzilting tussen 1990 en 2005
-- Definitie: Chlorideconcentratie bij Bernisse > 500 mg/l --

15x voldeden niet aan de vuistregel omdat:

- $Q_{\text{br}} > 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ (14x)
- HL < 1 m (1x)



20 december 2016

Deltares

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht



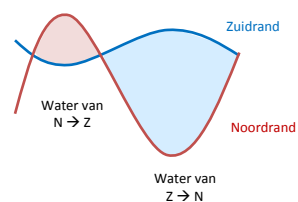
Hoger

Lager



Lager

Hoger



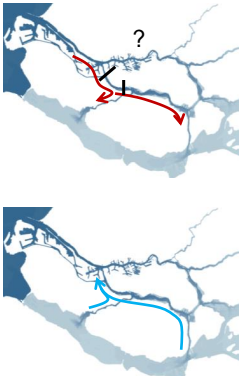
20 december 2016

Deltares

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

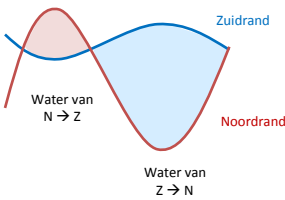
Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht
- Aanvangssituatie: Hoever is het zout al?
mate van oplading van het systeem + zoutconcentratie Noordrand



Hoger
Lager

Lager
Hoger



Water van N → Z
Water van Z → N

Zuidrand
Noordrand

Deltares

20 december 2016

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht
- Hoever is zout al?
mate van oplading van het systeem + zoutconcentratie Noordrand



Periode van Achterwaartse verzilting

1x
2x

Som waterstandsverschil
→ maat voor oplading

Som waterstandsverschil
→ maat voor hoever zout
kan indringen en wordt
teruggedrongen

Deltares

20 december 2016

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht
- Hoever is zout al?
mate van oplading van het systeem + zoutconcentratie Noordrand

Som waterstandsverschil
→ maat voor oplading

$$\left[\sum_{t=1}^T dh \, dt \right]$$

Som waterstandsverschil
→ maat voor hoever zout
kan indringen en wordt
teruggedrongen

$$+ \left[2 \sum_{t=1}^{T+1} dh \, dt \right] / 3T$$

20 december 2016

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Nuttig resultaat!

Indicator	HL > 1 m & Qbr < 1100 m³/s	$\sum dh > 2.7 \text{ m}$	HL > 1.55 m	LH > -0.30 m
Aantal voorspeld	10 (van 25)	20 (van 25)	9 (van 25)	6 (van 25)
Vals positief	Niet getest	5	23	0

Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:

HL (Hoog water Hoek van Holland - Laag water Moerdijk) > 1 m
&
Q_{bevoering} (Afvoer bij Lobith) < 1100 m³/s

[Handboek Waterwach]

20 december 2016

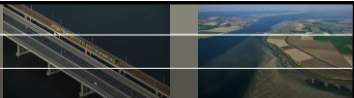


Grote knop

Invloed Haringvlietsluizen op waterbeweging en zoutverspreiding

20 december 2016

Deltares



Basis

Literatuur
Analyse principe berekeningen*

** Principe berekeningen uit 'Niet te zoet, niet te zout' (RWS, 2006)*

Eb-vloed Opening

Q_{BR}

Systeemkennis

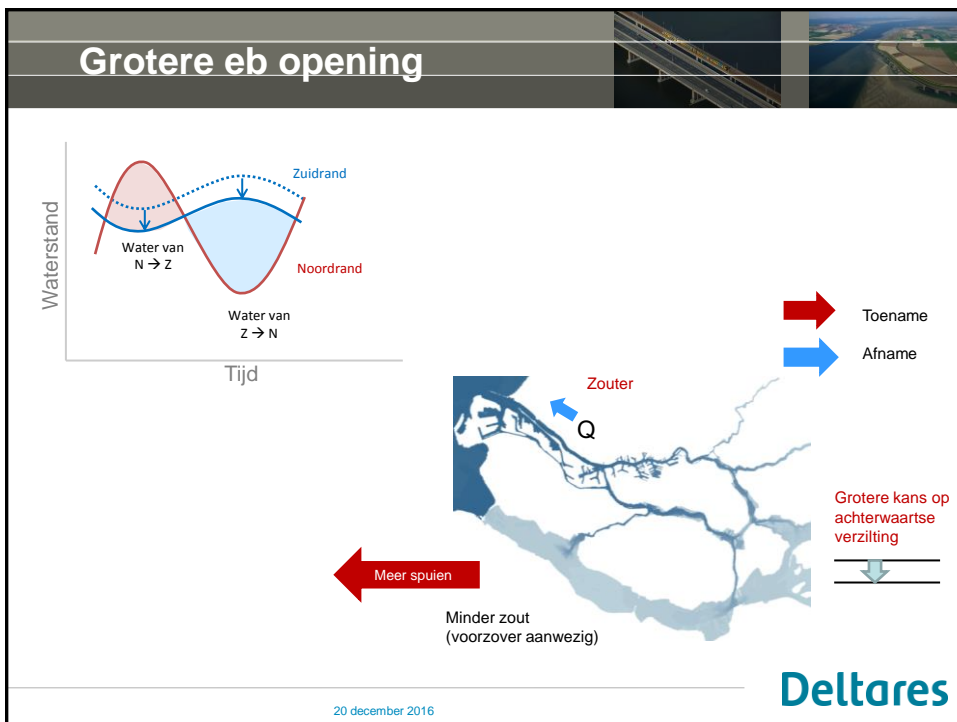
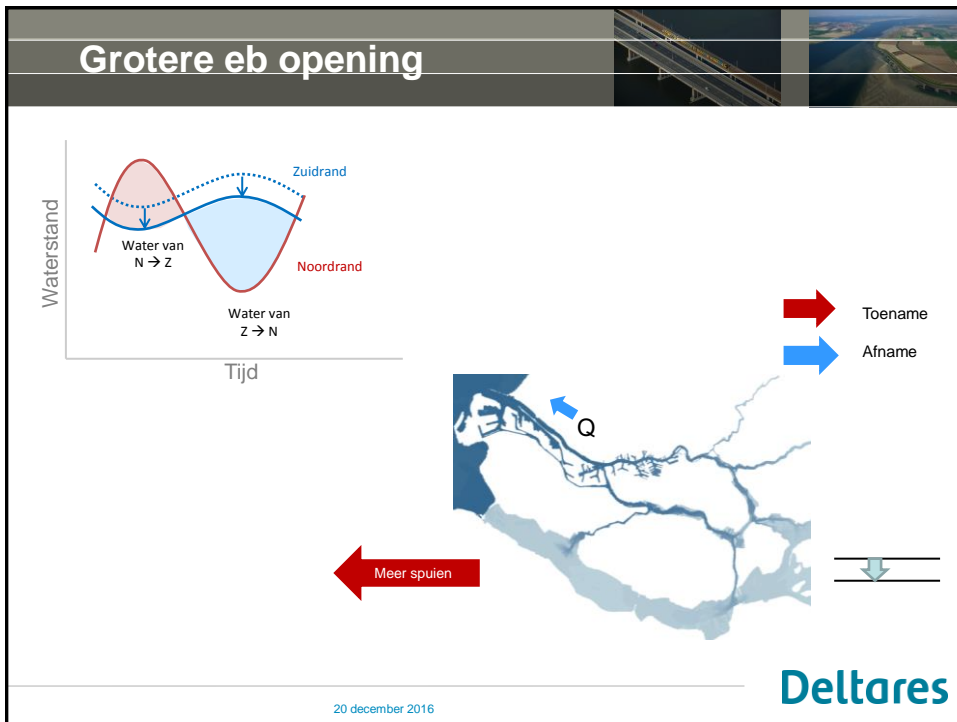
- Grotere eb opening
- Grotere vloed opening
- Grotere eb-vloed opening
- Toekomst: Van LPH84 naar Kier

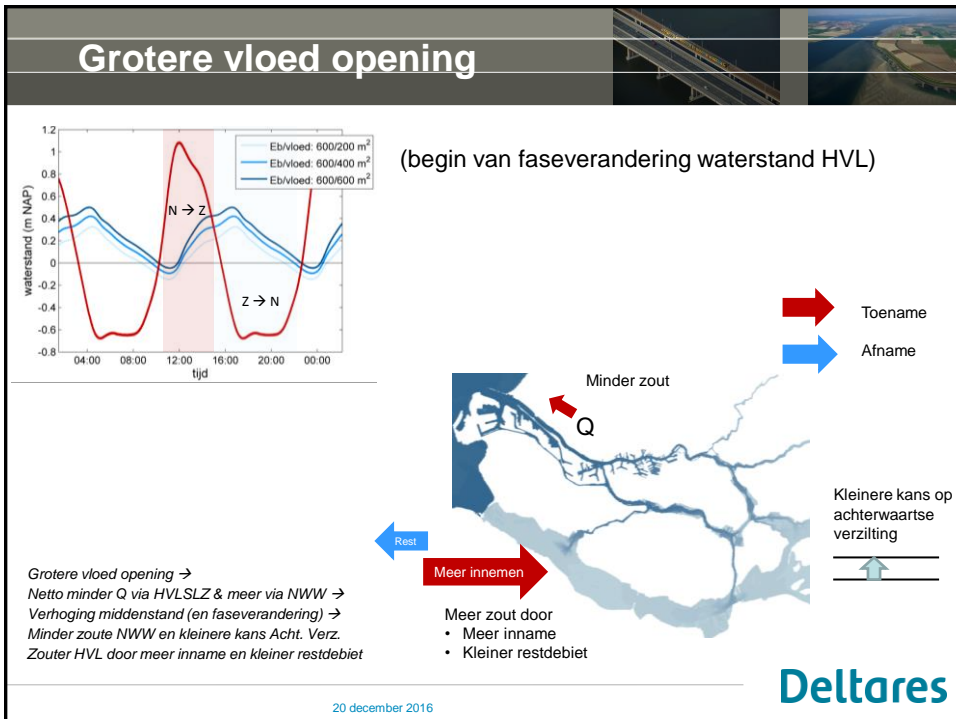
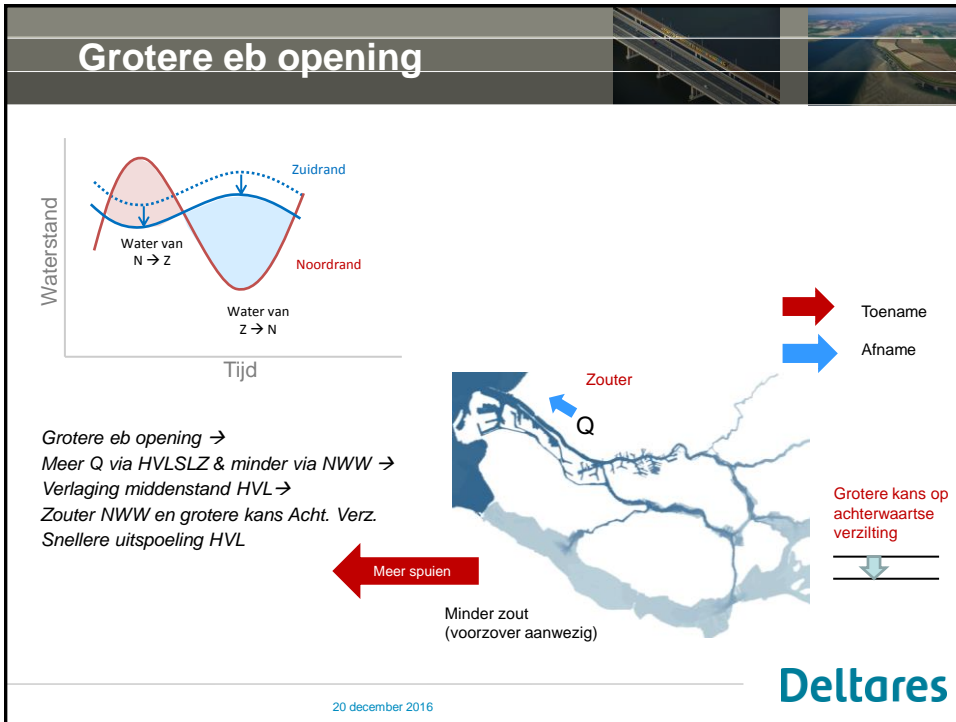
Haringvlietsluizen als regelknop

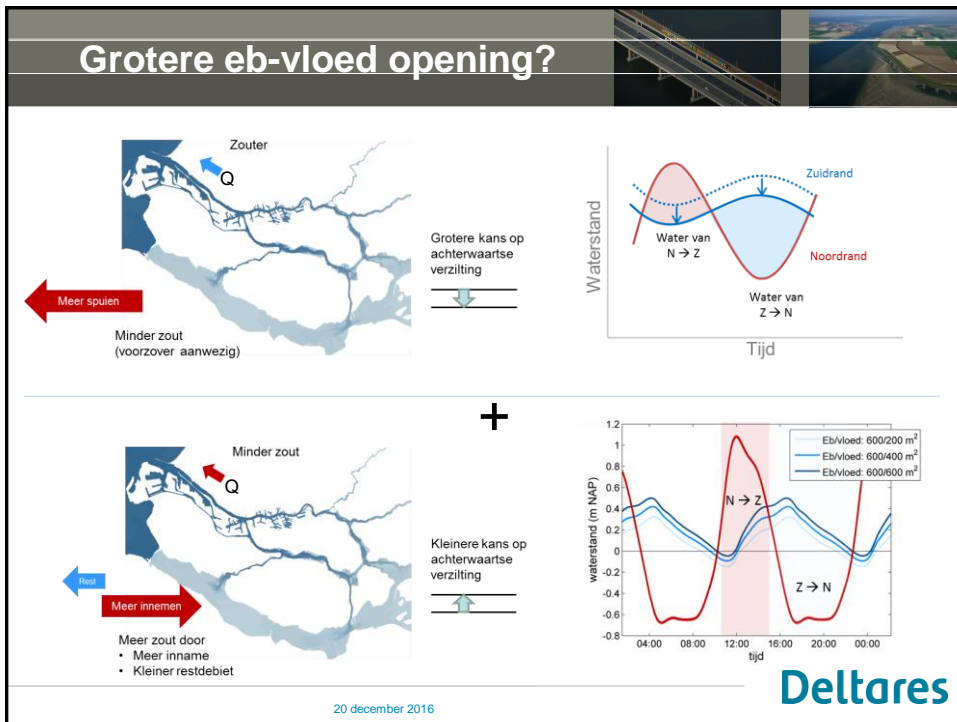
- Voorwaartse verzilting
- Achterwaartse verzilting

20 december 2016

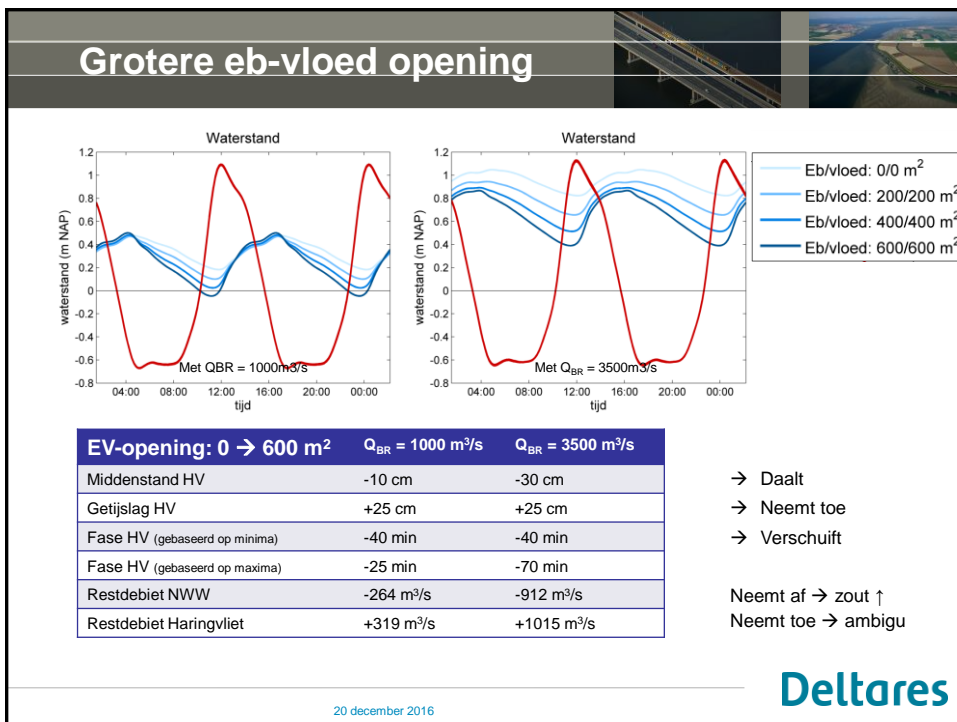
Deltares







20 december 2016



20 december 2016

Grotere eb-vloed opening

Zout Noordrand ↑, doordat $Q_{NWW} \downarrow$

Meer spuien

Meer innemen

Middenstand ↓
→ Achterwaartse verzilting ↑

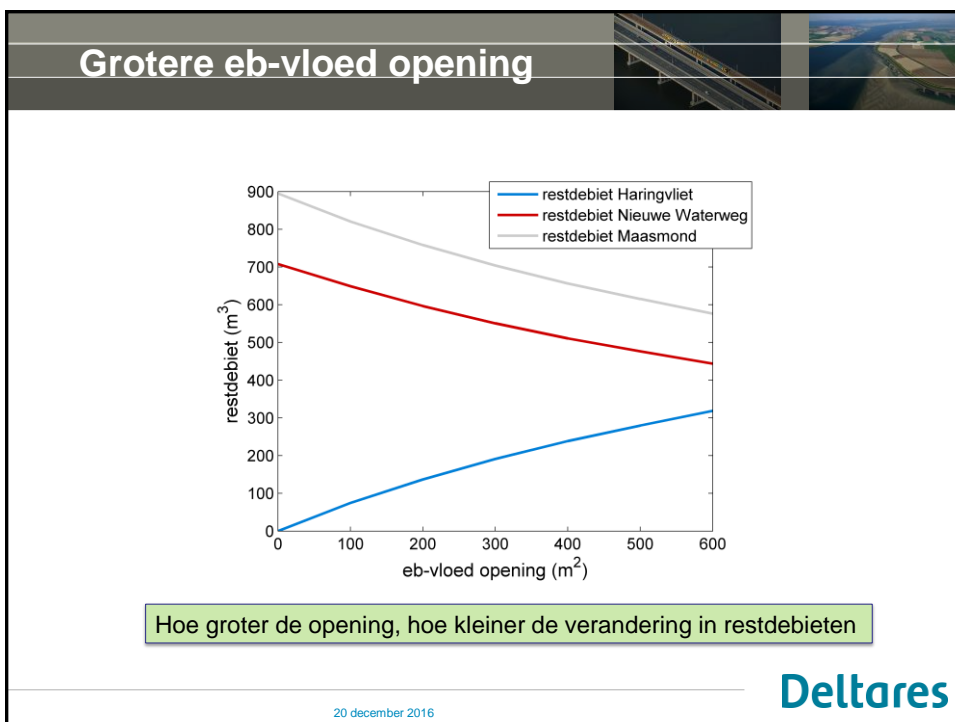
Effect op zout aan de zuidrand is tweeledig:

- 1) Zout ↓, doordat $Q_{HV} \uparrow$
- 2) Zout ↑, doordat meer water ingenomen wordt bij vloed

Netto kan het dus voorkomen dat bij grotere eb-vloed de zoutconcentraties afnemen!

20 december 2016

Deltares



Haringvliet als stuurknop (resumé effecten)

Grotere eb-opening

- Toename zoutconcentraties Noordrand
- Toename kans op achterwaartse verzilting
- Gunstig voor uitspoelen zout uit Haringvliet (effectiviteit)
- Lagere waterstanden Moerdijk

Grotere vloed-opening

- Afname zoutconcentraties Noordrand
- Afname kans op achterwaartse verzilting.
- Meer zout in Haringvliet
- Gemiddeld hogere waterstanden Moerdijk, maar grotere fluctuaties.

20 december 2016

Deltares

Haringvliet als stuurknop

Grotere eb-opening

Meer spuien

Minder zout
(voorover aanwezig)

Grotere kans op
achterwaartse
verzilting

Grotere vloedopening

Minder zout

Meer innemen

Meer zout door
• Meer inname
• Kleiner restdebit

Kleinere kans op
achterwaartse
verzilting

Grotere eb & vloedopening

Zouter

Meer spuien

Meer innemen



Grotere kans op
achterwaartse
verzilting

Minder zout door hoger restdebit
Meer zout door meer inname tijdens vloed

20 december 2016


Deltares

Handelingsperspectief


Tegengaan voorwaartse verzilting Noordrand

- Minder spuien
- Meer innemen met vloed (*mits zuidrand zout nog hebben kan*)




Tegengaan achterwaartse verzilting


- Minder spuien
- Effect opening vloed is niet eenduidig. Grotere vloedopening:
 - Hogere waterstanden zuidrand (gunstig)
 - Grotere getijslag zuidrand (ongunstig)



Ontzilting Haringvliet
(*na achterwaartse verzilting of bij voorwaartse verzilting zuidrand tgv Kier*)

- Extra spuien (mogelijk grote spuidebieten nodig)
(*mits geen dreiging van achterwaartse verzilting en verzilting noordrand en mits waterstanden bij Moerdijk hoog genoeg zijn*)
- Minder innemen met vloed





20 december 2016




Kleine knoppen

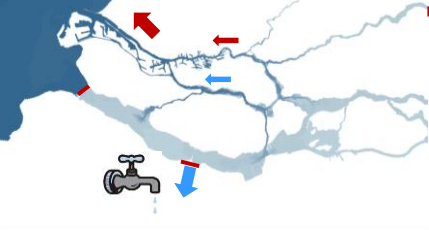
Onttrekking Volkerak Zoommeer en gebruik stuw bij Hagestein



20 december 2016

Theoretische werking

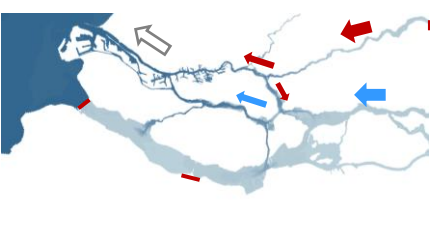
Onttrekking VZM



Gevolg van Afname onttrekking:

- Minder zout komt via de Nieuwe Waterweg het systeem binnen
- iets groter debiet op de Nieuwe en Oude Maas

Afvoervertrekking




(uitgaande van dichte HVLSLZ)

- Evenveel zout komt via de Nieuwe Waterweg het systeem binnen
- Groter debiet op de Nieuwe Maas, kleiner debiet op de Oude Maas

20 december 2016

Deltares

DEEL 3



Conclusies

Deltares

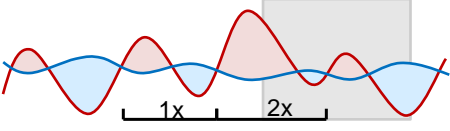
20 december 2016

Conclusies

Achterwaartse verzilting

Voor achterwaartse verzilting zijn de waterstandsverschillen de belangrijkste voorspeller.

Met de kier zal de kans op achterwaartse verzilting vermoedelijk (iets) toenemen



Deltares

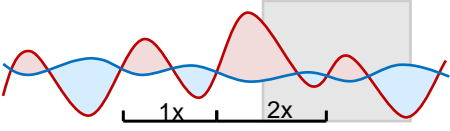
20 december 2016

Conclusies

Achterwaartse verzilting

Voor achterwaartse verzilting zijn de waterstandsverschillen de belangrijkste voorspeller.

Met de kier zal de kans op achterwaartse verzilting vermoedelijk (iets) toenemen



Stuurknop Haringvliet

Grotere eb-opening

- Toename zoutconcentraties Noordrand
- Toename kans op achterwaartse verzilting
- Gunstig voor uitspoelen zout uit Haringvliet (effectiviteit)
- Lagere waterstanden Moerdijk

Grotere vloed-opening

- Afname zoutconcentraties Noordrand
- Effect op achterwaartse verzilting is niet eenduidig:
- Meer zout in Haringvliet
- Gemiddeld hogere waterstanden Moerdijk, maar grotere fluctuaties.

+ Effecten zijn niet lineair!

Deltares

20 december 2016

Conclusies

Achterwaartse verzilting

Voor achterwaartse verzilting zijn de waterstandsverschillen de belangrijkste voorspeller.

Met de kier zal de kans op achterwaartse verzilting vermoedelijk (iets) toenemen

Stuurknop Haringvliet

Grotere eb-opening

- Toename zoutconcentraties Noordrand
- Toename kans op achterwaartse verzilting
- Gunstig voor uitspoelen zout uit Haringvliet (effectiviteit)
- Lagere waterstanden Moerdijk

Grotere vloed-opening

- Afname zoutconcentraties Noordrand
- Effect op achterwaartse verzilting is niet eenduidig:
- Meer zout in Haringvliet
- Gemiddeld hogere waterstanden Moerdijk, maar grotere fluctuaties.

+ Effecten zijn niet lineair!

Kleine Stuurknoppen

Effect op verzilting Noordrand

Onttrekking VZM

- Minder zout naar binnen via NWW
- Iets meer tegendruk via Oude Maas en Nieuwe Maas

Afvoervertrekking

- Evenveel zout naar binnen via NWW
- Meer tegendruk via de Noordrand

....Work in Progress

Deltares

20 december 2016

B.3 Presentatie (Kennisdag Zoetwater, 8 november 2016)

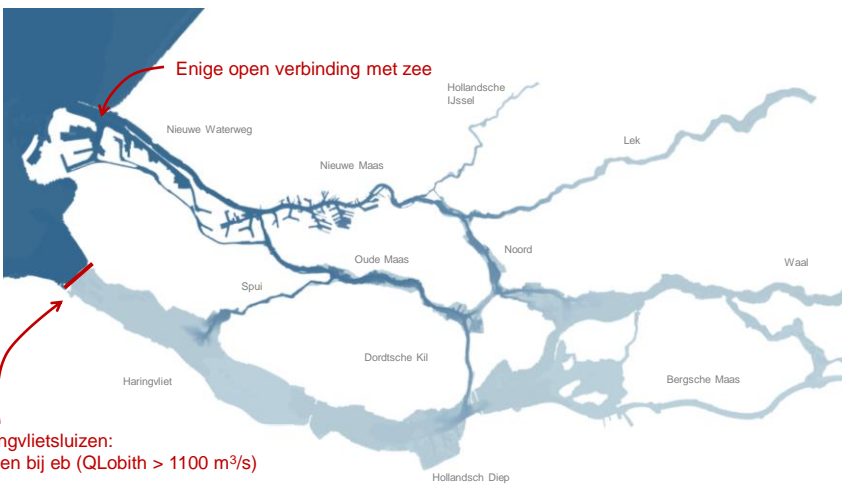


Noord-Zuidrelaties Rijn-Maasmonding

Onderdeel van de “Systeemanalyse Rijn-Maasmonding”


Ymkje Huismans - Kennisdag Zoetwater – 8 november 2016

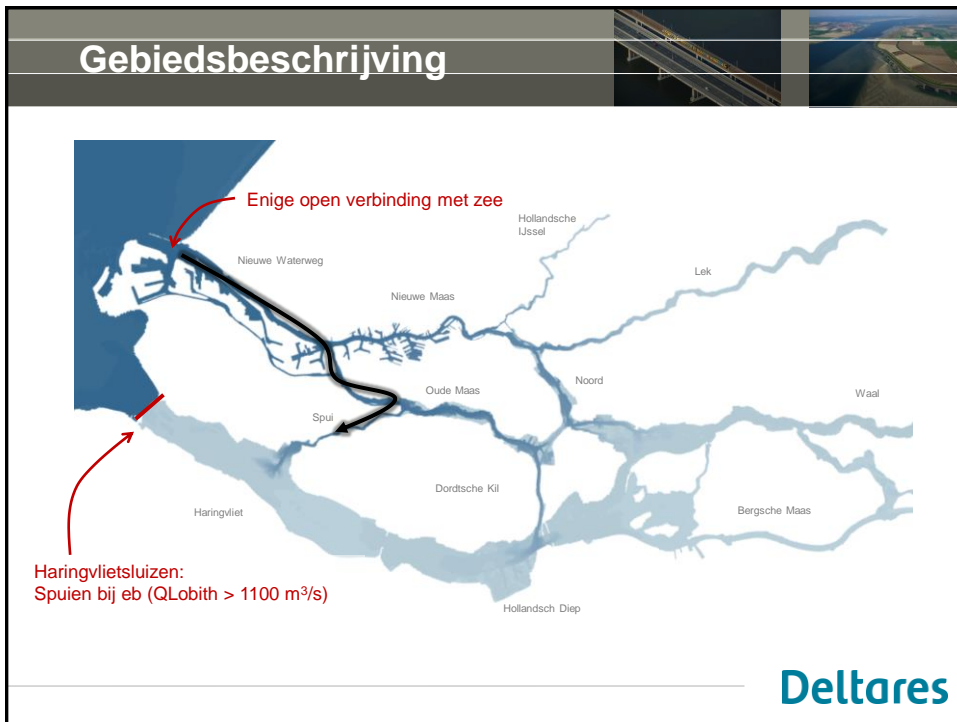
Gebiedsbeschrijving



Enige open verbinding met zee

Haringvlietssluisen:
Spuien bij eb ($QLobith > 1100 \text{ m}^3/\text{s}$)





Gebiedsbeschrijving



Enige open verbinding met zee

Nieuwe Waterweg
Hollandsche IJssel
Lek
Nieuwe Maas
Oude Maas
Noord
Waal
Spui
Dordtsche Kil
Bergsche Maas
Haringvliet
Hollandsch Diep

Haringvlietsluizen:
Spuien bij eb ($Q_{Lobith} > 1100 \text{ m}^3/\text{s}$)

Deltares

Opzet presentatie

- 1) Achterwaartse verzilting & vuistregels voor optreden
- 2) Stuurknop Haringvlietsluizen
- 3) Conclusies & koppeling naar de praktijk



Deltares

Achterwaartse verzilting: achtergrond

Voorbeeld van Achterwaartse verzilting:
In 2005, maandenlange verzilting zuidrand + innamestop



Deltares

Achterwaartse Verzilting: Vuistregel

Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:

HL (Hoog water Hoek van Holland - Laag water Moerdijk) > 1 m

&

$Q_{\text{Bovenrijn}}$ (Afvoer bij Lobith) < 1100 m³/s

[Handboek Waterwacht]



Deltares

Achterwaartse Verzilting: Vuistregel

Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:

$$HL (\text{Hoog water Hoek van Holland} - \text{Laag water Moerdijk}) > 1 \text{ m}$$

&

$$Q_{\text{Bovenrijn}} (\text{Afvoer bij Lobith}) < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$$

[Handboek Waterwacht]

25x Achterwaartse Verzilting tussen 1990 en 2005
 -- Definitie: Chlorideconcentratie bij Bernisse > 500 mg/l --

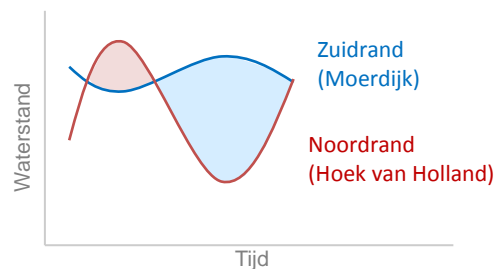
15x voldeden niet aan de vuistregel omdat:

- $Q_{br} > 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ (14x)
- $HL < 1 \text{ m}$ (1x)

Deltares

Wanneer treedt achterwaartse verzilting op?

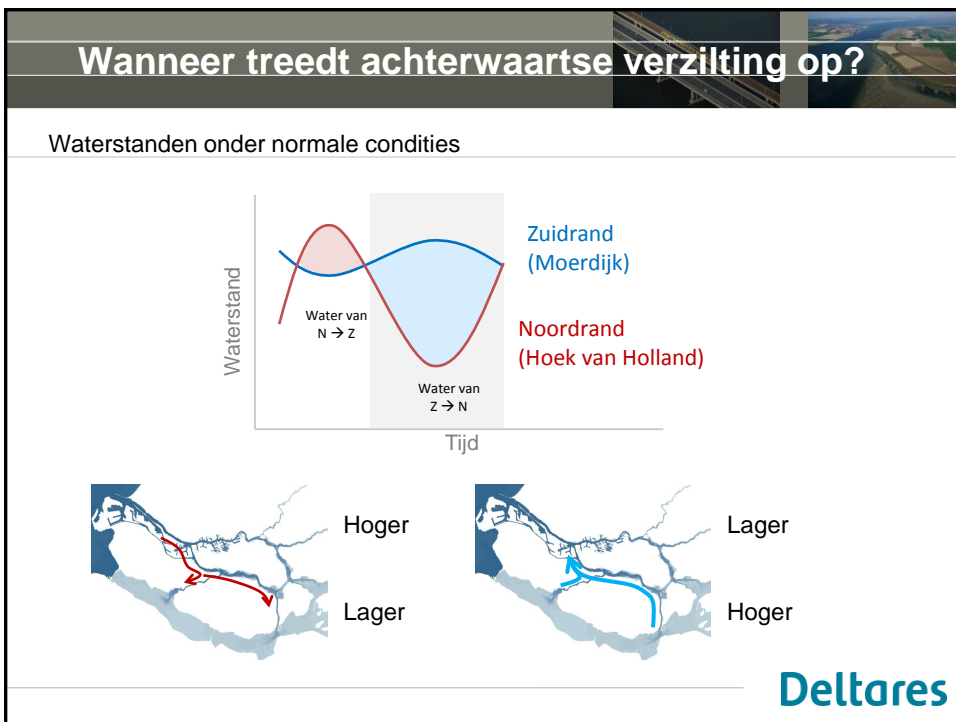
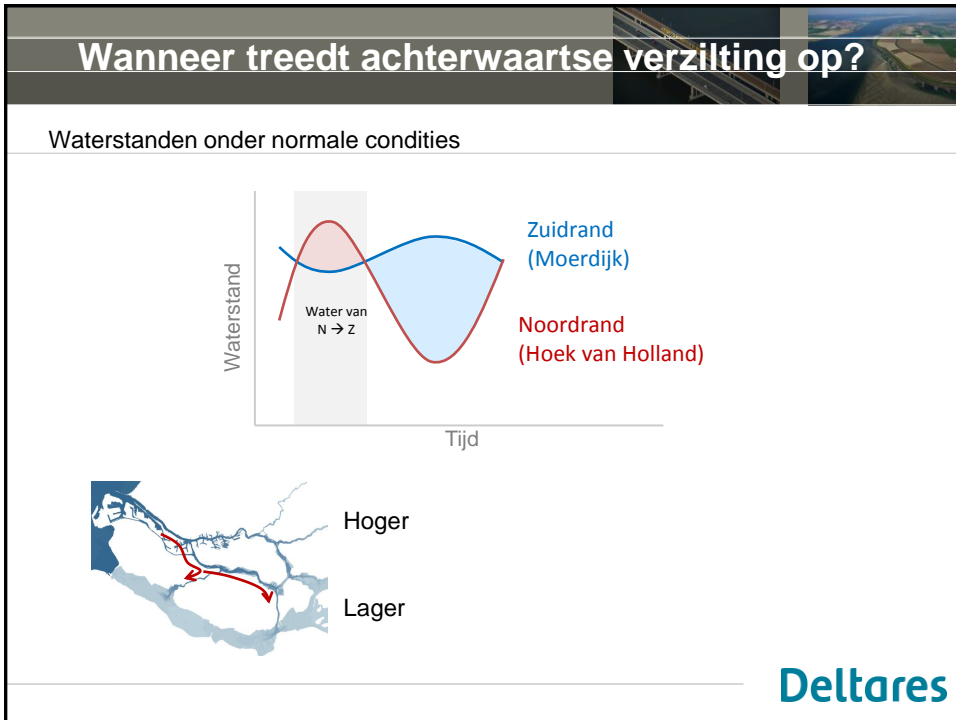
Waterstanden onder normale condities

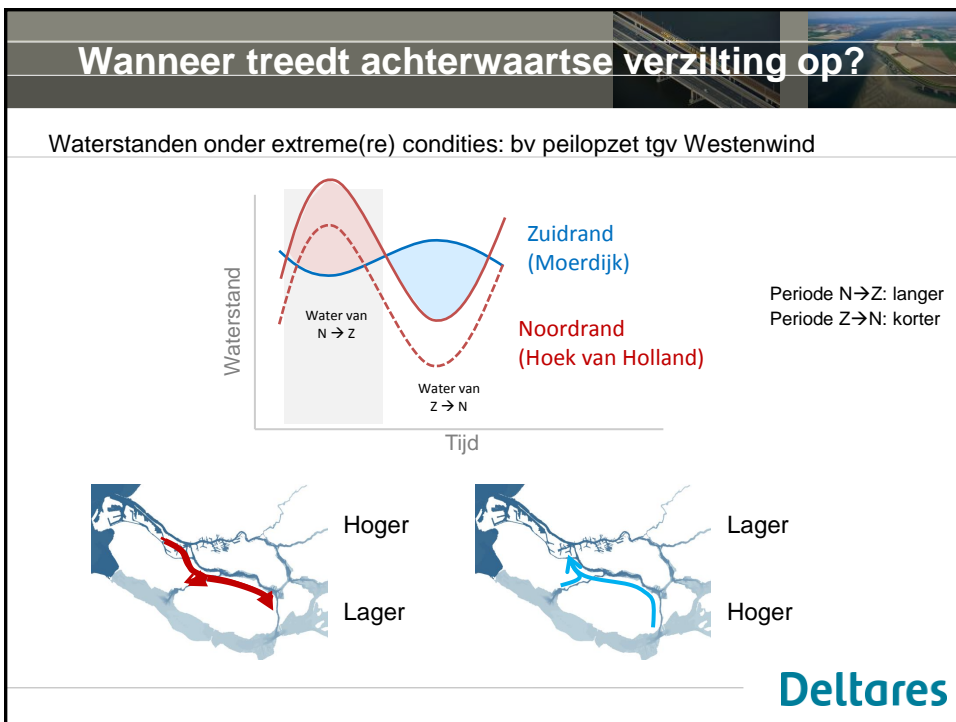
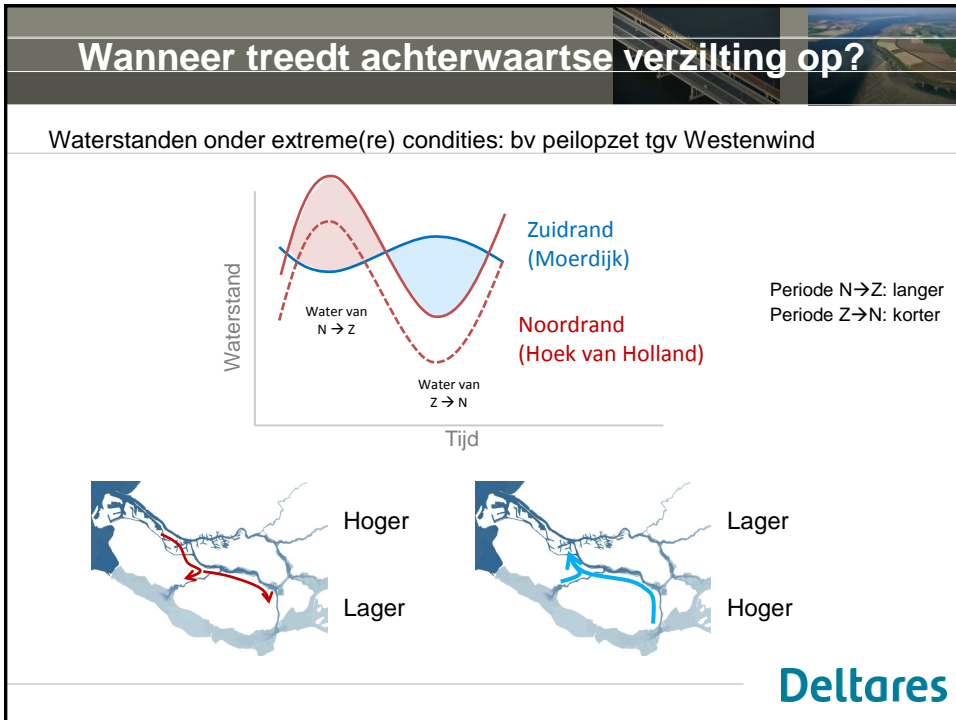


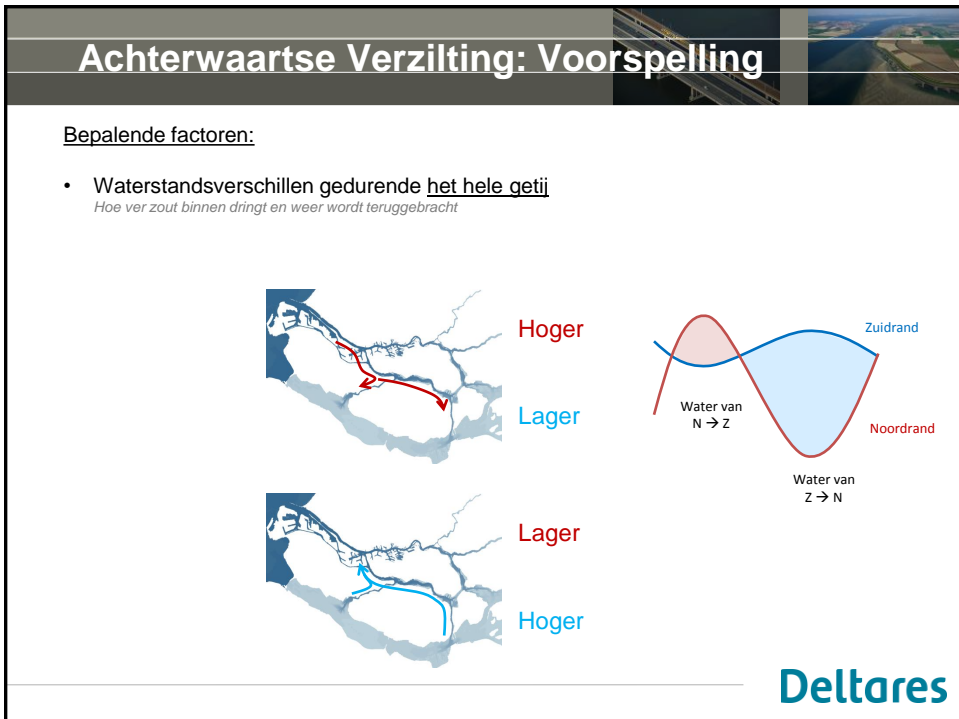
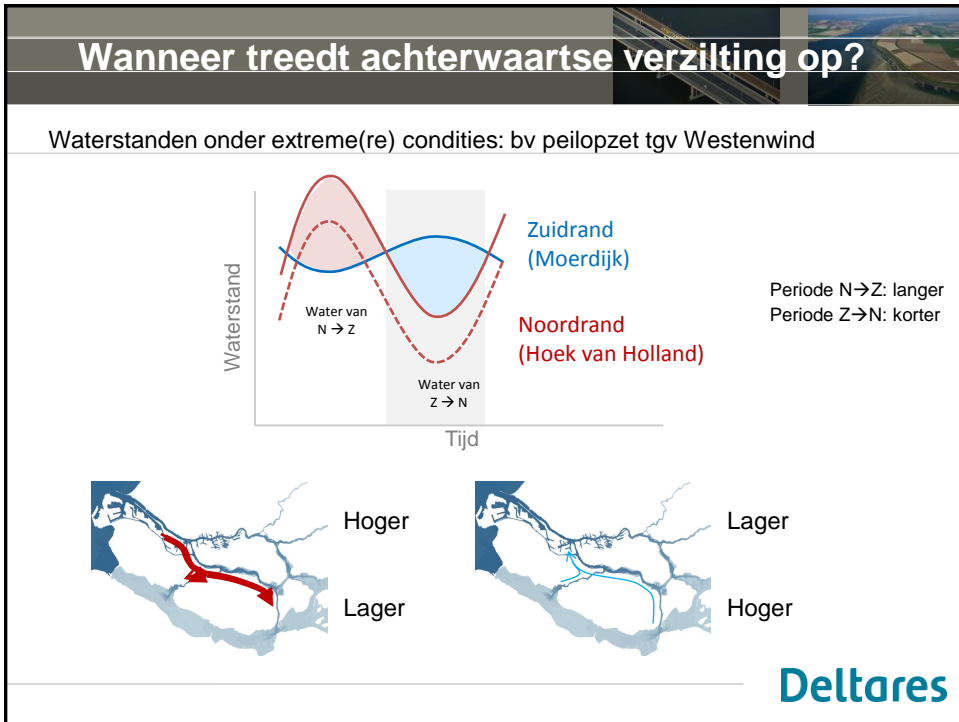
Onder normale condities:

- Noordrand: grootste getijslag
- Zuidrand: uit fase, kleine getijslag en gemiddeld een hogere waterstand

Deltares








Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

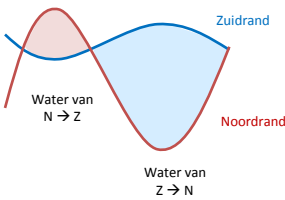
Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht
- Aanvangssituatie: Hoever is het zout al?
mate van oplading van het systeem




Hoger

Lager



Zuidrand

Noordrand



Lager

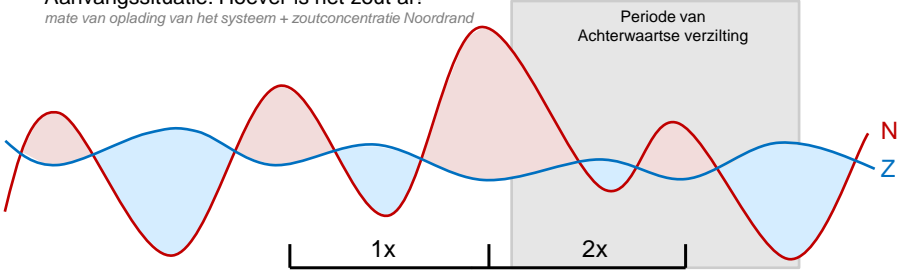
Hoger

Deltares

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht
- Aanvangssituatie: Hoever is het zout al?
mate van oplading van het systeem + zoutconcentratie Noordrand



Periode van Achterwaartse verzilting

1x 2x

Som waterstandsverschil → Hoe ver was zout al? Som waterstandsverschil → Hoe ver komt zout?

Deltares

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Bepalende factoren:

- **Waterstandsverschillen gedurende het hele getij**
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht
- **Aanvangssituatie: Hoever is het zout al?**
mate van oplading van het systeem

Som waterstandsverschil → Hoe ver was zout al? Som waterstandsverschil → Hoe ver komt zout?

Deltares

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Indicator	HL > 1 m & Qbr < 1100 m³/s	$\sum dh > 2 \text{ m}$
Aantal voorspeld	10 (van 25)	20 (van 25)
Vals positief	Niet getest	5

Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:

HL (Hoog water Hoek van Holland - Laag water Moerdijk) > 1 m
&
Q_{Bovenrij} (Afvoer bij Lobith) < 1100 m³/s

[Handboek Waterwach]

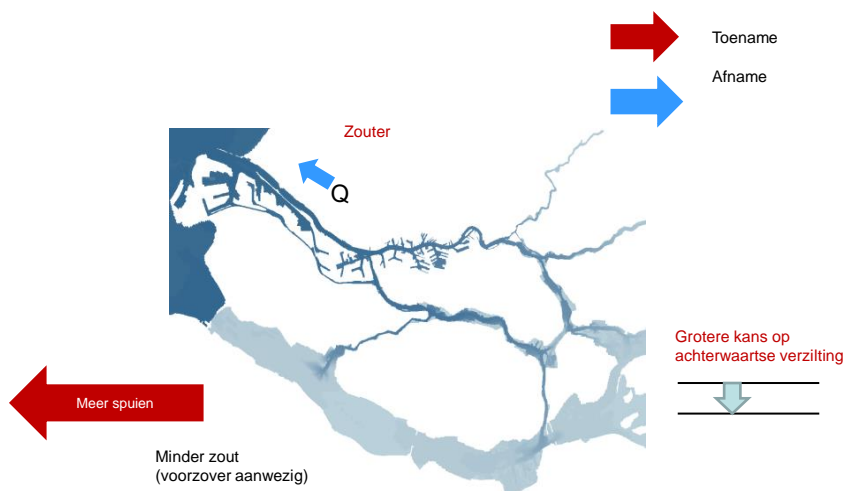
Deltares

Stuurknop Haringvlietsluizen



Deltares

Grotere eb opening



Deltares

Grotere vloed opening

➔ Toename
➔ Afname

➔ Rest
➔ Meer innemen

Minder zout
 Q
 Kleinere kans op achterwaartse verzilting

Meer zout door
 • Meer inname
 • Kleiner restdebiet

*Relaties geldig tot een opening van <math>< 600 \text{ m}^2</math>
 Daarboven mogelijk anders door samenspelings faseverschuiving en getijslag.*

Deltares

Haringvliet als stuurknop

Grotere eb-opening

Zouter

Meer spuien

Minder zout
(voorover aanwezig)

Grotere kans op
 achterwaartse
 verzilting

Grotere vloedopening

Minder zout

Meer innemen

Rest

Meer zout door
• Meer inname
• Kleiner restdebiet

Kleinere kans op
 achterwaartse
 verzilting

Relaties in ieder geval geldig voor opening tussen 0 - 600 m²

Deltares

Haringvliet als stuurknop

Grotere eb-opening

Zouter

Meer spuien

Minder zout (voorzoever aanwezig)

Grotere kans op achterwaartse verzilting

Grotere vloedopening

Minder zout

Meer innemen

Meer zout door

- Meer inname
- Kleiner restdebiet

Kleinere kans op achterwaartse verzilting

Relaties in ieder geval geldig voor opening tussen 0 - 600 m²

Effecten zijn

- tegengesteld
- niet lineair

➔ Resultaat niet altijd eenduidig of eenvoudig af te leiden!

Deltares

Conclusies

Achterwaartse verzilting

Voor achterwaartse verzilting zijn de waterstandsverschillen de belangrijkste voorspeller.

Toepassing: betere voorspelling achterwaartse verzilting

Deltares

Conclusies

Achterwaartse verzilting

Voor achterwaartse verzilting zijn de waterstandsverschillen de belangrijkste voorspeller.

Toepassing: betere voorspelling achterwaartse verzilting

Stuurknop Haringvliet

Grotere eb-opening

Grotere vloedopening

Relaties zijn niet lineair!

Toepassing

- Handvaten voor sturing systeem bij bepaald type verzilting
- Handvaten voor het implementeren van het Kierbesluit

Deltares

VRAGEN?

Deltares

B.4 Presentatie Slim Watermanagement Regiodag RijnMaasmonding (21 november 2016)




Samenhang Rijn-Maasmonding

Kleine stuurknoppen
&
Voorspelling achterwaartse verzilting

Ymkje Huismans – Regiodag RMM: Workshop Samenhang – 22 november 2016

Gebiedsbeschrijving



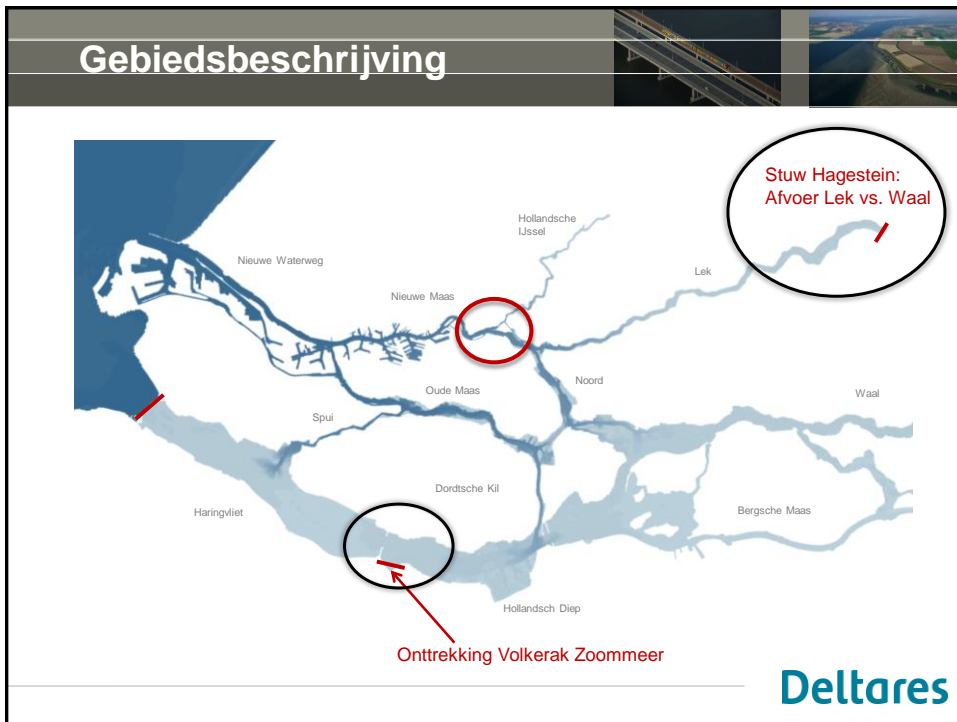
Enige open verbinding met zee

Stuw Hagestein:
Afvoer Lek vs. Waal

Haringvliet
Haringvlietstuizen:
Spuien bij eb ($QLobith > 1100 \text{ m}^3/\text{s}$)

Onttrekking Volkerak Zoommeer

Deltares



Volkeraksluizen




Deltares

Stuw bij Hagestein





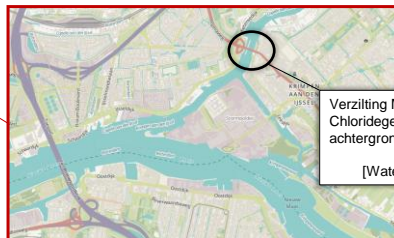
Vraagstelling

Effectiviteit extra afvoer over de Lek of minder onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer voor het tegengaan van verzilting van de monding Hollandsche IJssel?

Deltares

Vraagstelling

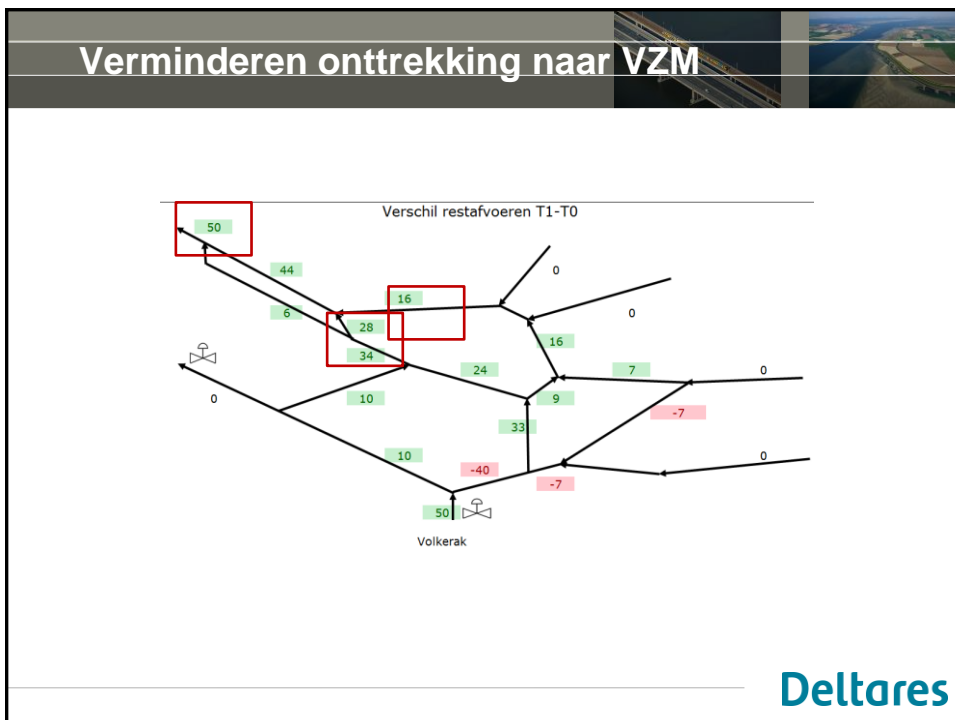
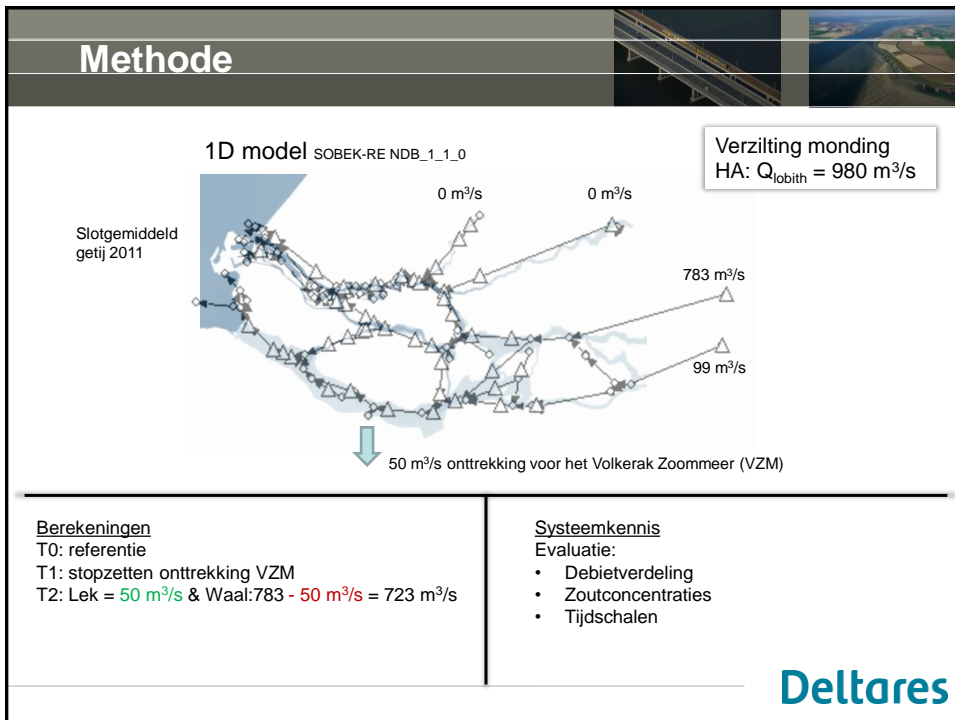
Effectiviteit extra afvoer over de Lek of minder onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer voor het tegengaan van verzilting van de monding Hollandsche IJssel?



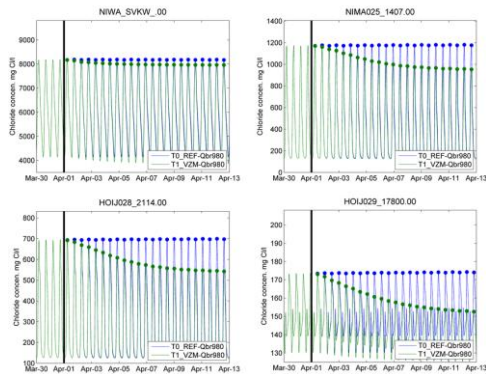
Verziltion Monding Hollandsche IJssel:
Chloridegehalte 50 mg Cl/l boven de
achtergrondconcentratie.

[Waterakkoord Hollandsche IJssel]

Deltares



Verminderen onttrekking naar VZM



Locatie	Chlorideconcentraties (mg Cl/l)		Verschillen		Percentage van de verandering, na x getijden		
	referentie	maatregel	Abs.	Rel.	>50%	>90%	>95%
NIWA_SVKW_00	8173	7961	-212	3%	4	12	25
NIWA025_1407.00	1171	940	-231	20%	8	17	30
HOIJ028_2114.00	693	534	-159	23%	8	17	30
HOIJ029_17800.00	173	151	-22	13%	8	21	40

Deltares

Verminderen onttrekking naar VZM

Hydrodynamica

Pas na 4 getijden (~2 dagen) meer dan 80% van de verandering bereikt. Pas na 10 getijden (~10 dagen) nieuw evenwicht bereikt.

Redenen:

- Buffercapaciteit Haringvliet & Hollandsch Diep
- Grote afstanden: van Volkeraksluizen naar monding Hollandsche IJssel via de rivier ~ 45 km.

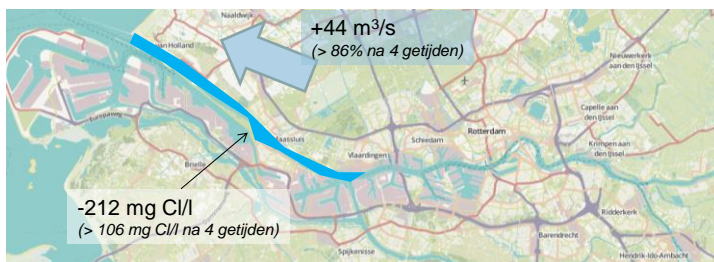
Deltares

Verminderen onttrekking naar VZM



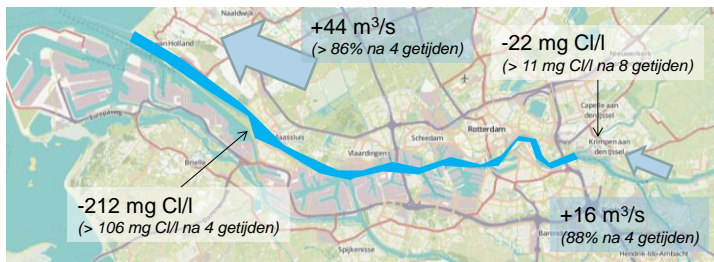
Deltares

Verminderen onttrekking naar VZM



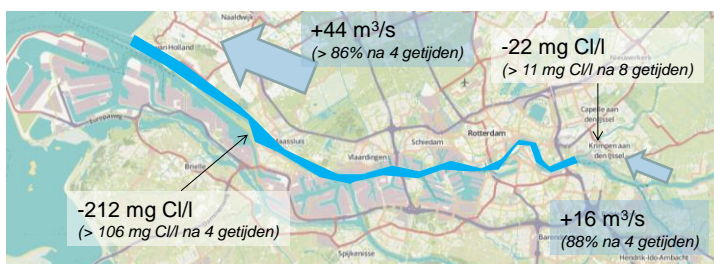
Deltares

Verminderen onttrekking naar VZM



Deltares

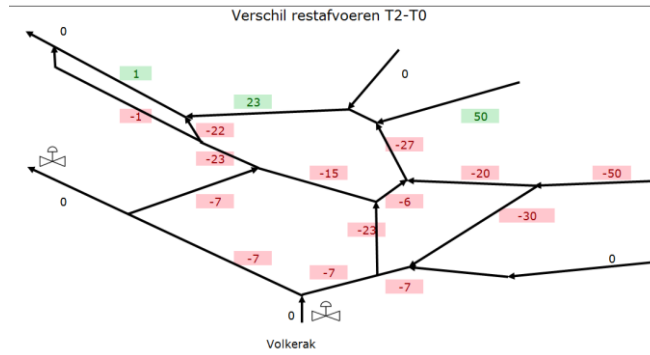
Verminderen onttrekking naar VZM



~13% verlaging van de chlorideconcentraties
Duurt meerdere dagen voordat effect merkbaar wordt.

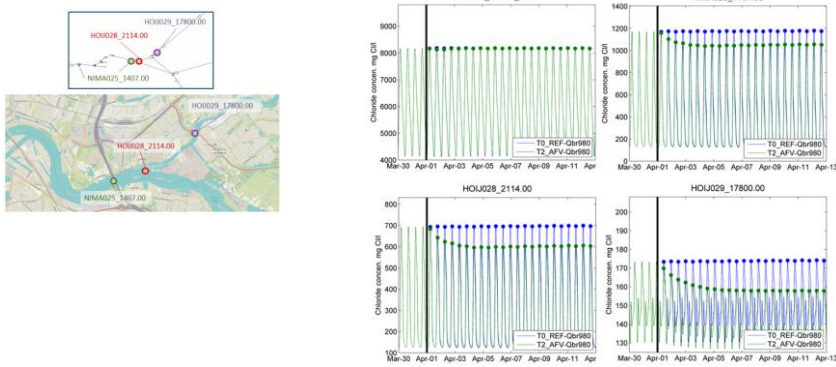
Deltares

Afvoervertrekking van Waal naar Lek



Deltares

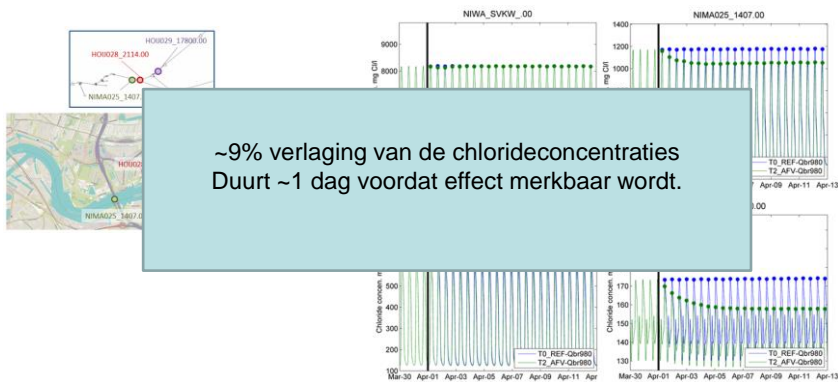
Afvoervertrekking van Waal naar Lek



Locatie	Chlorideconcentraties (mg Cl/l)		Verschillen		Percentage van de verandering, na x getijden		
	referentie	maatregel	Abs.	Rel.	>50%	>90%	>95%
NIWA_SVKW_00	8173	8175	2	0%	17	25	33
NIMA025_1407.00	1171	1048	-123	-10%	2	5	6
HOIJ028_2114.00	693	600	-93	-13%	2	5	6
HOIJ029_17800.00	173	157	-16	-9%	3	8	22

Deltares

Afvoervertrekking van Waal naar Lek



Locatie	Chlorideconcentraties (mg Cl/l)		Verschillen		Percentage van de verandering, na x getijden		
	referentie	maatregel	Abs.	Rel.	>50%	>90%	>95%
NIWA_SVKW_00	8173	8175	2	0%	17	25	33
NIMA025_1407.00	1171	1048	-123	-10%	2	5	6
HOIJ028_2114.00	693	600	-93	-13%	2	5	6
HOIJ029_17800.00	173	157	-16	-9%	3	8	22

Deltares

Conclusies

Stopzetten onttrekking VZM



- + Grotere reductie chlorideconc.
- + ook minder verzilting zuidrand
- duurt langer

- Winterdoorspoeling
- Inzetten als verzilting pas over 1 à 2 weken verwacht wordt.

Afvoervertrekking Waal naar Lek



- Kleinere reductie chlorideconc.
- toename verzilting zuidrand
- duurt korter

- Inzetten bij acute dreiging van achterwaartse verzilting, mits
 - * toename verzilting zuidrand geen probleem is
 - * Lagere waterstanden Waal geen probleem zijn

Deltares

Discussie

- Zijn de afnames in chlorideconcentraties bruikbaar?
(~10-20 mg Cl/l bij Monding HA)
- Welke tijdschalen zijn in de praktijk haalbaar om mee te werken? (vb. heeft het zin om een maatregel 5 dagen van te voren te moeten inzetten?)
- Welke orde groottes van onttrekking en afvoervertrekking zijn realistisch haalbaar?
-



NB. Modelonzekerheid: Zoutverspreiding is 3D, modellering 1D.
→ Vertrouwen in de orde grootte van de chlorideconcentratie en de tijdschalen, niet in de absolute waarden!

Deltares

Achterwaartse verzilting: achtergrond

Voorbeeld van Achterwaartse verzilting:
In 2005, maandenlange verzilting zuidrand + innamestop



Deltares

Achterwaartse Verzilting: Vuistregel

Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:

$$HL (\text{Hoog water Hoek van Holland} - \text{Laag water Moerdijk}) > 1 \text{ m}$$

&

$$Q_{\text{Bovenrijn}} (\text{Afvoer bij Lobith}) < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$$

[Handboek Waterwacht]



Deltares

Achterwaartse Verzilting: Vuistregel

Vuistregel optreden achterwaartse verzilting:

$$HL (\text{Hoog water Hoek van Holland} - \text{Laag water Moerdijk}) > 1 \text{ m}$$

&

$$Q_{\text{Bovenrijn}} (\text{Afvoer bij Lobith}) < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$$

[Handboek Waterwacht]

25x Achterwaartse Verzilting tussen 1990 en 2005
 -- Definitie: Chlorideconcentratie bij Bemisse > 500 mg/l --

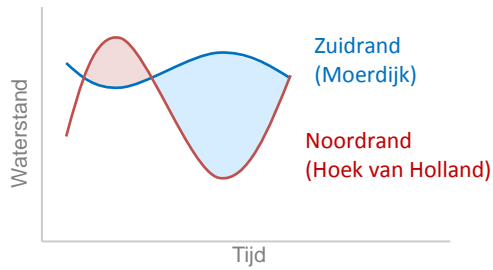
15x voldeden niet aan de vuistregel omdat:

- $Q_{br} > 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ (14x)
- $HL < 1 \text{ m}$ (1x)

Deltares

Wanneer treedt achterwaartse verzilting op?

Waterstanden onder normale condities



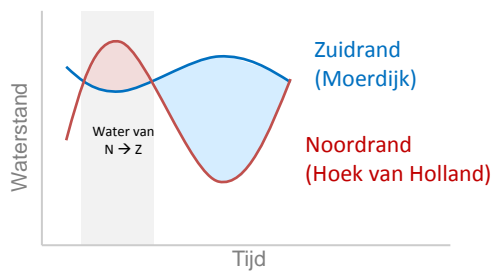
Onder normale condities:

- Noordrand: grootste getijslag
- Zuidrand: uit fase, kleine getijslag en gemiddeld een hogere waterstand

Deltares

Wanneer treedt achterwaartse verzilting op?

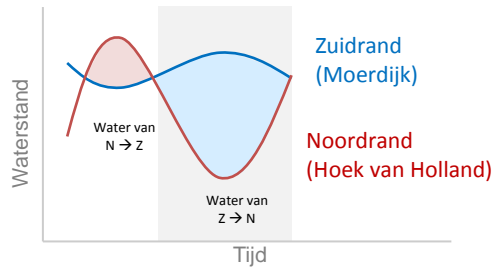
Waterstanden onder normale condities



Deltares

Wanneer treedt achterwaartse verzilting op?

Waterstanden onder normale condities



Hoger

Lager



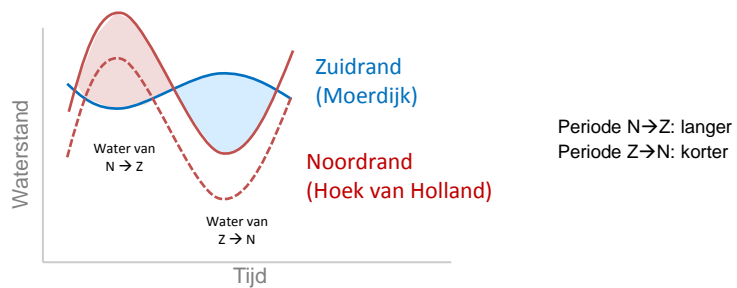
Lager

Hoger

Deltares

Wanneer treedt achterwaartse verzilting op?

Waterstanden onder extreme(re) condities: bv peilopzet tgv Westenwind



Hoger

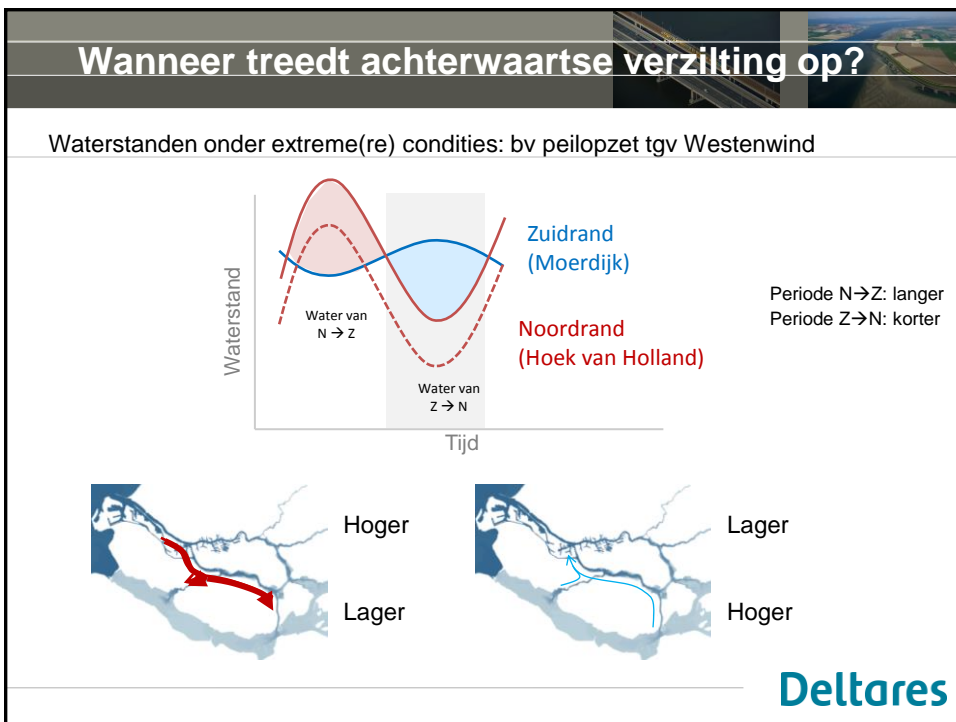
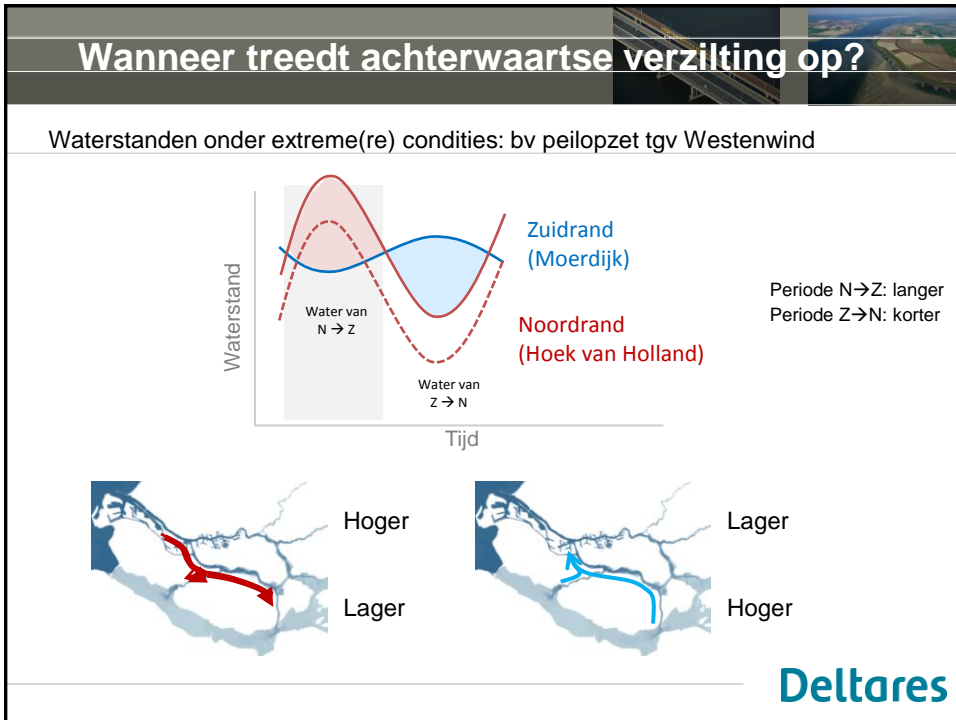
Lager



Lager

Hoger

Deltares



Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht



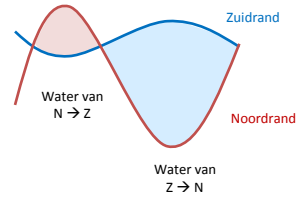
Hoger

Lager



Lager

Hoger



Deltares

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht
- Aanvangssituatie: Hoeveel is het zout al?
mate van oplading van het systeem



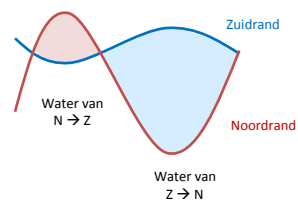
Hoger

Lager



Lager

Hoger

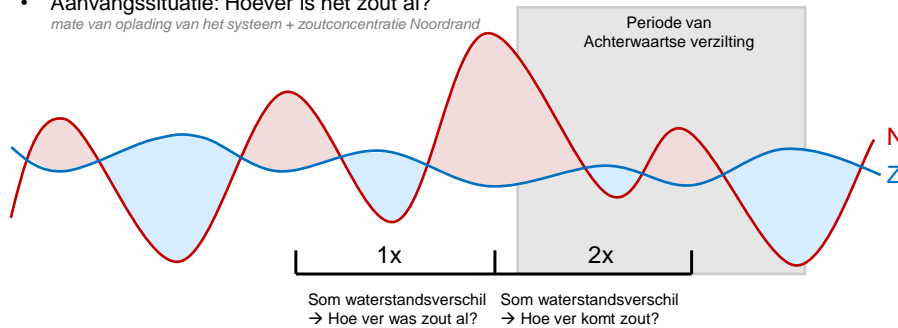


Deltares

Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht
- Aanvangssituatie: Hoever is het zout al?
mate van oplading van het systeem + zoutconcentratie Noordrand

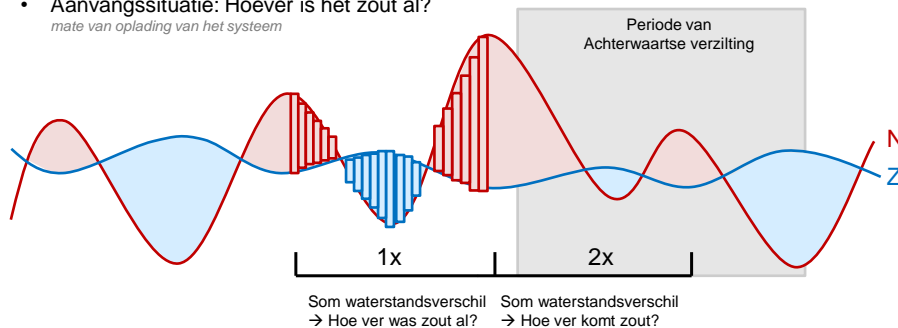


Deltares

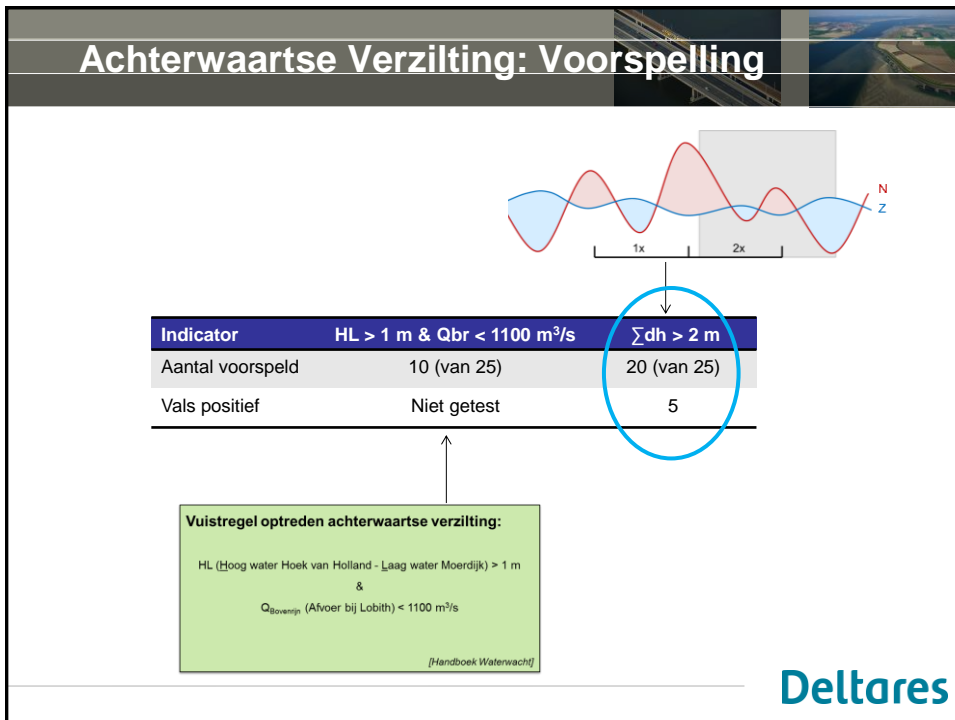
Achterwaartse Verzilting: Voorspelling

Bepalende factoren:

- Waterstandsverschillen gedurende het hele getij
Hoe ver zout binnen dringt en weer wordt teruggebracht
- Aanvangssituatie: Hoever is het zout al?
mate van oplading van het systeem



Deltares

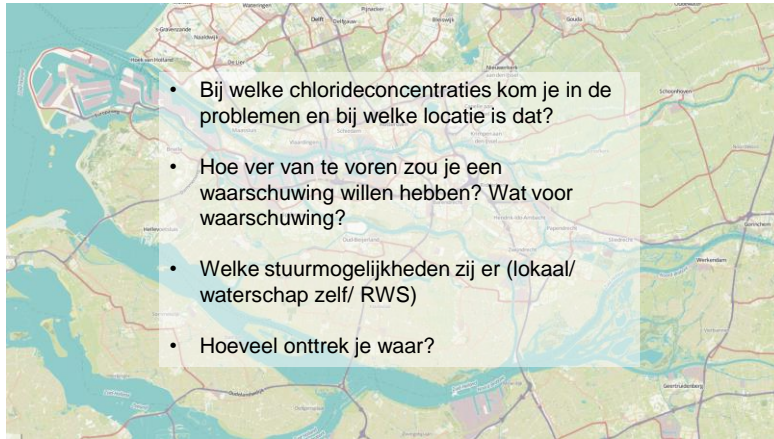


Discussie

- Wanneer vormt achterwaartse verzilting echt een probleem
Dwz. bij overschrijding van welke chloridenorm op welke locatie en voor welke duur?
- Hoe ver van te voren wil je voorspelling van achterwaartse verzilting hebben?
- Is huidige parameter nuttig?
-

Deltares

Brainstorm – variant 1



Deltares

Brainstorm – variant 2

Is kennis over de kleine knoppen nuttig?

Ja

Nee

Wat heb je eraan?

Waarom niet?

Wat mis je nog?

*Hoe zou het wel toepasbaar/
nuttig gemaakt kunnen worden?*

Heb je overige suggesties voor verder onderzoek?

Overige suggesties

Deltares

C Zoutverspreiding voormalige getijdegeulen in het Haringvliet

C.1 Memo

Memo

Aan
RWS-WVL

Datum 12 december 2016	Kenmerk 1230077-001-ZWS-0006	Aantal pagina's 20
Van Meinard Tiessen	Doorkiesnummer +31(0)88335 7429	E-mail meinard.tiessen@deltares.nl

Onderwerp
Zoutverspreiding via voormalige getijdegeulen in het Haringvliet - Hypothese vorming

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	dec. 2016	Meinard Tiessen	MT	Theo van der Kaaij	Tk	Frank Hoozemans	

Status
definitief

1 Inleiding

1.1 Probleemformulering

Voorafgaand aan de afsluiting van het Haringvliet, was het Haringvliet een estuarium met een geleidelijke zoutgradiënt. Sinds de afsluiting van de zeearm door middel van de Haringvlietsluizen in 1970 is het een zoetwater meer geworden. In de jaren na de afsluiting is veel van de watervoorziening voor de omliggende gebieden afhankelijk geworden van het zoete Haringvliet. Zowel boeren, als drinkwaterbedrijven en de industrie van de Rotterdamse haven betrekken hun water in of nabij het Haringvliet. Een nadelig gevolg van de afsluiting van het Haringvliet, is dat er nu sprake is van een zeer abrupte scheiding tussen de zoute Noordzee, en het zoete Haringvliet. De scheiding tussen beide wateren, de Haringvlietsluizen, wordt alleen bij eb geopend om zo overtollig rivierwater naar zee te spuien. Deze barrière is zeer belemmerend voor vismigratie.

Om vismigratie tussen beide gebieden te bevorderen wordt in 2018 overgegaan tot de uitvoering van het Kierbesluit. Hierbij worden ook tijdens vloed de Haringvlietsluizen "op een kier" gezet om zo migratie van vissen beter mogelijk te maken. Dit heeft tot gevolg dat zout water het Haringvliet wordt ingelaten. Om te voorkomen dat hierbij de zoetwatervoorziening in gevaar komt, wordt in de eerste jaren na 2018 een fase van "lerend implementeren" gehanteerd, waarin inzicht wordt verkregen in de zoutverspreiding in het Haringvliet, en hoe deze het beste is te beheersen.

In de afgelopen decennia is in aanloop op het Kierbesluit al meerdere malen onderzoek gedaan naar de zoutverspreiding in het Haringvliet. De daarmee opgebouwde kennis vormt de basis waaruit in dit onderzoek hypothesen zijn geformuleerd over de rol van diepe delen van het Haringvliet met betrekking tot zoutverspreiding.

1.2 Doel van deze studie

Het doel van dit onderzoeksproject is om inzicht krijgen in zoutverspreiding van en naar de diepere delen van het Haringvliet

In voorbereiding op lerend implementeren en lerend modelleren bij de invoering van de Kier, beoogt dit deelproject om hypothesevormend te zijn met betrekking tot de werking van de diepere delen en geulen in het Haringvliet. Dit onderzoek naar de werking van dit zwak-dynamisch systeem richt zich op de zoutindringing, terugdringing en verspreiding vanuit de diepere delen van het Haringvliet.

1.3 Onderzoeksonderwerpen

Binnen dit project worden drie onderdelen die betrekking hebben op de zoutverspreiding in het Haringvliet nader onderzocht.

1. Zoutindringing vanuit zee
2. Terugdringing van verzilting
3. Zoutverspreiding vanuit diepe delen

Punt 1 richt zich op de manier waarop zout water zich verspreidt wanneer dit wordt binnengelaten via de Haringvlietsluizen. Punt 2 focust op de effectiviteit van het spuien van water uit het Haringvliet naar de Noordzee, om daarmee de zoutindringing tegen te gaan. Tot slot gaat punt 3 over de periodes waarin zout water al in het systeem is, maar de rivierafvoer te laag is om grote hoeveelheden water te kunnen spuien. Voor punt 3 is de nalevering van zout water uit de diepere delen van het Haringvliet naar de ondiepere delen, en bovenal naar andere gebieden zoals het Spui (vanwege het waterinnamepunt Bernisse) van belang.

1.4 Aanpak

Het binnen dit deelproject uitgevoerde onderzoek richt zich op een beperkt aantal casussen waarbij zout het Haringvliet is ingekomen. De data-analyse van meetgegevens en rapportage zoals deze voor deze casussen is uitgevoerd, vormt de basis voor dit onderzoek. Naast de zoutverspreidingscasussen van het Haringvliet is ook gekeken naar de experimenten en opgebouwde kennis omtrent zoutindringing in andere relevante gebieden. Voor dit tweede deel is specifiek gekeken naar de zoutinlaatexperimenten in het IJsselmeer, en de zoutverspreiding in het Volkerak.

1.5 Relatie met overige projecten

De kennis over zout in voormalige getijgeulen is relevant voor een groot aantal beheer- en beleidsvragen die gaan over de Kier, een zout Volkerak-Zoommeer, en de zoetwatervoorziening. De in dit onderzoek samengebrachte kennis draagt daarnaast bij aan modelontwikkeling, en bijvoorbeeld aan het beter kunnen simuleren van zoutnaleveringsprocessen in een 1D model. De kennis en modellen moeten worden ingezet bij projecten zoals het lerend implementeren van het Kierbesluit en de Knelpuntenanalyse. Parallel aan de Systeemanalyse wordt een nieuw 3D-model voor het Haringvliet ontwikkeld. Dat zal eind 2017 inzetbaar zijn als onderzoeksinstrument. De aan de hand van dit onderzoek geformuleerde hypothesen over de werking van geulen in het Haringvliet zal aan de hand van nader modelonderzoek worden onderzocht zodra het 3D-model daarvoor geschikt wordt geacht.

In een eerste fase van het ontwikkeltraject om tot een nieuw 3D-model voor het Haringvliet te komen, is een literatuurstudie gedaan waarin de drie zoutinlaatproeven (1994, 1997, 2008) zijn bestudeerd. Bevindingen uit dit onderzoek zijn gerapporteerd in de memo "1230069-000-ZKS-

0010-m-Synthese dataonderzoek Haringvliet” (Groenenboom, 2016). Hierin wordt niet alleen een beschrijving gegeven van de drie inlaatproeven, maar ook een overzicht gegeven van de belangrijkste bevindingen en dominante processen. Tot slot wordt hierin een overzicht gegeven van relevante doelvariabelen aan de hand waarvan verschillende processen in het 3D-model kunnen worden getoetst. Waar relevant zullen bevindingen uit deze memo in dit onderzoek worden aangehaald.

Daarnaast wordt op dit moment in samenwerking met het project om tot een nieuw 3D-model van het Haringvliet te komen, gewerkt aan het opzetten van een zoutbalans voor het Haringvliet voor de Zoutinlaatproef 1997. Dit onderzoeksonderdeel is nog niet afgerond en zal in het eindejaarsrapport voor 2016 met betrekking tot de ontwikkeling van het 3D-model worden gerapporteerd (Groenenboom, 2016).

1.6 Opbouw van de memo

In hoofdstuk 2 volgt een beschrijving van het Haringvliet en de zoutverspreidingscasussen. Daarna wordt in hoofdstuk 3 tot en met 5 per onderzoeksvraag gekeken wat de lessen zijn die op basis van de beschikbare kennis kunnen worden getrokken. De conclusies volgen daarna in hoofdstuk 6. Waarna in hoofdstuk 7 tot slot nog de openstaande onderzoeksvragen en mogelijk te onderzoeken aspecten worden beschreven.

2 Haringvliet

2.1 Systeemomschrijving

Het Haringvliet is de zuidelijke arm van het Rijn-Maasmondingsgebied. Samen met de Nieuwe Waterweg zorgt het voor de afvoer van Rijn- en Maaswater naar zee. Het Haringvliet heeft een lengte van bijna 30 km, is ongeveer 2,5 km breed en heeft een gemiddelde bodemligging van circa NAP -8 m (Figuur 2.1). Het Haringvliet is een voormalig estuarium met diepe getijdegeulen die significant dieper liggen dan de ondiepere delen. De put bij Middelharnis is bijvoorbeeld meer dan 30 m diep.

2.1.1 Haringvlietsluizen

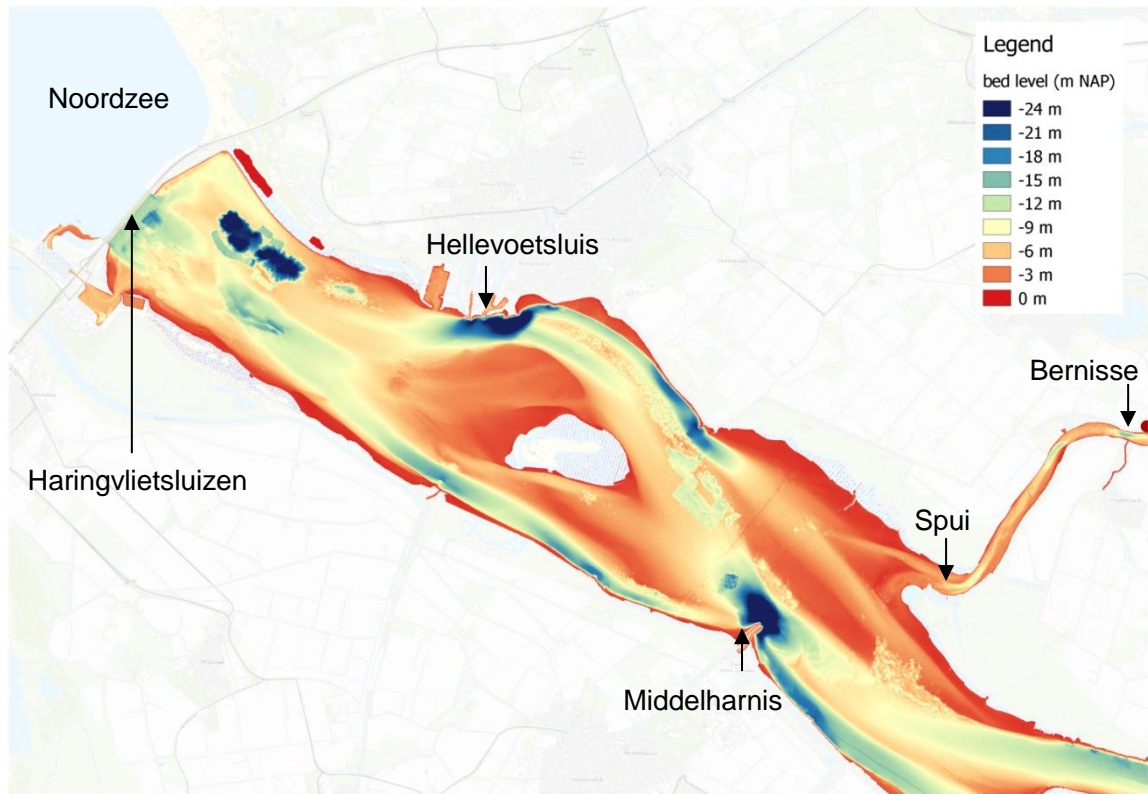
Waar de Nieuwe Waterweg in open verbinding staat met de zee, is het tussen de Noordzee en het Haringvliet een barrière, de Haringvlietsluizen. Het doel van het Haringvlietsluizencomplex is om stormvloed en op de Noordzee te keren, om de zoutindringing via de noordrand van het RMM-gebied te beperken door het verhogen van de rivierafvoer via de noordelijke takken en om een zoetwaterbekken te creëren voor onttrekking van industrieel-, drink- en landbouwwater. Het huidige bedieningsprogramma, Lozingsprogramma Haringvlietsluizen 1984 (LPH'84), heeft als belangrijkste uitgangspunten dat de oppervlakteafvoer via de Nieuwe Waterweg ten minste 1500 m³/s bedraagt en dat de laagwaterstand te Moerdijk bij gemiddeld getij op zee niet onder NAP daalt.

2.1.2 Achterwaartse verzilting

Met achterwaartse verzilting stroomt zout water via de noordrand (de Nieuwe Waterweg) richting de zuidrand en kan er zout water terecht komen in de voormalige getijgeulen in het Haringvliet. Achterwaartse verzilting treedt voornamelijk op bij lage rivierafvoeren en windopzet. Achterwaartse verziltingskarakteristieken worden binnen het RMM Systeemanalyse project verder onderzocht in onderdeel 2 "Noord-zuid relaties". Zoutindringing als gevolg van achterwaartse verzilting kan zowel via het Spui (zie Figuur 2.1) als meer stroomopwaarts via de Dordtsche Kil en het Hollandsch Diep naar de diepere delen van het Haringvliet geschieden. Na de periode van achterwaartse verzilting wordt dit zout geleidelijk terug geleverd aan de omgeving, met kans op normoverschrijding (< 150 mg Cl⁻/l [de Vries, 2014]) bij innamepunt Bernisse. Ook de invoering van de Kier kan zorgen voor zout water in de getijgeulen. Voor beantwoording van beheervragen hieromtrent is kennis nodig over de verblijftijd van zout op de grotere diepte, en de werking en snelheid van uitspoeling. Dit is met name relevant voor het bepalen het van vereiste debiet en de duur voor het 'schoonsoelen' van het Haringvliet voorafgaand aan verwachte laagwaterperiodes.

2.1.3 Zoetspoelen bij implementatie Kierbesluit

In het geval van een verzilt Haringvliet, is het de bedoeling dat dit zoute water via de Haringvlietsluizen naar zee wordt geloosd. Wanneer er sprake is van continue hoge rivierafvoeren, is dit te doen door het huidige bedieningsprogramma (LPH'84) te hanteren. Voor het geval dat er lage rivierafvoeren worden verwacht, zouden de Haringvlietsluizen onder de bestaande aansturing gesloten worden. Hierdoor wordt het zoute water in het systeem vastgehouden, met mogelijk levering van zout naar andere gebieden zoals het Spui tot gevolg. Om dit te voorkomen, kan in deze situatie worden overgegaan tot zoetspoelen. Doel van deze maatregel is om het Haringvliet te verzoeten, zodat zo min mogelijk zout kan opmengen en verspreiden. Dit houdt in dat er extra gespuid wordt als de verwachting is dat de rivierafvoer bij Lobith voor langer dan 7 dagen onder de 1500 m³/s blijft.



Figuur 2.1 Bodemhoogte in het Haringvliet samen met een aanduiding voor de belangrijkste locaties.

2.2 Zoutverspreidingscasussen

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de verschillende zoutindringingscasussen die in beschouwing zijn genomen voor dit onderzoek¹. Voor iedere casus wordt kort beschreven wanneer zout het Haringvliet is binnengekomen, welke consequenties dat heeft gehad en hoe het is gemeten:

Visintrekproef 1994 (Bol, 1995)

Zoutinlaatperiode: 8 maart - 17 juli (kortstondige periodes)

Onderzoek om de intrek van vissen via bij vloed geopende sluizen mogelijk te maken.

Daarnaast zijn metingen uitgevoerd om kennis en inzicht te verkrijgen in het optreden van zoutindringing in het gebied. Gedurende enkele maanden zijn gedurende enkele kortstondige periodes de Haringvlietsluizen beperkt open gezet bij vloed.

Zoutinlaatproef 1997 (Rijkswaterstaat, 2002 en Jacobs et al. 2003)

Zoutinlaatperiode: 10 -15 maart.

Onderzoek naar zoutindringing in verband met MER Beheer Haringvlietsluizen. Zout water is gedurende 9 vloedperiodes ingelaten via Haringvlietsluizen (met verschillende openingsconfiguraties). De zoutverspreiding is intensief in kaart gebracht met zowel constante

¹ Een mogelijke toekomstige toevoeging aan de te onderzoeken verziltingscasussen zou de verzilting van het Haringvliet vanuit het Volkerak kunnen zijn, zoals deze tussen 1970 (afsluiting Haringvliet) tot 1986 (afsluiting Volkerak) optrad via de Volkeraksluizen.

meetpunten, als varende metingen. Na de inlaatperiode is ook de daaropvolgende terugdringing van de verzilting gemeten met maandelijks metingen.

Trillingstest 2008 (Van Spijk, 2009)
Zoutinlaatperiode: 10 – 15 december

Onderzoek naar het optreden van trillingen in de Haringvlietsluizen tijdens het inlaten van zeewater. Doordat hiermee ook zout water het Haringvliet is binnengelaten, is met behulp van een varende meetcampagne inzicht verkregen in de verzilting van het Haringvliet. De test is voortijdig beëindigd vanwege verwachte lage rivier-afvoeren. De meetcampagne is echter voortgezet om de terugdringing verzilting te meten.

Achterwaartse verzilting 2003 (de Vries, 2014)
Verziltingsperiode: oktober 2003

Door de samenloop van lage rivierafvoer (hogere achtergrondwaarde zoutgehalte) en stormopzet dring zout water het Haringvliet in. Vervolgens is er ook nalevering richting Spui en inlaapunt Bernisse. Afgezien van een korte beschrijving in De Vries (2014) zijn van deze casus geen gegevens bekend.

Achterwaartse verzilting 2005-2006 (van Spijk, 2006 en de Vries, 2014)
Verziltingsperiode: 25 november 2005 – eind februari 2006

Lage rivierafvoer gecombineerd met stormopzet (24-25 november) leidt tot binnendringing zout in het Haringvliet via het Spui. Door lage rivierafvoeren duurt het tot eind februari (wanneer het spuidebiet door de Haringvlietsluizen sterk toeneemt) totdat het meetpunt Middelharnis schoonspoelt. In de periode met lage rivierafvoeren direct na het achterwaartse verziltingsincident is "zoetspoelen" toegepast. Aan de hand van meetgegevens in de diepe put bij Middelharnis bleek dat met een klein spuidebiet door de Haringvlietsluizen het zoutgehalte in de bovenste laag van het Haringvliet kan worden teruggedrongen, maar niet uit de diepere delen van het meer.

Zoutlekkage 2011 (de Vries, 2014)
Verziltingsperiode: april – augustus 2011

Het westelijk deel van het Haringvliet is in deze periode sterk verzilt doordat de zoutriolen in de Haringvlietsluizen enige weken gesloten waren, terwijl de visriolen open stonden om de intrek van de glasaal mogelijk te maken. Lage rivierafvoeren bemoeilijkten vervolgens het terugdringen van de verzilting. Analyse van deze periode beperkt zich voorlopig tot de permanente meetlocaties (Spui en Volkeraksluizen, de Vries 2014). Nadat dit zoutlek is ontdekt (21 mei) is een uitgebreide meetcampagne opgezet om de terugdringing van de verzilting te monitoren. Een analyse van deze meetgegevens is echter niet uitgevoerd.

Sinterklaasstorm 2013 (de Vries, 2014)
Verziltingsperiode: 5 december – begin januari 2013

Achterwaartse verzilting van het Haringvliet en Hollandsch Diep door stormopzet bij Hoek van Holland². Verzilting treedt zowel op via het Spui richting de diepe put bij Middelharnis, als ook indirect via de Dordtsche Kil. Zout water stroomt dan vervolgens via het Hollandsch Diep naar

² Voorafgaand aan deze storm is het peilbeheer in het Haringvliet aangepast. Onderzocht werd of door een lagere middenstand in het Haringvliet te hanteren de opzet bij Dordrecht en Rotterdam kon worden teruggebracht. Voor mogelijke implicaties van veranderingen in het peilbeheer van het Haringvliet op achterwaartse verzilting wordt verwezen naar Huismans, 2016.



Datum
12 december 2016

Ons kenmerk
1230077-001-ZWS-0006

Pagina
7/20

het Haringvliet. Gedurende deze achterwaartse verziltingsperiode is de rivierafvoer laag, maar blijft spuien door de Haringvlietssluisen mogelijk.

IJsselmeer: zoutinlaatproeven 2012, 2013, 2014 (Brongers en de Witte, 2012, 2013, 2014)
Dit betreft drie kortstondige verziltings-meetcampagnes aan IJsselmeerszijde van de spuisluisen. In 2012 is zout via de schutsluisen het IJsselmeer binnengekomen, terwijl de spuisluisen gesloten waren voor onderhoud. In 2013 en 2014 zijn bewust de spuisluisen tijdens teruggaande vloed open geweest, om zo kortstondig een beperkte hoeveelheid zout water (ongeveer 150.000 m³) het IJsselmeer in te laten. Deze beperkte hoeveelheid zout vulde de diepe put direct achter de spuisluisen met zout, maar leidde niet tot een verdere verspreiding van het zout via voormalige getijdegeulen in het IJsselmeer. Op het moment dat het normale spuibeheer weer werd gehanteerd, verdween de binnengedrongen zout binnen enkele eb-spuiperiodes richting de Waddenzee.

Volkerak-Zoommeer: 1990 – heden

Verziltingsperiode: Continue instroom van zout water via Krammersluizen.

Het Volkerak is een zeer laag-dynamisch systeem, met een zeer beperkte doorstroming vanuit de Volkeraksluisen aan de noordzijde richting de Bathse spuisluis in het zuiden. Vanuit de Krammersluizen (aan de westzijde van het meer) lekt zout water het systeem in. Maandelijks worden op vaste meetlocaties in het Volkerak dieptemetingen gedaan van het zoutgehalte. Het zout verzamelt zich in de diepere delen van het Volkerak. Er is geen analyse van deze uitgebreide dataset beschikbaar. Deze meetgegevens bieden echter de mogelijkheid om de zoutverspreiding uit diepe delen van een gebied te onderzoeken, en bijvoorbeeld de relatie tot windcondities en seizoenale veranderingen te inventariseren.

3 Zoutindringing vanuit zee

Een beschrijving van de dominante processen bij zoutindringing vanuit zee wordt gegeven in Groenenboom (2016). Hieronder wordt slechts een overzicht gegeven van de synthese en daaraan gekoppelde hypothesen met betrekking tot zoutindringing.

3.1 Geanalyseerde casussen

- Visintrekproef 1994
- Zoutinlaatproef 1997
- Trillingstest 2008
- IJsselmeer 2012, 2013, 2014

3.2 Beschrijving en analyse

Er is sprake van twee fases:

In de **eerste fase** stroomt het binnenkomende zout de diepe put in achter de Haringvlietsluizen. Deze fase duurt relatief kort, afhankelijk van de inlaatopening, duur van de opening en het verhang over de kering.

Deze fase komt overeen met experimenten bij de spuisluisen van het IJsselmeer (Kornwerderzand en Den Oever). Deze gecontroleerde zoutinlaat door de spuisluisen liet slechts een beperkte hoeveelheid zout in. Uit deze experimenten bleek dat dit zoute water zich verzamelde in de diepe put direct achter de spuisluisen. Zelfs als tijdens het inlaten van zeewater, zout water voorbij deze diepe put was waargenomen, stroomde dit (de bathymetrie volgend) terug naar de diepe put direct achter de spuisluisen in de daaropvolgende periode (wanneer de spuisluisen gesloten waren).

De **tweede fase** begint als de diepe put direct achter de Haringvlietsluizen is volgelopen met zout water, en het binnenkomende water zich over de ondiepe delen van het Haringvliet gaat verspreiden. Tijdens de Visintrekproef van 1994 is gemeten dat er zich dan een zout-watertong over de bodem van het Haringvliet verspreidt met een laagdikte van 2 m (tussen een zoete bovenlaag en de bodem) en zich verspreidt met een snelheid van 0.25 m/s. De verspreidingsnelheid en hoogte zijn echter afhankelijk van de hoeveelheid ingelaten zout water, de stroomsnelheid, en het zoutgehalte.

De zoutverspreiding gedurende de tweede fase volgt de diepere delen van het Haringvliet en leidt aan de noordzijde tot het vollopen van de diepe putten nabij Hellevoetsluis (zie Figuur 2.1). Aan de zuidzijde van het Haringvliet is sprake van een continue dieper gelegen voormalige getijdegeul tussen de Haringvlietsluizen en Middelharnis waarin het zout zich sneller oostwaarts verspreidt dan aan de noordzijde. Deze snellere verspreiding aan de zuidzijde is mogelijk het gevolg van de residuele stroming (niet verder onderzocht) maar meer waarschijnlijk het gevolg van de bodemligging. Aan de noordzijde van het Haringvliet is sprake van diepe putten die van elkaar gescheiden zijn door ondiepe delen met een maximale diepte van tussen -5 en -8 m NAP. Aan de zuidzijde is de getijgeul minimaal -8 tot -10 m diep, tot voor de diepe put bij Middelharnis. Hierdoor kan het inkomende zoute water aan de zuidzijde zich relatief snel verspreiden. Tijdens de Zoutinlaatproef in 1997 bleek dat de geul aan de zuidzijde van het Haringvliet al tijdens de eerste inlaatperiode verzilte, en dat nabij de bodem al een constant zoutgehalte was bereikt binnen 24 uur.

Uit de drie inlaatproeven die voor dit onderdeel zijn onderzocht, is niet duidelijk geworden of er aan het einde van de inlaatperiode sprake was van een stabiel evenwicht met een constante zoutverdeling. Uit voorlopige resultaten met betrekking tot de zoutbalans blijkt dat voor de Zoutinlaatproef in 1997 een verzadiging van de hoeveelheid zout in het Haringvliet lijkt op te treden richting het einde van de proefperiode. Dit zou betekenen dat aan het einde van de inlaatperiode de hoeveelheid zout die bij vloed werd ingelaten, van de zelfde orde grootte was als de hoeveelheid die bij eb werd gespuid. Niet uitgesloten kan echter worden dat de zoutverdeling in het Haringvliet zelf nog niet stabiel is geworden.

3.3 Hypotheses

- Zoutindringing in het Haringvliet leidt eerst tot het vollopen van de diepe put achter de Haringvlietssluisen
- Wanneer deze diepe put is volgestroomd met zout water, verspreidt het zoute water zich naar de diepere delen verder stroomopwaarts.
- De zoutindringing gebeurt over een grotere afstand en met een grotere snelheid aan de zuidzijde, dan aan de noordzijde van het Haringvliet. De meer continue dieper gelegen voormalig-getijdegeul aan de zuidzijde leidt tot een snelle indringing van zout langs die zijde van het Haringvliet.

3.4 Mogelijk te onderzoeken casussen & kennisleemtes

Op dit moment zijn geen andere casussen bekend die voor dit onderdeel relevant zijn. Dit deelonderwerp was specifiek onderzocht tijdens de drie zoutinlaatproeven. De verwachting is dat wanneer wordt begonnen met lerend implementeren van het Kierbesluit, de tot nu toe opgebouwde kennis verder kan worden uitgebreid en getoetst.

4 Terugdringing van verzilting

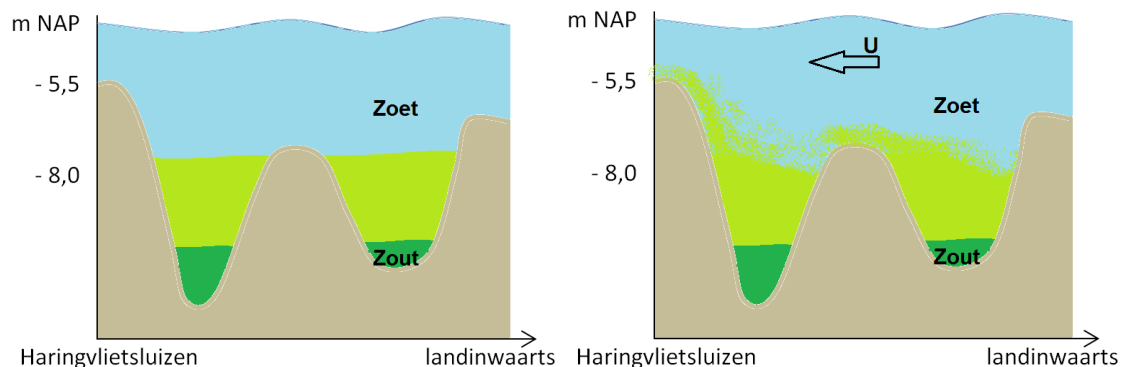
4.1 Geanalyseerde casussen

- Zoutinlaatproef 1997
- Trillingstest 2008
- Achterwaartse verzilting 2005-2006

4.2 Beschrijving en analyse

Aansluitend op de Zoutinlaatproef 1997 en de Trillingstest 2008 zijn meetcampagnes uitgevoerd om de terugdringing van verzilting te onderzoeken. De bevindingen van deze twee casussen staan beschreven in Groenenboom (2016), hieronder volgt alleen een beknopt overzicht. Voor de terugdringing van verzilting is een onderscheid te maken tussen periodes met hoge en lage rivierafvoeren, en daaraan gerelateerd hoge of lage spuidebieten door de Haringvlietsluizen.

Bij **lage spuidebieten**, zoals bijvoorbeeld het geval is bij **zoetspoelen**, wordt door middel van een beperkte spuiopening in de Haringvlietsluizen in beperkte mate water uit het Haringvliet naar zee gespuid. Om zoutindringing in het Haringvliet tegen te gaan, is dit beperkt effectief. Verhoogde zoutconcentraties in de bovenste lagen van de waterkolom worden op deze manier verlaagd, waarbij een verlaging van het zoutgehalte tot het bodemniveau van de drempels (tot -5 tot -8 m NAP) wordt gerealiseerd.

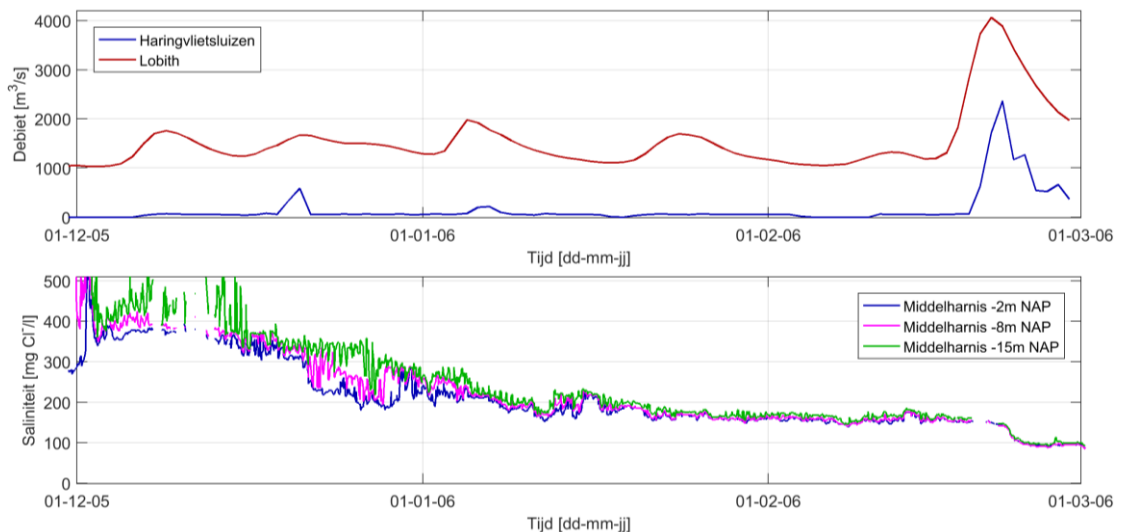


Figuur 4.1 Terugdringing van zout uit diepere bij lage spuidebieten (en zoetspoelen). Het in de diepe delen verzamelde zout wordt afgeschaafd, terwijl het zout in de diepste delen gehandhaafd blijft (Groenenboom, 2016).

Voor het zout in diepere putten, geldt dat lage spuidebieten een veel minder groot effect hebben. Voor de diepere delen is meer sprake van een afschaafproces (zie Figuur 4.1). Vanwege het dichtheidsverschil tussen zoet en zout water, bevindt zoet water zich in de hogere lagen terwijl het zoute water zich in de diepe delen ophoopt. De overgang of spronglaag die zich tussen beide watermassa's bevindt, schuift geleidelijk op wanneer met lage spui-debieten het systeem wordt doorgespoeld. De verlaging van de spronglaag betekent effectief dat het zoute water langzaam wordt weggespoeld uit de diepere delen. Tijdens de Trillingstest in 2008 werd met 2 dagen zoetspoelen een verlaging van de spronglaag met 1 m bewerkstelligd. Onder deze spronglaag is echter ook na het zoetspoelen (of spuien bij lage rivierdebieten) sprake van een verhoogde chloride concentratie. Nalevering van zout uit deze diepere delen naar ondiepere delen van het Haringvliet (verder stroomopwaarts) en ook andere gebieden (Spui, en innamepunt Bernisse) blijft daarmee een mogelijkheid. Zoetspoelen

verkleint mogelijk de kans, en misschien ook de omvang hiervan, maar kan nalevering van zout niet uitsluiten.

Bij hoge rivier-afvoeren, en daar aan gekoppelde **hoge spuidebieten** door de Haringvlietsluizen, is sprake van sterkere stroming door het Haringvliet, waardoor tot op grotere diepte het water in beweging wordt gebracht. Hierdoor wordt tot ook op diepere delen van het Haringvliet de zoutconcentratie teruggebracht.



Figuur 4.2 Het debiet bij Lobith en door de Haringvlietsluizen (boven) en zoutconcentratie bij Middelharnis (onder) in de periode na de achterwaartse verzilting van 24-25 november 2005.

Een voorbeeld van het effect van zowel hoge als lage spuidebieten op het zoutgehalte in het Haringvliet is te zien in Figuur 4.2, waar aansluitend op de achterwaartse verzilting van 24-25 november 2005 de spui-debieten door de Haringvlietsluizen en de chloride concentratie bij Middelharnis zijn weergegeven. Nadat gedurende het achterwaartse verziltingsincident een significante hoeveelheid zoutwater via het Spui naar de diepe put voor Middelharnis was gestroomd, volgde een lange periode wanneer slechts zeer beperkt kon worden gespuid door de Haringvlietsluizen. Om verdere zoutindringing tegen te gaan is op 20 en 21 december zoet gespoeld. De relatief lage spuidebieten leiden bij meetlocatie Middelharnis tot een aanzienlijke afname in chloride concentratie nabij het wateroppervlak. Op -15 m NAP is echter niet sprake van een significante verandering in het zoutgehalte. De meetlocatie ter hoogte van de drempels (-8 m NAP) laat aansluitend op het zoetspoelen een sterk fluctuerend karakter zien, wat suggereert dat de diepte waarop de spronglaag zich bevindt variabel is gedurende deze periode.

Na deze korte periode van zoetspoelen volgt een lange periode waarin amper gespuid kan worden. In de periode van 1 januari tot eind februari is echter wel sprake van een geleidelijke afname in de chloride concentraties bij Middelharnis, die nagenoeg gelijk is voor alle gemeten dieptes. In welke mate deze geleidelijke afname kan worden gerelateerd aan teruglevering van zout naar andere gebieden (zoals via het Spui naar Bernisse) is nog niet onderzocht.

Pas eind februari neemt de rivierafvoer bij Lobith dusdanig toe dat er grote hoeveelheden water via de Haringvlietsluizen naar buiten worden gelaten. De chloride concentratie bij Middelharnis neemt tijdens deze hoge spuidebieten sterk af op alle meetdieptes. De

resterende zoutconcentratie (ongeveer 90 mg Cl⁻/l) komt overeen met de achtergrondwaarde voor dit gebied.

Tabel 4.1 Verandering van chloride concentraties in de diepe put bij Middelharnis in relatie tot het gespuide debiet door de Haringvlietsluizen

	Zoetspoelen (20-21 dec 2005)			Hoge rivierafvoer (20-24 feb 2006)		
	voor	na	netto	voor	na	netto
Volume door Haringvlietsluizen [mln m ³]	80			617		
Zoutconcentratie Middelharnis (-2m) [mg Cl ⁻ /l]	315	240	-70	155	90	-75
Zoutconcentratie Middelharnis (-8m) [mg Cl ⁻ /l]	325	275	-50	155	90	-75
Zoutconcentratie Middelharnis (-15m) [mg Cl ⁻ /l]*	340	340	0	160	90	-70

In totaal wordt tijdens de hoge rivierafvoer ongeveer 600 mln m³ water gespuid (Tabel 4.1), terwijl bij het zoetspoelen ongeveer een achtste deel van dat volume is gespuid³. Het effect is in absolute zin voor de meting nabij het wateroppervlak vergelijkbaar, terwijl de afname in zoutconcentratie voor het diepste meetpunt sterk verschillend is voor de twee spui-periodes.

De metingen zoals deze tijdens de ontzilting in 2005 en 2006 zijn gedaan, geven slechts een beeld van het chloride gehalte tot een diepte van -15 m in de put bij Middelharnis. De put zelf heeft een diepte van meer dan 30 m. In hoeverre de hoge spuidebieten eind februari ook leiden tot een afname in zoutgehalte op deze diepte kan aan de hand van de huidige data niet worden bepaald.

4.3 Hypotheses

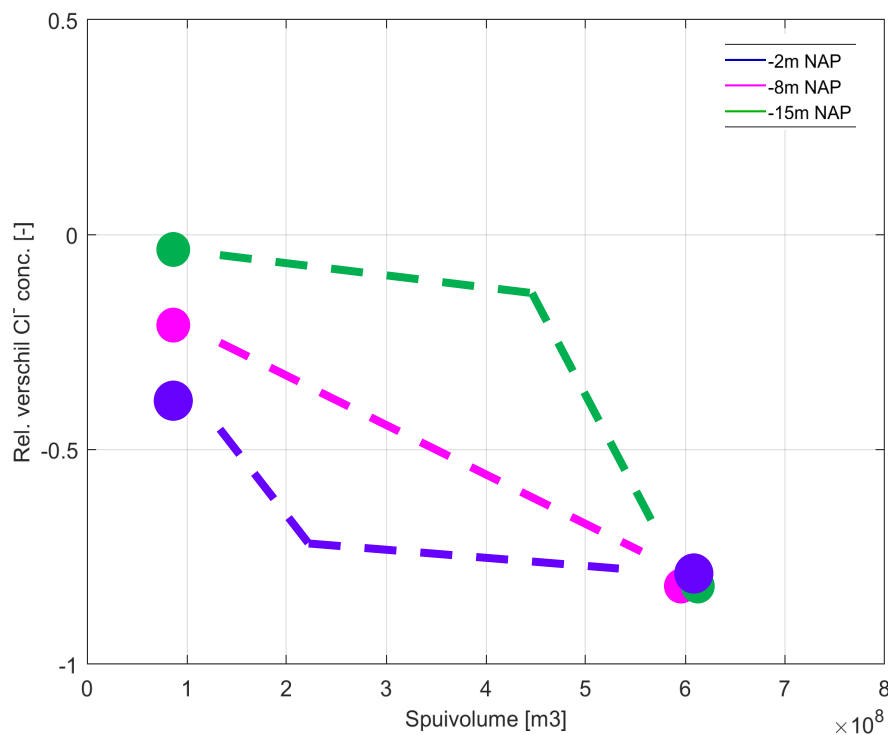
- Terugdringing van chloride concentraties met behulp van lage spuidebieten, zoals bij zoetspoelen, leidt tot een afname van chloride concentraties in bovenste lagen van de waterkolom. Terugdringing van chloride concentraties treedt hoofdzakelijk op tot de diepte van de drempels in het Haringvliet.
- Voor diepere delen leiden lage spuidebieten tot het afschaven van de spronglaag, waarbij het zout beneden deze spronglaag niet afneemt.
- Bij hoge rivierafvoeren wordt het water tot grotere dieptes in beweging gebracht, waardoor tot een grotere diepte het zout wordt uitgespoeld.

Op basis van de gegevens van de periode aansluitend op de achterwaartse verzilting van 2005-2006, kan voor een locatie (Middelharnis) een relatie worden gelegd tussen spui-debiet en de afname in zoutgehalte (zoals gepresenteerd is in Tabel 4.1). Op dit moment kan deze relatie zeer grofweg worden bepaald voor twee verschillende spui-periodes. Echter, een algemeen geldende relatie tussen de afname in de chloride concentratie en het spuidebiet kan aan de hand van deze gegevens al hypothetisch in kaart worden gebracht (Figuur 4.3). Voor ondiepe delen, leiden lage afvoeren al tot een significante afname van zoutgehaltes, terwijl

³ Op dit moment wordt er vanuit gegaan dat zoetspoelen met een volume van 180 mln m³ nodig zal zijn om de verzilting van het Haringvliet tegen te gaan.

hoge spuidebieten noodzakelijk zijn om tot een significante afname in chloride concentratie te komen voor de alle dieptelagen.

Wanneer meer spuiregimes en meer meetlocaties op deze wijze geanalyseerd kunnen worden, kan een meer algemeen geldende relatie tussen spuidebieten en zoutterugdringing worden vastgesteld. Deze informatie is relevant om te bepalen in welke mate de zoutindringing tijdens het kieren (en lerend implementeren) beheerst kan worden op basis van beschikbare rivierafvoeren en spuidebieten en welke spui volumes bij zoetspoelen nodig zijn om effectief de zoutindringing tegen te gaan.



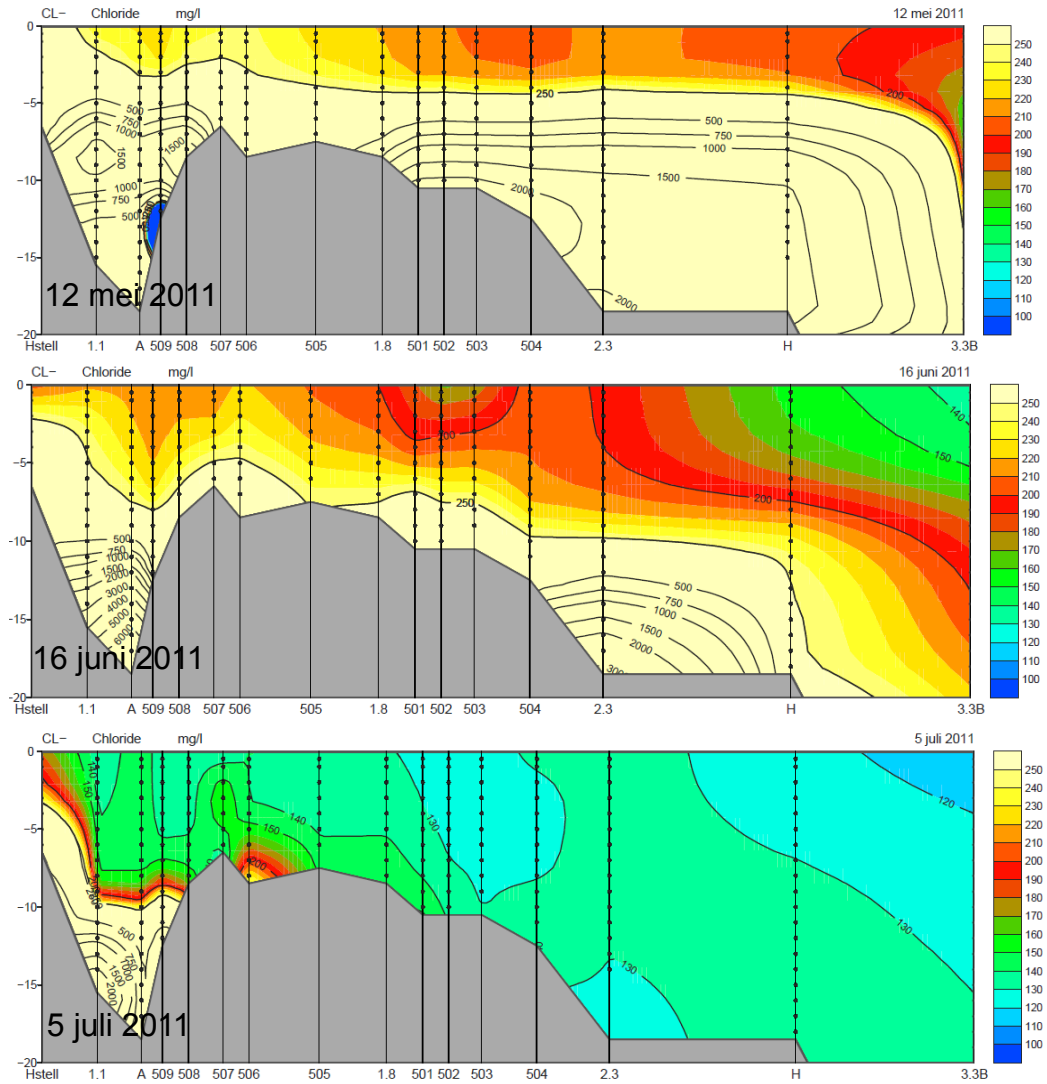
Figuur 4.3 Hypothetische relatie tussen spui-debiet door de Haringvlietsluizen en de relatieve afname van de Chloride concentratie voor verschillende dieptes (waaronder wordt verstaan: $(C_{i0}-C_{t1})/C_{i0}$).

4.4 Mogelijk te onderzoeken casussen & kennisleemtes

De in Figuur 4.3 gepresenteerde hypothetische relatie tussen het spuidebiet en de afname in de chloride concentratie voor verschillende dieptes zou aan de hand van meetgegevens uit de andere verziltingscasussen verder kunnen worden ingevuld. Voor verschillende casussen zijn continue metingen verricht (naast de achterwaartseverziltting van 2005-2006, ook de Sinterklaasstorm 2013) die een gedetailleerd beeld geven van de tijdafhankelijkheid van deze relatie. Deze gegevens geven ruimtelijk echter slechts zeer beperkt inzicht in de effectiviteit van verschillende spuidebieten.

Daarentegen zijn er ook casussen aan de hand waarvan de ruimtelijke component in kaart kan worden gebracht. Deze meetcampagnes zijn minder frequent, maar bestrijken een groter gebied. Meetgegevens van de Zoutinlaatproef 1997 en de nog in ontwikkeling zijnde zoutbalans kunnen daarbij een beeld geven van de totale hoeveelheid zout die uit het Haringvliet stroomt als gevolg van spuien, terwijl de meetcampagne die volgde op de

zoutlekkage in 2011 (zie Figuur 4.4) een ruimtelijke relatie met betrekking tot de zoutterugdringing kan geven.



Figuur 4.4 Zoutterugdringing na de zoutlekkage in 2011. De meetlocaties geven een beeld van de zoutverdeling langs de zuidzijde van het Haringvliet, met aan de linkerkzijde de Haringvlietsluizen, en aan de rechterzijde de put bij Middelharnis.

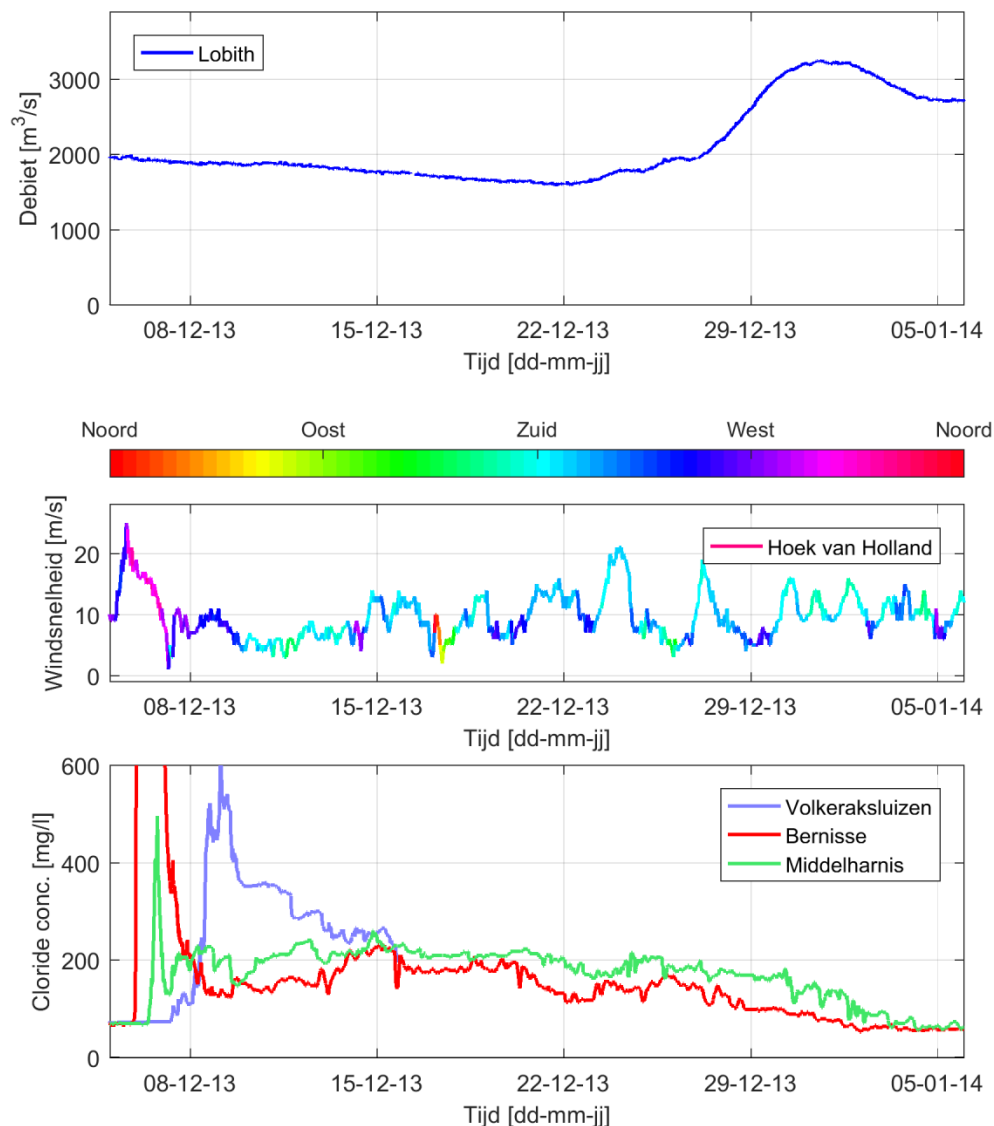
5 Zoutverspreiding vanuit diepere delen

5.1 Geanalyseerde casussen

- Sinterklaasstorm 2013

5.2 Beschrijving en analyse

Wanneer zout is binnengedrongen in het Haringvliet, en er tijdelijk niet gespuid kan worden, bestaat de mogelijkheid dat het zout zich verspreidt vanuit de diepere delen en zich richting meer stroomopwaarts gelegen gebieden verplaatst zoals het Spui en het inlaatpunt bij Bernisse.



Figuur 5.1 Teruglevering van zout vanuit het Haringvliet naar het Spui en inlaatpunt Bernisse tijdens de Sinterklaasstorm 2013. (boven) Rivierdebiet bij Lobith. (midden): Windcondities bij Hoek van Holland (met geploet in kleur de richting, en op de y-as de windsnelheid). (onder): Chloride concentraties in het Haringvliet en omliggende wateren. De meting bij de Volkeraksluizen loop slechts tot 16 december.

Deze zoutverspreiding vanuit het Haringvliet richting het Spui vindt plaats na ieder achterwaarts verziltingsincident, en ook als gevolg van de zoutlekkage in 2011. Om te onderzoeken welke externe condities (rivierafvoer en wind) leiden tot nalevering van zout water uit de diepere delen van het Haringvliet naar ondiepere gebieden, wordt in dit onderzoek voor één verziltingscasus (Sinterklaasstorm 2013) gekeken naar de mogelijke oorzaken van de teruglevering van zout uit de diepere delen.

Achterwaartse verzilting op 5 december 2013 (Figuur 5.1) leidt tot een toename in zoutgehalte voor een groot gebied aan de zuidzijde van het Rijn-Maasmondingsgebied. De grootste verzilting treedt op bij Bernisse en het Spui (meetpunt Inloop Spui) op 5 december en duurt tot ongeveer 8 december, waarna de verzilting terugloopt nabij de achtergrondconcentratie (100 mg Cl⁻/l). De achterwaartse verziltingspiek bij Middelharnis treedt op ongeveer het zelfde moment op, maar is lager. Na de verziltingspiek, blijft het zoutgehalte in deze put hoger dan in het Spui. Daarnaast treedt ook verzilting op van het Hollandsch Diep zoals te zien is in de verhoogde chloride concentraties bij meetlocatie Voleraksluizen. Bij dit meetpunt treedt pas in een later stadium een toename van het zoutgehalte op dan op de andere meetlocaties. Dit is omdat het zout water een langere weg moet afleggen.

In eerste instantie wordt getracht de relatie tussen het zoutgehalte in het Haringvliet en de nalevering aan het Spui te relateren aan **windcondities**. In de periode na 12 december volgt een toename in de chloride concentraties in het Spui en bij Bernisse. Dit is het gevolg van nalevering uit het Haringvliet. Echter, alhoewel er continue sprake is van zuidelijke en zuidwesterlijke wind, geven de windcondities geen duidelijke aanleiding waarom juist in de periode na 12 december sprake zou moeten zijn van zoutlevering uit de diepere delen van het Haringvliet.

Tijdens deze verziltingscasus is echter ook sprake van achterwaartse verzilting richting het Hollandsch Diep, zoals te zien is op meetlocatie Volkeraksluizen. Na de storm, wordt als gevolg van aanzienlijke **spuidebieten** het zoute water van het Hollandsch Diep naar het Haringvliet getransporteerd. Simulaties met SOBEK RE RMM (de Goederen, pers. communicatie) laten zien dat de verplaatsing van de zoutwaterbel afkomstig uit het Hollandsch Diep richting de Haringvlietsluizen ongeveer tegelijkertijd de ingang van het Spui bereikt, als wanneer een toename in chloride concentratie in het Spui (12 december) wordt waargenomen.

De bron van de toename in zoutgehalte bij het Spui (Inloop Spui) en Bernisse in de periode na de storm, is daarmee niet toe te wijzen aan nalevering uit het Haringvliet (lees: Middelharnis), maar wordt vermoedelijk veroorzaakt door het zoute water wat vanuit het Hollandsch Diep richting de Haringvlietsluizen wordt getransporteerd, echter niet uit te sluiten valt dat er mogelijk sprake is van een combinatie van beide effecten.

5.3 Hypothese

- Teruglevering van zout water uit diepere delen van het Haringvliet aan ondiepe gebieden (zoals het Spui) geschiedt als gevolg van externe factoren zoals spuidebieten en windcondities.

Deze hypothese is voorlopig alleen zeer beperkt getoetst op basis van de Sinterklaasstorm 2013 casus. Op basis van de beperkte hoeveelheid gegevens is het niet mogelijk om de relatie tussen de verzilte diepere delen, en een toename aan verzilting van ondiepe gebieden te

relateren aan externe factoren. Grote spuidebieten leiden mogelijk tot de verplaatsing van een zoutwaterbel, welke leidt tot teruglevering van zout water naar andere gebieden.

5.4 Mogelijk te onderzoeken casussen & kennisleemtes

De zoutverspreiding uit de diepere delen naar ondiepe gebieden wordt in verschillende verziltingscasussen waargenomen. De focus heeft in dit onderzoek gelegen bij de nalevering van zout water richting het Spui en inlaatpunt Bernisse. Echter, ook in bredere zin kan worden gekeken naar de zoutverspreiding uit diepere delen.

Verticale opmenging van diepe putten vormt een eerste stadium naar verdere verspreiding. Om dit te onderzoeken zijn casussen zoals de achterwaartse verzilting 2005-2006 interessant, omdat hier continue metingen op verschillende dieptes zijn gedaan in de sterk verzilte en periodiek gestratificeerde diepe put bij Middelharnis (zie paragraaf 4.2). Een relatie tussen het verdwijnen van de stratificatie na de periode van zoetspoelen, en mogelijke externe factoren (zoals wind-condities) kan verder inzicht geven in de stabiliteit van de verticale gelaagdheid.

Daarnaast kunnen studies waarbij de ruimtelijke verdeling van de zoutindringing in kaart wordt gebracht (Zoutlekkage 2011 en Volkerak 1990 - heden) een inzicht geven in de ruimtelijke variabiliteit in de relatie tussen zoutverspreiding en –opmenging, en externe factoren. Hierbij moet wel worden aangemerkt dat de maandelijkse tijdsinterval waarmee deze metingen worden uitgevoerd, een directe relatie tussen specifieke condities en opmenging onmogelijk maken, en specifiek naar seizoenale veranderingen gekeken zou moeten worden. De VTSSO metingen in het Volkerak bieden daarbij een interessant vergelijkingscasus voor het Haringvliet, vanwege het laag-dynamische karakter (zeer kleine doorstroomdebieten) en de langdurige dataset.

Omdat deze onderzoeksvraag het minst eenvoudig is te beantwoorden met de beschikbare meetgegevens, zou met behulp van langjarige chloride metingen bij Bernisse en in het Haringvliet (Middelharnis), zoals nu gebruikt worden in Mens (2016), een selectie kunnen worden gemaakt van naleverings-gebeurtenissen. Metingen van deze periodes van zoutgehalten in het Haringvliet en omliggende wateren (Volkeraksluizen) kunnen samen met externe forceringsgegevens (getij, opzet, afvoer, wind) worden gebruikt om een beter beeld te krijgen van condities die leiden tot opmenging en nalevering.

6 Bevindingen en hypothesen

Er bestaat een redelijk omvangrijke dataset van verziltingscasussen in het Haringvliet en vergelijkbare gebieden. In totaal zijn voor deze studie 9 casussen in behandeling genomen. Het onderzoek richtte zich met name op literatuurstudie, en voor specifieke gevallen beperkte dataanalyse.

Het onderzoek is gericht op de beantwoording van drie vragen:

- 1 Wanneer zout water via de Haringvlietsluizen wordt binnengelaten, hoe verspreidt het zout zich vervolgens in het Haringvliet?

De drie experimenten waarbij de zoutindringing via de Haringvlietsluizen was gemeten boden veel kennis en inzichten over de beantwoording van deze vraag. De volgende hypothesen konden aan de hand hiervan worden geformuleerd:

- Zoutindringing in het Haringvliet leidt eerst tot het vollopen van de diepe put achter de Haringvlietsluizen
- Wanneer deze diepe put is volgestroomd met zout water, verspreidt het zoute water zich naar de diepere delen verder stroomopwaarts.
- De zoutindringing gebeurt over een grotere afstand en met een grotere snelheid aan de zuidzijde, dan aan de noordzijde van het Haringvliet. De meer continue dieper gelegen voormalig-getijdegeul aan de zuidzijde leidt tot een snelle indringing van zout langs die zijde van het Haringvliet.

- 2 Wanneer er sprake is van een verzilt Haringvliet, hoe kan door middel van het spuien van water door de Haringvlietsluizen naar de Noordzee de verzilting worden teruggedrongen?

Op basis van de twee zoutindringingscasussen en de ontziltingscasus van 2005-2006 konden de volgende hypothesen worden geformuleerd:

- Terugdringing van chloride concentraties met behulp van lage spuidebieten, zoals bij zoetspoelen, leidt tot een afname van chloride concentraties in bovenste lagen van de waterkolom. Daarnaast leidt nalevering mogelijk ook tot een afname in chloride concentraties.
- Voor diepere delen leiden lage spuidebieten tot het afschaven van de spronglaag, waarbij het zout beneden deze spronglaag niet afneemt.
- Bij hoge rivierafvoeren wordt het water tot grotere dieptes in beweging gebracht, waardoor tot een grotere diepte het zout wordt uitgespoeld.

- 3 Wanneer er sprake is van verzilting van de diepere delen van het Haringvliet, welke externe condities leiden er dan tot nalevering van zout water naar ondiepere gebieden?

Op basis van de in dit onderzoek geanalyseerde gegevens kan de volgende hypothese worden geformuleerd:

- Teruglevering van zout water uit diepere delen van het Haringvliet aan ondiepe gebieden (zoals het Spui) geschiedt als gevolg van externe factoren zoals spuidebieten en windcondities. Echter deze hypothese kon niet worden getoetst aan de hand van de meetgegevens van de Sinterklaasstorm 2013.

7 Open onderzoeksvragen

Van die drie in dit deelproject onderzochte vragen, is de eerste vraag (over **zoutindringing vanuit zee**) al zeer uitgebreid onderzocht. Het is de verwachting dat verdere bestudering van de verziltingscasussen zoals die tot nu toe beschikbaar zijn niet veel meer inzichten zullen opleveren, wanneer over gegaan wordt tot de uitvoering van het Kierbesluit zal de kennis over zoutindringing verder kunnen worden getoetst en uitgebreid. Daarnaast kan de toepassing van een 3D model ook meer informatie verschaffen over de ruimtelijke variabiliteit en de tijdafhankelijkheid (getij) van de zoutindringing.

Voor de tweede onderzoeksvraag (over **terugdringing van verzilting**) is een verdere kwantificering van de relatie tussen de ontzilting en de afvoer door de Haringvlietsluizen zeer relevant. Wanneer begonnen wordt met lerend implementeren, is het beheersbaar houden van de zoutindringing een primair thema. De vraag bij welk debiet het chloride gehalte op een specifieke diepte tot een beheersbaar niveau kan worden teruggebracht is daarbij zeer relevant. De in deze memo beschreven aanpak kan daarvoor nog verder worden verfijnd en de toepassing van deze methode voor meerdere zoutindringingscasussen (Zoutinlaatproef 1997, Achterwaartse verzilting 2005-2006, Zoutlekkage 2011 en Sinterklaasstorm 2013) kan daarnaast een beter beeld geven van de ruimtelijke variabiliteit van deze relatie. Inzicht over terugdringing van verzilting op basis van deze casussen kan zeer waardevol zijn tijdens de implementatie van het Kierbesluit, om de beheersbaarheid van zoutverspreidingscondities in relatie tot rivierafvoeren in te kunnen schatten. Onderzoek op basis van de reeds beschikbare meetgegevens voorafgaand aan de invoering van het Kierbesluit is daarom gewenst.

Tot slot is de laatste vraag (**zoutverspreiding uit diepere delen**) het meest bedreigend voor de zoetwatervoorziening van de omliggende gebieden. Wanneer niet door middel van spuien naar zee de zoutverspreiding kan worden beheerst, is de mate waarin externe factoren invloed hebben op de zoutverspreiding naar ondiepe gebieden (nalevering) van groot belang. Deze vraag is echter ook het minst eenvoudig te onderzoeken. Alhoewel veel onderzochte achterwaartse verziltingscasussen leidden tot teruglevering van zout water uit het Haringvliet naar ondiepere gebieden zoals het Spui, is het zeer lastig om deze processen te kwantificeren en daarnaast nog te relateren aan andere omgevingsfactoren zoals wind en spuidebieten. Binnen dit onderzoek is slechts naar een verziltingscasus specifiek gekeken (Sinterklaasstorm 2013), maar verder onderzoek waarin naast de achterwaartse verziltingscasussen ook de zoutverspreiding in het Volkerak wordt geanalyseerd kan informatief zijn in de bepaling wanneer er risico (maar mogelijk ook wanneer geen risico) bestaat op nalevering van zout richting ondiepere gebieden. Onzeker is in hoeverre de datasets afkomstig van verziltingscasussen uit het verleden deze vraag veel verder kunnen beantwoorden. Substantiële uitbreiding van het inzicht in dit proces kan mogelijk pas worden verkregen met behulp van meetgegevens uit de "Lerend Implementeren" fase van het Kierbesluit. Voorafgaand hieraan is het echter gewenst om een beter beeld te krijgen op welke wijze en met behulp van welke metingen deze onderzoeksvraag moet worden onderzocht. De mate waarin de zoutindringing beheerst moet worden ten tijde van hoge (of matige) rivierafvoeren is sterk afhankelijk van de risico's op nalevering wanneer bij lage rivierafvoeren niet gespuid kan worden.

8 Referenties

- Bol, R. 1995. *Een snuffje zout...! Verslag van de metingen naar zoutindringing via de Haringvlietsluizen in het kader van de Praktijkproef Visintrek*. Notanr. 94.051, Rijkswaterstaat.
- Brongers, I., de Witte, B.J. 2012. *Zoutmetingen in het IJsselmeer bij de sluizencomplexen; Kornwerderzand en Den Oever*. Rijkswaterstaat.
- Brongers, I., de Witte, B.J. 2013. *Cloridemetingen in het IJsselmeer bij inlaten water via spuisluizen Den Oever en Kornwerderzand*. Directie CIV / Midden Nederland, Rijkswaterstaat.
- Brongers, I., de Witte, B.J. 2014. *Cloridemetingen in het IJsselmeer bij inlaten water via spuisluizen Den Oever en Kornwerderzand. Metingen Den Oever 12 maart en 30 april en Kornwerderzand 13 maart en 1 mei*. Directie CIV / Midden Nederland, Rijkswaterstaat.
- Jacobs, P., Steenkamp, B.P.C., de Goederen, S. 2003. *Van zoet naar zout in 5 dagen? Analyse zoutmetingen inlaatproef Haringvliet in maart 1997*. RIZA rapport 2003.001
- de Goederen, S., Bavelaar, A., Jacobs, P., Kraaijeveld, M., Ligtenberg, J., Visser, T. 2006. *Niet te zoet, niet te zout*. RIZA-werkdocument 2006.045X, Rijkswaterstaat.
- Groenenboom, J., M.C.H. Tiessen, van der Kaaij, Th. (2016). *Ontwikkeling 3D-Haringvlietmodel*. Deltares, rapport 1230069-000-ZKS-0028 – *in voorbereiding*.
- Huismans, Y. 2016. *Systeemanalyse Rijn-Maasmonding: analyse relaties noord- en zuidrand en gevoeligheid stuurknoppen. Deelproject Systeemanalyse en Slimwatermanagement*. Deltares rapport. 1230077-001.
- Mens, M. 2016. *Karakterisering van deelgebieden in de Rijn-Maasmonding naar type verziltingsproces*. Deltares memo. 1230077-001 – *in voorbereiding*.
- Rijkswaterstaat. 2002. *Verloop Chlorideconcentratie langs de zuidrand van het noordelijke deltabekken na de proef met de Haringvlietsluizen voor de periode 15 maart t/m 31 oktober 1997*. Nota AP/2401750/2002/25, Rijkswaterstaat.
- van Spijk, A. 2006. *Evaluatie van verzilting en ontzilting van het Haringvliet na de storm van 24/25 november 2005*. Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland, notanummer AP/2006/03.
- van Spijk, A. 2009. *Verzilting en ontzilting Haringvliet t.g.v. trillingsproef met Haringvlietsluizen december 2008*. Nota RWS/DZH/ARA/2009-33, Rijkswaterstaat.
- de Vries, I. 2014. *Toetsing robuustheid Brielse Meer voor zoetwatervoorziening*. Deltares rapport.120918-000.

C.2 Presentatie (RMM Systeemanalyseoverleg, 15 september 2016)



Deltares
Enabling Delta Life



Haringvliet – Zout in diepe putten

Hypothese vorming

Meinard Tiessen

15 september 2016



Inleiding

Doel

Inzicht krijgen in zoutverspreiding van en naar de diepere delen van het Haringvliet

Aanpak

Literatuurstudie & beperkte data analyse

- Haringvliet
- Overige locaties (IJsselmeer en Volkerak)

Relatie met overige projecten

Opzetten 3D zoutindringingsmodel Haringvliet

- Systeminzichten
- Data-analyse inlaatproeven
- Zoutbalans (lopend onderzoek)

15 december 2016



Inleiding

Drie hoofdthema's

1. Zoutindringing vanuit zee
2. Terugdringing van verzilting
3. Zoutverspreiding vanuit diepe delen

15 december 2016

Deltares

1. Zoutindringing vanuit zee

Verziltingscasussen

- **Zoutinlaatproef 1994**
- **Zoutinlaatproef 1997**
- **Trillingstest 2008**
- Achterwaartse verzilting 2003
- Achterwaartse verzilting 2005-2006
- Zoutlekkage 2011
- Sinterklaasstorm 2013
- **IJsselmeer: zoutinlaatproeven 2012, 2013, 2014**
- Volkerak: 1990 – heden

15 december 2016

Deltares

1. Zoutindringing vanuit zee

Stap 1: Opvullen diepere delen achter spuicomplex
Vergelijkbaar met IJsselmeerproeven

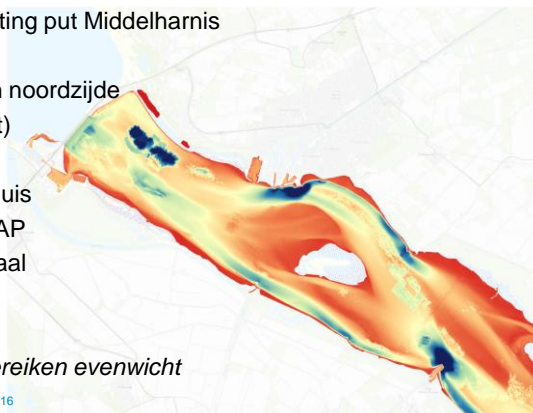
Stap 2: Verspreiding door Haringvliet

Visintrekproef 1994: Laagdikte 2 m, snelheid 0.25 m/s

- Vollopen diepe putten richting en nabij Hellevoetsluis
- Volgen getijgeul zuidzijde richting put Middelharnis

Verspreiding zuidzijde verder dan noordzijde

- Reststroming (niet onderzocht)
- Bodemligging
 - > Noordzijde: bij Hellevoetsluis drempel van -5 tot -8 m NAP
 - > Zuidzijde: getijgeul minimaal -8 tot -10 m NAP



Onderzochte periodes te kort voor bereiken evenwicht

15 december 2016

2. Terugdringing van verzilting diepe delen

Verziltingscasussen

- Zoutinlaatproef 1994
- **Zoutinlaatproef 1997**
- **Trillingstest 2008**
- Achterwaartse verzilting 2003
- **Achterwaartse verzilting 2005-2006**
- **Zoutlekkage 2011**
- Sinterklaasstorm 2013
- IJsselmeer: zoutinlaatproeven 2012, 2013, 2014
- Volkerak: 1990 – heden

15 december 2016

Deltares

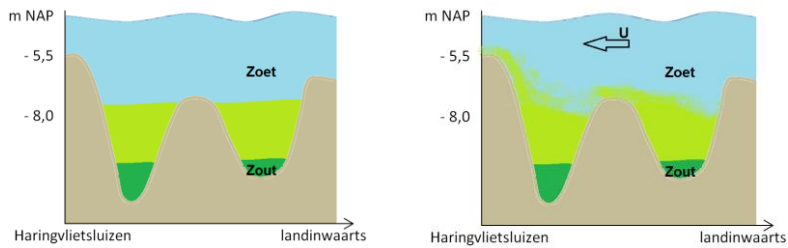
2. Terugdringing van verzilting diepe delen

Lage spuidebieten:

(Bijvoorbeeld zoetspoelen)

- Met name geschikt voor verlagen zoutgehalte ondiepe delen
- Afschaven hogere zoutgehaltes in diepere delen
- Terugdringen zoutgehalte gehele Haringvliet duurt weken tot maanden

Trillingstest 2008: 2 dagen zoetspoelen, verlaging spronglaag met 1 m



Hoge spuidebieten:

- Hogere stroomsnelheden
- Afname zoutconcentratie tot diepere delen

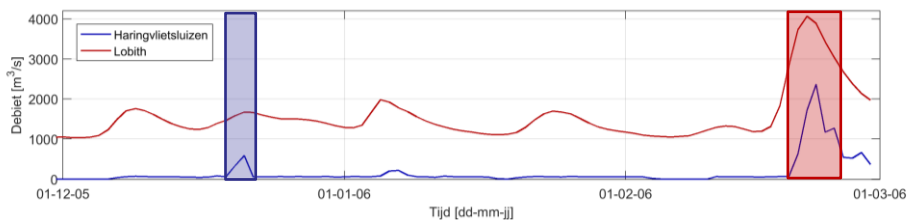
15 december 2016

Deltares

2. Terugdringing van verzilting diepe delen

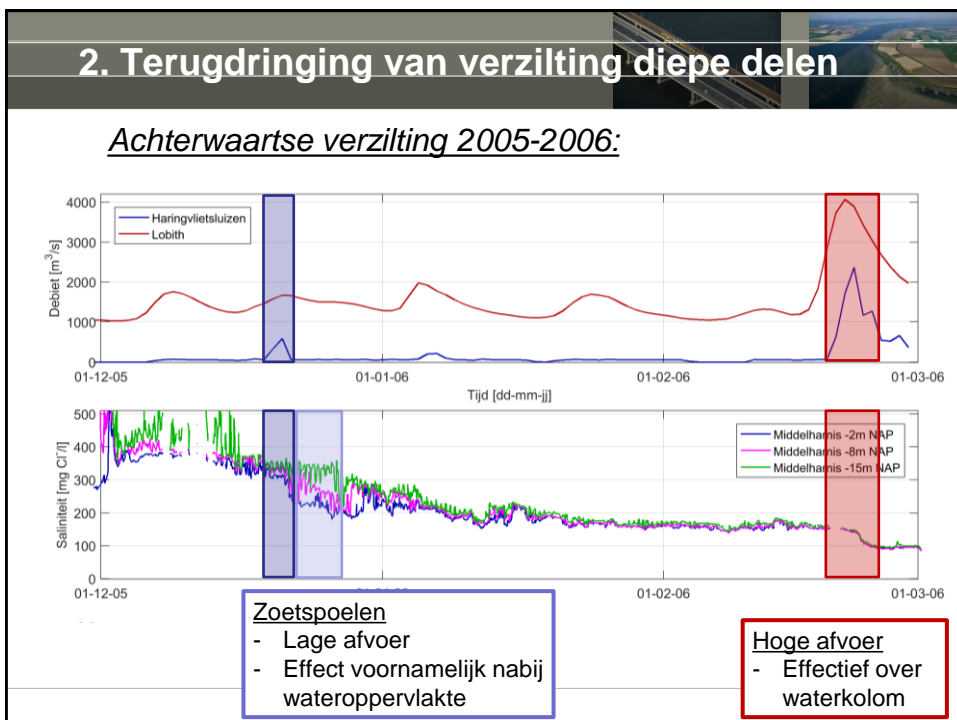
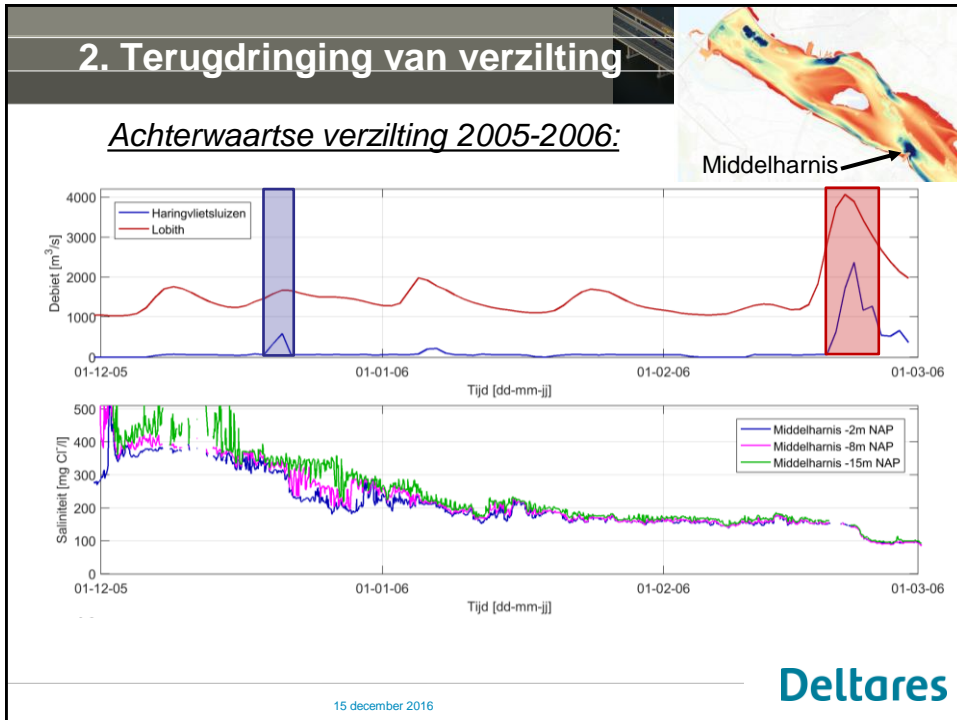
Achterwaartse verzilting 2005-2006:

- 25-26 november 2005
- Sterke toename zoutgehalte in Haringvliet
- Terugdringing zoutgehalte langdurig proces door lage rivierafvoeren



15 december 2016

Deltares



2. Terugdringing van verzilting diepe delen

Achterwaartse verzilting 2005-2006:

- Relatie afvoerdebit door Haringvlietsluizen en zoutconcentratie Middelharnis

	Zoetspoelen (20-21 dec 2005)			Hoge rivierafvoer (20-24 feb 2006)		
	voor	na	netto	voor	na	netto
Volume door Haringvlietsluizen [mln m ³]	80			617		
Zoutconcentratie Middelharnis (-2m) [mg Cl ⁻ /l]	315	240	-70	155	90	-75
Zoutconcentratie Middelharnis (-8m) [mg Cl ⁻ /l]	325	275*	-50	155	90	-75
Zoutconcentratie Middelharnis (-15m) [mg Cl ⁻ /l]*	340	340	0	160	90	-70

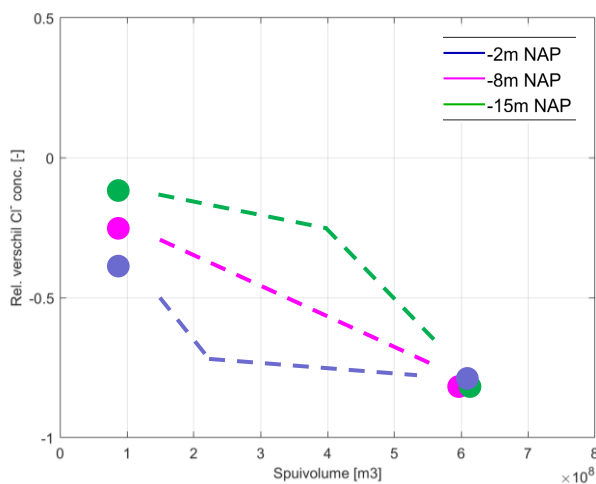
*) Sterk fluctuerend per getijdeperiode [240 – 320 mg Cl⁻/l].

ltares

2. Terugdringing van verzilting diepe delen

Conceptueel:

- Algemene relatie tussen afvoerdebit en zoutconcentratie



Deltares

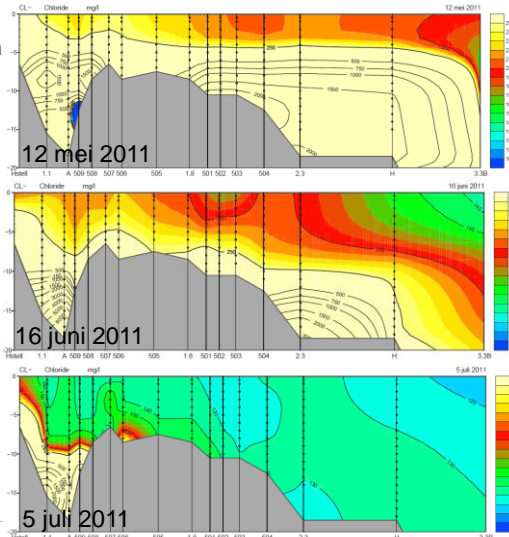
2: Terugdringing van verzilting diepe delen

Mogelijke onderzoeksrichting:

Algemene relatie tussen afvoerdebiet en zoutconcentratie

Meerdere zoutindringingcasussen:

- Achterwaartse verzilting 2005-2006
- Sinterklaasstorm 2013
- Zoutlekkage 2011
- Zoutinlaatproef 1997
(ahv zoutbalans)



3: Zoutverspreiding vanuit diepe delen

Verziltingscasussen

- Zoutinlaatproef 1994
- Zoutinlaatproef 1997
- Trillingstest 2008
- **Achterwaartse verzilting 2003**
- **Achterwaartse verzilting 2005-2006**
- **Zoutlekkage 2011**
- **Sinterklaasstorm 2013**
- IJsselmeer: zoutinlaatproeven 2012, 2013, 2014
- **Volkerak: 1990 – heden**

3: Zoutverspreiding vanuit diepe delen

Relatie tussen **zout levering** aan omgeving en externe **forcering**:

- Rivierafvoer
- Windcondities

Vereisten:

- Verhoogde zoutconcentratie diepe delen Hartingvliet
- Geen zoutlevering vanuit andere delen (bijvoorbeeld via de Oude Maas)
- Toenemende zoutconcentraties in ondiepe delen (Spui, bijvoorbeeld)

Onderzochte verziltingscasus

- Sinterklaasstorm 2013 (achterwaartse verzilting)

15 december 2016

Deltares

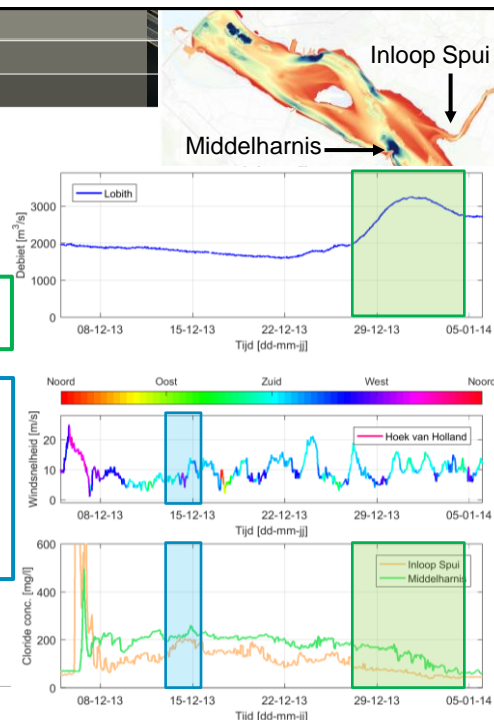
3: Zoutverspreiding

Sinterklaasstorm 2013

Bevindingen

- Grote rivierafvoer leidt tot afname zout-concentraties
- Toename zoutconcentratie bij Inloop Spui (na 12 dec) gevolg van nalevering uit Haringvliet
- Geen duidelijke relatie tussen wind & nalevering

15 december 2016



3: Zoutverspreiding vanuit diepe delen

Mogelijke onderzoeksrichting:

- Relatie tussen wind en zoutlevering uit diepere delen
 - Achterwaartse verzilting 2003
 - Achterwaartse verzilting 2005-2006
 - Sinterklaasstorm 2013

- Zoutlekkage 2011
- Volkerak: 1990 – heden

15 december 2016

Deltares

3: Zoutverspreiding vanuit diepe delen

Mogelijke onderzoeksrichting:

- Relatie tussen wind en zoutlevering uit diepere delen
 - Achterwaartse verzilting 2003
 - Achterwaartse verzilting 2005-2006
 - Sinterklaasstorm 2013

 - Zoutlekkage 2011
 - Volkerak: 1990 – heden
- } Op basis van meetlocaties Middelharnis en Spui
- } Maandelijkse CTD profielen (VTSO) (seizoenale processen)

15 december 2016

Deltares

Bevindingen en hypothesen

- Zoutindringing vanuit zee
 - Zoutinlaatproeven: Veel kennis en inzicht in zoutbinnendringing
 - Diepere bodemligging geulen in zuidelijke helft Haringvliet leiden tot verder indringen zout

- Terugdringing van verzilting diepe delen
 - Zoetspoelen leidt hoofdzakelijk tot afschaven van spronglaag
 - Bij lage debieten: verlaging zoutgehalte diepe putten zeer langzaam (weken tot maanden)
 - Diepe putten alleen schoonspoelen met hoge spuidebieten (Middelharnis, Achterwaartse verzilting 2004-2005)
 - Relatie tussen spui-debiet en mate ontzouting over de diepte

- Zoutverspreiding vanuit diepe delen
 - Uit analyse Sinterklaasstorm 2013 casus geen duidelijke relatie tussen wind en zoutlevering aan Spui.

15 december 2016

Deltares

Open vragen & lopend onderzoek

Lopend onderzoek

- Opstellen zoutbalans voor Zoutinlaatproef 1997 en ontzilting
(afgerond voor eind 2016)

Open vragen

Terugdringing verzilting diepe delen

- Relatie ontzilting en afvoer door Haringvliet
 - Bij welk debiet neemt chloride concentratie af en op welke diepte?

Verspreiding zout uit diepe delen

- Bij verhoogde zoutconcentraties in Haringvliet
Relatie Middelharnis en Inloop Spui (en Bernisse)
 - Effect windcondities
- Kwantificeerbare relatie tussen zoutverspreiding in Volkerak en wind

15 december 2016

Deltares

D Verzilting Hollandsche IJssel

D.1 Rapport

**Analyse van de zoutmetingen
in november 2015 langs de
Hollandsche IJssel**

Afleiding dispersiecoëfficiënt



Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel

Afleiding dispersiecoefficient

Kees Kuijper

1230077-001

Titel

Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS-WVL	1230077-001	1230077-001-ZWS-0005	50

Trefwoorden

verziltig, chlorideconcentratie, dispersiecoëfficiënt, Hollandsche IJssel, onttrekkingen, lozingen, metingen




Samenvatting

Bij Gouda wordt water vanuit de Hollandsche IJssel ingenomen ten behoeve van de land- en tuinbouw. Tijdens perioden met droogte is de zoetwatervraag groot maar kan tevens door de lage rivierafvoeren zout water vanuit zee de Hollandsche IJssel bereiken. Verziltig van de mond van de Hollandsche IJssel hoeft geen consequenties te hebben voor het al dan niet kunnen onttrekken van water bij Gouda. Als pas na enige tijd tijdens de vloedperiode op de Nieuwe Maas het zout de Hollandsche IJssel bereikt, zal het zout enkele kilometers de Hollandsche IJssel optrekken. De volledige ebperiode in de Hollandsche IJssel is dan voldoende lang om het zout weer weg te spoelen naar de Nieuwe Maas. In het geval van permanente verziltig van de mond van de Hollandsche IJssel kunnen dispersieve processen een netto zouttransport in de richting van Gouda tot gevolg hebben. De snelheid waarmee een zoutfront met een bepaalde concentratie zich voortplant is afhankelijk van de dispersiecoëfficiënt, de grootte van de concentratietoename in de mond en de duur van deze toename. Samen met de maximaal toelaatbare concentratie van het inname water bepaalt dit de grootte van het lozingsdebiet.

In november 2015 zijn tijdens een lage afvoersituatie met een Bovenrijnafvoer dalend van 1150 tot 880 m³/s metingen in de Hollandsche IJssel uitgevoerd met als doel de verziltig van de Hollandsche IJssel vast te leggen en de dispersiecoëfficiënt te bepalen. Uit de analyse van de metingen volgt dat halverwege de Hollandsche IJssel de dispersiecoëfficiënt 10 tot 65 m²/s bedraagt. Dispersie door snelheidsverschillen in het dwarsprofiel ('shear dispersion') dragen slechts weinig hieraan bij (f3-term in de Thatcher-Harleman vergelijking). Vermoed wordt dat de dispersie voor een deel het gevolg is van de (geringe) lozingen tijdens de metingen en dat verdere bijdragen afkomstig kunnen zijn van bochtstromingen, doodwaterzones etc. Bij het uitvoeren van scenarioberekeningen voor het aanbrengen en instandhouden van een zoetwaterbuffer in de Hollandsche IJssel bij Gouda moet er mee rekening worden gehouden dat de dispersiecoëfficiënt verandert bij wijziging van het netto lozingsdebiet. Nader onderzoek is nodig om het verloop van de dispersiecoëfficiënt langs de Hollandsche IJssel te bepalen en nieuwe metingen worden voorgesteld om de dispersiecoëfficiënt nauwkeuriger vast te stellen.

Referenties

KPP 2016 Verziltig (LT). Projectcode: WR02. RWS Landelijke Taken en BOA Zoetwater. Project: Systemanalyse Rijn-Maasmonding

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	sept. 2016	Kees Kuijper		Rob Uittenbogaard		Frank Hoozemans	
2.0	dec. 2016	Kees Kuijper		Rob Uittenbogaard		Frank Hoozemans	
2.1	dec. 2016	Kees Kuijper		Rob Uittenbogaard		Frank Hoozemans	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel van de studie en onderzoeksvragen	1
1.3	Leeswijzer	2
2	Hollandsche IJssel	5
2.1	Algemeen	5
2.2	Geometrie en bodemligging	6
2.3	Lozings- en onttrekkingspunten	8
2.4	Waterbeweging en verzilting	9
3	Dispersie	17
3.1	Processen	17
3.2	Modellering: dispersievergelijking	19
3.3	Dispersie van een tracer	20
3.4	Samenvatting	24
4	Metingen	27
4.1	Lozingen en onttrekkingen	28
4.2	Chlorideconcentraties	30
4.2.1	Vaste metingen	30
4.2.2	Varende metingen	32
4.3	Overige metingen en gegevens	33
4.4	Keuze meetdagen voor analyse	33
5	Analyse	35
5.1	Beschrijving verzilting mond Hollandsche IJssel	35
5.2	Afleiding dispersiecoëfficiënt	36
5.3	Vergelijking met literatuur	40
5.4	Discussie	41
6	Samenvatting, onzekerheden en aanbevelingen	43
6.1	Samenvatting	43
6.2	Onzekerheden	45
6.3	Aanbevelingen	46
7	Referenties	49
	Bijlage(n)	
A	F3-term in Thatcher-Harleman dispersievergelijking	A-1
A.1	Relatie tussen Chézy- en Manning-ruwheid	A-1
A.2	'Shear dispersion' volgens Thatcher-Harleman	A-1
A.3	Referenties	A-2
B	'Shear dispersion' onder getijcondities	B-1

B.1	Fischer et al. (1979)	B-1
B.1.1	Effect getijperiode op K	B-1
B.1.2	Effect rivierbreedte op K	B-4
B.2	Aanpassingen T_c en K_0	B-5
B.3	Toepassing Hollandsche IJssel	B-6
B.4	Referenties	B-7
C	Dispersiecoëfficiënt K_0 voor rivieren	C-1
C.1	Beknopte literatuurinventarisatie	C-1
C.2	Referenties	C-5
D	Verziltingskarakteristieken mond Hollandsche IJssel	D-1
D.1	Metingen 2 t/m 17 november 2015	D-1
D.2	Vergelijking met zoutmetingen op 10 september 2013	D-18

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De klimaatverandering (zeespiegelstijging, verandering rivierafvoeren) en de uitvoering van infrastructurele werken (nieuwe zeesluis IJmuiden, verdieping Nieuwe Waterweg, Kierprogramma Haringvlietsluizen, zout Volkerak-Zoommeer) leiden tot diverse beheer- en beleidsvragen voor de zoetwatervoorziening in West-Nederland. Deze vragen zijn vooral gericht op perioden met droogte wanneer de zoetwatervraag groot is en tegelijkertijd verzilting van innamepunten kan optreden. Het beheer dient in die situaties te zorgen voor een optimale zoetwatervoorziening en –verdeling. Om dit mogelijk te maken moet de beheerder beschikken over kennis van het systeem voor de beoordeling van voorgenomen ingrepen, meetinformatie voor het vastleggen van de toestand van het systeem tijdens verziltingsgebeurtenissen en gevalideerde modellen waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan en mitigerende maatregelen kunnen worden doorgerekend.

In de Rijn-Maasmonding is een aantal belangrijke innamepunten van zoet rivierwater ten behoeve van de landbouw, de drinkwatervoorziening en de industrie (proceswater). Een belangrijke locatie is het boezemgemaal Gouda van het Hoogheemraadschap Rijnland (gemaal Pijnacker-Hordijk), waar water wordt ingenomen ten behoeve van de land- en tuinbouw. Verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel *kan* leiden tot verzilting bij Gouda maar dit hoeft niet altijd het geval te zijn, ook niet als er sprake is van een netto onttrekking van water aan de Hollandsche IJssel. Een belangrijk aspect hierbij is het moment dat tijdens het getij het zoute water, via de Nieuwe Maas, de Hollandsche IJssel bereikt. Een analyse van de wateruitwisseling tussen de Hollandsche IJssel en de Nieuwe Maas wordt gegeven in (Kuijper, 2015) op basis van uitgevoerde metingen in het verleden. In deze studie konden geen uitspraken worden gedaan over de zoutverdeling tussen de mond van de Hollandsche IJssel en Gouda omdat hiervoor metingen in onvoldoende mate beschikbaar waren en ook vanwege de te beperkte verzilting tijdens de metingen. Vragen als (i) onder welke condities treedt verzilting van Gouda op en (ii) hoe snel beweegt een zoutfront vanaf de mond in de richting van Gouda zijn daarom onderzoeksvragen die nog steeds moeten worden beantwoord. Antwoorden op deze vragen zijn nodig bij onderzoek naar de mogelijkheden van het creëren van een zoetwaterbuffer in de Hollandsche IJssel via de Kleinschalige Wateraanvoer (KWA en KWA+) als potentiële maatregel om de zoutindringing ter plaatse tegen te gaan. Bij onderzoek naar de verzilting van de Hollandsche IJssel, bijvoorbeeld als onderdeel van klimaatstudies, worden meerjarige simulaties uitgevoerd met eendimensionale procesmodellen, zoals SOBEK. Ook de effectiviteit van maatregelen kan met dit type modellen worden onderzocht mits de relevante processen correct door het model worden weergegeven. De grootte van de dispersiecoëfficiënt, en in het bijzonder de invloed hierop van grootheden als rivierafvoer, getij, geometrie en dichtheidsverschillen, moet dan bekend zijn. Het doel van de recent uitgevoerde metingen was om de grootte van de dispersiecoëfficiënt te bepalen voor de dan optredende condities; onderzoek naar de dispersieformulering verloopt in een flankerend onderzoek binnen KPP 2016 (Daniels, 2016).

1.2 Doel van de studie en onderzoeksvragen

In dit rapport worden recent uitgevoerde metingen (oktober-november 2015) in de Hollandsche IJssel tijdens een periode met een lage Bovenrijnafvoer ($< 1150 \text{ m}^3/\text{s}$) geanalyseerd. Het doel van deze analyse is inzicht te verkrijgen in de processen die leiden tot

verziltzing van de Hollandse IJssel vanaf de mond tot aan Gouda. De verkregen inzichten moeten bijdragen aan het onderbouwen van te onderzoeken mitigerende maatregelen zoals de instelling van een zoetwaterbuffer in de Hollandsche IJssel.

De onderzoeksvragen zijn:

- Onder welke omstandigheden kan zout de Hollandsche IJssel optrekken en onder welke omstandigheden spoelt het weer uit?
 - » Hoe verloopt de wateruitwisseling tussen de Nieuwe Maas en de Hollandsche IJssel?
 - » Hoe zijn afvoer, getij, middenstandsveranderingen en onttrekkingen hierop van invloed?
- Hoe is bij zoutindringing in de Hollandsche IJssel de verhouding tussen de diverse zouttransportprocessen, en hoe verandert dit met veranderende omstandigheden (afvoer, getij en onttrekking)?
 - » Welke zijn de tijdschalen voor het advectieve en dispersieve transport?
- Wat zijn onder gegeven omstandigheden de noodzakelijke voorwaarden voor een zoetwaterbel op de Hollandse IJssel om stabiel te zijn?
 - » Hoe groot is het benodigde netto lozingsdebiet (= lozing – onttrekking)?
- Hoe beïnvloeden de voorgenomen maatregelen en ontwikkelingen de zoutindringing?

1.3 Leeswijzer

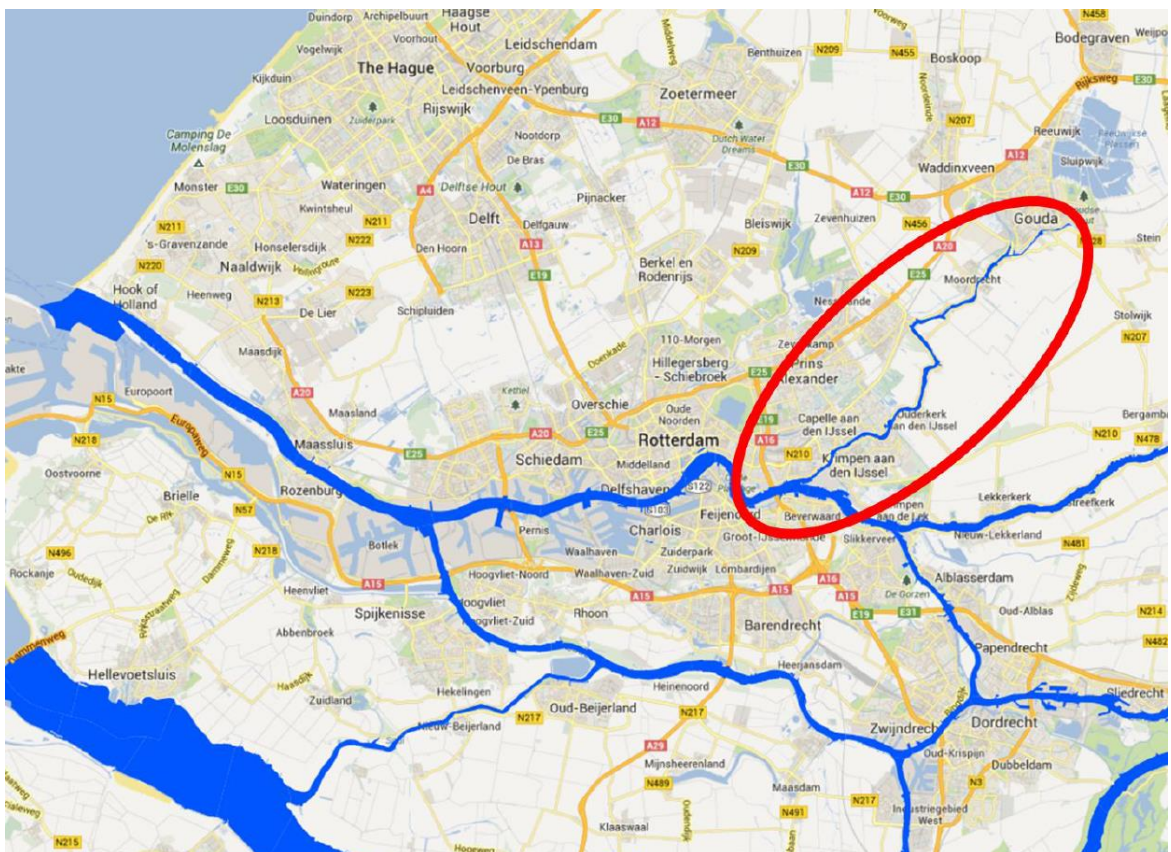
In Hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de Hollandsche IJssel. Het betreft de dimensies van de rivier en de locaties van de lozings- en onttrekkingspunten. Ook wordt ingegaan op de verziltzing van de mond van de Hollandsche IJssel en hoe de uitwisseling van zout water met de Nieuwe Maas verloopt. Belangrijk is om onderscheid te maken tussen (i) het deel van de Hollandsche IJssel, waar de getijgemiddelde zoutconcentratie vooral wordt bepaald door het advectieve transport van zout over de lengte van de vloedweg vanaf de Nieuwe Maas, en (ii) het deel waar het dispersieve zouttransport de verandering van de getijgemiddelde zoutconcentratie bepaalt voor de situatie zonder lozingen en onttrekkingen. Daartoe wordt de vloedweg in de mond berekend. Verder worden de maximale eb- en vloednelheden bepaald en de gemiddelde (absolute) stroomsnelheid langs de Hollandsche IJssel. Deze waarden worden later gebruikt bij de analyse van de metingen. Hoofdstuk 3 gaat in op dispersieve processen in het algemeen en hoe een aantal van deze processen wordt beschreven met de dispersieformulering volgens Thatcher-Harleman. Met een analytische beschrijving van het dispersieve transport na een concentratietoename op de rand wordt inzicht verkregen in de voortplantingssnelheid van een zoutfront en de orde-grootte van het benodigde lozingsdebiet om deze verziltzing tegen te gaan. De uitgevoerde zoutmetingen in oktober en november 2015 worden beschreven in Hoofdstuk 4. Dit betreft zowel de “varende” als “vaste” metingen en de grootte van onttrekkingen aan en lozingen op de Hollandsche IJssel. De zoutconcentraties worden gepresenteerd in samenhang met de omgevingscondities. Op basis van een aantal criteria wordt van de totale meetperiode een deelperiode geselecteerd, die zal worden gebruikt bij de afleiding van de dispersiecoëfficiënt K in Hoofdstuk 5. Bij deze bepaling wordt een aantal veronderstellingen gedaan, wat leidt tot een onzekerheidsband voor K . De resultaten worden vervolgens vergeleken met bevindingen in de literatuur. De samenvatting, onzekerheden en aanbevelingen zijn vermeld in Hoofdstuk 6. In de bijlagen wordt nadere achtergrondinformatie verstrekt. Bijlage A gaat in op de constante voor de f_3 -term ('shear dispersion') in de Thatcher-Harleman dispersievergelijking. 'Shear dispersion' volgens de theorie van Fischer wordt beschreven in Bijlage B. Hierbij wordt de invloed van de oscillerende stroming op de dispersiecoëfficiënt behandeld en wordt dit toegepast op de Hollandsche IJssel. Bijlage C geeft de resultaten van een beknopte literatuurinventarisatie over de grootte van de dispersie-coëfficiënt voor rivieren met een in de

tijd constante stroming. In Bijlage D wordt de verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel in detail beschreven voor opeenvolgende dagen in de periode 2 t/m 17 november 2015. Een samenvatting van deze analyse wordt gegeven in Par. 5.1.

2 Hollandsche IJssel

2.1 Algemeen

De Hollandsche IJssel is één van de riviertakken in de Rijn-Maasmonding, zie Figuur 2.1. De riviertak loopt over een lengte van 20 km vanaf Gouda tot Krimpen a/d IJssel, waar de Hollandsche IJssel samenvloeit met de Nieuwe Maas ter hoogte van km. 994, ongeveer 1 km opwaarts (oostelijk) van de van Brienoordbrug. De begrenzing aan de bovenstroomse zijde bij Gouda wordt gevormd door de Julianasluis, het boezemgemaal Pijnacker Hordijk van het Hoogheemraadschap Rijnland (beiden km. 3) en de Waaiersluis (km. 0), in beheer bij het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden.



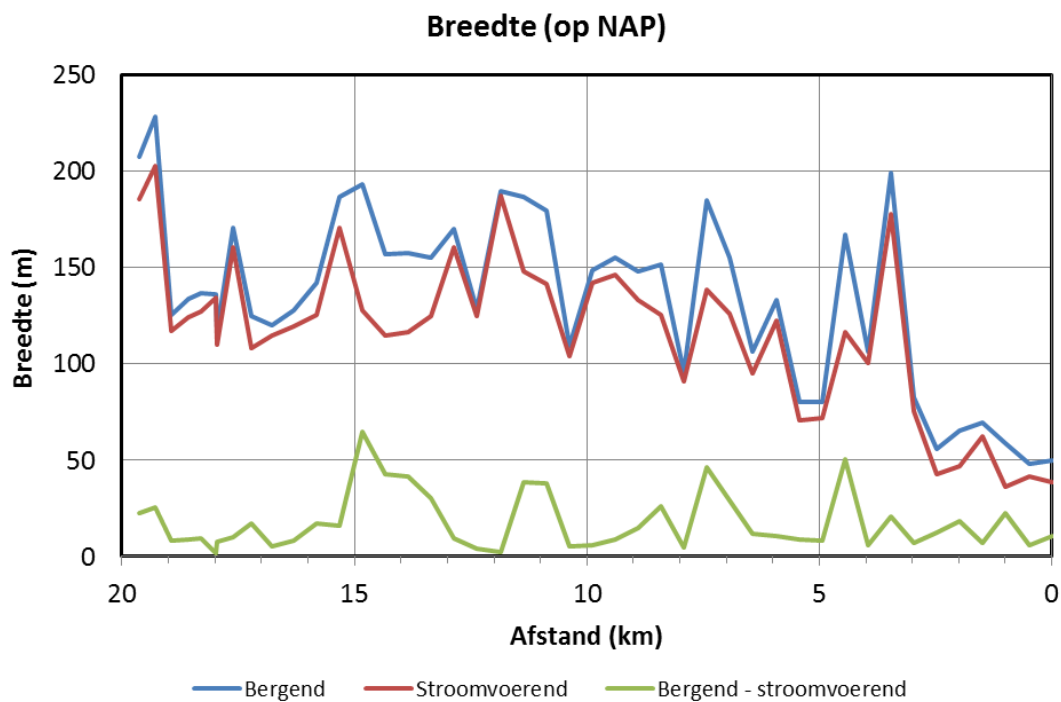
Figuur 2.1 Rijn-Maasmonding en Hollandsche IJssel (Hydrologic, 2013).

De Stormvloedkering (Algerakering) bevindt zich ter plaatse van km. 18. Op een afstand van 350 m zeewaarts van de buitenste schuiven van deze stormvloedkering verbindt de Sliksloot de Hollandsche IJssel met de Nieuwe Maas. De Stormpolder is het driehoekige eiland dat wordt omsloten door de Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en de Sliksloot. Ter plaatse van het splitsingspunt Nieuwe Maas-Sliksloot is er ook een verbinding met de Bakkerskil, een geul die 2,7 km verder in opwaartse richting is verbonden met de Nieuwe Maas.

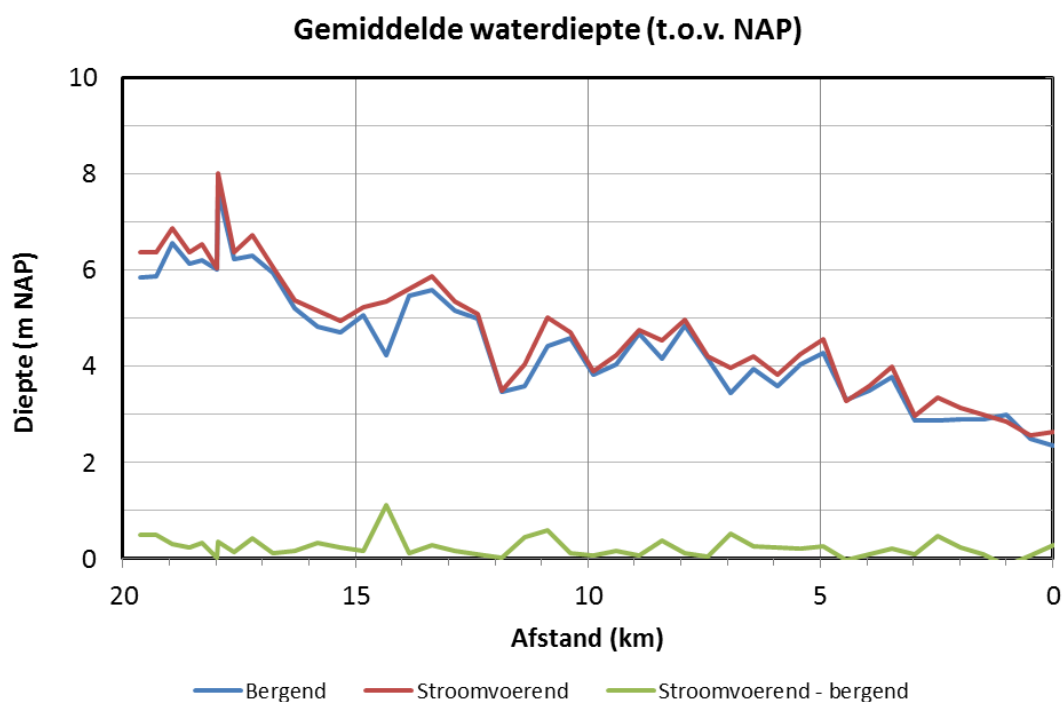
2.2 Geometrie en bodemligging

In Figuur 2.2, Figuur 2.3 en Figuur 2.4 worden de breedte en waterdiepte en het dwarsoppervlak langs de Hollandsche IJssel getoond. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen het stroomvoerend en het bergend profiel. De data zijn ontleend aan de SOBEK-schematisatie sobek-rmm-j15_5-v1 voor de Rijn-Maasmonding, welke dateert van 2015. De laatste lodingen voor het gehele gebied zijn gedaan in 2012/2013.

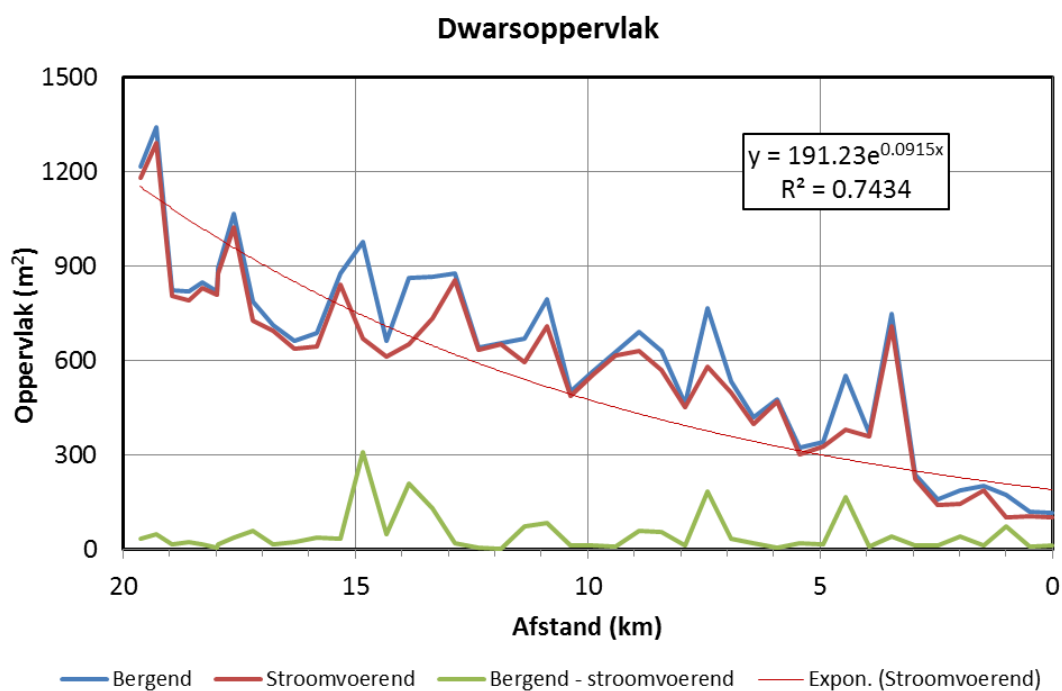
Uit de figuren volgt dat de breedte afneemt van 200 m in de mond tot 100 m bij de Julianasluis (km. 3) en 50 m bij de Waaiersluis (km. 0). De gemiddelde waterdiepte ten opzichte van NAP neemt geleidelijk af van 6,5 m in de mond tot 3 m bij de Julianasluis en 2,5 m bij de Waaiersluis. De resulterende afname van het dwarsoppervlak (factor 10) kan worden benaderd met een exponentieel verloop met een convergentielengte van $1/0,0915 \approx 11$ km.



Figuur 2.2 Bergende breedte (blauwe lijn), stroomvoerende breedte (rode lijn) en verschil (groene lijn) van de Hollandsche IJssel tussen de mond (km. 20) en Gouda Waaiersluis (km. 0).



Figuur 2.3 Gemiddelde waterdiepte bergend profiel (blauwe lijn), gemiddelde waterdiepte stroomvoerend profiel (rode lijn) en verschil (groene lijn) van de Hollandsche IJssel tussen de mond (km. 20) en Gouda Waaiersluis (km. 0).



Figuur 2.4 Dwarsoppervlak bergend profiel (blauwe lijn), dwarsoppervlak stroomvoerend profiel (rode lijn) en verschil (groene lijn) van de Hollandsche IJssel tussen de mond (km. 20) en Gouda Waaiersluis (km. 0). Het dwarsoppervlak van het stroomvoerend profiel is benaderd met een exponentiële relatie.

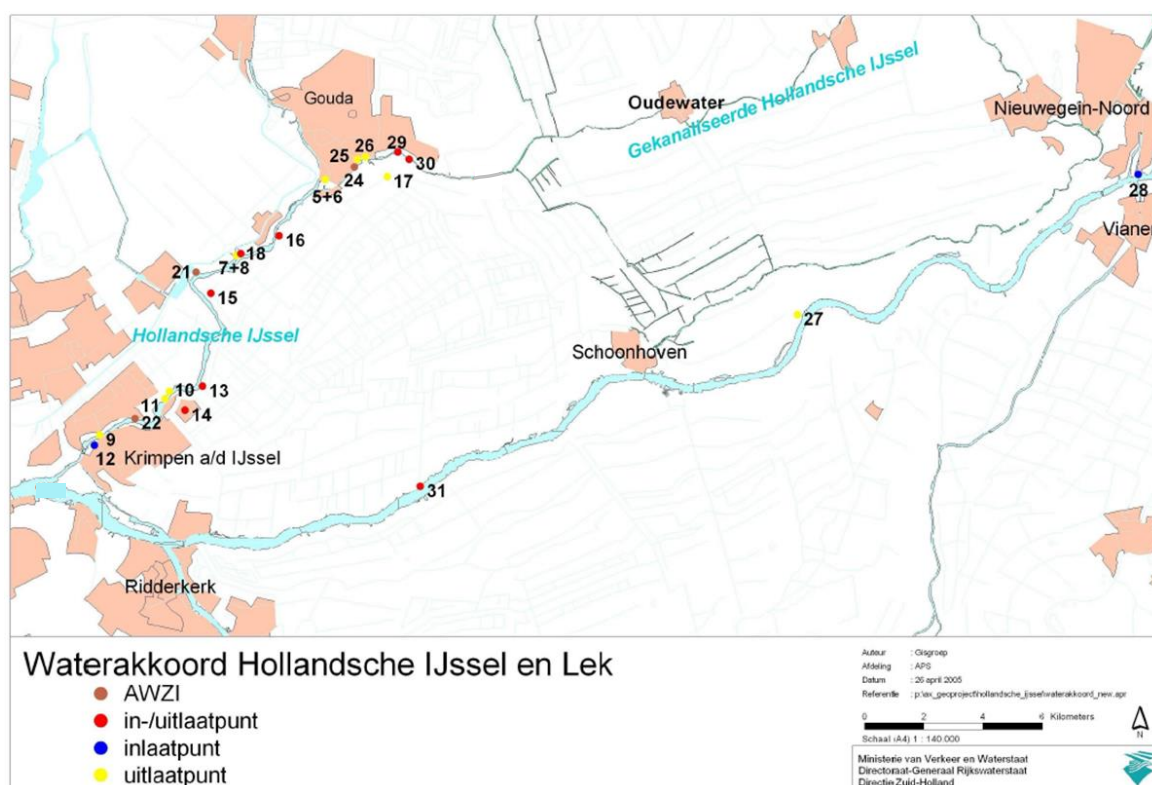
2.3 Lozings- en onttrekkingspunten

De lozings- en onttrekkingslocaties langs de Hollandsche IJssel en Lek zijn vermeld in Tabel 2.1 en weergegeven in Figuur 2.5. De analyse van de metingen zal worden uitgevoerd voor de periode waarvoor geldt dat de grootte van de lozings- en de onttrekkingen zo klein mogelijk is ('gesloten waterbalans'). De locaties waarvoor gegevens zijn toegeleverd gedurende deze periode, in totaal 15, zijn cursief vermeld.

Tabel 2.1 Lozings- en onttrekkingspunten langs de Hollandsche IJssel en Lek (Friocourt en Kuijper, 2015). De gegevens voor de vet gedrukte locaties zijn gebruikt voor de analyseperiode 9 t/m 13 november 2015.

Nummer op Figuur 2.5	Beheerder	Naam	Type	Maximale capaciteit (m ³ /min)
5, 6	HHS Rijnland	Gemaal mr. P.A. Pijnacker Hordijk	Uitlaat	2070
			Inlaat	2070
7, 8	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Abraham Kroes	Uitlaat	850
9	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Middelwatering	Uitlaat	90
			Inlaat	120
10	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Hitland	Uitlaat	75
11	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Oostgaarde	Uitlaat	50
12	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Langeland en Kortland	Inlaat	-
13	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Krommer Geer en Zijde	In-/uitlaat	-
14	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Johannes Veurink	In-/uitlaat	300
15	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal De Nesse	Uitlaat	40
			Inlaat	5
16	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Verdoold	Uitlaat	319
			Inlaat	50
17	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Stolwijkersluis	Uitlaat	50
18	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Schutsluis Snelle Sluis	In-/uitlaat	100 à 200
21	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	AWZI Kortenoord	Uitlaat	
22	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	AWZI Groenedijk	Uitlaat	
	HH Rijnland	AWZI Gouda	Uitlaat	?
24	?	?	?	?
25	HHS van Rijnland	Gemaal Mallegat	Uitlaat	80
26	HHS van Rijnland	Gemaal Hanepraai	Uitlaat	70
	HHS van Rijnland	Gemaal Kort Haarlem	Uitlaat	
27	HHS De Stichtse Rijnlanden	Gemaal de Koekoek	In-/uitlaat	672
28	HHS De Stichtse	Inlaat Vreeswijk	Inlaat	120

Nummer op Figuur 2.5	Beheerder	Naam	Type	Maximale capaciteit (m ³ /min)
	Rijnlanden			
29	Rijkswaterstaat	Waaiersluis (sluis + Gemaal)	Uitlaat Inlaat	Max. 450
30	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Beneden Haastrecht	In-/uitlaat	30
31	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Gemaal Krimpenerwaard	In-/uitlaat	500
?	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Stormpolder A	Uitlaat	1,7
?	HHS Schieland en de Krimpenerwaard	Stormpolder B	Uitlaat	3,3



Figuur 2.5 Lozings- en onttrekkingspunten langs de Hollandsche IJssel en Lek (Friocourt en Kuijper, 2015)

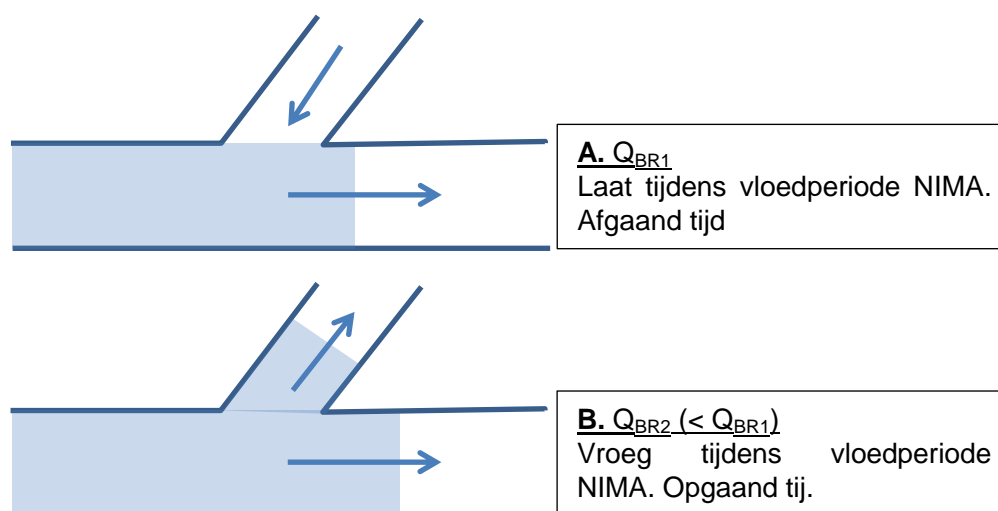
2.4 Waterbeweging en verzilting

De waterbeweging in de Nieuwe Maas wordt vooral gedomineerd door het getij. De gemiddelde getijslag bij Krimpen a/d IJssel bedraagt 1,51 m; bij springtij en doortij is deze 1,61 m en 1,36 m (Slotgemiddelde 1998.0). Op- en afwaaiing bij Hoek van Holland tijdens storm resulteert in vulling en lediging van de Rijn-Maasmond en is daarmee ook van invloed op waterstanden en stroomsnelheden. De Bovenrijnafvoer bepaalt in belangrijke mate de gemiddelde debieten (restafvoeren) op de riviertakken. Het water wordt aangevoerd via de Lek en de Waal en afgevoerd naar de Noordzee via de Nieuwe Waterweg, het Hartel- en Beerkanaal en de Haringvlietsluizen. Daarnaast wordt er water afgevoerd afkomstig van de

Maas maar deze afvoer is veel kleiner dan die van de Bovenrijn. De vele splitsingspunten zijn kenmerkend voor het gebied; het aangevoerde rivierwater wordt via de splitsingspunten verdeeld over de riviertakken. Deze verdeling wordt beïnvloed door het bedieningsprogramma van de Haringvlietsluizen. Bij Bovenrijnafvoeren lager dan 1100 m³/s zijn de Haringvlietsluizen volgens het Lozings-programma Haringvlietsluizen '84 gesloten (behoudens de omloop- en visriolen). De restafvoeren over de riviertakken worden in geringe mate beïnvloed door restcirculaties als gevolg van het getij ('tidal pumping').

Voor de zoetwatervoorziening van zuidwest-Nederland speelt verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel een belangrijke rol. Zout water dat vanuit zee via de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas de monding van deze riviertak bereikt, kan resulteren in verhoogde chlorideconcentraties bij Gouda waardoor de inname van zoet water moet worden gestopt. Verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel doet zich voor bij Bovenrijnafvoeren lager dan ongeveer 1200 m³/s maar bij een stormopzet op zee kan verzilting ook bij hogere afvoersituaties optreden. In hoeverre verzilting van de monding van de Hollandsche IJssel daadwerkelijk leidt tot verzilting bij Gouda hangt af van diverse factoren. De grootte van de onttrekking te Gouda is een belangrijke parameter maar ook als niet wordt onttrokken kan het zout uiteindelijk Gouda bereiken. Voor dit laatste zijn verschillende mechanismen verantwoordelijk zoals de tijdelijke berging van zout in doodwaterzones langs de oever van de Hollandsche IJssel en in zijtakken (Sliksloot), diepte- en dwarsvariaties van stroomsnelheid en chlorideconcentratie, faseverschillen tussen het tijdsverloop van de stroomsnelheid en chlorideconcentratie etc. In eendimensionale (profielgemiddelde) modellen wordt voor de beschrijving van deze driedimensionale processen doorgaans gebruik gemaakt van een dispersieformulering. De mate waarin de zoutverdeling voor verschillende omgevingscondities (rivierafvoer, getij, geometrie) met deze formulering kan worden voorspeld, bepaalt het succes van een 1D-benadering.

Uit een analyse van in het verleden uitgevoerde debiet- en zoutmetingen blijkt, dat in de monding van de Hollandsche IJssel sprake is van een faseverschil tussen het debiet in de Nieuwe Maas en het debiet in de Hollandsche IJssel (Kuijper, 2015). Het debiet in de Hollandsche IJssel volgt het waterstandsverloop: bij opkomend tij is er sprake van instroming en bij afgaand tij uitstroming. Dit kombergingsdebiet is het gevolg van de relatief korte Hollandsche IJssel (20 km) ten opzichte van de lengte van de getijgolf ter plaatse (~ 300 km). Als de Hollandsche IJssel direct na hoogwater begint uit te stromen (tijdens afgaand tij) is er nog een vloedstroming op de Nieuwe Maas, zie bovenste afbeelding in Figuur 2.6. Zout water vanuit zee dat na hoogwater de mond van de Hollandsche IJssel bereikt zal dan niet de Hollandsche IJssel kunnen intrekken.



Figuur 2.6 Zoutindringing in de Hollandsche IJssel. **A:** Het zoute zeewater bereikt laat tijdens de vloedperiode in de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel ($Q_{BR,1}$). **B:** Het zoute zeewater bereikt vroeg tijdens de vloedperiode in de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel ($Q_{BR,2}$). Ontleend aan Kuijper (2015).

Als zout water al vóór hoogwater de Hollandsche IJssel bereikt (tijdens opgaand tij), kan er wel verzilting van de Hollandsche IJssel optreden omdat er dan nog een (beperkte) instroming is, zie onderste afbeelding in Figuur 2.6. Na hoogwater wordt dit zoute water echter weer weggespoeld naar de Nieuwe Maas. Als het zoute water steeds eerder tijdens de vloedperiode op de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel bereikt zal het zoute water ook een steeds grotere afstand afleggen in de Hollandsche IJssel. De grootste afstand is dan gelijk aan de getijweg (= vloedweg) in de mond van de Hollandsche IJssel, welke in een eendimensionaal rekenmodel volgt uit de profielgemiddelde snelheid. In dat geval is er op het moment van laagwater al zout aanwezig in de Nieuwe Maas ter plaatse van de mond van de Hollandsche IJssel en is er sprake van permanente verzilting.

Het zout dat met de profielgemiddelde snelheid wordt getransporteerd, wordt aangeduid met advectioneel transport. Het verschil tussen het totale en het advectioneel transport vormt dan het dispersieve transport. In een eendimensionaal stromingsmodel waarmee dynamisch wordt gerekend, d.w.z. tijdens de getijperiode worden waterstanden en stroomsnelheden berekend, kan het zout niet verder komen dan de getijweglengte in de mond van de Hollandsche IJssel als dispersieve transporten verwaarloosd worden. In Hydrologic (2013) wordt voor de 'advectioneel' getijweglengte 6 km genoemd, zie Figuur 2.7.



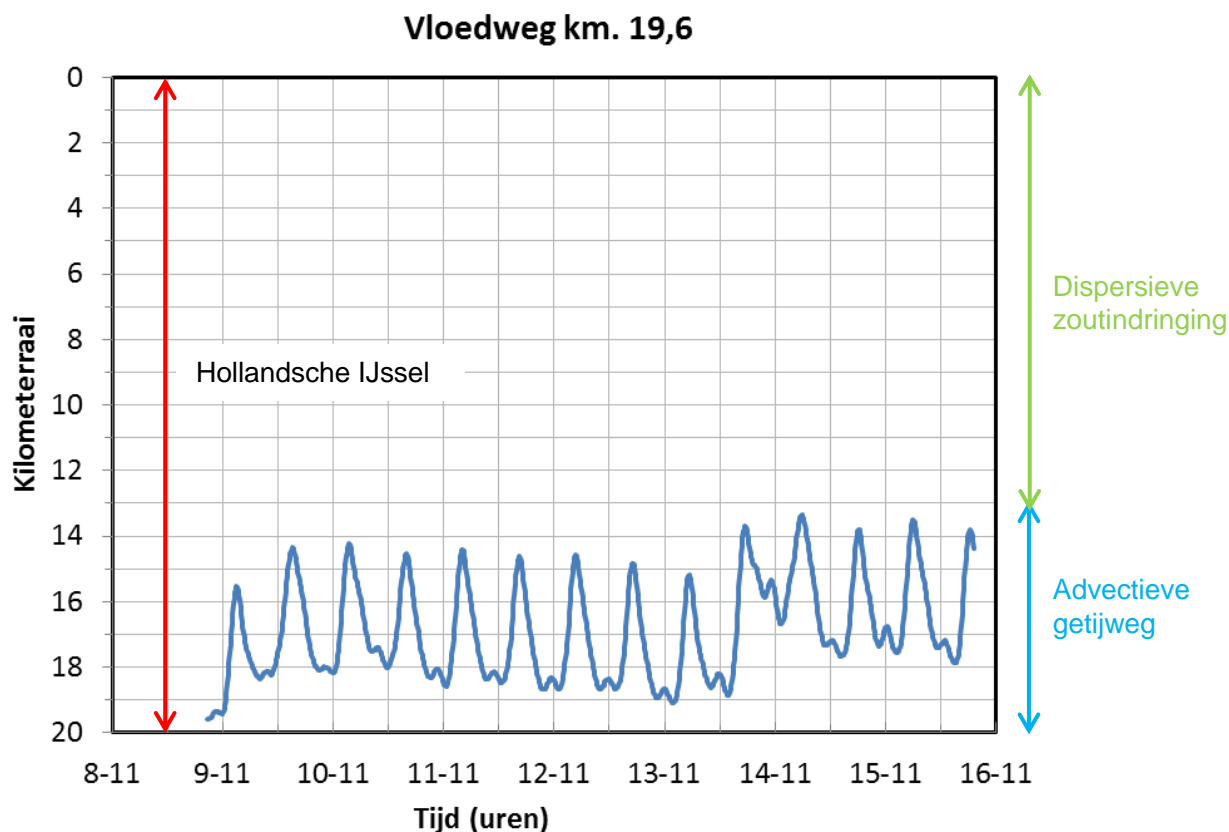
Figuur 2.7 Advectieve getijweg: maximale afstand waarover zout vanuit de Nieuwe Maas door advectie ten gevolge van de getijbeweging kan worden getransporteerd (Hydrologic, 2013). Opwaarts hiervan kan alleen zout voorkomen ten gevolge van dispersieve processen (indien er geen onttrekkingen zijn).

De getijweglengte is in het voorliggende rapport als volgt berekend¹:

- Ter plaatse van de opeenvolgende SOBEK-vakken is het kombergingsdebiet berekend uit het gemiddelde van de waterstand in Gouda-brug en de waterstand in Krimpen a/d IJssel en het kombergend oppervlak opwaarts van elk SOBEK-vak.
- Vervolgens is uit het kombergingsdebiet en het stroomvoerend oppervlak in elk SOBEK-vak de stroomsnelheid bepaald.
- Aan het begin van de vloedperiode is een (virtueel) deeltje losgelaten en de positie en snelheid is bepaald op opeenvolgende tijdstippen. De snelheid van het deeltje volgt hierbij uit lineaire interpolatie van de omliggende stroomsnelheden ter plaatse van de SOBEK-vakken.

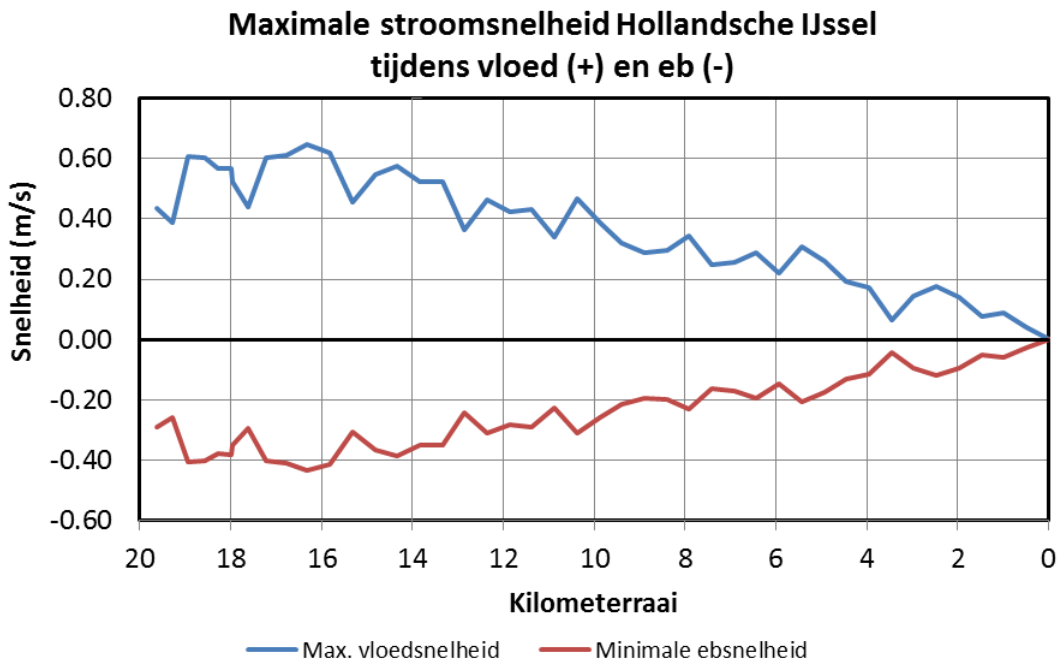
Het resultaat is voor de periode 9 t/m 15 november 2015 weergegeven in Figuur 2.8. Hieruit komt naar voren dat zout door advectief transport vanaf de mond tot ongeveer km. 13/14 kan worden getransporteerd. Middenstandsveranderingen en de springtij-doodtij variatie zijn hierop enigszins van invloed.

¹ Er is geen SOBEK-simulatie uitgevoerd.



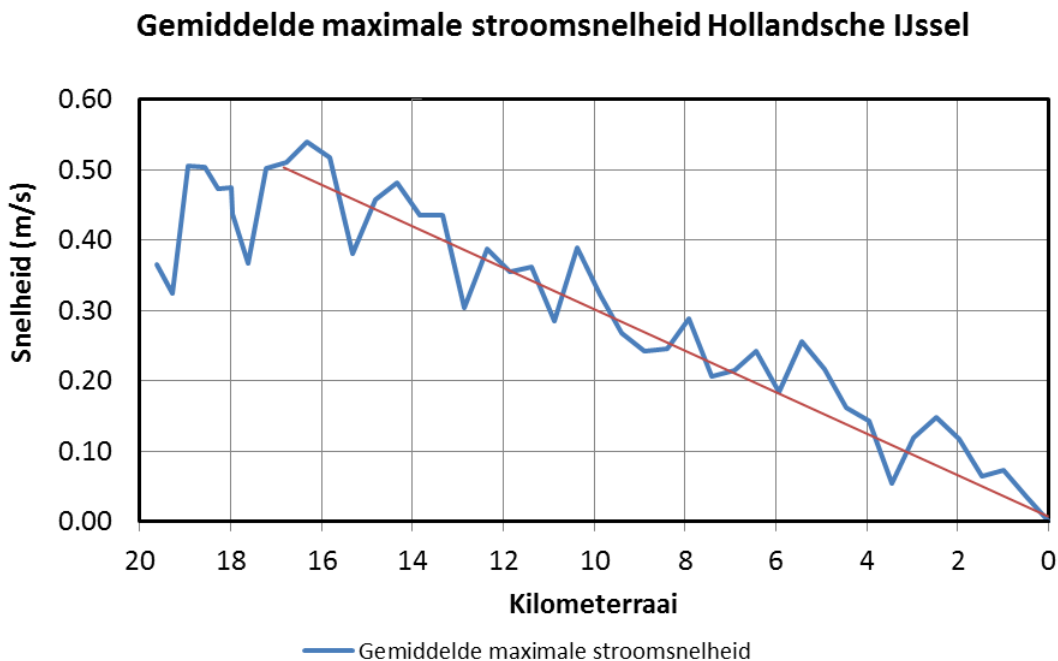
Figuur 2.8 Getijweglengte in de mond van de Hollandsche IJssel (km. 19,6). Langs de verticale as is de kilometerraai vermeld: Gouda (Waaiersluis) = km. 0; mond = km. 19,6.

In elke SOBEK-dwarsdoorsnede is uit het berekende snelheidsverloop de maximale vloed- en ebsnelheid bepaald. Dit is gedaan voor opeenvolgende perioden van 24 uur en 50 min tussen 9 november 2015 00:00 uur en 20 november 2015 09:00 uur (in totaal 11 deelperioden). Het gemiddelde van de 11 berekende waarden is weergegeven in Figuur 2.9. De maximale stroomsnelheden tijdens vloed zijn groter dan die tijdens eb. Dit wordt veroorzaakt door de kortere duur van de vloedperiode ten opzichte van de ebperiode (getijasymmetrie). De maximale vloedsnelheid neemt van de monding naar Gouda af van 0,6 m/s naar 0 m/s. De maximale ebsnelheid neemt af van 0,4 m/s in de monding tot 0 m/s bij Gouda.



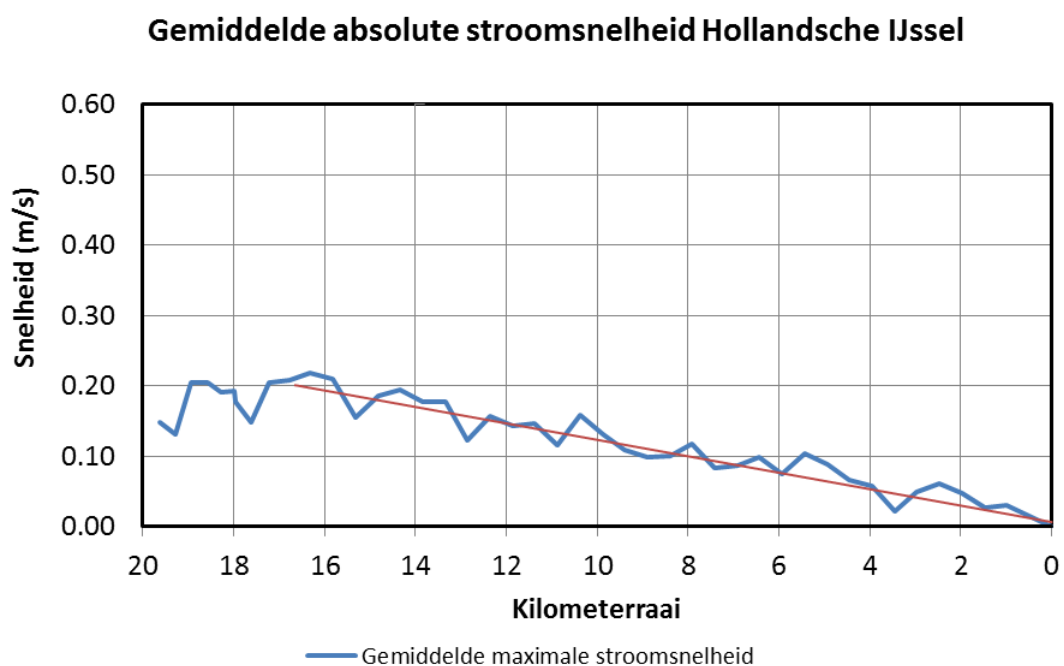
Figuur 2.9 Maximale vloed- en ebsnelheid in de Hollandsche IJssel tussen km. 20 en km. 0. Periode: 9 november 00:00 uur t/m 20 november 2015 09:00 uur.

In Figuur 2.10 is het gemiddelde van de maximale vloodsnelheid en de absolute waarde van de ebsnelheid weergegeven. De afname in landwaartse richting verloopt vanaf km. 17 vrijwel lineair.



Figuur 2.10 Gemiddelde maximale stroomsnelheid in de Hollandsche IJssel tussen km. 20 en km. 0. Periode: 9 november 00:00 uur t/m 20 november 2015 09:00 uur. De gemiddelde maximale stroomsnelheid is het gemiddelde van de maximale vloodsnelheid en de maximale (absolute) ebsnelheid.

Het gemiddelde van de absolute stroomsnelheid tijdens het getij is weergegeven in Figuur 2.11. De gemiddelde eb- en vloednelheid is 0,2 m/s in de mond en neemt lineair af in de richting van Gouda.



Figuur 2.11 Gemiddelde absolute stroomsnelheid in de Hollandsche IJssel tussen km. 20 en km. 0. Periode: 9 november 00:00 uur t/m 20 november 2015 09:00 uur. De gemiddelde absolute stroomsnelheid is het gemiddelde van de absolute waarden van de stroomsnelheden.

3 Dispersie

3.1 Processen

Het totale zouttransport in een doorsnede x van een rivier wordt verkregen door vermenigvuldiging van de lokale stroomsnelheid $u(y, z)$ met de lokale zoutconcentratie $c(y, z)$ en integratie over de gehele doorsnede. Hierin zijn x , y en z de horizontale, laterale en verticale coördinaten. In een eendimensionaal model wordt alleen gerekend met profielgemiddelde waarden voor u en c en moeten de deeltransporten die ontstaan ten gevolge van variaties van u en c in de dwarsdoorsnede, resp. u' en c' , op een bepaalde manier worden beschreven. Het is gebruikelijk het dispersieve transport T_{disp} afhankelijk te stellen van de gradiënt van de profielgemiddelde zoutconcentratie \bar{c} . In één dimensie geldt dan:

$$T_{disp} = -AK \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad (3.1)$$

waarin A het oppervlak van de dwarsdoorsnede en K de dispersiecoëfficiënt.

De grootte van K moet dan worden voorgeschreven om met het model berekeningen te kunnen uitvoeren.

In de natuur zijn er veel processen die resulteren in variaties van de snelheid u en de concentratie c over de diepte en breedte en het is niet altijd goed bekend hoe deze van invloed zijn op de dispersiecoëfficiënt K . Een stroming langs een vaste wand, zoals de stroming in een rivier, leidt tot snelheidsverschillen over de diepte. Evenzo kunnen snelheidsverschillen ontstaan over de breedte van de rivier. De dispersie die het gevolg is van snelheidsverschillen wordt aangeduid als 'shear dispersion'. Een ander bekend voorbeeld betreft de dispersie ten gevolge van dichtheidsstromingen. Er is een netto landwaarts gerichte stroming bij de bodem van relatief zout water en een netto zeewaarts gerichte stroming bij het oppervlak van relatief zoet water. Deze verticale gravitatiecirculatie leidt tot een groter netto landwaarts gericht transport naar gelang er sprake is van een sterkere gelaagdheid². Verder kunnen bijdragen aan dispersie (Friocourt en Kuijper, 2015):

- dichtheidsverschillen in dwarsrichting, bijvoorbeeld tussen de rivier en dode zones;
- getijschering ('tidal straining') resulterend in een asymmetrie in verticale menging tijdens een getijperiode, zowel in langs- als dwarsrichting;
- de uitwisseling tussen haven en rivier of tussen riviertakken als gevolg van een verschil tussen hoogwater en stroomkentering op de rivier; idem rond laagwater ('tidal trapping');
- netto circulaties van de stroomsnelheid zoals opgewekt door bodemvariaties (eb- en vloedgeulen) of ten gevolge van rondstromingen rond 'eilanden' in een vertakt rivierenstelsel als de Rijn-Maasmonding ('tidal pumping');
- overige geometrische effecten (profielveranderingen en bochten);
- circulaties ten gevolge van wind.

² Ook bij een volledig gemengde situatie ontstaat een verticale gravitatiecirculatie, omdat deze bepaald wordt door de longitudinale zoutgradiënt. De bijdrage aan het netto zouttransport is dan echter nul.

De dispersiecoëfficiënt representeert dus een scala van fysische processen en het is van belang te weten hoe bepaalde ingrepen hierop van invloed kunnen zijn bij het uitvoeren van scenariostudies.

De dispersiecoëfficiënt voor 'shear dispersion' kan evenredig worden gesteld met de snelheidsverschillen in het dwarsprofiel (in verticale of laterale richting). Als de gemiddelde snelheid \bar{u} is en de variatie daaromheen u' (bijv. aan het oppervlak is de stroomsnelheid groter dan bij de bodem; u' is dus geen turbulente fluctuatie) volgt:

$$K \sim \overline{u'^2} \quad (3.2)$$

waarbij de middeling over de diepte of de breedte wordt aangegeven met de horizontale streep. K is dus groot als de snelheidsvariatie u' in het profiel groot is.

De dispersiecoëfficiënt is ook evenredig met de tijd die nodig is om de opgeloste stof (het aanwezige zout) te mengen over de diepte of de breedte (T_c). Als deze mengtijd groot is, kan een vloeistofpakketje met een bepaalde concentratie een grote afstand afleggen (de mengweglengte) voordat het zijn eigenschappen, i.e. de concentratie, verliest aan de omgeving. De dispersiecoëfficiënt is in dat geval groot. K is dus ook evenredig met T_c :

$$K \sim T_c \quad (3.3)$$

Omdat de mengtijd kan worden geschreven als:

$$T_c = \frac{L^2}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

met L een zekere lengteschaal en ε de turbulente mengingscoëfficiënt volgt:

$$K \sim \overline{u'^2} T_c \sim \overline{u'^2} \frac{L^2}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

In het geval van een stroming met snelheidsverschillen in het verticale vlak is de lengteschaal L gelijk aan de waterdiepte en is ε de verticale diffusiecoëfficiënt. In de praktijk blijkt dat de snelheidsverschillen in breedterichting bepalend zijn voor de grootte van K . L is dan gelijk aan de halve breedte als het dwarsprofiel symmetrisch is of gelijk aan de totale breedte bij een asymmetrisch profiel (Fischer et al., 1979). In de literatuur zijn diverse empirische vergelijking beschikbaar die de dispersiecoëfficiënt K voorspellen voor rivieren (stationaire stroming) gebaseerd op de algemene vorm van vgl. (3.5), zie Bijlage C.

Voor een oscillerende stroming, bijvoorbeeld de getijdestroming, speelt de verhouding tussen de getijperiode T en de mengtijd T_c een rol voor de grootte van K . In Bijlage B wordt uiteengezet, dat de dispersiecoëfficiënt onder getijcondities kleiner is dan die voor stationaire stroming.

3.2 Modelling: dispersievergelijking

De dispersievergelijking van Thatcher-Harleman (1972) geeft de dispersiecoëfficiënt voor twee van de in Par. 3.1 beschreven processen: 'shear dispersion' (f_3 -term, zie ook Bijlage A) en verticale gravitatiecirculatie (f_4 -term):

$$K(x,t) = f_1 + f_3 \frac{\sqrt{g}}{C} |u(x,t)| d(x,t) + f_4 \frac{u_0^*}{S_0^*} L^2 \left(\frac{\Delta\rho_0}{\rho} \frac{g d_0}{u_0^2} \frac{Q_f T}{P_T} \right)^{\frac{1}{4}} \left\langle \frac{S(x,t)}{S_0(x,t)} \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} \right\rangle \quad (3.6)$$

Hierin is g de gravitatieversnelling, C de Chézy-ruwheid, $u(x,t)$ de profielgemiddelde stroomsnelheid in x op tijdstip t , $d(x,t)$ de waterdiepte, u_0^* de karakteristieke stroomsnelheid in de mond, S_0^* de (constante) referentie saliniteit in de mond, L de estuariumlengte, $\Delta\rho$ het dichtheidsverschil tussen het zeewater en het rivierwater, ρ de dichtheid van het rivierwater, u_0 de maximale stroomsnelheid in de mond, Q_f de rivierafvoer, T de getijperiode, P_T het vloedvolume, $S(x,t)$ de saliniteit, $S_0(x,t)$ de (tijdsafhankelijke) referentie saliniteit in de mond en f_3 en f_4 dimensieloze constanten. De haken $\langle \rangle$ hebben betrekking op een tijdsmiddeling over 2 getijperioden. De f_3 -term wordt op elk tijdstip t berekend, terwijl de f_4 -term een tijdsgemiddelde waarde betreft over 2 getijperioden.

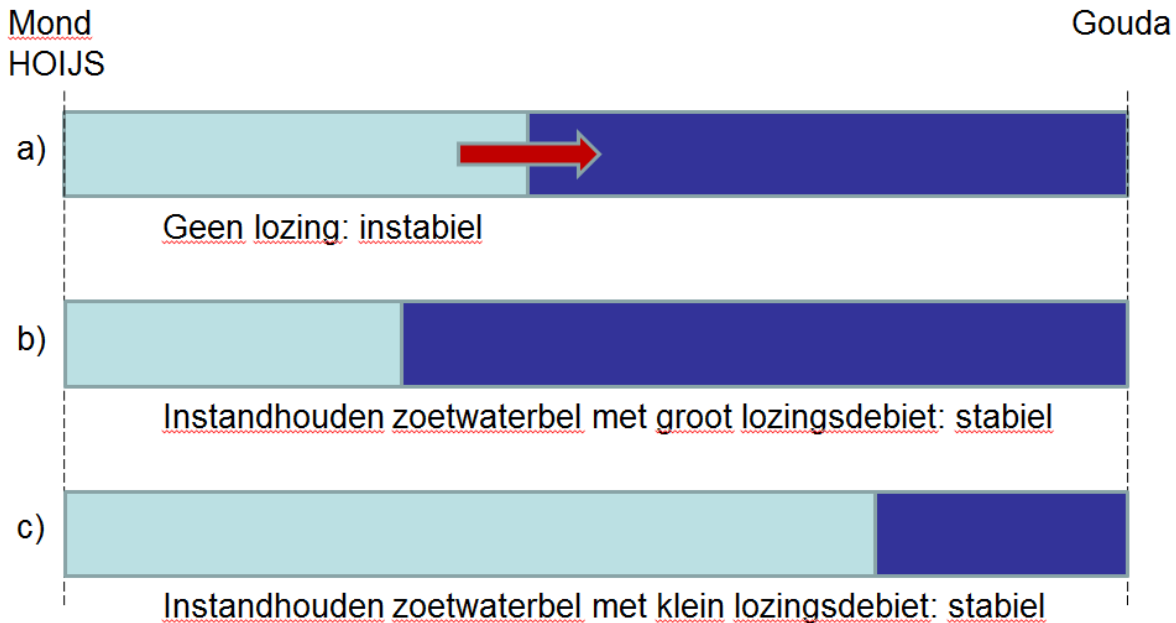
Vergelijking (3.6) vormde onderdeel van SOBEK-RE en wordt momenteel ook in SOBEK-3 geïmplementeerd. De vergelijking is niet helemaal conform de oorspronkelijke vergelijking van Thatcher-Harleman. In een eerder model van Rijkswaterstaat (ZWENDL) is de term $\frac{S(x,t)}{S_0(x,t)}$ toegevoegd om een te grote zoutindringing te reduceren (Rijkswaterstaat, 1984).

Verder geldt, dat slechts een tweetal processen met de vergelijking wordt beschreven. In SOBEK is het mogelijk om eventueel extra dispersie te specificeren met een constante (f_1 -term).

Als verzilting van de Hollandsche IJssel optreedt kunnen voor het gebruik van vgl. (3.6) de volgende situaties worden onderscheiden:

- 1 *Situatie zonder lozingen en onttrekkingen.* In dit geval is er geen netto afvoer van water en de f_4 -term is gelijk aan nul. K kan worden gespecificeerd via de f_1 -term als deze bijvoorbeeld is bepaald uit metingen. Deze aanpak is niet voorspellend, omdat bij een ingreep K kan veranderen. K kan ook worden bepaald met de f_3 -term maar dit betreft dan alleen 'shear dispersion'. Als f_3 bekend is ($f_3 \approx 60$, zie Bijlage A) kan K als functie van x worden bepaald, welke nadert tot nul achterin de Hollandsche IJssel. De f_3 -term is dus voorspellend maar alleen voor 'shear dispersion'.
- 2 *Situatie met lozingen en onttrekkingen.* Als er een netto lozing van water plaatsvindt op de Hollandsche IJssel, bijvoorbeeld voor het in stand houden van een zoetwaterbel, zal de dispersie toenemen door de f_4 -term. Er is dan feitelijk sprake van een estuarium met een rivierafvoer en een bijbehorende zoutgradiënt. Als het lozingsdebiet toeneemt zal de zoutindringing afnemen. Het effect van de grootte van het lozingsdebiet op K wordt beschreven met de f_4 -term zodat in principe scenario's met een voorspellend karakter kunnen worden uitgevoerd.

Het voorgaande is schematisch weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Verziltig Hollandsche IJssel. a: geen lozing. Voortschrijdend zoutfront. b en c: stabiele zoutverdeling als gevolg van respectievelijk een groot en klein lozingsdebiet.

Tijdens de uitgevoerde zoutmetingen in november 2015 werd nagenoeg niet geloosd op en onttrokken aan de Hollandsche IJssel, zodat sprake was van situatie a in Figuur 3.1 (voortschrijdend zoutfront). In de volgende paragraaf zal ten behoeve van het systeeminzicht het tijdsafhankelijke gedrag van de zoutverdeling analytisch worden beschreven.

3.3 Dispersie van een tracer

Verondersteld wordt dat de tracer, in dit geval een mengsel van zoutionen, geen effect heeft op de waterbeweging, m.a.w. de aanwezigheid van zout heeft geen invloed op de dichtheid van het water. Als op het tijdstip $t = 0$ de zoutconcentratie gelijk aan nul is voor $x > 0$ en de zoutconcentratie op de rand plotseling wordt vergroot tot c_0 dan volgt voor de tijds- en plaatsafhankelijke zoutconcentratie $c(x,t)$ (Fischer et al., 1979):

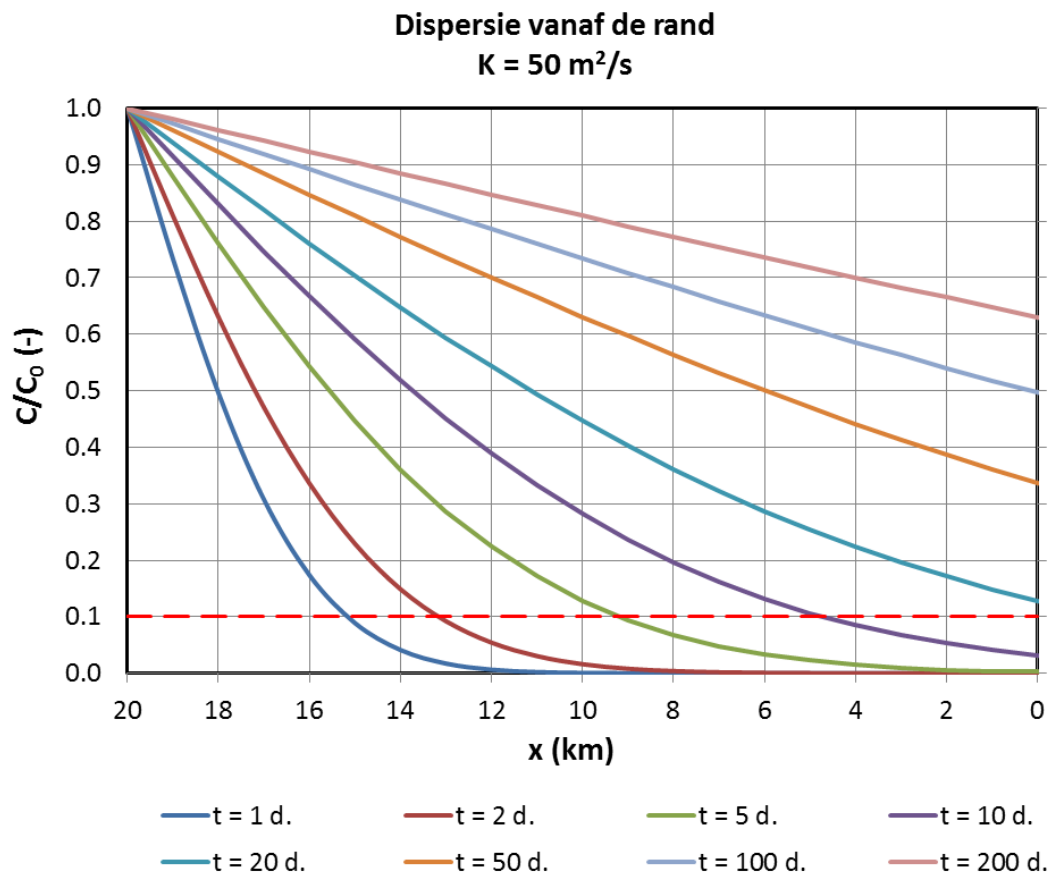
$$\frac{c}{c_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Kt}}\right) \quad (3.7a)$$

Hierin is erf de 'error' functie gedefinieerd als:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.7b)$$

Hierbij is verder aangenomen dat het domein zich oneindig ver uitstrekt in de positieve x -richting (er is geen fysieke begrenzing). Verder wordt de dispersiecoëfficiënt constant verondersteld, d.i. onafhankelijk van de tijd t en de plaats x .

De concentratieverdeling langs een rivier met een lengte van 20 km (gelijk aan die voor de Hollandsche IJssel) is op verschillende tijdstippen weergegeven in Figuur 3.2 voor $K = 50 \text{ m}^2/\text{s}$.



Figuur 3.2 Concentratieverdeling langs een riviertak met lengte 20 km op verschillende tijdstippen. Op $t = 0$ is de concentratie op de rand ($x = 20 \text{ km}$) plotseling verhoogd tot c_0 . De snijpunten van de rode lijn met de curves geven de positie van het front met $c_f/c_0 = 0,1$ weer op verschillende tijdstippen. c_f is de concentratie van het front; c_0 is de concentratie in de monding.

Uit de figuur kan de positie van een “front”³ met bijvoorbeeld $c_f/c_0 = 0,1$ op de verschillende tijdstippen worden afgelezen (snijpunten van de rode lijn met de curves). Waargenomen kan worden dat de snelheid van het front afneemt in de tijd (de tijdstippen van de getoonde lijnen zijn niet equidistant). Ook blijkt dat een front met een grotere relatieve concentratie c_f/c_0 zich langzamer voortplant. De positie x van het front op tijdstip t volgt uit vgl. (3.7a):

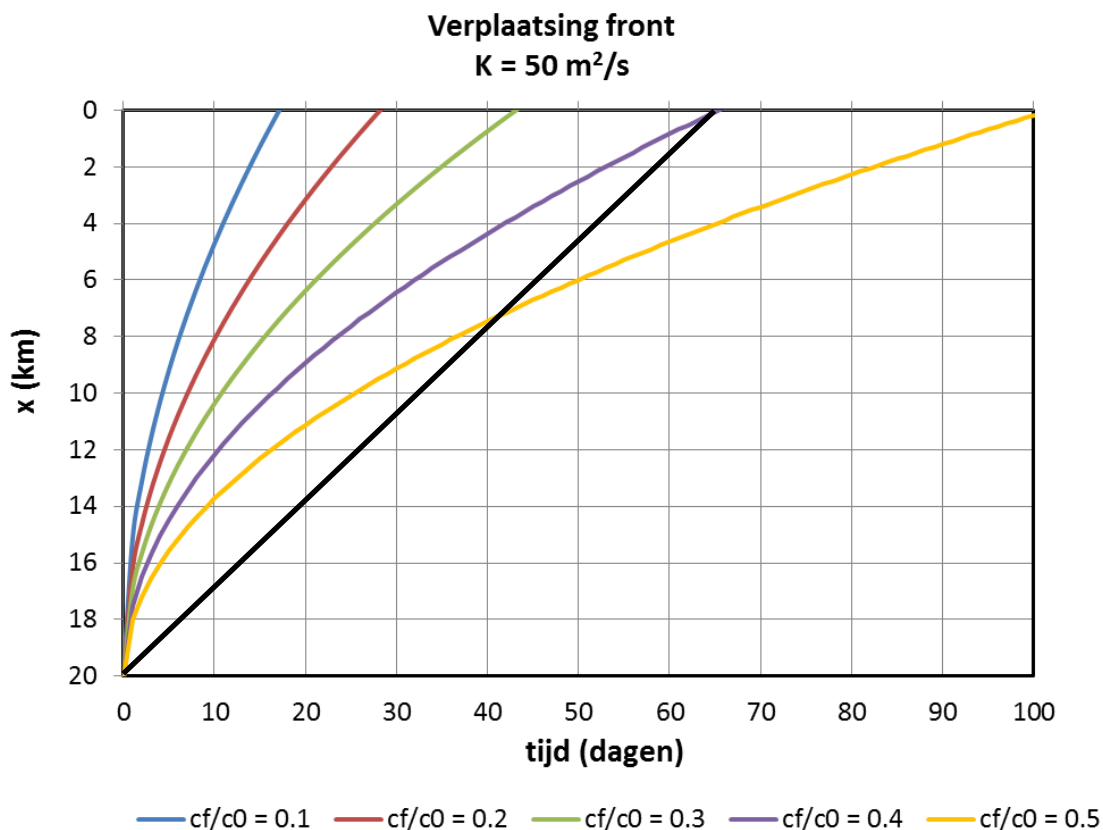
$$\frac{x}{\sqrt{4Kt}} = \operatorname{erfinv}\left(1 - \frac{c_f}{c_0}\right) = \alpha \quad (3.8)$$

waarbij *erfinv* de inverse ‘error’ functie is. Het front met de gekozen concentratie c_f/c_0 bereikt locatie x op tijdstip t volgens:

³ Hier wordt de concentratie op een bepaalde plaats x met “front” aangeduid. In werkelijkheid is er geen plotselinge verandering van de concentratie maar varieert de concentratie geleidelijk in de ruimte, zie Figuur 3.2.

$$x = 2\alpha\sqrt{Kt} \quad (3.9)$$

Vgl. (3.9) is weergegeven in Figuur 3.3 voor verschillende waarden van c_f/c_0 .



Figuur 3.3 Verplaatsing van het zoutfront met concentratie c_f voor verschillende waarden van c_f/c_0 . De helling van de zwarte lijn is de gemiddelde verplaatsingssnelheid tussen $x = 20$ km en $x = 0$ km voor $c_f/c_0 = 0,4$. c_f is de concentratie van het front; c_0 is de concentratie in de monding.

Uit de figuur kan eveneens worden afgelezen dat het front met een lage relatieve concentratie sneller verplaatst dan een front met een hogere relatieve concentratie (zie ook Figuur 3.2). De tijdschaal voor het dispersieve transport varieert tussen 15 dagen ($c_f/c_0 = 0,1$) en 100 dagen ($c_f/c_0 = 0,5$) als voor de lengteschaal 20 km wordt aangehouden en $K = 50$ m²/s. De tijdschaal voor dispersie hangt dus ook af van de relatieve concentratie van het front dat wordt gevolgd. Bij een lozing van 10 m³/s is de tijdschaal voor het advectieve transport over een lengte van 20 km 15 dagen bij een gemiddelde waterdiepte van 4,5 m en een gemiddelde breedte van 135 m. Voor grotere lozingsgebieden is de tijdschaal evenredig kleiner.

De snelheid waarmee een front met relatieve concentratie c/c_0 verplaatst, volgt door met vgl. (3.9) de tijdsafgeleide te bepalen:

$$u_{front} = \frac{dx}{dt} = \frac{\alpha K}{\sqrt{Kt}} \quad (3.10a)$$

Met vgl. (3.9) kan vgl. (3.10a) ook worden geschreven als:

$$u_{front} = \frac{2\alpha^2 K}{x} \quad (3.10b)$$

Met $x = L$ volgt uit vgl. (3.10b) de snelheid van het front (u_{front}) met relatieve concentratie c_f/c_0 (gegeven door α) aan het eind van de riviertak. Door aan het eind van de riviertak een netto lozingsdebiet in te stellen ter grootte van $Q_{lozing} = Bh u_{front}$ met B de rivierbreedte en h de waterdiepte kan het front worden tegengehouden. Om een front met een lagere relatieve concentratie tegen te houden is een groter debiet nodig; voor fronten met een hogere relatieve concentratie juist een lager debiet. Deze benadering beschrijft dus niet een situatie met een zoutverdeling die in evenwicht is, want voor elk front moet een verschillend debiet worden ingesteld. De methode is wel inzichtelijk om de verplaatsing van een zoutfront ten gevolge van dispersie te vertalen in een debiet. De evenwichtssituatie ('steady state') kan echter eenvoudig worden gevonden met de transportvergelijking, waarbij geldt dat in elke doorsnede het advectief transport gelijk is aan het dispersief transport:

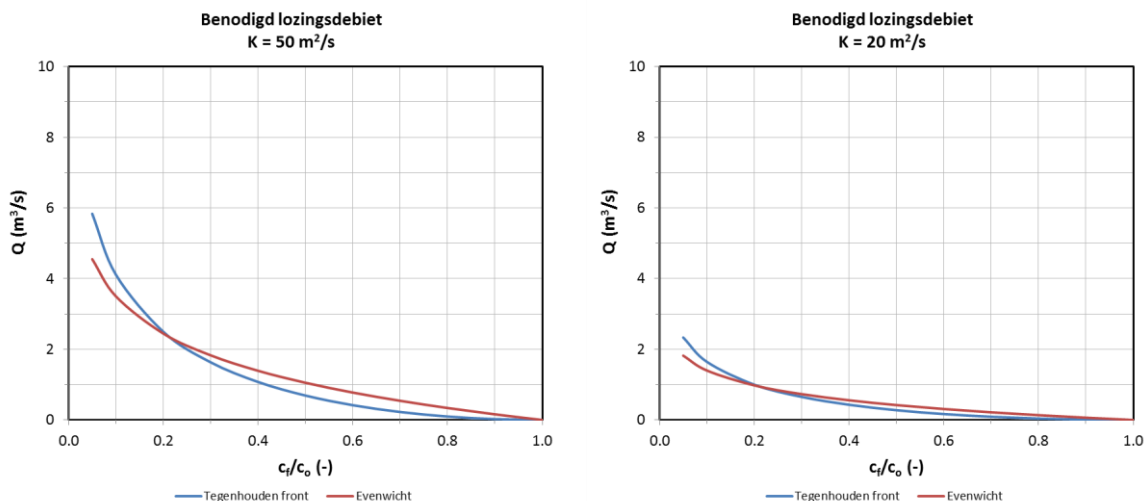
$$\bar{u} \bar{c} = -K \frac{d\bar{c}}{dx} \quad (3.11)$$

met \bar{u} de profielgemiddelde snelheid en \bar{c} de profielgemiddelde chlorideconcentratie. Als de dispersiecoëfficiënt K constant wordt verondersteld (onafhankelijk van de locatie x) volgt:

$$Q_{lozing} = \frac{BhK}{L} \ln\left(\frac{c_0}{c}\right) \quad (3.12)$$

In deze situatie reikt het front met relatieve concentratie c_f/c_0 tot $x = L$.

In Figuur 3.4 wordt de relatie tussen c_f/c_0 en het lozingsdebiet gegeven volgens beide benaderingen ('Tegenhouden front' en 'Evenwicht') en voor $K = 50$ en $20 \text{ m}^2/\text{s}$. Voor $c/c_0 = 0,1$ is het benodigde lozingsdebiet $4 \text{ m}^3/\text{s}$ als $K = 50 \text{ m}^2/\text{s}$. Voor $K = 20 \text{ m}^2/\text{s}$ is het benodigde lozingsdebiet een factor 2,5 kleiner ($1,5 \text{ m}^3/\text{s}$). Dit geeft aan dat inzicht in de grootte van de dispersiecoëfficiënt nodig is om tot een betrouwbare schatting van het benodigde lozingsdebiet te komen.



Figuur 3.4 Benodigd lozingsdebiet om te voorkomen dat het front met relatieve concentratie c_f/c_0 locatie $x = L$ bereikt. $L = 20$ km, Breedte $W = 135$ m en waterdiepte $d = 4,5$ m. Links: $K = 50$ m²/s, rechts: $K = 20$ m²/s. c_f is de concentratie van het front; c_0 is de concentratie in de monding.

In het algemeen zal bij de inname van water sprake zijn van een absolute norm, bijvoorbeeld de chlorideconcentratie in Gouda mag Δc toenemen of, omdat in deze analyse de achtergrondconcentratie nul is verondersteld, de concentratie mag slechts c_{norm} bedragen. Voor een grote c_0 is c_{norm}/c_0 klein en is dus een groter compenserend debiet nodig dan bij een kleine c_0 . Dit is ook wat intuïtief wordt verwacht.

Bij het voorgaande is het effect van zout op de dichtheid van het water buiten beschouwing gebleven. Door een verschil in dichtheid tussen de mond (verzilt) en achterin de riviertak zal een dichtheidsstroming ontstaan. Als de zoutverticaal niet volledig gemengd is, resulteert dit in een netto zouttransport in opwaartse richting. De dispersiecoëfficiënt zal hierdoor groter worden. Verder zal bij het instellen van een lozingsdebiet de dispersiecoëfficiënt ook groter worden, waardoor het directe effect van de lozing (toename van het advectieve transport in de richting van de mond) voor een deel wordt tegengegaan. Het effect van het netto lozingsdebiet op K wordt beschreven door de f4-term in vgl. (3.6). Bij de uitvoering van scenario-berekeningen naar de effecten van het lozingsdebiet mag K dus niet onveranderlijk worden verondersteld.

Ten slotte kan worden verondersteld dat de dispersie als gevolg van een aantal processen, bijvoorbeeld 'shear dispersion', kleiner wordt in de richting van Gouda omdat de getijsnelheid in deze richting afneemt. Deze afname wordt voor 'shear dispersion' beschreven door de f3-term in vgl. (3.6); voor andere dispersiemechanismen is dit niet het geval omdat deze niet door vgl. (3.6) worden beschreven.

3.4 Samenvatting

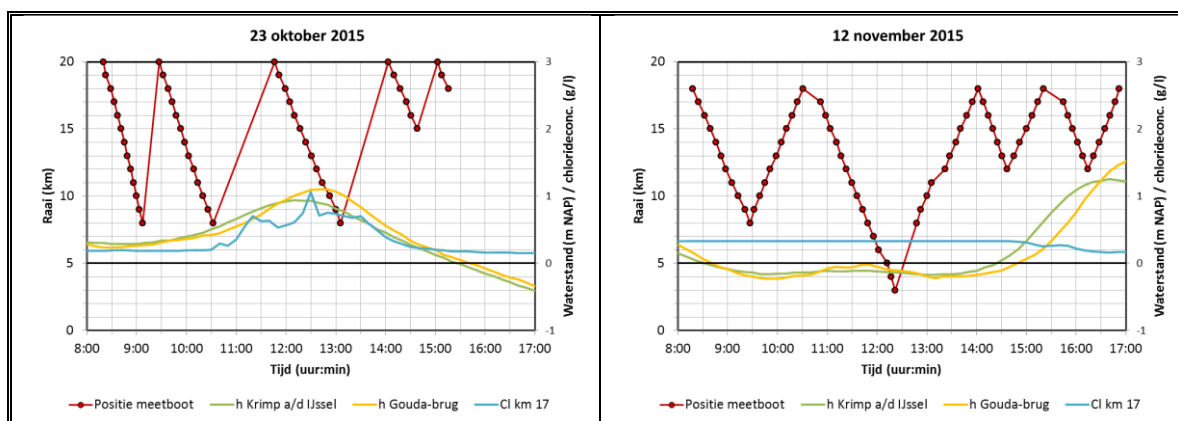
- 1 De dispersieformulering van Thatcher-Harleman, zoals die ook in SOBEK is geïmplementeerd, beschrijft alleen de dispersie als gevolg van snelheidsverschillen in de dwarsdoorsnede ('shear dispersion') en de dispersie ten gevolge van verticale gravitatiecirculatie. De formulering kan worden gebruikt in *voorspellende* zin bij de uitvoering van scenario's maar alleen voor de genoemde processen. Andere factoren die van invloed kunnen zijn op de dispersie, zoals 'tidal straining', over-

- onregelmatigheden, berging in kribvakken en dode takken (havens), bochten etc. worden niet door de formulering beschreven. Wel kan door 'expert judgement' of anders een dispersiecoëfficiënt worden geschat maar dan moet bij de uitvoering van scenario's de waarde in de nieuwe situatie worden opgegeven.
- 3 Ondanks de aannamen die zijn gedaan geeft de analytische benadering inzicht in de wijze waarop het zoutfront zich verplaatst. Het front met een lage relatieve concentratie c_f/c_0 verplaatst zich snel in vergelijking met het front met een grotere relatieve concentratie.
 - 4 Bij een grotere randconcentratie c_0 is bij een gekozen c_f voor het zoutfront een groter compenserend debiet nodig.
 - 5 De tijdschaal van het dispersieve transport voor een riviertak als de Hollandsche IJssel (lengte = 20 km) varieert tussen 15 en 100 dagen voor relatieve concentraties van het front van 0,1-0,5 en $K = 50 \text{ m}^2/\text{s}$. De tijdschaal voor het advectieve transport is 15 dagen bij een lozing van $10 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - 6 De verplaatsingssnelheid van het zoutfront is evenredig met de dispersiecoëfficiënt K . De grootte van K moet dus bekend zijn om uitspraken te kunnen doen over de snelheid waarmee de Hollandsche IJssel ten gevolge van dispersief transport verzilt als de mond (permanent) verzilt.
 - 7 Voor een uniforme dispersiecoëfficiënt K in de Hollandsche IJssel volgt dat het benodigde lozingsdebiet om te voorkomen dat het zoutfront Gouda bereikt orde 1 - 5 m^3/s bedraagt voor $K = 20 - 50 \text{ m}^2/\text{s}$. Dit is een globale schatting omdat het effect van de lozing op de dichtheidsstromingen niet is meegenomen (de dispersie kan hierdoor toenemen). Ook de gehanteerde criteria spelen hierbij een rol, namelijk de grootte van c_f/c_0 van het front en de afstand waarover het zout de Hollandsche IJssel mag binnentrekken. Bij deze schatting is verondersteld dat de concentratie c_0 onveranderd blijft.
 - 8 Bij het uitvoeren van scenarioberekeningen met variërende (netto) lozingsdebieten moet het effect van de debieten op de dispersiecoëfficiënt K worden meegenomen; K mag niet onveranderlijk worden verondersteld. Dit is in principe mogelijk met dispersievergelijking (3.6) aangezien deze het effect van een afvoer op de dispersie beschrijft (f_4 -term).
 - 9 De getijsnelheid langs de Hollandsche IJssel neemt af van de mond in de richting van Gouda. Hierdoor zal ook de 'shear dispersion' afnemen (f_3 -term in vgl. (3.6)). Echter de dispersie ten gevolge van gravitatiecirculatie kan juist toenemen, omdat de getijsnelheid u_0 in de noemer van de f_4 -term van vgl. (3.6) staat. In hoeverre dit tot een toename van de zoutflux in de richting van Gouda leidt hangt af van de gelaagdheid. Voor andere dispersieve processen is het minder duidelijk hoe deze van de getijsnelheid afhangen.

4 Metingen

Gedurende de periode oktober-november 2015 zijn op de Hollandsche IJssel zoutmetingen uitgevoerd in het kader van het 'Draaiboek metingen extra aanvoer via Waaiersluis'. Het doel van de meetcampagne was om meetgegevens te verzamelen waarmee kan worden getoetst of extra aanvoer van water uit de Gekanaliseerde Hollandsche IJssel via de Waaiersluis een dreigende verzilting van het inlaatpunt boezemgemaal Gouda in de Hollandsche IJssel kan verminderen of volledig mitigeren (Aqua Vision, 2015). Door de waterschappen (Rijnland, Schieland & Krimpenerwaard en de Stichtse Rijnlanden) is de grootte van de lozingen en onttrekkingen langs de Hollandsche IJssel vastgelegd. Door Aqua Vision zijn geleidendheid en temperatuur gemeten in een aantal vaste meetpunten langs de Hollandsche IJssel (km. 17 t/m km. 8, elke kilometer). De meetsensoren bevonden zich ongeveer 1 meter boven de bodem. Daarnaast is gemeten vanaf een meetschip dat continu heen en weer voer tussen de mond van de Hollandsche IJssel en Gouda (of over kortere trajecten).

In figuur worden twee voorbeelden gegeven van de tijdstippen van de varende metingen en de positie van het meetschip (23 oktober en 12 november).



Figuur 4.1 Varende metingen: tijdstip van meting en positie langs de Hollandsche IJssel (rode symbolen) op 23 oktober 2015 en 12 november 2015. Ook de waterstand in Krimpen a/d IJssel en Gouda-brug en de chlorideconcentratie in km. 17 zijn vermeld.

De metingen van de sensors van Rijkswaterstaat in de vaste meetpunten (km. 12 t/m km. 8) bleken onbetrouwbaar en moesten na de meetcampagne gecorrigeerd worden aan de hand van de varende metingen. Dit geeft enige onzekerheid in de hierna beschreven analyse, omdat vooral de metingen opwaarts van km. 13 zijn gebruikt bij de afleiding van de dispersiecoëfficiënt.

Een overzicht van de metingen is opgenomen in Tabel 4.1. Voor verdere details wordt verwezen naar (Aqua Vision, 2015).

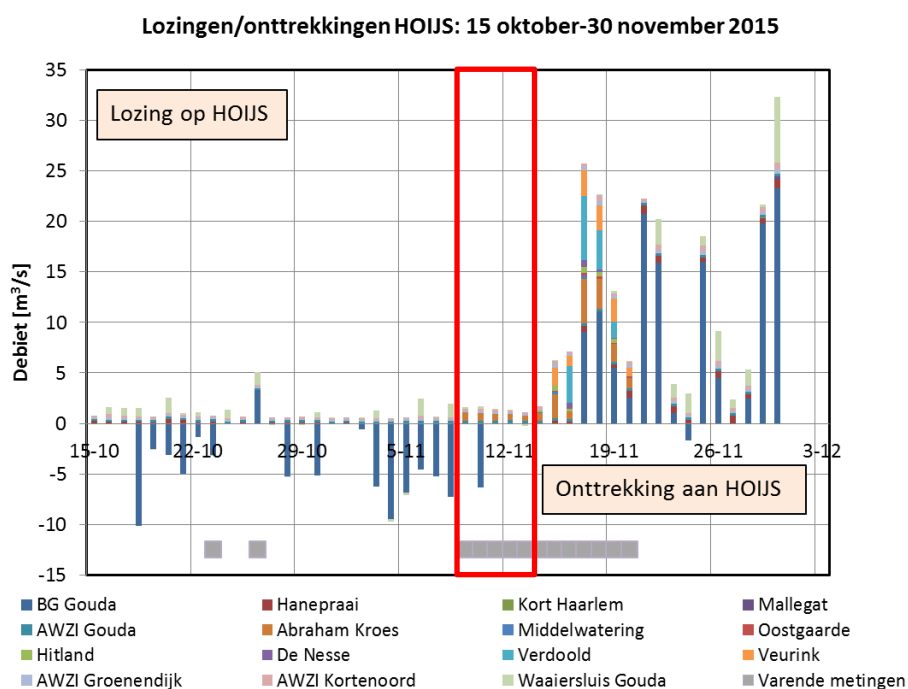
Tabel 4.1 Uitgevoerde metingen in de Hollandsche IJssel gedurende de periode 12 oktober t/m 30 november 2015.

Type	Periode	Traject	Type
Lozingen/onttrekkingen	15 okt. t/m 8 nov. en 21 t/m 30 nov. 2015	8 locaties	volumes of debieten
	9 t/m 20 nov. 2015	15 locaties	
Vaste metingen	12 okt. t/m 20 nov. 2015	km. 17 – km. 8: per km.	geleidendheid en temperatuur langs de oever en 1 m boven de bodem. Continu.
Varende metingen	23 en 26 okt. 2015 9 t/m 20 nov. 2015	km. 20 - km. 1 (of korter) per km.	geleidendheid en temperatuur in verticale profielen in midden van de rivier. Tussen 09:00 en 17:00 uur.

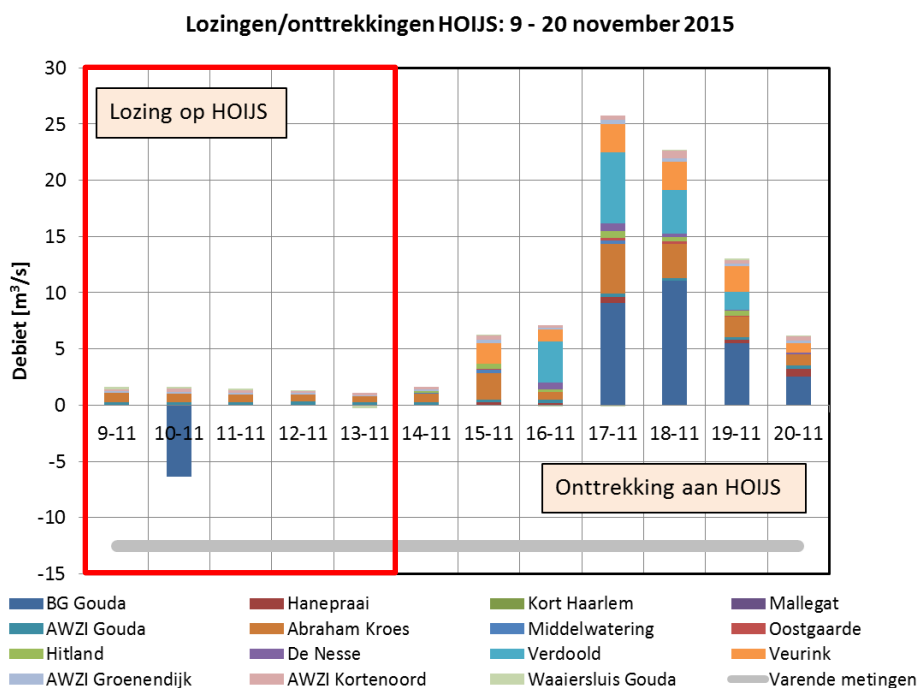
4.1 Lozingen en onttrekkingen

De grootte van de lozingen en onttrekkingen langs de Hollandsche IJssel voor de periode 15 oktober t/m 30 november 2015 is weergegeven in Figuur 4.2. In totaal betreft dit 15 locaties. Van de locaties Abraham Kroes, Middelwatering, Oostgaarde, Hitland, De Nesse, Verdoold en Veurink zijn alleen gegevens toegeleverd voor de periode 9 t/m 20 november 2015.

Vóór 15 november is er nauwelijks geloosd ($< 2 \text{ m}^3/\text{s}$ m.u.v. 26 oktober). In die periode is er wel regelmatig door het boezemgemaal Gouda tot $10 \text{ m}^3/\text{s}$ onttrokken. Vanaf 15 november maakten de weersomstandigheden (hevige neerslag) het noodzakelijk om op diverse locaties te lozen op de Hollandsche IJssel. Van de periode met de varende metingen (9 t/m 20 november) resteert dus de periode 9 t/m 14 november voor een bepaling van de dispersiecoëfficiënt. Omdat op 14 november de varende metingen niet verder gingen dan tot km. 7 en er ook sprake was van een middenstandsopzet is deze dag evenmin gebruikt voor de analyse. De periode 9 t/m 13 november is in Figuur 4.2 rood omkaderd; Figuur 4.3 geeft meer in detail de lozingen en onttrekkingen weer (9 t/m 20 november).



Figuur 4.2 Lozingen op en onttrekkingen aan de Hollandsche IJssel. Periode: 15 oktober 2015 t/m 30 november 2015. De grijze balk geeft aan op welke meetdagen varend is gemeten in de Hollandsche IJssel. De gebruikte meetdagen voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt vallen binnen de rode rechthoek.

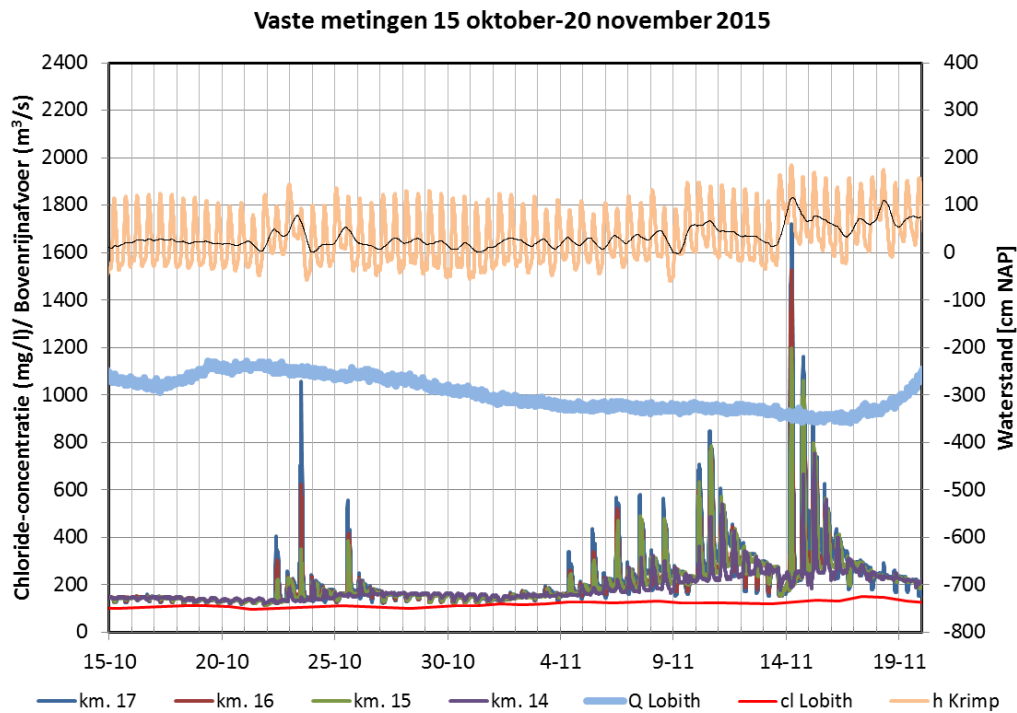


Figuur 4.3 Lozingen op en onttrekkingen aan de Hollandsche IJssel. Periode: 9 t/m 20 november 2015. De grijze balk geeft aan op welke meetdagen varend is gemeten in de Hollandsche IJssel. De gebruikte meetdagen voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt vallen binnen de rode rechthoek.

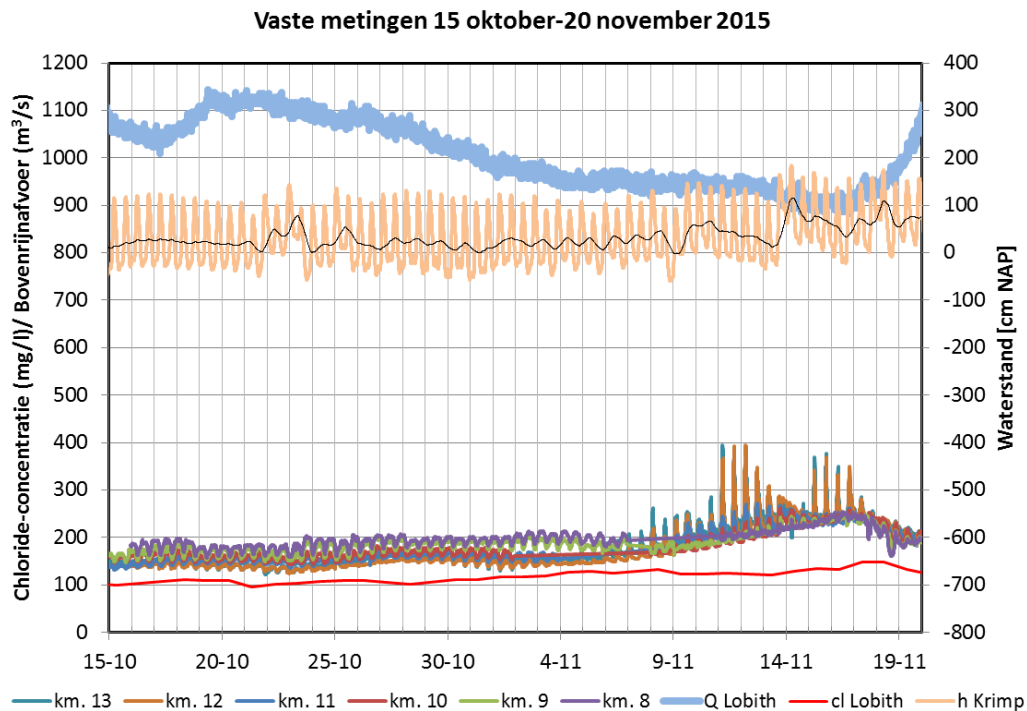
4.2 Chlorideconcentraties

4.2.1 Vaste metingen

De gemeten chlorideconcentraties in de vaste locaties gedurende de periode 15 oktober t/m 20 november 2015 zijn weergegeven in Figuur 4.4 (km. 17 t/m km. 14) en Figuur 4.5 (km. 13 t/m km. 8). In deze figuren zijn ook vermeld de Bovenrijnafvoer en de chlorideconcentratie bij Lobith en de waterstand bij Krimpen a/d IJssel. Vóór 4 november is er alleen sprake van verzilting van het afwaartse deel van de Hollandsche IJssel (tot km. 14) tussen 22 en 25 oktober. De pieken in de chlorideconcentratie (400-1000 mg/l) zijn het gevolg van middenstandsveranderingen; de Bovenrijnafvoer is 1100 m³/s. Voorbij km. 14 is er geen toename van de chlorideconcentratie waarneembaar en de variatie van de zoutconcentratie is het gevolg van de eb- enloedbeweging. De periode vóór 4 november is dus niet geschikt voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt. Vanaf 4 november treedt verzilting van de Hollandsche IJssel zeewaarts van km. 14 op; de Bovenrijnafvoer is dan gedaald tot ongeveer 950 m³/s. Door een middenstandsverlaging neemt op 9 november de chlorideconcentratie af, weer gevolgd door een toename op 10 november als gevolg van een middenstandsverhoging en mogelijk ook door een onttrekking te Gouda op die dag (zie Figuur 4.3). Gedurende de dagen 11, 12 en 13 november neemt de chlorideconcentratie zeewaarts van km. 14 geleidelijk af. Op deze dagen wordt nauwelijks geloosd op de Hollandsche IJssel. Wel is er sprake van een geringe daling van de gemiddelde waterstand (0,5 m gedurende 3 dagen) wat kan hebben geleid tot een gemiddeld debiet naar de Nieuwe Maas van orde 5 m³/s. Opwaarts van km. 14 wordt echter geen afname van de chlorideconcentraties waargenomen (Figuur 4.5) zodat het niet waarschijnlijk is dat de dalende waterstand verantwoordelijk is voor de afname van de chlorideconcentratie in de mond. Verondersteld wordt dat de uitwisseling van water met de Nieuwe Maas de afname van de zoutconcentratie in de mond veroorzaakt (uitstroming van relatief zout water en instroming van relatief zoet water). De middenstandsopzet op 14 november veroorzaakt een piek chlorideconcentratie van 1700 mg/l. De tweede piek op die dag is al lager (1200 mg/l) en tijdens de opvolgende 2-3 dagen (tot 17 november) neemt de chlorideconcentratie verder af. Dit is nog voordat wordt begonnen met lozingen van 20-25 m³/s op 17 en 18 november. Verzilting opwaarts van km. 13 begint op 8 november.



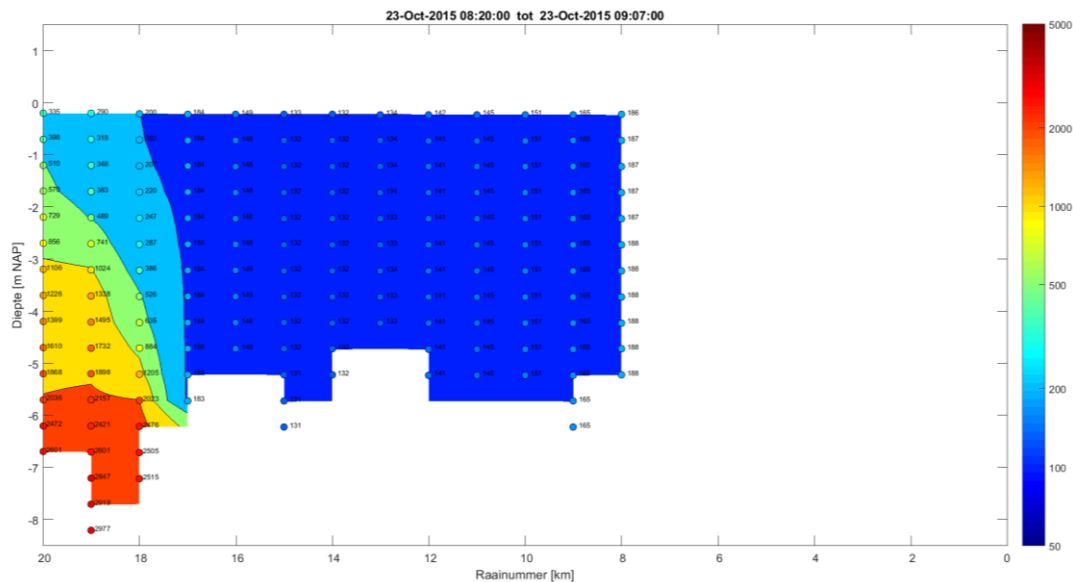
Figuur 4.4 Chlorideconcentraties in de vaste meetpunten km. 17 t/m km. 14. De Bovenrijnafvoer en chlorideconcentratie in Lobith en de waterstand in Krimpen a/d IJssel (met voortschrijdend gemiddelde) zijn eveneens weergegeven.



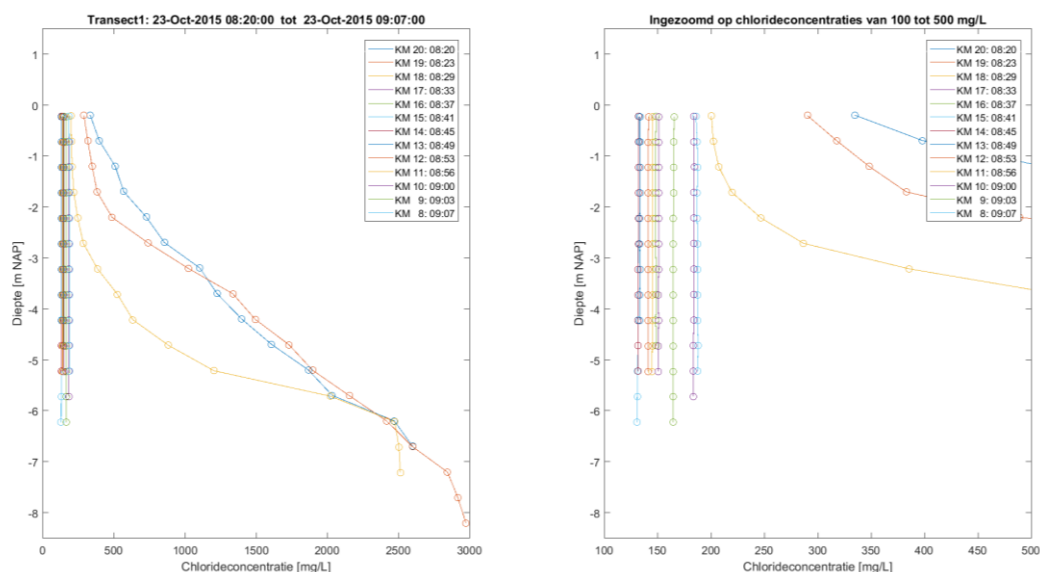
Figuur 4.5 Chlorideconcentraties in de vaste meetpunten km. 13 t/m km. 8. De Bovenrijnafvoer en chlorideconcentratie in Lobith en de waterstand in Krimpen a/d IJssel (met voortschrijdend gemiddelde) zijn eveneens weergegeven. De schaal voor de chlorideconcentratie verschilt van die in Figuur 4.4.

4.2.2 Varende metingen

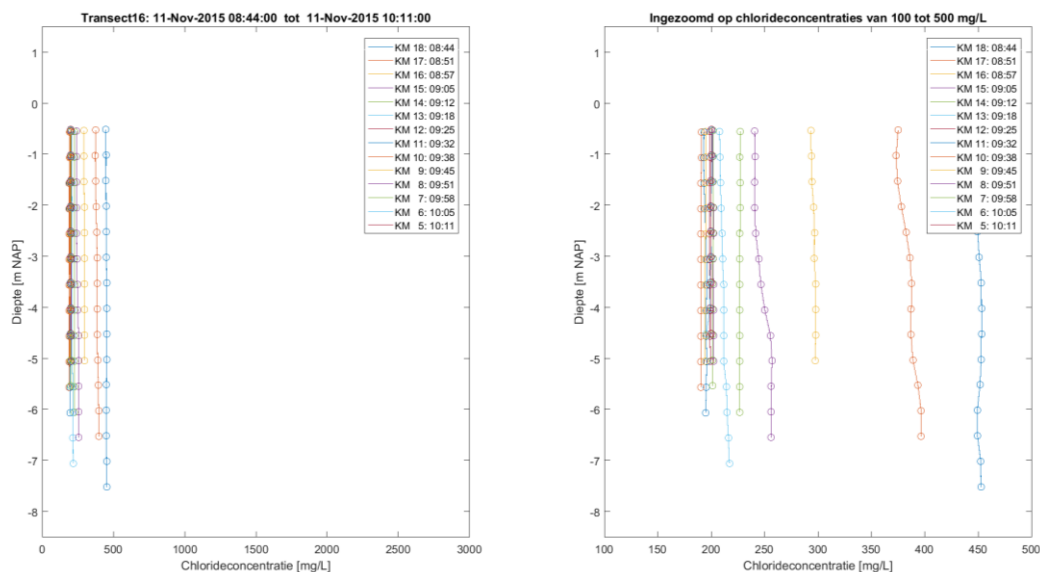
De varende metingen hebben een geringe temporele resolutie waar het chlorideconcentraties in een specifieke locatie betreft. Daarom lenen zij zich minder voor de kwantitatieve analyse in Hoofdstuk 5. Wel wordt met de metingen inzicht verkregen in de verticale en longitudinale verdeling van de concentraties. In Figuur 4.6 wordt deze verdeling getoond voor 23 oktober. De contourklassen zijn hier logaritmisch gekozen om voldoende resolutie te verkrijgen in het bereik met lage chlorideconcentraties. Op 23 oktober is de verticale zoutverdeling in de mond van de Hollandsche IJssel (km. 20 – km. 18: zeewaarts van de Stormvloedkering) sterk gelaagd met concentraties tot 3000 mg/l bij de bodem en 300 mg/l aan het oppervlak. Figuur 4.7 (linker venster) toont deze gelaagdheid. Vanaf km. 17 is de verticale zoutverdeling gemengd en de concentraties zijn kleiner dan 200 mg/l, zie rechter venster in Figuur 4.7. De sterke gelaagdheid en de hoge concentraties in de mond zijn mogelijk het gevolg van de middenstandsopzet op 23 oktober. Op 14 november (hier niet getoond) is de gelaagdheid en de chlorideconcentratie minder groot al is er op die dag niet gemeten in km. 20 en km. 19. De concentratieprofielen op 11 november 2015 in km. 18 en opwaarts hiervan zijn uniform.



Figuur 4.6 Longitudinale en verticale verdeling chlorideconcentratie. Periode: 23 oktober 2015 08:20 – 09:07. Contourklassen zijn logaritmisch.



Figuur 4.7 Verticale profielen van chlorideconcentratie in km. 20 - km. 8. Periode: 23 oktober 2015 08:20 – 09:07. Schaal horizontale as: 0-3000 mg/l (links) en 100-500 mg/l (rechts).



Figuur 4.8 Verticale profielen van chlorideconcentratie in km. 18 - km. 5. Periode: 11 november 2015 08:44 – 10:11. Schaal horizontale as: 0-3000 mg/l (links) en 100-500 mg/l (rechts).

4.3 Overige metingen en gegevens

Op de Hollandse IJssel zijn met een ADCP ook stroomsnelheden gemeten. Deze zijn nog niet verwerkt en geanalyseerd. Ook zijn er in november 2015 door Havenbedrijf Rotterdam op de Lek en de Noord chlorideconcentraties gemeten.

4.4 Keuze meetdagen voor analyse

De periode 9 t/m 14 november 2015 is het meest geschikt voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt, omdat in die periode de grootte van de lozingen en onttrekkingen zeer

beperkt zijn geweest, zie Par. 4.1. Alleen op 10 november is er netto bijna 5 m³/s water onttrokken aan de Hollandsche IJssel als totaal van een netto onttrekking door het boezemgemaal Gouda (6,4 m³/s) en kleine lozingen elders (AWZI's Gouda, Groenendijk en Kortenoord, Abraham Kroes, en de Waaiersluis Gouda).

Opmerkingen bij de meetdagen tussen 9 en 20 november zijn vermeld in Tabel 4.2. Op 9 en 11 t/m 14 november waren de lozingen en onttrekkingen minimaal. In deze periode is op 10 t/m 13 november tot dichtbij Gouda varend gemeten. Op 9 en 10 november zijn er hiaten in de registraties van de vaste opnemers in km. 8. Op 9, 13 en 14 november waren er middenstandsvariaties. Dit heeft uiteindelijk geleid tot de keuze voor de meetdagen 9 t/m 13 november voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt. De minst verstoorde cq. meest geschikte meetdagen zijn 11 en 12 november.

Tabel 4.2 Opmerkingen bij de meetdagen. De groene cellen betreffen een positieve kwalificatie; de rode cellen een negatieve voor de afleiding van de dispersiecoëfficiënt.

	November 2015											
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Geen lozingen en onttrekkingen (totaal < 1m ³ /s)												
Varende metingen tot km. 5 of verder	km 7	km 4	km 5	km 3	km 4	km 7	km 8	km 7	km 6	km 4	km 1	km 7
Hiaten vaste metingen	km 8	km 8					km 16	km 16	km 16	km 16	km 16	km 16
Onttrekking Gouda												
Lozingen diverse locaties												
Middenstands-opzet												
Gebruikte meetdagen voor analyse												
Minst verstoorde meetdagen												

De hiaten in de vaste metingen op 9 en 10 november in km. 8 zijn opgevuld met de varende metingen.

5 Analyse

5.1 Beschrijving verzilting mond Hollandsche IJssel

In Bijlage D wordt de verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel in detail beschreven. Dit wordt gedaan voor de periode 2 t/m 17 november 2015 aan de hand van gemeten chlorideconcentraties t.p.v. de van Brienoordbrug (NAP-650 cm), Krimpen a/d IJssel (NAP-550 cm), km. 17 (1 m boven de bodem) en km. 12 (1 m boven de bodem). Gedurende deze periode is verzilting van de Hollandsche IJssel opgetreden als gevolg van de grote zoutindringing in de Nieuwe Maas bij lage Bovenrijnafvoeren en ten gevolg van middenstandsveranderingen (op- en afwaaiing). De resultaten worden in deze paragraaf samengevat.

- 1 Direct na hoogwater begint de Hollandsche IJssel uit te stromen. In de Nieuwe Maas is er dan nog sprake van een vloedstroming. Als zout water in de Nieuwe Maas pas na hoogwater de Hollandsche IJssel bereikt treedt geen verzilting van de Hollandsche IJssel op.
- 2 Als direct na laagwater de Hollandsche IJssel begint in te stromen treedt vaak gedurende 1 uur een toename van de chlorideconcentratie op in Krimpen en even later in km. 17. Vermoed wordt dat de mond van de Hollandsche IJssel tijdens de (lange) periode met laagwater verzilt raakt. Dit is het geval als de Bovenrijnafvoer zo laag is dat er rond laagwater nog verzilt water in de Nieuwe Maas richting zee passeert (rond laagwater is er nog een ebstroming in de Nieuwe Maas).
- 3 De in punt 2 beschreven verziltingskarakteristiek treedt bij lage afvoeren niet elke getijperiode op. De grootte van de chlorideconcentratie, zoals gemeten bij de van Brienoordbrug, lijkt hierbij bepalend. Als deze tijdens laag water laag cq. hoog is treedt geen cq. wel verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel op. De dagelijkse ongelijkheid lijkt hierbij een beïnvloedende factor.
- 4 De "zoutprop" die volgens punt 2 de Hollandsche IJssel is ingestroomd, wordt na hoogwater weer richting Nieuwe Maas getransporteerd.
- 5 Omdat begin november gedurende het getij zout water in de mond van de Hollandsche IJssel heen en weer beweegt en er regelmatig (niet elke getijperiode) een "injectie" van verzilt water vanaf de Nieuwe Maas plaatsvindt, nemen de chlorideconcentraties in de mond van de Hollandsche IJssel langzaam toe. Dit leidt na verloop van tijd tot een geringe toename van de chlorideconcentratie in km. 12. Dat is voorbij de vloedweg en dus het gevolg van dispersief transport van zout.
- 6 De toename van de chlorideconcentratie in de mond van de Hollandsche IJssel ten gevolge van een middenstandsopzet kunnen veel groter zijn dan de toename zoals hiervoor beschreven voor rustige condities. Als het zout op de Nieuwe Maas tijdens een middenstandsopzet pas na hoogwater de Hollandsche IJssel bereikt treedt geen verzilting van de Hollandsche IJssel op. De komledigingsstroom is in staat het zoute water tegen te houden, zie ook punt 1.
- 7 Wel kan tijdens de *volgende* getijperiode sterke verzilting van de Hollandsche IJssel optreden. Als tijdens opgaand tij de Nieuwe Maas nog verzilt is, zal direct na laagwater de komvullingsstroom zout water de Hollandsche IJssel doen instromen. Tijdens afgaand tij zal het zoute water weer in de richting van de Nieuwe Maas worden getransporteerd maar door dispersief transport kan een deel van het zout achterblijven.
- 8 Als zout water pas laat tijdens de vloedstroming in de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel instroomt (d.i. vóór hoogwater), wordt het zoute water tijdens afgaand tij de

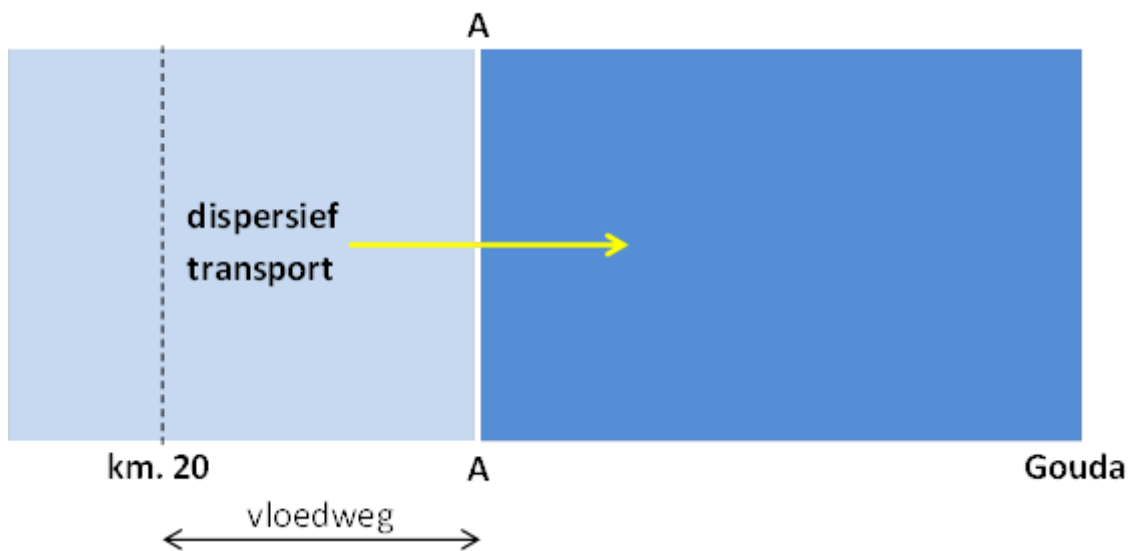
Hollandsche IJssel weer uitgespoeld. Een tijdelijke toename van de chlorideconcentratie in de mond leidt dan niet tot verzilting van Gouda.

Samenvattend geldt dat verzilting van de Hollandsche IJssel tot Gouda kan optreden als sprake is van permanente verzilting. De chlorideconcentratie in de mond is dan gedurende de gehele getijperiode verhoogd ten opzichte van de achtergrond waarde. Als de mond tijdelijk verzilt (de chlorideconcentratie is dan gedurende een deel van de getijperiode gelijk aan de achtergrond waarde) dan houdt dit in dat gedurende afgaand tij eerder ingestroomd verzilt water weer wordt uitgespoeld.

5.2 Afleiding dispersiecoëfficiënt

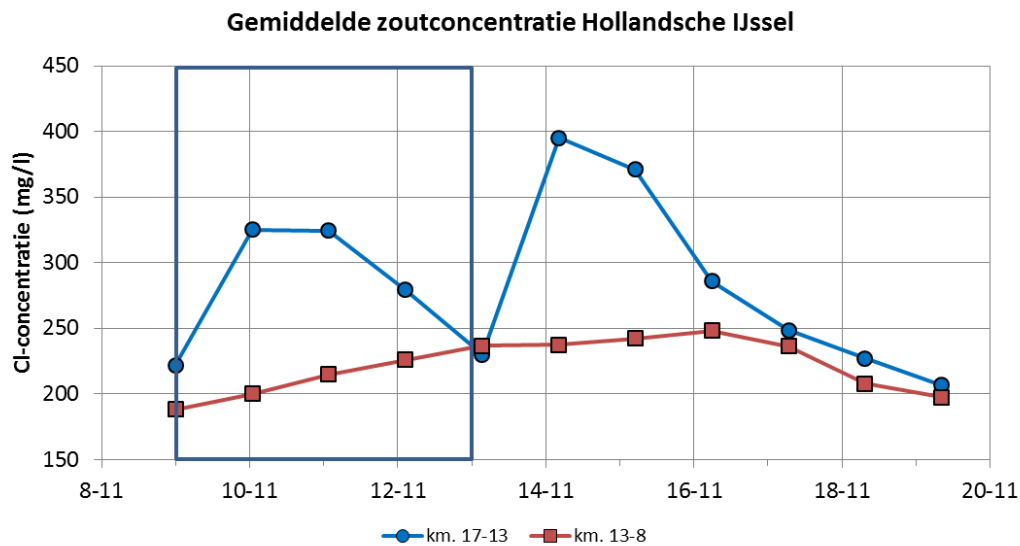
De dispersiecoëfficiënt wordt bepaald door een zoutbalans op te stellen voor het gebied voorbij de vloedweg in de mond, zie

Figuur 5.1. Zout afkomstig van de Nieuwe Maas kan ten gevolge van advectief transport niet verder komen dan de vloedweg. Dit betekent, dat de zoutconcentratie in het balansgebied voorbij de vloedweg alleen kan toenemen ten gevolge van dispersief transport door doorsnede A-A. In het gebied tussen km. 20 en doorsnede A-A wordt de chlorideconcentratie bepaald door de concentratie van het water dat bij opkomend tij vanuit de Nieuwe Maas de Hollandsche IJssel instroomt. Als de Bovenrijnafvoer daalt, neemt de chlorideconcentratie van het instromende water toe. Het gebied fungeert dus als randvoorwaarde voor het balansgebied.



Figuur 5.1 Principeschets zoutbalans voor afleiding van de dispersiecoëfficiënt K .

Figuur 5.2 laat de gemiddelde chlorideconcentratie voor de twee deelgebieden zien. Duidelijk is te zien dat het gebied tussen km. 17 en km. 13 sterk door de omgevingscondities wordt bepaald (Bovenrijnafvoer en middenstandsveranderingen). Voor het deelgebied tussen km. 13 en km. 8 is dit slechts indirect het geval en neemt de chlorideconcentratie geleidelijk toe als gevolg van dispersief transport vanuit het relatief zoute gebied tussen km. 17 en km. 13.



Figuur 5.2 Gemiddelde chlorideconcentratie per meetdag in de deelgebieden km. 17-13 en km. 13-8. De meetdagen die zijn gebruikt voor de zoutbalans zijn omljnd.

De zoutbalans wordt opgesteld voor tijdsgemiddelde waarden van de chlorideconcentratie. Gekozen is voor een middelingsperiode van 2 getijden om het effect van de dagelijkse ongelijkheid weg te filteren. Ook wordt bij een langere middelingsperiode het effect van het niet volledig cyclisch zijn van het getij verminderd. Als er geen lozingen en onttrekkingen zijn en de opwaartse rand bij Gouda ligt waar het dispersief transport nul is, wordt de balansvergelijking:

$$A_{AA} K_{AA} \frac{d\tilde{c}_{AA}}{dx} = V \frac{d\tilde{c}_{\text{gebied}}}{dt} \quad (5.1)$$

met A de oppervlakte van de dwarsdoorsnede in doorsnede AA , K de dispersiecoëfficiënt in doorsnede AA , \tilde{c}_{AA} de chlorideconcentratie in doorsnede AA gemiddeld over 2 getijperioden (24 uur 50 min), $\tilde{c}_{\text{gebied}}$ de chlorideconcentratie gemiddeld over 2 getijperioden en vervolgens gemiddeld over de meetlocaties in het balansgebied, x de afstand langs de Hollandsche IJssel vanaf de mond (positief in de richting van Gouda), V het watervolume van het balansgebied en t de tijd.

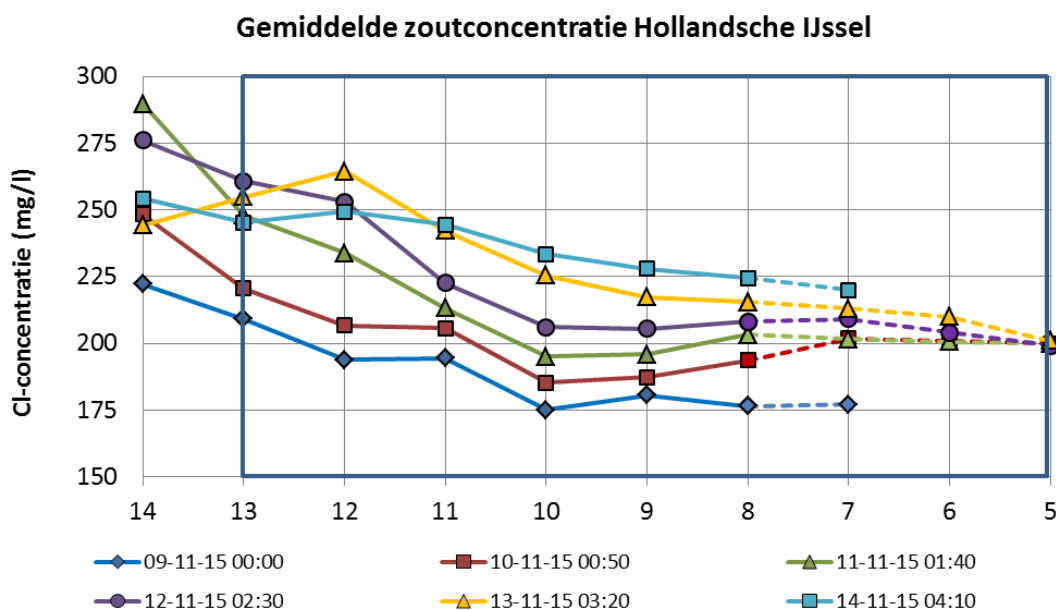
Voor de balansen zijn meerdere varianten beschouwd om het effect van onderliggende aannamen op de afgeleide dispersiecoëfficiënt vast te stellen:

- *Verschillende meetdagen.* De concentratieverandering van het balansgebied wordt steeds bepaald voor twee opeenvolgende meetdagen: 9/10, 10/11, 11/12 en 12/13 november. Op deze wijze wordt de invloed van de omgevingsomstandigheden vastgesteld. Middenstandsveranderingen kunnen een netto komvullingsdebiet tot gevolg hebben en dus tot een advectief zouttransport door de randen van het balansgebied leiden. Dit netto advectieve transport wordt niet meegenomen in de zoutbalans en leidt dus tot een onzekerheid in K .
- *Verschillende balansgebieden.* Met de vaste opnemers is gemeten t/m km. 8. De opwaartse rand van het balansgebied is dan niet gesloten: er is een dispersief transport en, indien geloosd of onttrokken wordt, ook advectief transport ter plaatse van de rand

(zie hierna). Als opwaartse rand van het balansgebied is gekozen voor km. 8 en km. 5. In het laatste geval zijn voor km. 7, 6 en 5 de chlorideconcentraties van de varende metingen gebruikt. Dit zijn slechts enkele metingen op een dag zodat in deze raaien de tijdsgemiddelde concentratie niet nauwkeurig kan worden bepaald. Ook de locatie van de afwaartse rand is gevarieerd (km. 13, 12 en 11).

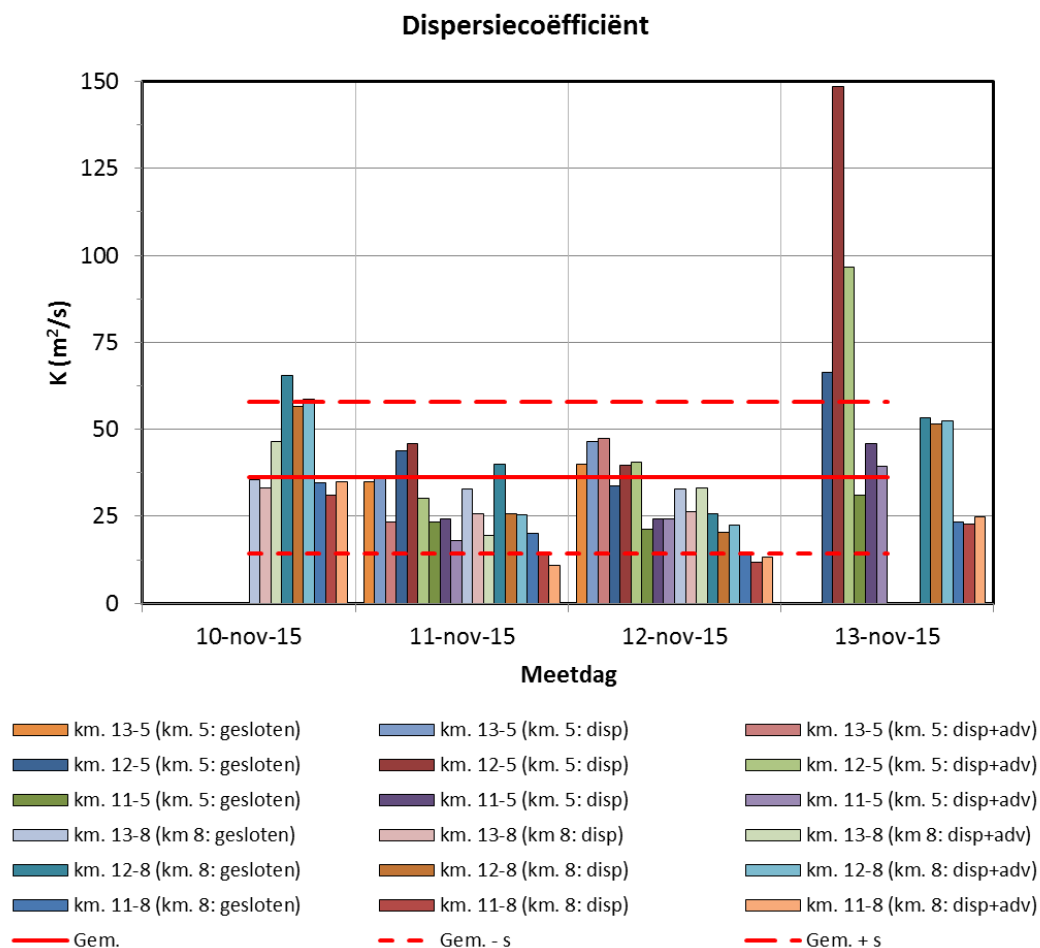
- *Verschillende randtransporten.* Er zijn verschillende typen transporten op de randen van het balansgebied gebruikt:
 - a) Op de benedenrand is er alleen een dispersief transport; de bovenrand van het balansgebied is gesloten verondersteld (geen transport). In dit geval hoeven geen aannamen te worden gedaan over het verloop van de dispersiecoëfficiënt langs de Hollandsche IJssel.
 - b) Op de bovenrand is er een dispersief transport waarbij de dispersiecoëfficiënt gelijk wordt verondersteld aan die op de benedenrand: de dispersiecoëfficiënt is onafhankelijk van de locatie langs de Hollandsche IJssel.
 - c) Op de beneden- en bovenrand is er een dispersief en een advectief transport. Het advectief transport is het gevolg van de lozingen op 9, 11, 12 en 13 november ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) en de netto onttrekking op 10 november ($5 \text{ m}^3/\text{s}$). Voor het dispersief transport wordt verondersteld dat de dispersiecoëfficiënt lineair afneemt vanaf de benedenrand van het balansgebied tot $0 \text{ m}^2/\text{s}$ bij de Waaiersluis (km. 0).

Als voorbeeld wordt in Figuur 5.3 het balansgebied km. 13 – km. 5 getoond met de tijdsgemiddelde chlorideconcentraties per km, zoals gemeten op de meetdagen 9 t/m 14 november 2015. De gemiddelde breedte en waterdiepte voor dit traject is resp. 141 m en 4,2 m. In de figuur is te zien dat op 9 november geen gegevens beschikbaar zijn in km. 6 en 5, zodat geen dispersiecoëfficiënt kan worden afgeleid. Op 13 november neemt de concentratie ter plaatse van de benedenrand af in zeevaartse richting wat tot onrealistisch waarden voor de dispersiecoëfficiënt leidt.



Figuur 5.3 Gemiddelde chlorideconcentratie voor het balansgebied km. 13 - km. 5 (blauwe rechthoek) op de meetdagen 9 t/m 14 november 2015. De gradiënt voor het dispersief transport in km. 13 is afgeleid uit de metingen in km. 14, 13 en 12; de gradiënt in km. 5 is afgeleid uit de metingen in km. 6 en 5. De gestippelde lijnen betreffen de chlorideconcentraties volgens de varende metingen.

De resultaten voor de dispersiecoëfficiënt, zoals afgeleid voor alle varianten, zijn weergegeven in Figuur 5.4.



Figuur 5.4 Berekende dispersiecoëfficiënten K voor de verschillende varianten. De getoonde waarden voor K op 10 november zijn bepaald met de metingen op 9 en 10 nov. etc.

gesloten: dispersief transport op zeewaartse rand; geen transport op landwaartse rand.

disp: dispersief transport op beide randen. K op beide randen hetzelfde verondersteld.

disp+adv: dispersief transport op beide randen. K lineair afnemend verondersteld tot Gouda. Advectief transport op beide randen t.g.v. lozingen/onttrekkingen.

De berekende dispersiecoëfficiënten variëren tussen 10 en 150 m^2/s met een gemiddelde van 36 m^2/s en een standaardafwijking van 22 m^2/s , zoals getoond in Figuur 5.4. Op 13 november zijn er twee uitschieters en ook andere varianten zijn buiten beschouwing gelaten, omdat deze tot onrealistische resultaten leiden (negatieve waarden voor K). Mogelijk is dit veroorzaakt door de middenstandsopzet op 13 november. Voor de meetdagen 10, 11 en 12 november varieert K tussen 10 en 65 m^2/s met een gemiddelde en standaardafwijking van 31 en 13 m^2/s .

5.3 Vergelijking met literatuur

In de literatuur zijn veel gegevens beschikbaar over de dispersiecoëfficiënt K_0 voor permanente rivierstroming. Ook zijn vergelijkingen afgeleid waarbij K_0 een functie is van de breedte-diepteverhouding van de rivier (W/h) en de verhouding tussen de profielgemiddelde stroomsnelheid en de schuifspanningssnelheid (\bar{u}/u_*), zie Bijlage C. Fischer et al. (1979) leiden af voor de dispersiecoëfficiënt voor een oscillerende stroming:

$$K = \gamma K_0 \quad (5.2a)$$

waarbij γ een functie is van de verhouding tussen de periode van de oscillerende stroming T en de mengingstijd in dwarsrichting T_c :

$$\gamma = f\left(\frac{T}{T_c}\right) \quad (5.2b)$$

Voor een getijstroming wordt afgeleid dat $\gamma < 1$, zie Bijlage B. Dit betekent, dat de dispersiecoëfficiënt K voor getijomstandigheden kleiner is dan de dispersiecoëfficiënt voor permanente rivierstroming K_0 .

In Tabel 5.1 wordt K_0 getoond, zoals berekend met de voorspellers genoemd in Bijlage C. Hierbij zijn als karakteristieke waarden voor km. 13 gebruikt (zie Figuur 2.2, Figuur 2.3 en Figuur 2.11):

- breedte $W = 150$ m;
- waterdiepte $h = 4,5$ m
- gemiddelde stroomsnelheid $\bar{u} = 0,15$ m/s;
- schuifspanningssnelheid $u_* = 0,010$ m/s ($C = 45 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$ met $\bar{u}/u_* = C/\sqrt{g}$).

Tabel 5.1 K_0 volgens dispersieformuleringen van Bijlage C met karakteristieke waarden halverwege de Hollandsche IJssel voor breedte, waterdiepte, gemiddelde stroomsnelheid en schuifspanningssnelheid.

Referentie	K_0 (m^2/s)
Liu (1977)	36
Iwasa & Aya (1991)	104
Koussis & Rodrigues (1998)	31
Fischer (1975)	119
Fischer (1979)	359
Seo & Cheong (1998)	110
Kashefipour & Falconer (2002)	105
Sahay & Dutta (2009)	76
Shahidi & Taghipour (2012)	54
Shahidi & Taghipour (2012)	46

Als de berekende K_0 volgens Fischer et al. (1979) buiten beschouwing wordt gelaten⁴, volgt dat K_0 varieert tussen 30 en 120 m^2/s met als gemiddelde 76 m^2/s . De dispersiecoëfficiënt voor getijcondities zal volgens vgl. (5.2a) met $\gamma < 1$ dus kleiner zijn. In Bijlage B (Par. B.3) is K berekend met vgl. (5.2). Rekening houdend met de onzekerheid in de constante voor laterale menging volgen voor K waarden van 2-6 m^2/s .

Met de vergelijking van Thatcher-Harleman voor 'shear dispersion, zie Par. A.2, volgt $K = 3 m^2/s$. Hierbij zijn niet de momentane snelheid en waterdiepte gebruikt maar de getijgemiddelde waarden, resp. 0,15 m/s en 4,5 m.

5.4 Discussie

De 'shear dispersion' van maximaal orde 5 m^2/s volgens Fischer en Thatcher-Harleman verklaart maar een klein deel van de dispersiecoëfficiënt zoals bepaald uit de metingen, nl. 10-65 m^2/s . Dit kan het volgende betekenen:

- De vergelijkingen van Thatcher-Harleman en Fischer onderschatten de dispersie;
- De uit de metingen afgeleide waarden voor de dispersiecoëfficiënt geven een overschatting. In dat geval zou de ondergrens van het bereik voor K moeten worden aangehouden, nl. $K = 10 m^2/s$.
- Andere processen dragen bij aan dispersie. Dit kunnen zijn dispersie als gevolg van dichtheidsstromingen, dispersie door bochtstroming, onregelmatigheden langs de oever en bodem, dispersie door de aanwezigheid van kombergingsgebieden langs de rivier etc.

⁴ In Fischer (1975) worden andere keuzes gemaakt voor de lengteschaal waarover menging plaatsvindt (nl. $0,7W$ i.p.v. W) en de constante die afgeleid is van de vorm van het snelheids- en concentratieprofiel ($0,07$ i.p.v. $0,1$), zie Par. B.2.

Het is bekend dat andere dispersiemechanismen significant kunnen bijdragen aan de totale dispersie. Zo kan in principe de geringe lozing van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ tijdens de metingen geleid hebben tot een vergroting van de dispersiecoëfficiënt met $10\text{-}18 \text{ m}^2/\text{s}$, zie Par. B.3 voor een eerste globale schatting. Verder zijn er dispersieve processen die niet in een dispersieformulering als vgl. (3.6) zijn uitgedrukt, zoals de dispersie ten gevolge van bochten en doodwaterzones. Deze overige processen kunnen in een restterm worden ondergebracht, bijvoorbeeld de f1-term in vgl. (3.6).

6 Samenvatting, onzekerheden en aanbevelingen

6.1 Samenvatting

In dit rapport is achtereenvolgens ingegaan op: (i) de bepaling van de dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandsche IJssel op basis van uitgevoerde metingen in november 2015, (ii) een vertaalslag hiervan naar een lozingsdebiet als eerste grootte-orde schatting om de zoutindringing in de Hollandsche IJssel ten gevolge van dispersie te compenseren, (iii) de afzonderlijke bijdragen van dispersieve processen, (iv) het gebruik van voorspellende dispersieformuleringen en (v) tijdschalen van advectief en dispersief zouttransport

Afgeleide dispersiecoëfficiënt en grootte-orde compenserend debiet

Als op de Hollandsche IJssel sprake is van verzilting tot voorbij de vloedweg in de mond en er geen lozingen op en onttrekkingen aan de Hollandsche IJssel zijn, is de voortplanting van het zoutfront in de richting van Gouda het gevolg van dispersief transport. Dit transport kan worden tegengegaan door het instellen van een (netto) lozingsdebiet bij Gouda. De grootte van dit debiet wordt mede bepaald door de dispersiecoëfficiënt. Als deze coëfficiënt klein is, is het benodigde debiet voor de instandhouding van een stabiele situatie klein en vice versa.

- ⇒ Voor de Hollandsche IJssel is de dispersiecoëfficiënt afgeleid op basis van uitgevoerde metingen in november 2015. Een zoutbalans is opgesteld voor het gebied in de Hollandsche IJssel waar dispersieve transporten dominant zijn. Hierbij is nagegaan hoe gevoelig het resultaat is voor diverse aannamen. De dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandsche IJssel bedraagt 10 tot 65 m²/s afhankelijk van de grootte van het balansgebied en het veronderstelde transport op de bovenrand van het gebied (gesloten rand, dispersief transport of dispersief én advectief transport).
- ⇒ Een eerste schatting voor de grootte van het benodigde (netto) lozingsdebiet om te voorkomen dat de chlorideconcentratie bij Gouda 10% bedraagt van de toename in de mond is 1 tot 5 m³/s voor een karakteristieke dispersiecoëfficiënt van 20 tot 50 m²/s. Hierbij is verondersteld dat de dispersiecoëfficiënt over de gehele lengte van de Hollandsche IJssel hetzelfde is.
- ⇒ Onzekerheden die samenhangen met genoemde waarden voor de dispersiecoëfficiënt en voor het compenserend debiet worden besproken in Par. 6.2.

Afzonderlijke bijdragen van dispersieve processen

In de literatuur zijn voor *stationaire condities* (rivieren zonder getij) diverse voorspellers voor de dispersiecoëfficiënt voorhanden. Als deze voorspellers worden gebruikt voor de Hollandsche IJssel volgen waarden van 30 tot 110 m²/s, afhankelijk van de gekozen voorspeller.

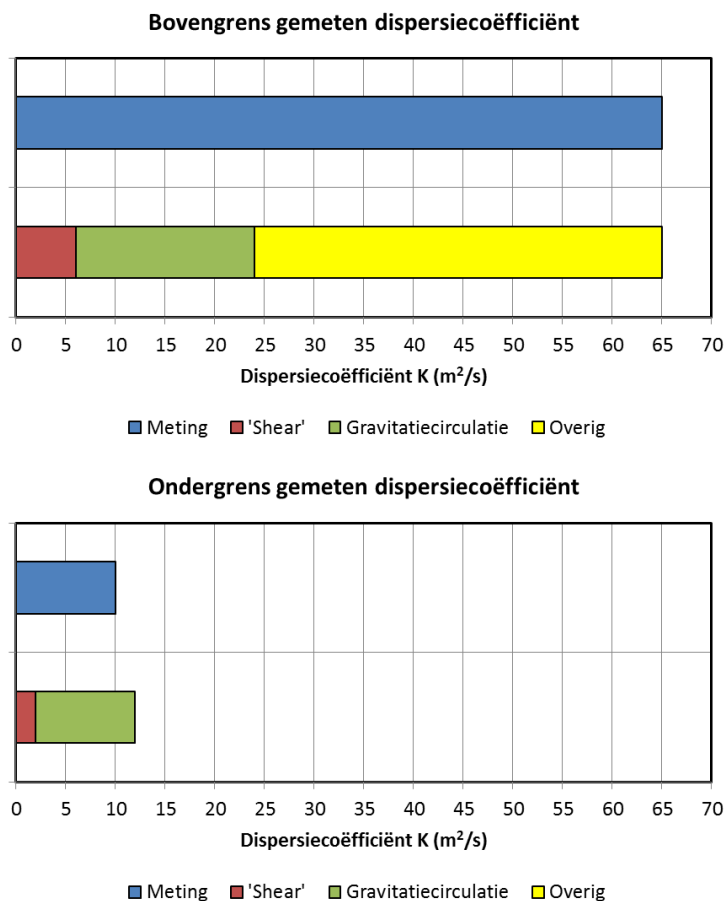
- ⇒ Onder getijomstandigheden is de dispersiecoëfficiënt echter kleiner dan onder stationaire omstandigheden. Gebruikmakend van twee formuleringen in de literatuur (Thatcher-Harleman en Fischer) volgt dan voor de dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandsche IJssel een waarde van 2 tot 6 m²/s. Deze waarde heeft alleen betrekking op de dispersie die het gevolg is van snelheidsverschillen (schering ofwel 'shear') in het dwarsprofiel.

Bovenstaande betekent dat andere dispersieve processen het verschil veroorzaken tussen de gemeten dispersiecoëfficiënt (10 tot 65 m²/s) en de 'shear dispersion' volgens Thatcher-Harleman en Fischer (2 tot 6 m²/s). De (geringe) lozing van water tijdens de meetperiode,

bochtstroming en de aanwezigheid van doodwaterzones (berging langs de rivier) kunnen de oorzaak zijn van dit verschil.

- ⇒ De invloed van de verticale gravitatiecirculatie op de dispersiecoëfficiënt kan worden beschreven met gangbare formuleringen als vgl. (3.6), welke is gebaseerd op de Thatcher-Harleman vergelijking, en vgl. (B.17) volgens Kuijper en Van Rijn (2011). In het laatste geval wordt voor de dispersiecoëfficiënt een waarde afgeleid van 10 tot 18 m^2/s voor een lozingsdebiet van 1 m^3/s .
- ⇒ Voor het bepalen van de effecten van andere processen (doodwaterzones, bochtstroming) is nadere studie nodig.

De resultaten zoals hiervoor genoemd worden samengevat in Figuur 6.1:



Figuur 6.1 Dispersiecoëfficiënten K volgens metingen en voor deelprocessen.

Boven: bovengrens K volgens metingen

Onder: ondergrens K volgens metingen.

- In het bovenste venster wordt uitgegaan van de *bovengrens* van de dispersiecoëfficiënt volgens de metingen (= 65 m^2/s). De bovengrenzen voor de schattingen van de 'shear dispersion' en gravitatiedispersie zijn resp. 6 en 18 m^2/s . Overige processen zijn dan verantwoordelijk voor een dispersie van ongeveer 40 m^2/s .
- In het onderste venster van de figuur wordt uitgegaan van de *ondergrens* van de dispersiecoëfficiënt die bepaald is aan de hand van de metingen (= 10 m^2/s). De ondergrenzen voor de schattingen van de 'shear dispersion' en gravitatiedispersie zijn

resp. 2 en 10 m²/s. Deze beide processen kunnen dus de gemeten dispersie in principe verklaren en er zijn geen overige processen die resulteren in een dispersief transport.

Gebruik voorspellende dispersieformuleringen

Als uitgegaan wordt van de ondergrens voor de dispersiecoëfficiënt volgend uit de metingen (10 m²/s) dan kunnen de effecten van ingrepen (bijv. een verandering van het lozingsdebiet) dus in voorspellende zin worden meegenomen bij gebruik van een dispersieformulering zoals vgl. (3.6). Als uitgegaan wordt van de bovengrens voor de gemeten dispersiecoëfficiënt dan kan kennelijk slechts een deel van de gemeten dispersiecoëfficiënt met de dispersievergelijking worden voorspeld. In dat geval moet additionele dispersie worden voorgeschreven die het gevolg is van 'overige processen'. Voor de omstandigheden tijdens de metingen van november 2015 was deze extra dispersie 40 m²/s maar niet bekend is hoe deze dispersie varieert met de omgevingscondities of als gevolg van ingrepen. Een gevoeligheidsonderzoek naar de effecten van veranderingen van de dispersiecoëfficiënt is bij het uitvoeren van scenarioberekeningen dan raadzaam.

Tijdschalen

De tijdschaal voor advectief transport in de Hollandsche IJssel wordt bepaald door de grootte van het onttrekkingsdebiet. Bij een debiet van 10 m³/s is de tijdschaal voor het transport van zout vanaf de mond naar Gouda ongeveer 2 weken; bij grotere debieten is dit evenredig kleiner. De tijdschaal voor dispersief transport hangt af van de dispersiecoëfficiënt maar ook van de concentratie van het front dat wordt gevolgd t.o.v. de concentratie in de mond. Als deze concentratieverhouding klein is, loopt het zoutfront relatief snel en is de tijdschaal klein. Voor concentratieverhoudingen van 0,1 tot 0,5 en een karakteristieke dispersiecoëfficiënt van 50 m²/s varieert deze tijdschaal tussen 15 en 100 dagen. Als de dispersiecoëfficiënt kleiner is, is de tijdschaal voor het dispersief transport proportioneel groter. Bij deze afschatting is verondersteld dat de dispersiecoëfficiënt constant is over de gehele lengte van de riviertak.

6.2 Onzekerheden

Met de afleiding van de dispersiecoëfficiënt op basis van de uitgevoerde metingen is een belangrijke stap gezet om te komen tot een meer betrouwbare modellering van de zoutindringing in de Hollandsche IJssel. Er is echter nog een aantal onzekerheden, waarmee rekening moet worden gehouden bij toepassing van de resultaten voor toekomstige studies, zoals de instandhouding van een zoetwaterbel bij Gouda:

- Omdat een aantal zoutopnemers tijdens de meetcampagne niet optimaal hebben gefunctioneerd moest een correctie van de metingen worden uitgevoerd. Verder is als onderdeel van de analyse een aantal aannamen gedaan, wat heeft geleid tot een range voor de dispersiecoëfficiënt.
- De dispersiecoëfficiënt geldt voor halverwege de Hollandsche IJssel en voor de omgevingscondities (mate van verzilting mond, getij, lozingsdebieten etc.), zoals die zijn opgetreden ten tijde van de metingen. Voor andere locaties en condities zijn de waarden niet bekend en moet de dispersiecoëfficiënt worden voorspeld met een dispersieformulering.
- De dispersieformuleringen die momenteel in gebruik zijn voor het geven van een dergelijke voorspelling hebben hun eigen onzekerheid (zie bv. Daniels, 2016).

Voor het verkleinen van de onzekerheden worden in Par. 6.3 aanbevelingen gedaan: (i) het afleiden van een plaats afhankelijke dispersiecoëfficiënt m.b.v. SOBEK-simulaties, (ii) gebruik van een geverifieerd 3D-model op basis van de uitgevoerde metingen en afleiding met dit model van een dispersiecoëfficiënt door gebruik te maken van een analyse-'tool' als de

zoutfluxontrafelaar, (iii) nader onderzoek naar een voorspellende dispersieformulering, (iv) een literatuurstudie en (v) het uitvoeren van nieuwe metingen.

Door de onzekerheden in de dispersiecoëfficiënt is het nog niet mogelijk nauwkeurige uitspraken te doen over het benodigde lozingsdebiet om de zoutindringing in de Hollandsche IJssel ten gevolge van dispersieve processen tijdens een verziltingssituatie te compenseren. De in dit rapport genoemde grootte van 1 tot 5 m³/s betreft een vertaling van een veronderstelde dispersiecoëfficiënt van 20 tot 50 m²/s naar een eenvoudiger te interpreteren grootheid als een debiet. De schatting van het lozingsdebiet is verkregen op basis van een analytische benadering, waarbij is aangenomen dat de dispersiecoëfficiënt langs de Hollandsche IJssel constant is en ook niet wordt beïnvloed door de grootte van het lozingsdebiet. De analyse geeft aan dat het resultaat van deze vertaling afhankelijk is van een aantal factoren, zoals de mate en duur van de verzilting in de mond en de toename van de chlorideconcentratie bij Gouda. Als de variatie van de dispersiecoëfficiënt langs de Hollandsche IJssel bekend is, bijvoorbeeld zoals verkregen door kalibratie van het model, kan het benodigde lozingsdebiet worden afgeleid op basis van modelsimulaties.

6.3 Aanbevelingen

- 1 Aanbevolen wordt om met SOBEK simulaties uit te voeren met verschillende waarden voor de dispersiecoëfficiënt en de resultaten te vergelijken met de metingen met de vaste opnemers. Op deze wijze kan de mate van overeenstemming tussen meting en berekening worden vastgesteld voor verschillende waarden van de dispersiecoëfficiënt, waarbij de coëfficiënt kan variëren langs de Hollandsche IJssel.
- 2 Een geautomatiseerde procedure voor het kalibreren van de dispersiecoëfficiënt aan de hand van de metingen is mogelijk met behulp van data-assimilatie (OpenDA). Aanbevolen wordt de mogelijkheden daartoe voor SOBEK-3 te onderzoeken.
- 3 Voor de Hollandsche IJssel is een 3D-model beschikbaar (Friocourt, 2015). Aanbevolen wordt een verificatie van het model uit te voeren met de zoutmetingen van november 2015 en met gebruikmaking van de lozingen en onttrekkingen in het gebied.
- 4 Met het gekalibreerde 3D-model en gebruik van de zoutfluxontrafelaar (Kranenburg en Groenenboom, 2016)⁵ kan met modelsimulaties een dispersiecoëfficiënt worden afgeleid voor de Hollandsche IJssel.
- 5 Door Daniels (2016) is een generieke vorm van de dispersievergelijking opgesteld, waarmee verschillende beschikbare dispersieformuleringen in de literatuur kunnen worden getest. Voorgesteld wordt om deze tests uit te voeren voor de Hollandsche IJssel aan de hand van de beschikbare en nieuw uit te voeren metingen in de Hollandsche IJssel.
- 6 In de periode 1979 t/m 1982 is een uitgebreide studie uitgevoerd naar de toepasbaarheid van eendimensionale dispersiemodellering (Winterwerp, 1979, 1980a, 1980b, 1981, 1982a en 1982b). Voorgesteld wordt deze studie uit te breiden met inzichten die zijn verkregen gedurende de afgelopen decennia (bv. effecten van doodwaterzones en bochtstroming).
- 7 Het is het voornemen om tijdens volgende lage afvoersituaties opnieuw metingen uit te voeren in de Hollandsche IJssel. Het verdient dan aanbeveling om vaste opnemers te monteren over de gehele lengte van de Hollandsche IJssel (tot km. 0), zodat nauwkeuriger een massabalans voor zout kan worden opgesteld. Met de nieuwe metingen kan de onzekerheid worden verminderd die nu nog bestaat omdat de vaste

⁵ De zoutfluxontrafelaar is een 'tool' om vanuit resultaten van 3D modellen voor saliniteit in een estuarium zoutfluxcomponenten en equivalente dispersiecoëfficiënten te bepalen.

opnemers in km. 12 t/m km 8 niet goed gefunctioneerd hebben tijdens de metingen van november 2015, waardoor zij moesten worden gecorrigeerd aan de hand van de varende metingen. Voor de horizontale resolutie van de meetraaien wordt aanbevolen een afstand van 1 km over de gehele lengte van de Hollandsche IJssel; voor het aantal opnemers in verticale richting wordt voorgesteld ten minste 2 maar bij voorkeur 5. Het verdient de voorkeur de CTD-opnemers meer in het midden van de rivier te plaatsen, bijvoorbeeld bevestigd aan een vaarboei of, indien dit niet is toegestaan, aan een nieuw te plaatsen boei ernaast. Een onderzoek naar de meest geschikte cq. nauwkeurige CTD-opnemers wordt eveneens voorgesteld.

- 8 ADCP-metingen samen met CTD-metingen worden voorgesteld in bochten van de Hollandsche IJssel met als doel de breedte- en diepteverdeling van stroomsnelheid en zoutconcentratie vast te stellen en hieruit de dispersiecoëfficiënt af te leiden.
- 9 Voor een nieuwe meetcampagne verdient het aanbeveling deze uit te voeren tijdens een lage afvoersituatie zonder middenstandsveranderingen. De kans hierop is het grootst in de zomer. Zonder de aanwezigheid van lozingen en onttrekkingen kan dan eerst het zoutfront worden gevolgd tot voorbij km. 8. Vervolgens wordt met een lozingsdebiet te Gouda het zoutfront teruggedrongen. Met een varende boot kan de positie van het front worden "bewaakt". Aanbevolen wordt om de registraties van de vaste opnemers tijdens de metingen uit te lezen, zodat de beweging van het zoutfront goed kan worden bewaakt (ook na instelling van het lozingsdebiet). Bij het ter plaatse uitlezen kunnen dan tevens, indien nodig, de sensoren worden gecontroleerd op vervuiling en indien nodig opnieuw worden gekalibreerd.

7 Referenties

Aqua Vision, 2015. Zoutmetingen Hollandse IJssel oktober-november 2015. AV150182 definitief.

Daniels, J.A., 2016. Dispersion and dynamic one-dimensional modeling of salt intrusion in estuaries. Research proposal. 29 april 2016. Deltares, National University of Singapore and Delft University of Technology.

Eagleson, P.S., R.G. Dean, C.L. Bretschneider, F. Raichlen, D.R.F. Harleman, J.W. Johnson, A.T. Ippen, G.H. Keulegan and H.B. Simmons, 1966. Estuary and Coastline Hydrodynamics. McGraw-Hill.

Fischer, Hugo B., E. John List, Robert C.Y. Koh, Jörg Imberger and Norman H. Brooks, 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press.

Friocourt, Y.F., C. Kuijper, 2015. Verificatie 3D hydrodynamisch model Hollandsche IJssel voor verziltingsvraagstukken. Onderdeel KPP B&O Waterkwaliteitsmodelschematisaties 2014. 1209459. Deltares.

Harleman, Donald R.F. and M. Llewellyn Thatcher, 1974. Longitudinal dispersion and unsteady salinity intrusion in estuaries. La Houille Blanche. No. 1/2., pp. 25-33.

Hydrologic, 2013. Verkenning zoetwaterbuffer Hollandsche IJssel. P577.

Kranenburg, Wouter en Julien Groenenboom, 2016. Zoutfluxontrafelaar – nadere tests. Memo 1230069-000-ZKS-0032 d.d. 3 oktober 2016. Deltares.

Kuijper, Kees., 2015. Analyse debiet- en zoutmetingen Hollandsche IJssel. Rapport 1220106-003. Deltares.

Meijerink, J., 2015. Zoutmetingen Hollandsche IJssel oktober-november 2015. Rapport AV150182 definitief. Aqua Vision B.V.

Rijkswaterstaat, 1984. IJking chloridedeel ZWENDL Noordelijk Deltabekken. Stand van zaken september 1984. Notanummer 31.005.10. Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt Zuidwest.

Thatcher, M. Llewellyn and Donald R.F Harleman, 1972. A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries. Report No. MITSG 72-7. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts.

Winterwerp, J.C., 1979. Toepasbaarheid één-dimensionaal diffusie-model. Deel 2: homogene, permanente stroming. M 896 – 41 - 2. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1980a. Eén-dimensionale beschrijving van de zoutverdeling in de Rotterdamse Waterweg en Nieuwe Maas m.b.v. het dispersie-concept van Thatcher-Harleman. M896-42. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1980b. Toepasbaarheid één-dimensionaal diffusie-model. Homogene, getijstroming in kanalen. M 896 – 41 deel III. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1981. Toepasbaarheid eendimensionaal model. Inhomogene getijstroming. M 896 – 41 deel IV. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1982a. Toepasbaarheid eendimensionaal model. Deel 5: invloed doodwaterzones op de dispersie. M 896 – 41 deel V. Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C., 1982b. Toepasbaarheid eendimensionaal model. Een literatuurstudie. M 896 – 41 deel 1. Waterloopkundig Laboratorium.

A F3-term in Thatcher-Harleman dispersievergelijking

A.1 Relatie tussen Chézy- en Manning-ruwheid

$$\text{In SI-eenheden geldt: } C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (\text{A.1a})$$

met C de Chézy-ruwheid ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$), R de hydraulische straal (m) en n de Manning-coëfficiënt ($\text{s}/\text{m}^{1/3}$).

Als C en R worden uitgedrukt in de eenheden feet en s moet ook n worden uitgedrukt in deze eenheden. In dat geval geldt:

$$n \left[\frac{s}{(\text{m})^{\frac{1}{3}}} \right] = n \left[\frac{s}{\left(\frac{1}{0,3048} \text{ft} \right)^{\frac{1}{3}}} \right] = n \left[\frac{s}{1,486 \text{ft}^{\frac{1}{3}}} \right]$$

$$\text{Dus: } C = 1,486 \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (\text{A.1b})$$

met C de Chézy-ruwheid ($\text{ft}^{0.5}/\text{s}$), R de hydraulische straal (ft) en n de Manning-coëfficiënt ($\text{s}/\text{ft}^{1/3}$). Zie bijvoorbeeld Van Rijn (1990) en Eagleson et al. (1966).

A.2 'Shear dispersion' volgens Thatcher-Harleman

Thatcher en Harleman (1972) gaan uit van de vergelijking van Taylor voor turbulente pijpstroming:

$$K = 10,1 a u_* \quad (\text{A.2})$$

met K de longitudinale dispersiecoëfficiënt (m^2/s), a de straal (m) en u_* de schuifspanningssnelheid (m/s).

$$\text{Voor de hydraulische straal geldt: } R = \frac{\pi a^2}{2\pi a} = \frac{a}{2}.$$

$$\text{Vgl. (A.2) wordt: } K = 20,2 R u_* \quad (\text{A.3})$$

Deze vergelijking geldt ook voor een kanaalstroming met vrij wateroppervlak, waarbij R ongeveer de waterdiepte h is als de breedte $B \gg h$.

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (\text{A.4})$$

Substitutie van vgl. (A.4) in vgl. (A.3) geeft, zie ook Winterwerp (1980) en Harleman en Thatcher (1974):

$$K = 20,2 R\bar{u} \frac{\sqrt{g}}{C} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (\text{A.5})$$

In de eenheden feet en s en na substitutie van vgl. (A.1b) in vgl. (A.5) volgt:

$$K = 20,2 R\bar{u}n \frac{\sqrt{g}}{1,486R^{\frac{1}{6}}} = 13,6\sqrt{g}R^{\frac{5}{6}}\bar{u}n$$

Voor g geldt: $g = 32,9 \text{ ft/s}^2$, zodat voor K volgt:

$$K = 77R^{\frac{5}{6}}n\bar{u} \quad (\text{ft}^2/\text{s}) \quad (\text{A.6})$$

Vgl. (A.6) is dus het equivalent van vgl. (A.5) maar dan in eenheden feet-s, waarbij de constante 77 bedraagt. Merk op dat de constante 77 niet dimensieloos is! Thatcher en Harleman rapporteren zelf dat de constante een factor 3 hoger kan zijn indien van toepassing op natuurlijke estuaria. In dat geval wordt de constante in vgl. (A.5) dus 60:

$$K = 60 R(x,t)\bar{u}(x,t) \frac{\sqrt{g}}{C} \quad (\text{A.7})$$

Hierin zijn R en \bar{u} momentaan, dus functies van x en t .

A.3 Referenties

Eagleson, P.S., R.G. Dean, C.L. Bretschneider, F. Raichlen, D.R.F. Harleman, J.W. Johnson, A.T. Ippen, G.H. Keulegan and H.B. Simmons, 1966. Estuary and Coastline Hydrodynamics. McGraw-Hill.

Harleman, Donald R.F. and M. Llewellyn Thatcher, 1974. Longitudinal dispersion and unsteady salinity intrusion in estuaries. La Houille Blanche. No. 1/2., pp. 25-33.

Thatcher, M. Llewellyn and Donald R.F Harleman, 1972. A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries. Report No. MITSG 72-7. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts.

Van Rijn, L.C., 1990. Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. Aqua Publications, Amsterdam.

B 'Shear dispersion' onder getijcondities

B.1 Fischer et al. (1979)

Stromingen met snelheidsgradiënten in een dwarsdoorsnede worden aangeduid als 'shear flows'. De gradiënten kunnen het gevolg zijn van de aanwezigheid van een vaste bodem of wand of ontstaan als twee watermassa's met verschillende stroomsnelheden samenvloeien. De snelheidsverschillen in de dwarsdoorsnede resulteren in een verspreiding van opgeloste stoffen in de richting van de stroming. Deze verspreiding wordt aangeduid als 'shear flow dispersion'. Door Taylor (1953) is dit verschijnsel eerst bestudeerd voor laminaire pijpstroming en vervolgens uitgebreid voor turbulente pijpstroming (Taylor, 1954). In het eerste geval speelt de moleculaire diffusiecoëfficiënt D een rol en in het tweede geval de turbulente mengingscoëfficiënt ε ('eddy diffusivity'). In tegenstelling tot D kan ε variëren over de doorsnede. Door (Elder, 1959) is de analyse uitgebreid voor stroming langs een helling met een vrij wateroppervlak.

De hiervoor beschreven gevallen betreffen stationaire stromingscondities. In Fischer et al. (1979) wordt de analyse uitgebreid voor niet-stationaire situaties, zoals een oscillerende stroming. Hierbij kunnen twee uiterste situaties worden beschouwd:

- $T' \gg 1$. De oscillatieperiode T is veel groter dan de tijd T_c die nodig is voor de aanpassing van het concentratieprofiel aan het nieuwe snelheidsprofiel;
- $T' \ll 1$. De tijd T is veel kleiner dan T_c .

met,

$$T' = \frac{T}{T_c} \quad (\text{B.1})$$

Hierbij is T_c gedefinieerd als:

$$T_c = \frac{L^2}{D} \quad (\text{B.2})$$

waarbij L een lengteschaal (bijvoorbeeld de waterdiepte of de breedte) en D de moleculaire diffusiecoëfficiënt. In geval van turbulente stroming moet voor D de turbulente mengingscoëfficiënt ('eddy diffusivity' ε) worden genomen.

In het eerste geval is er voldoende tijd beschikbaar om het concentratieprofiel te laten aanpassen aan het stromingsprofiel in beide richtingen. De dispersiecoëfficiënt is in dat geval gelijk aan die voor stationaire stroming. In het tweede geval is er onvoldoende tijd beschikbaar voor aanpassing van het concentratieprofiel. De concentratie oscilleert rond het gemiddelde en de dispersiecoëfficiënt nadert tot nul (Fischer et al., 1979).

B.1.1 Effect getijperiode op K

Voor getijstroming is estuaria en getijdenrivieren leiden Fischer et al. (1979) de dispersiecoëfficiënt als functie van $T'=T/T_c$ af:

$$K = K_0 f(T') \quad (\text{B.3})$$

met,

$$K_0 = I \overline{u'^2} T_c \quad (\text{B.4})$$

Hierin is I een constante welke kan worden afgeleid uit het snelheidsprofiel⁶. Deze constante blijkt ongeveer de waarde 0,1 te hebben voor verschillende stromingssituaties (laminaire en turbulente pijpstroming, laminaire en turbulente stroming langs een helling etc.). Verder geldt volgens Fischer et al. (1979):

$$\overline{u'^2} \approx 0,2 \overline{u}^2 \quad (\text{B.5})$$

zodat volgt:

$$K_0 = 0,02 \overline{u}^2 T_c \quad (\text{B.6})$$

Voor de lengteschaal L wordt de breedte W van de rivier genomen zodat:

$$T_c = \frac{W^2}{\varepsilon_t} \quad (\text{B.7})$$

Voor $f(T')$ wordt afgeleid:

$$f(T') = \frac{240}{\pi^4} T'^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[(2n-1)^{-2} \left\{ \left(\frac{\pi}{2} (2n-1)^2 T' \right)^2 + 1 \right\}^{-1} \right] \quad (\text{B.8})^7$$

Hierin is \overline{u} de profielgemiddelde snelheid, W de breedte van de rivier en ε_t de turbulente mengingscoëfficiënt in dwarsrichting.

Het verloop van K/K_0 als functie van T' is weergegeven in Figuur B.1. Het laat het effect zien van de oscillatieperiode T op de dispersiecoëfficiënt K .

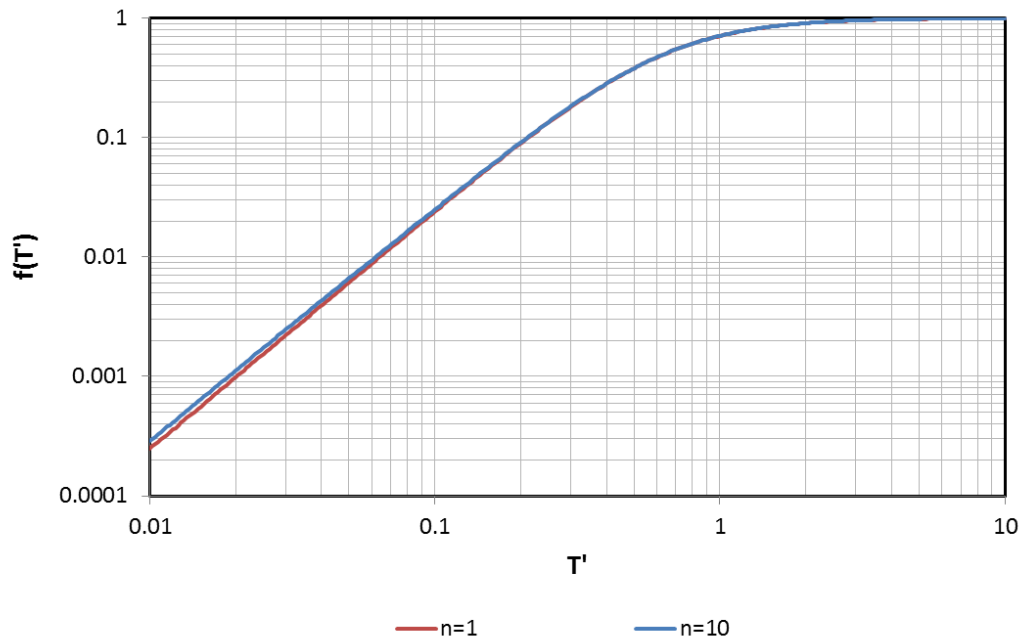
⁶ I is als volgt gedefinieerd (Fischer et al., 1979): $I = -\int_0^1 u'' \int_0^{y'} \frac{1}{\varepsilon_t} \int_0^{y''} u'' dy'' dy' dy'$ met $y'=y/h$, $u' = U - \overline{u}$ en

$u'' = u' / \sqrt{u'^2}$. Hierin is U de snelheid en \overline{u} de profielgemiddelde snelheid.

⁷ Door Fischer et al. (1979) wordt als vergelijking gegeven:

$$f(T') = \frac{240}{\pi^4} T'^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[(2n-1)^{-2} \left\{ \left(\frac{\pi}{2} (2n-1)^2 T' \right)^2 + 1 \right\}^{-1} \right], \text{ maar hiermee kunnen Figuur B.1 en}$$

Figuur B.2, zoals door hen gepresenteerd, niet worden gereproduceerd. Verondersteld is dat T'^2 in de term tussen () moet worden vervangen door T' . In dat geval is het resultaat identiek aan hun grafische weergaven van $f(T')$ en $(1/T')f(T')$.



Figuur B.1 De afhankelijkheid van de dispersiecoëfficiënt van de oscillatieperiode. $f(T')$ is de verhouding tussen K in een stroming met oscillatieperiode T en K in dezelfde stroming met $T \rightarrow \infty$. De rode en blauwe lijn zijn verkregen met resp. de sommatie met 1 en 10 termen.

Zoals eerder is beredeneerd, geldt voor grote waarden van T dat K nadert tot K_0 ($f(T') \rightarrow 1$) en voor kleine waarden van T dat K nadert tot 0 ($f(T') \rightarrow 0$). Voor een oscillerende stroming is de dispersiecoëfficiënt dus altijd kleiner dan die voor een stationaire stroming. Verder blijkt uit Figuur B.1 dat het voldoende is om slechts 1 term in de sommatie in vergelijking (B.8) ($n = 1$) mee te nemen. In dat geval wordt vgl. (B.8):

$$f(T') = \frac{\frac{960}{\pi^6} T'^2}{T'^2 + \frac{4}{\pi^2}} \approx \frac{T'^2}{T'^2 + 0,4} \quad (n=1) \quad (\text{B.9})$$

De longitudinale dispersievergelijking wordt in dit geval:

$$K = K_0 f(T') = 0,02 \bar{u}^2 T_c \frac{T'^2}{T'^2 + 0,4} = 0,02 \bar{u}^2 T \frac{T'}{T'^2 + 0,4} \quad (\text{B.10})$$

met,

$$T' = \frac{T}{T_c} = \frac{T}{W^2} = \varepsilon_t \frac{T}{W^2} \quad (\text{B.11})$$

Volgens Fischer et al. (1979) geldt voor ε_t :

$$\varepsilon_t = c_t h u_* \quad (\text{B.12})$$

met $c_t = 0,6 \pm 50\%$, h de waterdiepte en u_* de schuifspanningssnelheid. Voor u_* kan worden geschreven:

$$u_* = \frac{\sqrt{g}}{C} \bar{u}$$

Voor T' volgt dan:

$$T' = c_t h \bar{u} \frac{\sqrt{g}}{C} \frac{T}{W^2} \quad (\text{B.13})$$

Vergelijkingen (B.10) en (B.13) vormen samen de (vereenvoudigde) dispersievergelijking voor 'shear flow' onder getijcondities. De invoergrootheden voor deze dispersievergelijking zijn de:

- waterdiepte h ;
- gravitatieversnelling g ;
- ruwheid C ;
- getijperiode T ;
- rivierbreedte W ;
- stroomsnelheid \bar{u} tijdens het getij (tijdsgemiddelde van de absolute waarden).

De getijperiode T en de rivierbreedte W zijn aanvullende grootheden ten opzichte van de dispersievergelijking volgens Thatcher-Harleman (zie Par. A.2).

Bij het voorgaande is verondersteld dat de tijdschaal voor laterale menging veel groter is dan die voor verticale menging. In andere woorden: er wordt aangenomen dat verticale menging instantaan is in vergelijking met horizontale menging wat het geval is bij een grote breedte-diepte verhouding van het estuarium of de rivier. Verder worden dichtheidseffecten verwaarloosd.

B.1.2 Effect rivierbreedte op K

Uit vergelijkingen (B.3) en (B.6) volgt:

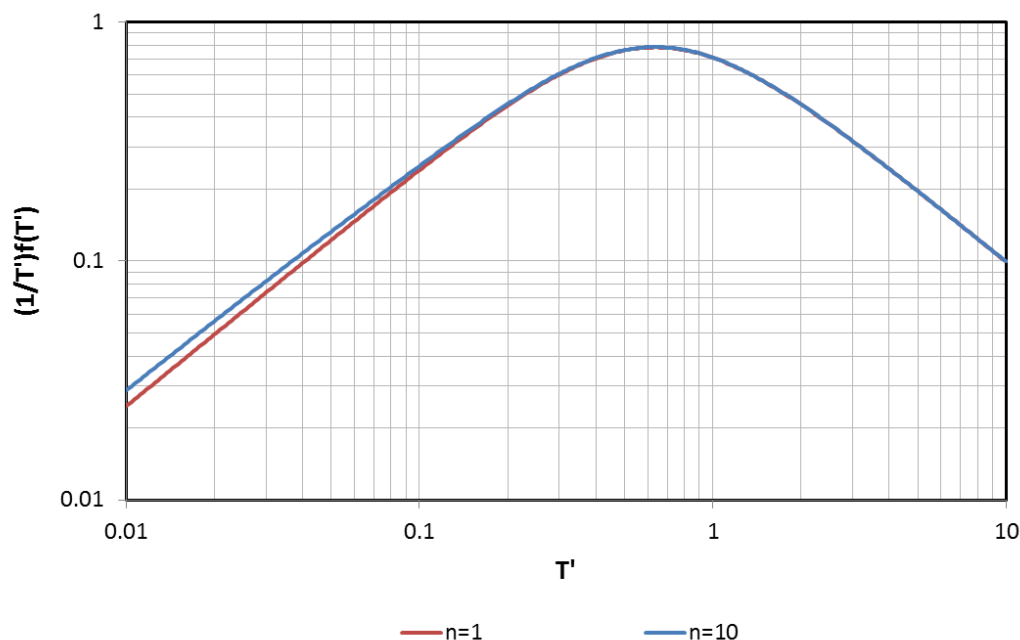
$$K = 0,02\bar{u}^2 T_c f(T') = 0,02\bar{u}^2 T \frac{1}{T'} f(T') = 0,02\bar{u}^2 T F(T') \quad (\text{B.14a})$$

met,

$$F(T') = \frac{1}{T'} f(T') \quad (\text{B.14b})$$

$F(T')$ is weergegeven in Figuur B.2. Met deze functie wordt het effect van de rivierbreedte W op de dispersiecoëfficiënt K weergegeven ($0,02\bar{u}^2 T$ in vgl. (B.14a) is onafhankelijk van W). Bij een grote breedte van het estuarium is T_c groot (T' klein); het concentratieprofiel past zich langzaam aan ten opzichte van de getijperiode en de dispersiecoëfficiënt is dientengevolge klein, omdat het concentratieprofiel "onvervormd" oscilleert tussen twee uiterste waarden. Als het estuarium smal is, verloopt de aanpassing van het concentratieprofiel snel ten opzichte van de getijperiode (T_c klein; T' groot) en de dispersiecoëfficiënt benadert die van een stationaire stroming (K_0) ofwel $f(T')$ nadert tot 1. Tegelijkertijd neemt K_0 volgens vgl. (B.6) af, zodat het netto resultaat volgens vgl. (B.3) is een afname van K voor grote en toenemende

waarden van T' . Voor $T' \approx 1$ wordt een maximum voor $F(T')$ bereikt, d.w.z. als de tijdschaal voor dwarsmenging van dezelfde grootte is als de getijperiode.



Figuur B.2 De grootheid $F(T')$ zoals gedefinieerd door vgl. (B.8) en vgl. (B.14b).

B.2 Aanpassingen T_c en K_0

In Par. B.1 is K_0 gegeven door vgl. (B.4) en vgl. (B.5) en $I = 0,1$. In Bijlage C zal blijken dat hiermee een K_0 wordt berekend die groot is in vergelijking met andere voorspellers voor K_0 . Door Fischer (1975) (zie ook Fischer et al., 1979) wordt voor vgl. (B.4) uitgegaan van iets afwijkende definities voor I en T_c :

$$I = 0,07$$

$$T_c = \frac{(0,7W)^2}{\varepsilon_t} \quad (\text{B.15})$$

Voor de karakteristieke lengteschaal wordt dus uitgegaan van $L = 0,7W$ als redelijke benadering voor een symmetrisch snelheidsprofiel ($L = 0,5W$) en een asymmetrisch profiel ($L = W$).

Met $c_t = 0,6$ (zie vgl. B.12) volgt dan volgens vgl. (B.4):

$$K_0 = 0,011 \frac{\bar{u}^2 W^2}{hu_*} \quad (\text{B.16})$$

K_0 volgens vgl. (B.16) is een factor 3 kleiner dan K_0 volgens vgl. (B.6).

In vgl. (B.8) moet dan $T' = T/T_c$ worden gebruikt met T_c gedefinieerd volgens vgl. (B.15).

B.3 Toepassing Hollandsche IJssel

Voor de Hollandsche IJssel geldt ter plaatse van de bestudeerde balansgebieden:

- $h = 4,2$ m;
- $W = 145$ m
- $\bar{u} = 0,15$ m/s (getijgemiddeld).

Verder is $C = 45$ m^{0.5}/s en $T = 44700$ s. Voor de constante c_t wordt $0,6 \pm 0,3$ gebruikt.

De longitudinale dispersiecoëfficiënt K wordt berekend volgens de methodes zoals beschreven in Par. B.1 en Par. B.2. De resultaten zijn vermeld in Tabel B.1.

Tabel B.1 K berekend voor halverwege de Hollandsche IJssel.

u_{gem}	B	h	c_t	ε_t	T_c	T'	$f(T')$	const.	K_0	K
(m/s)	(m)	(m)	(-)	(m ² /s)	(s)	(-)	(-)	(-)	(m ² /s)	(m ² /s)
Fischer et al. (1979). Methode Par. B.1										
0.15	145	4.2	0.3	0.013	1598278	0.028	0.0021	0.1	719	1
0.15	145	4.2	0.6	0.026	799139	0.056	0.0082	0.1	360	3
0.15	145	4.2	0.9	0.039	532759	0.084	0.0182	0.1	240	4
Fischer et al. (1979). Methode Par. B.2										
0.15	145	4.2	0.3	0.013	783156	0.057	0.0085	0.07	247	2
0.15	145	4.2	0.6	0.026	391578	0.114	0.0332	0.07	123	4
0.15	145	4.2	0.9	0.039	261052	0.171	0.0716	0.07	82	6
Thatcher-Harleman (op basis van gemiddelde u en h). Par. A.2.										
0.15		4.2								3

De berekende waarden voor K volgens de methode van Fischer et al. (1979) variëren tussen 1 en 6 m²/s. Als voor de methode van Thatcher-Harleman uitgegaan wordt van de gemiddelde stroomsnelheid tijdens eb en vloed en de gemiddelde waterdiepte tijdens het getij volgt voor K een waarde die overeenstemt met K volgens Fischer et al..

De waarden zijn een orde lager dan wat voor de Hollandsche IJssel is afgeleid uit de metingen in 2015, nl. $K = 10-65$ m²/s voor de balansperioden 10/11 en 11/12 november 2015. Mogelijke oorzaken van deze verschillen zijn:

- Vergroting van de dispersie in de Hollandsche IJssel ten gevolge van andere processen, zoals bochtstroming, onregelmatigheden langs de oever en de bodem, de aanwezigheid van kombergende gebieden langs de rivier etc.;
- Vergroting van de dispersie ten gevolge van het geringe lozingsdebiet tijdens de metingen (versterking gravitatiecirculatie).

De bijdrage van de gravitatiecirculatie aan de dispersie kan worden geschat met de dispersievergelijking van Kuijper en Van Rijn (2011). Deze vergelijking wordt gegeven door:

$$D_x = \alpha_c 60 \sqrt{\pi} \left(\frac{v_{\Delta}}{\hat{u}_x} \right) \left(\frac{C}{\sqrt{g}} \right) \left(\frac{|u_{r,x}|}{\hat{u}_x} \right)^{0.5} \hat{u}_x h_x \frac{L_{e,x}}{L_{a_e}} \quad \left(1 < \frac{L_{a_e}}{L_{e,x}} < 10 \right) \quad (B.17a)$$

$$v_{\Delta,x} = \sqrt{\frac{\Delta\rho_x}{\rho} gh_x} \quad (\text{B.17b})$$

Hierin is D_x de dispersiecoëfficiënt ten gevolge van dichtheidseffecten, α_c een kalibratieconstante welke gelijk is aan $1 \pm 0,3$, \hat{u}_x de maximale getijsnelheid, $u_{r,x}$ de afvoersnelheid (= Q_r/A_x), Q_r de rivierafvoer wat in dit geval gelijk is aan het netto lozingsdebiet, A_x het stroomvoerend oppervlak, L_e de getijweglengte welke gelijk is aan $\hat{u}_x T / \pi$, L_a de convergentielengte voor het stroomvoerend oppervlak, $\Delta\rho_x$ het dichtheidsverschil en ρ_f de dichtheid van zoet water ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$). Het subscript 'x' heeft hier betrekking op de zeewaartse rand van het balansgebied (d.i. km. 12/13).

De waarden voor de hiervoor genoemde grootheden zijn als volgt:

- Breedte $W = 150 \text{ m}$.
- Waterdiepte $h = 4,5 \text{ m}$.
- Ruwheid $C = 45 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$.
- Het verschil in chlorideconcentratie in raai 13/12 en verder opwaarts is ongeveer 50 mg/l . Dit is gelijk aan een dichtheidsverschil $\Delta\rho_x$ van ongeveer $0,07 \text{ kg/m}^3$.
- De maximale getijsnelheid \hat{u}_x tijdens eb en vloed is gemiddeld $0,35 \text{ m/s}$.
- $Q_{lozing} \approx 1 \text{ m}^3/\text{s}$.
- $u_{r,x} = Q_{lozing} / (Wh) = 1 / (150 * 4,5) = 0,0016 \text{ m/s}$.
- $L_a = 11 \text{ km}$.
- $L_{e,x} = \hat{u}_x T / \pi = 0,35 * 44700 / \pi = 5,0 \text{ km}$.
- $L_a / L_e = 2$

Substitutie van bovengenoemde waarden in vgl. (B.17) geeft als eerste globale schatting $K = 10\text{--}18 \text{ m}^2/\text{s}$. De geringe lozing van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ kan volgens vgl. (B.17) dus een invloed hebben gehad op de dispersie-coëfficiënt en het verklaart daarmee een deel van het verschil tussen de dispersiecoëfficiënt welke is bepaald aan de hand van de metingen ($10\text{--}65 \text{ m}^2/\text{s}$) en de dispersiecoëfficiënt ten gevolge van 'shear flow', zoals voorspeld met de vergelijkingen van Thatcher-Harleman en Fischer et al. ($2\text{--}6 \text{ m}^2/\text{s}$).

B.4 Referenties

Elder, J.W., 1959. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. J. Fluid Mech. 5, 544-560.

Fischer, H.B., 1975. Discussion of "Simple method for predicting dispersion in streams" by R.S. McQuivey and T.N. Keefer. J. Environ. Eng. Div. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 101, 453-455.

Fischer, Hugo B., E. John List, Robert C.Y. Koh, Jörg Imberger and Norman H. Brooks, 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press.

Kuijper, C. and L.C. van Rijn, 2011. Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; Part II: salinity distributions in prismatic and convergent tidal channels. Ocean Dynamics.

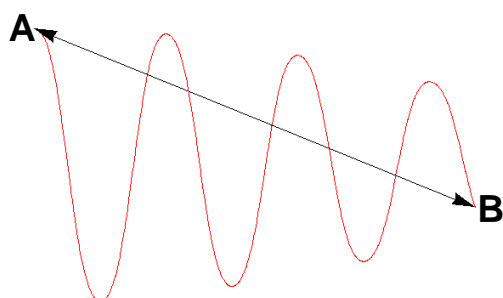
Taylor, G.I., 1953. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. Proc. R. Soc. London Ser. A 219, 186-203.

Taylor, G.I., 1954. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. Proc. R. Soc. London Ser. A 223, 446-468.

C Dispersiecoëfficiënt K_0 voor rivieren

C.1 Beknopte literatuurinventarisatie

In Bijlage B is de dispersiecoëfficiënt K voor estuaria en getijrivieren volgens Fischer et al. (1979) behandeld. Hierbij is K gerelateerd aan de dispersiecoëfficiënt K_0 voor rivieren met een stationaire stroming zoals gegeven door vgl. (B.3). In deze bijlage worden waarden van K_0 gepresenteerd ontleend aan Etemad-Shahidi en Taghipour (2012)⁸. Zij vermelden uit metingen afgeleide waarden voor K_0 en geven relaties tussen K_0 en geometrische en hydrodynamische grootheden. Deze relaties zijn deels ontleend aan de literatuur en deels door henzelf ontwikkeld. De gebruikte dataset bestaande uit in totaal 149 metingen is vermeld in Tabel C.2. De verschillende empirische vergelijkingen die een relatie geven tussen K_0 en de breedte W , waterdiepte h , stroomsnelheid u , schuifspanningssnelheid u_* en de 'sinuosity' σ (mate van meandering, bochtigheid) zijn vermeld in Tabel C.1. De vergelijkingen hebben met elkaar gemeen, dat de verhoudingen W/h en u/u_* een rol spelen. De tweede vergelijking van Etemad-Shahidi en Taghipour heeft ook als invoergrootheid de 'sinuosity' σ . Hoewel deze niet in het betreffende artikel wordt gedefinieerd, heeft deze vermoedelijk betrekking op de verhouding tussen de lengte van de rivier tussen twee locaties A en B en de hemelsbrede afstand AB, zie de schets hieronder.



Definitie 'sinuosity'

Voor de Hollandse IJssel is de 'sinuosity' tussen de monding en het boezemgemaal Gouda $16,6/13,5 = 1,23$.

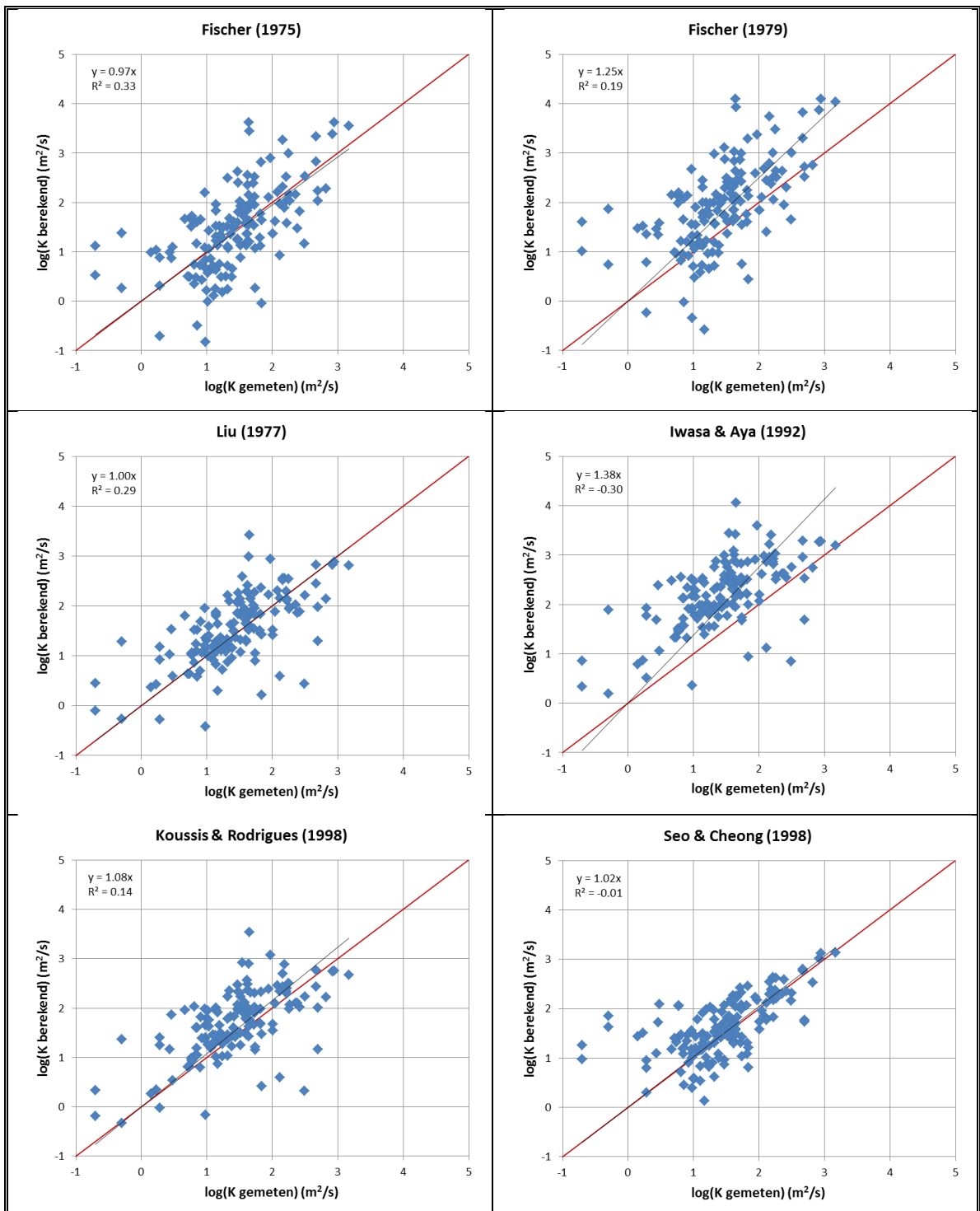
⁸ Er is geen uitgebreide literatuurinventarisatie uitgevoerd.

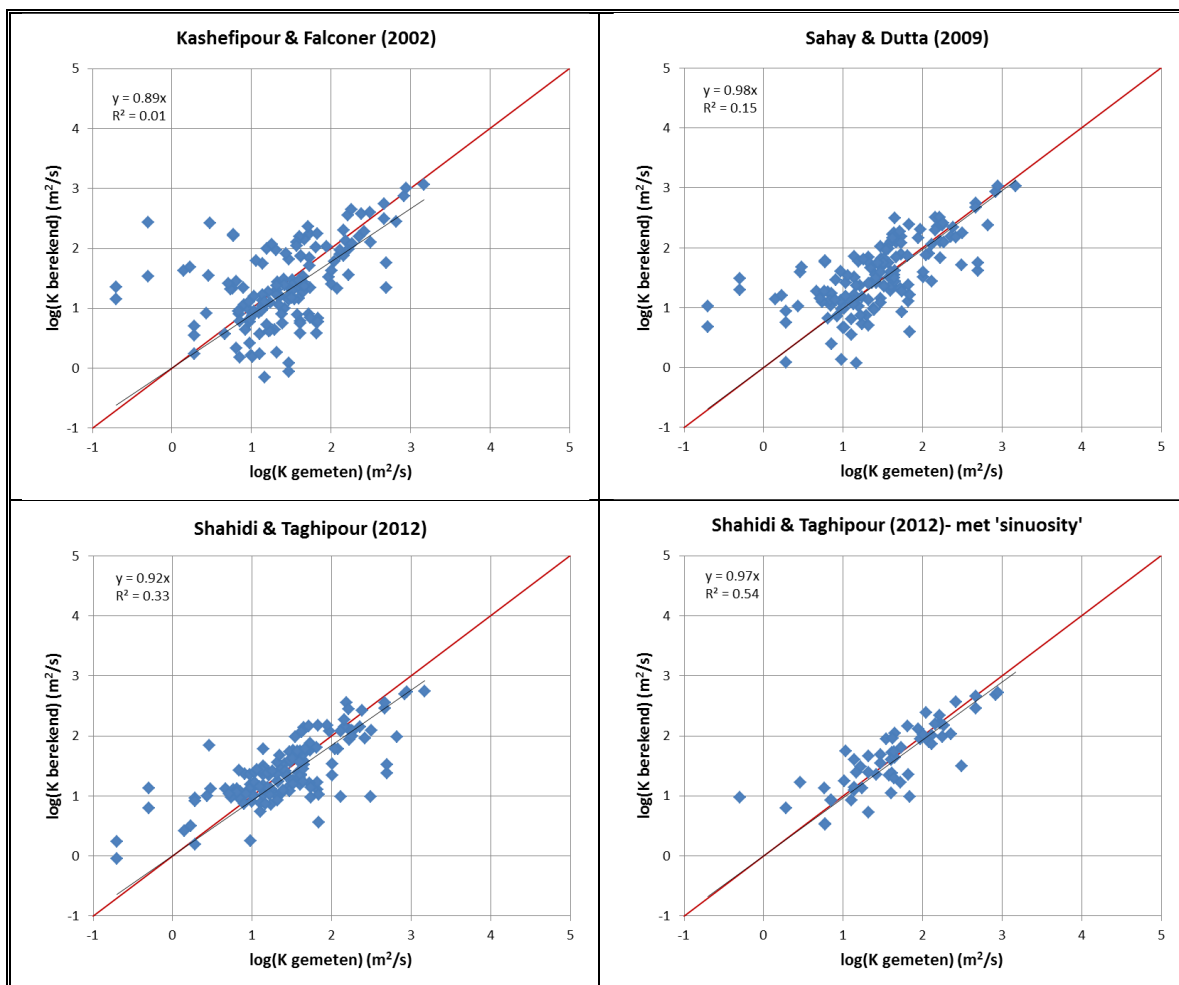
Tabel C.1 Dispersievergelijkingen voor K_0 (Etemad-Shahidi en Taghipour, 2012).

Dispersievergelijking voor K_0	Referentie
$K_0 = 0,011 \left(\frac{W^2}{h} \right) \left(\frac{u^2}{u_*} \right)^9$	Fischer (1975)
$\frac{K_0}{hu_*} = \beta \left(\frac{W}{h} \right)^2 \left(\frac{u}{u_*} \right)^2$; $\beta = 0,18 \left(\frac{u_*}{u} \right)^{1,5}$	Liu (1977)
$\frac{K_0}{hu_*} = 2 \left(\frac{W}{h} \right)^2$	Iwasa and Aya (1991)
$\frac{K_0}{hu_*} = 0,6 \left(\frac{W}{h} \right)^2$	Koussis and Rodrigues-Mirasol (1998)
$\frac{K_0}{hu_*} = 5,915 \left(\frac{W}{h} \right)^{0,62} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{1,428}$	Seo and Cheong (1998)
$K_0 = \left[7,428 + 1,775 \left(\frac{W}{h} \right)^{0,62} \left(\frac{u_*}{u} \right)^{0,572} \right] hu \left(\frac{u}{u_*} \right)$ ($W/h \leq 50$) $K_0 = 10,612 hu \left(\frac{u}{u_*} \right)$ ($W/h > 50$)	Kashefipour and Falconer (2002)
$\frac{K_0}{hu_*} = 2 \left(\frac{W}{h} \right)^{0,96} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{1,25}$	Sahay and Dutta (2009)
$\frac{K_0}{hu_*} = 15,49 \left(\frac{W}{h} \right)^{0,78} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{0,11}$ ($W/h \leq 30,6$) $\frac{K_0}{hu_*} = 14,12 \left(\frac{W}{h} \right)^{0,61} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{0,85}$ ($W/h > 30,6$)	Etemad-Shahidi and Taghipour (2012)
$\frac{K_0}{hu_*} = 2,75 \left(\frac{W}{h} \right)^{0,78} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{0,11} \sigma^{4,04}$ ($W/h \leq 30,6$) $\frac{K_0}{hu_*} = 8,36 \left(\frac{W}{h} \right)^{0,61} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{0,85} \sigma^{1,70}$ ($W/h > 30,6$)	Etemad-Shahidi and Taghipour (2012)

In Figuur C.1 zijn de berekende waarden voor K_0 vergeleken met de gemeten waarden voor elk van de dispersievergelijkingen. De tweede vergelijking van Shahidi en Taghipour maakt ook gebruik van de parameter σ ('sinuosity') maar deze is afgeleid op basis van een kleinere dataset (zie Tabel C.2). Voor alle vergelijkingen is de spreiding groot. Hierin is ook de dispersievergelijking opgenomen volgens Fischer et al. (1979) (zie vgl. B.3). Deze is identiek aan die van Fischer (1975) maar met een constante van 0,033.

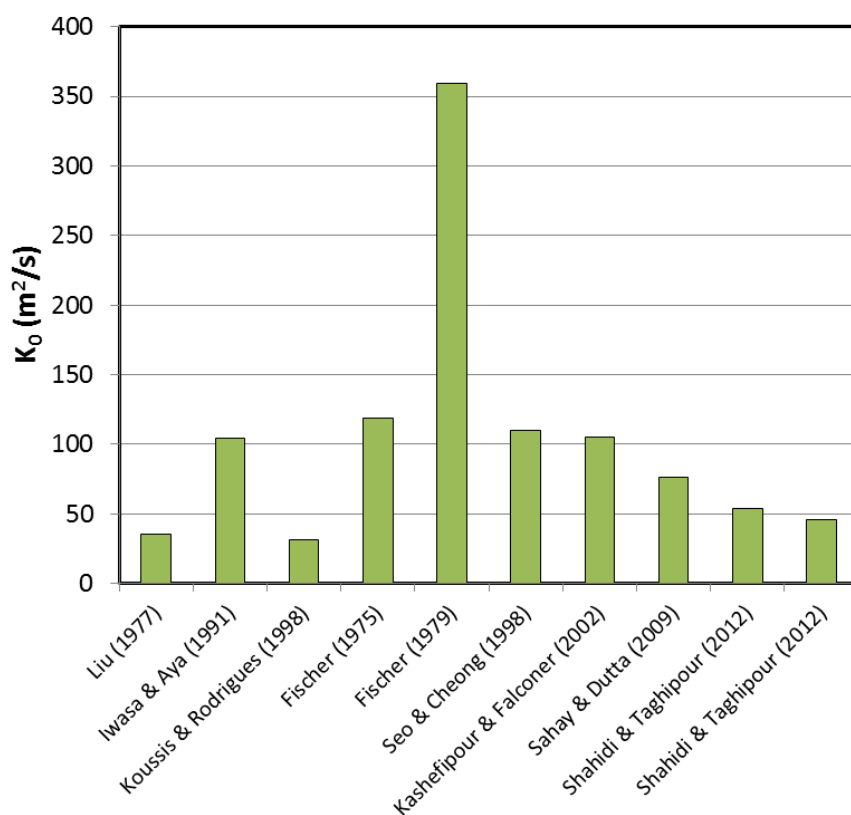
⁹ Deze vergelijking is conform de andere vergelijkingen ook te schrijven als: $\frac{K_0}{hu_*} = 0,011 \left(\frac{W}{h} \right)^2 \left(\frac{u}{u_*} \right)^2$





Figuur C.1 Vergelijking berekende met gemeten dispersiecoëfficiënt voor rivieren (K_0). Langs de assen zijn de logaritmen van de waarden uitgezet.

Voor de Hollandse IJssel, ter hoogte van km. 13/12, is de dispersiecoëfficiënt K_0 berekend met elk van de vergelijkingen, zie Figuur C.2. Deze dispersiecoëfficiënt kan worden beschouwd als een bovengrens, omdat volgens de analyse van Fischer et al. (1979) de dispersiecoëfficiënt K onder getijcondities kleiner is, zie Bijlage B. De invoergrootheden zijn: $W = 150 \text{ m}$, $h = 4,5 \text{ m}$, $\bar{u} = 0,15 \text{ m/s}$, $u_* = 0,010 \text{ m/s}$ ($C=45 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$) en $\sigma = 1,23$. Uit Figuur C.2 volgt dat de dispersiecoëfficiënt K_0 volgens Fischer (1979), $360 \text{ m}^2/\text{s}$, groot is in vergelijking met de andere voorspellers ($30\text{-}120 \text{ m}^2/\text{s}$). De constante in de dispersievergelijking van Fischer (1975) is driemaal kleiner dan die in Fischer (1979), waardoor de berekende waarde voor K beter overeenstemt met die volgens de andere voorspellers. De dispersievergelijkingen van Shahidi & Taghipour (2012), die volgens Figuur C.1 het beste presteren, resulteren in een K_0 van $40\text{-}50 \text{ m}^2/\text{s}$. Zoals eerder is opgemerkt vormen deze waarden een bovengrens voor de Hollandse IJssel omdat de dispersiecoëfficiënt onder getijomstandigheden kleiner is, zie Bijlage B.



Figuur C.2 Berekende dispersiecoëfficiënt K_0 voor de Hollandsche IJssel (km. 13/12) volgens diverse voorspellers.

C.2 Referenties

Etemad-Shahidi, A. and M. Taghipour, 2012. Predicting Longitudinal Dispersion Coefficient in Natural Streams using M5' Model Tree. J. Hydraulic Eng., 10.1061/(ASCE)HY. 1943-7900.0000550, 542-554.

Tabel C.2 Longitudinale dispersiecoëfficiënt en geometrische en hydrodynamische grootheden (Etemad-Shahidi en Taghipour, 2012). W – rivierbreedte, h – waterdiepte, u – stroomsnelheid, u^* – schuifspanningsnelheid, K – longitudinale dispersiecoëfficiënt en s – 'sinuosity' (mate van meandering).

No.	W	h	u	u^*	K	s	W/h
	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m ² /s)	(-)	(-)
1	16	0.5	0.21	0.079	20		32
2	18	0.8	0.52	0.100	21		22
3	16	0.5	0.25	0.079	10		33
4	47	0.9	0.28	0.067	14		55
5	59	2.1	0.86	0.104	54		28
6	53	2.1	0.79	0.107	46		26
7	19	0.4	0.14	0.116	10		48
8	34	0.9	0.16	0.055	10		40
9	36	0.6	0.30	0.049	8		62
10	22	1.6	0.31	0.058	7		14
11	30	1.1	0.36	0.048	1	1.41	27
12	20	0.4	0.29	0.044	14	1.30	48
13	86	2.9	1.20	0.514	153		29
14	16	0.4	0.32	0.060	9		41
15	20	0.5	0.43	0.069	16		38
16	24	0.7	0.52	0.081	26		34
17	35	0.3	0.21	0.040	5		110
18	37	0.5	0.32	0.050	14		81
19	48	0.9	0.44	0.070	37		55
20	183	2.2	0.93	0.065	465	1.35	82
21	201	3.6	1.27	0.082	836	1.35	57
22	197	3.1	1.53	0.077	892	1.35	63
23	67	1.0	0.88	0.110	42		68
24	33	0.3	0.43	0.046	9		109
25	51	0.4	0.46	0.046	21		121
26	25	0.6	1.01	0.137	14	1.08	45
27	13	0.3	0.31	0.043	7	1.31	48
28	16	0.4	0.37	0.055	14	1.31	39
29	37	0.8	0.29	0.068	23		45
30	42	0.8	0.42	0.068	30		53
31	104	2.0	0.56	0.054	316		51
32	127	4.8	0.64	0.081	669		27
33	13	0.8	0.37	0.077	14		17
34	20	1.2	0.45	0.093	33		16
35	35	1.0	0.21	0.041	39		36
36	67	0.6	0.35	0.044	30		122
37	66	1.1	0.39	0.075	33		58

No.	W (m)	h (m)	u (m/s)	u* (m/s)	K (m ² /s)	s (-)	W/h (-)
38	203	1.4	0.39	0.065	93	1.13	150
39	11	0.5	0.21	0.075	18		21
40	23	0.7	0.52	0.101	102		34
41	25	0.5	0.41	0.081	26		56
42	13	0.3	0.42	0.057	18	1.40	43
43	24	1.0	0.59	0.098	102	2.25	25
44	12	0.7	0.43	0.085	21	2.25	18
45	21	0.5	0.52	0.069	26	1.26	44
46	49	0.6	0.26	0.050	38	1.28	89
47	93	0.7	0.16	0.050	41	1.28	131
48	51	0.7	0.62	0.040	30	1.28	79
49	98	1.2	0.32	0.058	120	1.61	85
50	50	1.0	0.32	0.075	30		53
51	34	0.6	0.16	0.041	67		58
52	41	0.4	0.23	0.040	67	1.61	99
53	42	0.7	0.23	0.064	41	2.25	61
54	50	0.4	0.15	0.081	29	2.25	121
55	43	1.1	0.63	0.081	53	1.31	38
56	43	0.7	0.22	0.064	41		63
57	64	0.5	0.10	0.056	29		138
58	59	0.8	0.68	0.072	53		78
59	76	2.0	0.74	0.138	89	1.27	39
60	92	2.4	0.52	0.094	167	1.57	38
61	100	2.5	0.30	0.105	167		40
62	32	0.5	0.24	0.038	52	1.38	64
63	15	0.3	0.25	0.062	2	1.09	47
64	12	0.4	0.22	0.087	2		29
65	14	0.9	1.29	0.553	3	1.08	16
66	16	0.2	0.39	0.053	7	1.13	80
67	18	0.5	0.32	0.024	6	1.41	39
68	26	0.9	0.34	0.067	40	1.41	28
69	37	0.9	0.40	0.067	40	1.41	40
70	16	0.2	0.36	0.040	69	1.31	79
71	6	0.5	0.25	0.058	69		12
72	33	1.4	0.20	0.030	55		24
73	37	2.1	0.10	0.040	55		18
74	21	0.5	0.54	0.027	501		43
75	46	0.5	0.41	0.043	501		87
76	15	0.6	0.27	0.080	10	1.75	25
77	41	1.0	0.07	0.090	10		40

No.	W	h	u	u*	K	s	W/h
	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m ² /s)	(-)	(-)
78	31	0.8	0.48	0.072	45	1.46	39
79	30	0.4	0.34	0.020	44	1.46	75
80	43	1.3	0.26	0.068	45		34
81	32	0.8	0.36	0.053	44		42
82	254	0.8	0.48	0.072	45	1.20	313
83	162	0.4	0.34	0.020	44	1.44	404
84	152	1.6	0.61	0.032	144	1.44	94
85	155	4.0	0.29	0.060	131	1.24	39
86	248	4.8	0.31	0.065	144		51
87	116	3.7	0.45	0.057	228	1.17	32
88	160	1.7	0.47	0.036	178	1.17	92
89	14	1.7	0.58	0.054	131	2.53	9
90	12	2.3	1.06	0.054	309	2.05	5
91	21	0.5	0.13	0.037	13	1.47	43
92	22	0.6	0.08	0.042	13		35
93	17	1.2	0.04	0.050	15		14
94	31	1.4	0.13	0.041	24		22
95	44	1.4	0.99	0.140	185	1.56	32
96	85	2.4	1.73	0.150	465	1.56	36
97	17	0.5	0.20	0.080	17	2.54	33
98	49	1.2	0.21	0.070	15	1.25	40
99	18	0.4	0.15	0.120	21	2.54	46
100	37	0.9	0.13	0.050	16		41
101	29	0.6	0.35	0.070	11	2.20	48
102	20	0.8	0.49	0.100	21	1.14	25
103	58	2.5	0.75	0.100	41		23
104	25	1.6	0.66	0.040	6	1.14	15
105	34	0.8	0.19	0.049	11		43
106	56	2.3	0.69	0.099	37		25
107	53	2.4	0.66	0.110	37		22
108	24	1.6	0.67	0.040	6	1.14	15
109	25	1.5	0.66	0.037	6		16
110	17	0.5	0.24	0.080	25		34
111	181	3.3	1.62	0.080	1487		55
112	26	0.9	0.34	0.070	33		29
113	37	0.9	0.40	0.070	40		41
114	64	0.8	0.67	0.270	35	1.30	80
115	59	1.1	0.88	0.120	42	1.18	54
116	69	2.2	1.55	0.170	163	1.18	31
117	34	2.5	0.82	0.180	65	1.89	14

No.	W (m)	h (m)	u (m/s)	u* (m/s)	K (m ² /s)	s (-)	W/h (-)
118	70	2.4	0.43	0.100	112	2.17	29
119	72	3.8	0.76	0.130	260	2.17	19
120	106	6.1	0.79	0.088	181		17
121	72	8.2	1.20	0.337	243		9
122	100	4.4	0.03	0.002	0		23
123	35	2.5	0.04	0.002	0		14
124	8	3.5	0.68	0.047	1		2
125	35	2.5	0.11	0.006	1		14
126	34	2.5	0.13	0.008	2		14
127	49	8.1	0.27	0.019	3		6
128	1	0.2	0.38	0.110	10		7
129	2	0.1	0.33	0.100	2		11
130	5	0.3	0.26	0.210	7		18
131	9	0.3	0.37	0.150	8		30
132	10	0.4	0.53	0.170	12		29
133	20	0.4	0.19	0.180	7		50
134	13	0.6	0.48	0.240	7		22
135	10	0.6	0.55	0.300	14		16
136	11	0.8	0.41	0.061	8		15
137	59	0.7	0.37	0.070	32		82
138	63	1.0	0.32	0.094	22		63
139	60	1.0	0.46	0.092	47		63
140	25	1.2	0.73	0.084	27		21
141	20	1.9	0.62	0.123	12		10
142	25	1.4	0.77	0.091	21		18
143	25	1.4	0.78	0.091	16		18
144	25	1.6	0.83	0.096	18		16
145	85	206.0	0.69	0.060	52		0
146	120	2.0	0.64	0.050	67		60
147	11	0.3	0.35	0.058	3		38
148	10	0.8	0.46	0.090	6		12
149	10	0.9	0.52	0.100	5		11

D Verziltingskarakteristieken mond Hollandsche IJssel

In deze bijlage wordt de verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel in detail geanalyseerd, zoals die is opgetreden in de eerste helft van november 2015. Vervolgens worden de resultaten vergeleken met de analyse die eerder is uitgevoerd voor 10 september 2013 in Kuijper (2015). De resultaten zijn samengevat in Par. 5.1.

D.1 Metingen 2 t/m 17 november 2015

De analyse voor november 2015 vindt plaats aan de hand van de volgende waarnemingen:

- Waterstand te Krimpen a/d IJssel;
- Bovenrijnafvoer te Lobith, zoals die 2 dagen eerder is opgetreden;
- Chlorideconcentratie:
 - te Lobith, zoals die 2 dagen eerder is opgetreden;
 - t.p.v. de van Brienoordbrug (km. 995) op NAP-650 cm;
 - t.p.v. Krimpen a/d IJssel (km. 18, stormvloedkering) op NAP-550 cm;
 - in km. 17 aan de oever, 1 m boven de bodem.
 - in km. 12 aan de oever, 1 m boven de bodem.

De locaties van de chlorideconcentratiemetingen in de vier laatstgenoemde meetpunten zijn weergegeven in Figuur D.1.



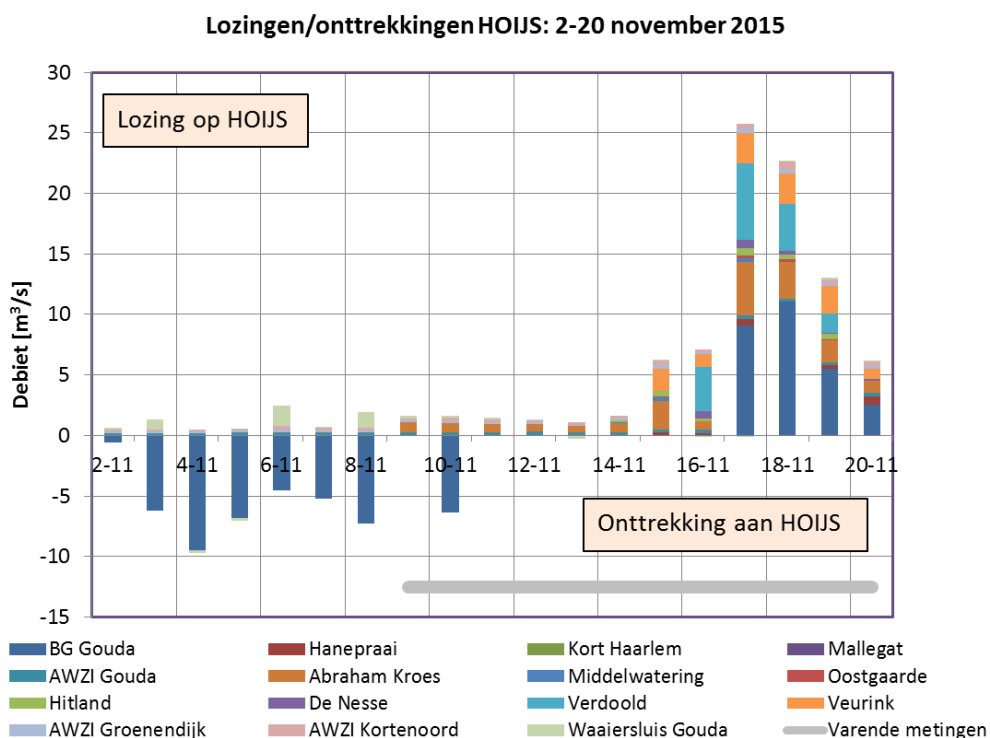
Figuur D.1 Locaties van de chlorideconcentratiemetingen nabij de mond van en in de Hollandsche IJssel. De foto toont het samenvloeiingspunt van de Hollandsche IJssel en de Nieuwe Maas. De afstand tussen de van Brienoordbrug en het samenvloeiingspunt is 1,2 km; de afstand tussen de van Brienoordbrug en Krimpen a/d IJssel (stormvloedkering) is 3 km.

De waterstand te Krimpen a/d IJssel wordt gebruikt om de richting van het kombergingsdebiet in de mond van de Hollandsche IJssel vast te stellen: tijdens opgaand tij (LW → HW) instromend en tijdens afgaand tij (HW → LW) uitstromend.

Gedurende de eerste helft van november neemt de Bovenrijnafvoer geleidelijk af van 1000 m³/s naar 900 m³/s.

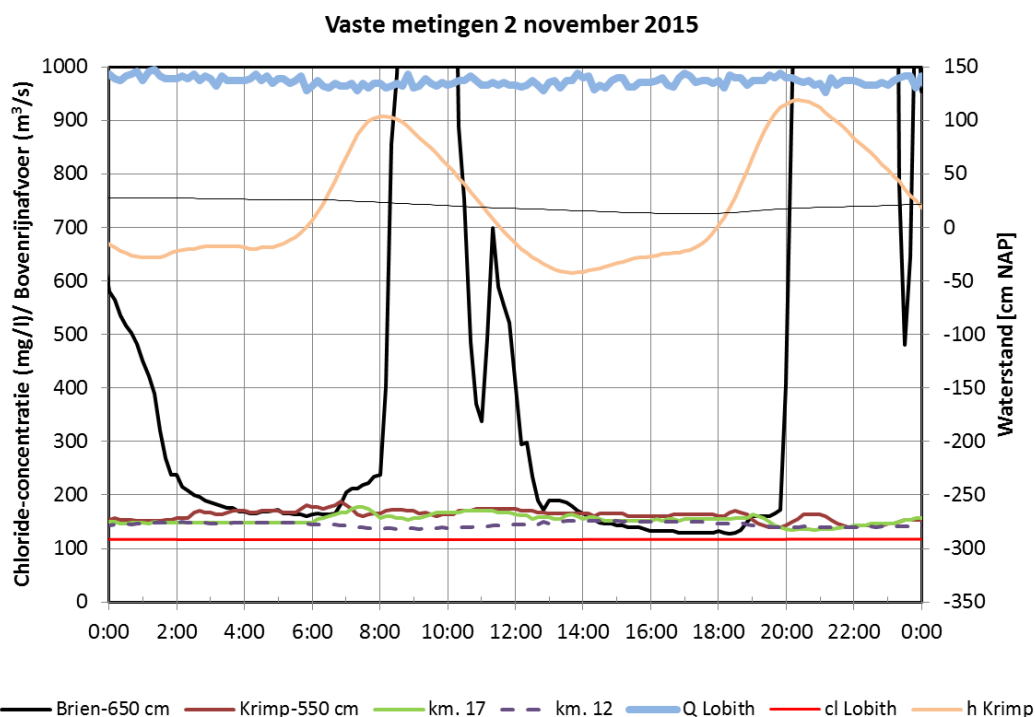
Tussen 2 en 8 november is geen noemenswaardige op- en afwaaiing opgetreden en is de gemiddelde waterstand constant. Op 8 november is er een middenstandsverlaging van ongeveer 0,5 m welke op 9 november wordt gevolgd door een middenstandsverhoging van 0,5 m. Op 13 en 14 november treedt een middenstands-verhoging op van 1 m met een geleidelijke daling tijdens de opvolgende dagen.

In Figuur D.2 zijn de lozingen en onttrekkingen langs de Hollandsche IJssel weergegeven. In de periode 3 t/m 8 november en op 10 november wordt er netto onttrokken. Vanaf 15 november wordt er netto geloosd. Op 2, 9 en 11 t/m 14 november zijn de netto onttrekkingen en lozingen zeer klein (totaal ~1 m³/s).



Figuur D.2 Lozingen en onttrekkingen Hollandsche IJssel tijdens de periode 2 t/m 20 november.

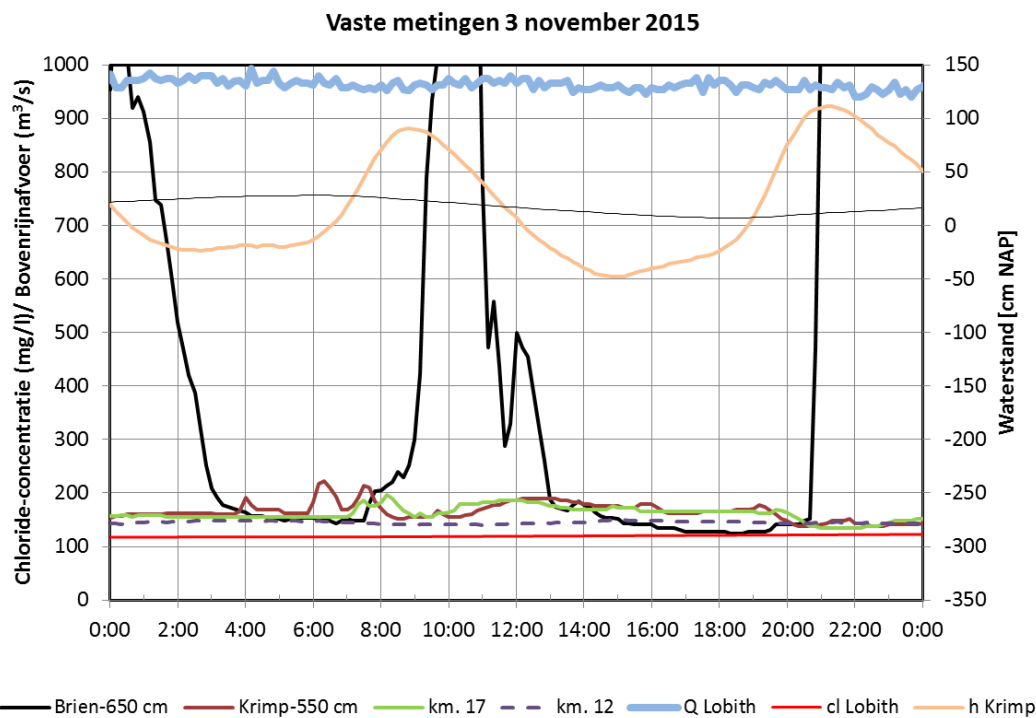
De analyse vindt plaats aan de hand van steeds dezelfde figuren voor opeenvolgende dagen tussen 2 en 16 november 2015, zie Figuur D.3 t/m Figuur D.18.



Figuur D.3 Metingen op 2 november 2015.

2 november:

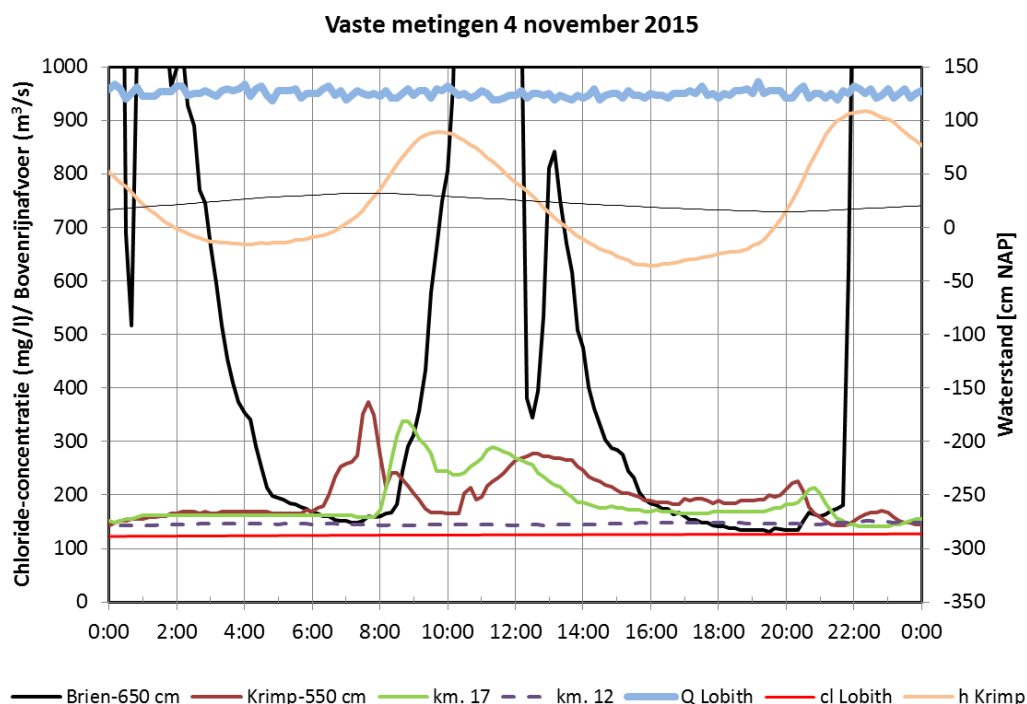
- Gedurende het laatste uur met instroming in de Hollandsche IJssel (7:00-8:00 uur) neemt de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug gering toe. Dit leidt niet tot een toename van de chlorideconcentratie t.p.v. Krimpen. De zoutindringing reikt op dat moment tot ergens tussen beide locaties.
- Vanaf hoogwater neemt de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug sterk toe; er is dan nog een vloedstroming in de Nieuwe Maas. De chlorideconcentratie in Krimpen neemt niet toe. De Hollandsche IJssel stroomt na hoogwater uit en het komledigingsdebiet is groot genoeg om verzilting van de Hollandsche IJssel te voorkomen.
- Rond 18:30 uur is de minimale chlorideconcentratie in de Nieuwe Maas iets lager dan de minimale concentratie 1 getijperiode eerder (06:00 uur). Dit lijkt samen te hangen met de dagelijkse ongelijkheid: het voorafgaande *hoogwater* is relatief laag (dus minder zoutindringing) en het voorafgaande *laagwater* is relatief laag (dus meer zeewaarts transport).



Figuur D.4 Metingen op 3 november 2015.

3 november:

- Rond 06:00 uur treedt een geringe toename van de chlorideconcentratie op t.p.v. Krimpen a/d IJssel. Er vindt dan een geringe instroming van de Hollandsche IJssel plaats gelet op de toename van de waterstand. Een mogelijke verklaring is een eerder opgetreden toestroming van zout water tussen 2:00 en 4:00 uur van de Nieuwe Maas naar de mond van de Hollandsche IJssel. Gedurende deze periode is er nog verzilting t.p.v. de van Brienoordbrug. In de Nieuwe Maas is er dan nog een ebstroming maar in de Hollandsche IJssel is de stroming nihil of er is een geringe toestroming vanaf de Nieuwe Maas door een toename van de waterstand, waardoor verzilt water zich kan verzamelen in de mond van de Hollandsche IJssel.
- Gedurende de eerste helft van de periode met instroming in de Hollandsche IJssel (6:00-8:00 uur) wordt het licht verzilte water meegenomen resulterend in eerst een toename van de chlorideconcentratie in Krimpen en een uur later in km. 17. De gemiddelde stroomsnelheid zou in die periode dan $1000/3600 \approx 0,3$ m/s geweest moeten zijn, wat realistisch lijkt.
- Tijdens afgaand tij neemt de chlorideconcentratie eerst in km. 17 iets toe en vervolgens in Krimpen. Het eerder ingestroomde verzilte water wordt dan weer naar de Nieuwe Maas getransporteerd.
- De toename van de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug rond 20:30 uur (iets voor hoogwater) leidt niet tot verzilting van de Hollandsche IJssel, omdat deze riviertak vanaf 21:00 uur begint uit te stromen.



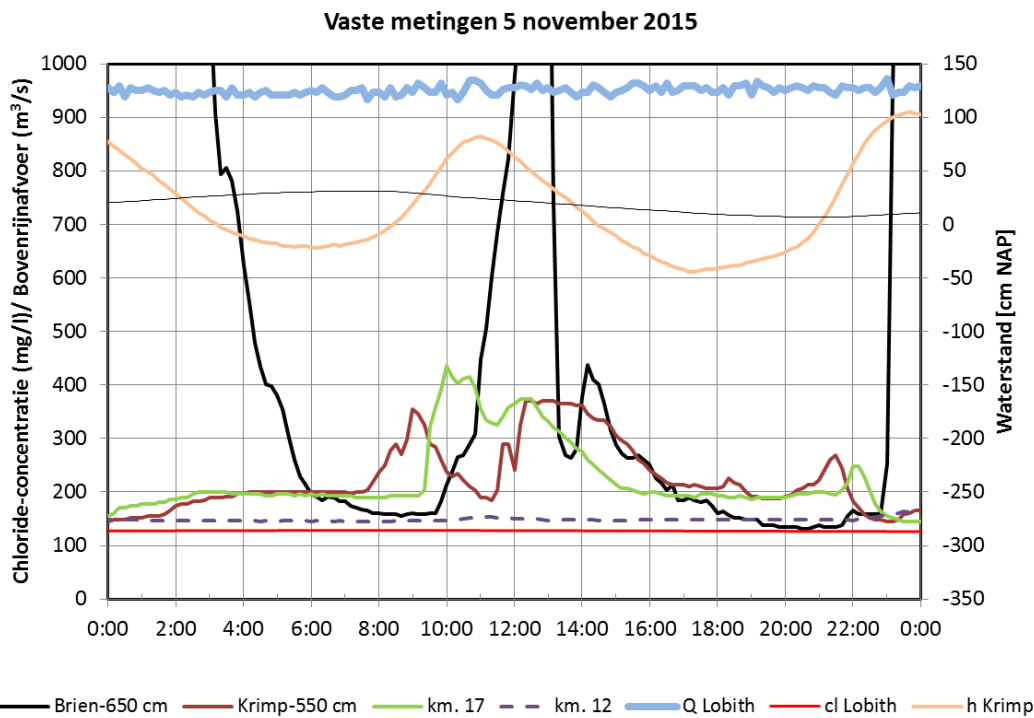
Figuur D.5 Metingen op 4 november 2015.

4 november:

- Op deze dag kunnen dezelfde karakteristieken worden waargenomen als op de voorafgaande dagen maar dan geprononceerder.
- Om 6:00 uur, aan het begin van de periode met vloedstroming op de Hollandsche IJssel, vindt een concentratietoename plaats in Krimpen gevolgd door een afname. De toename vindt al plaats als de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug laag is, zodat de Nieuwe Maas niet als zoutbron kan hebben gefungeerd.
- De toename en vervolgens afname van de concentratie duidt op een “zoutprop” die mogelijk afkomstig is van de mond van de Hollandsche IJssel, tussen de Nieuwe Maas en Krimpen. De afname is het resultaat van een toestroming van zoet water afkomstig van de Nieuwe Maas nadat de zoutprop is gepasseerd.
- Na enige tijd passeert deze “zoutprop” km. 17. Tijdens deze passage kentert de stroming in de Hollandsche IJssel, zodat de concentratie in km. 17 maar ten dele daalt.
- Na de kentering (tijdens hoogwater) passeert in km. 17 het eerder ingestroomde, verzilte water, wat eerst leidt tot een toename en vervolgens een verdere afname van de chlorideconcentratie. Dit passeren wordt ongeveer een uur later waargenomen in Krimpen.
- Omdat tijdens afgaand tij de stroomsnelheid gemiddeld kleiner is dan tijdens opgaand tij vindt de concentratieafname meer geleidelijk plaats dan de toename tijdens opgaand tij.
- Rond het tweede laagwater (16:00 uur) is de chlorideconcentratie in Krimpen iets hoger dan rond het eerste laagwater (4:00 uur). In km. 17 is dit niet het geval.
- Het is opvallend dat tijdens de instroming van de Hollandsche IJssel vanaf 16:00 uur (gering) en 18:00 uur (sterk) geen piekconcentratie waarneembaar is. Op het moment van het tweede laagwater (16:00 uur) is de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug laag in vergelijking met de concentratie tijdens het eerste laagwater (rond 04:00 uur). Dit is waarschijnlijk het gevolg van de dagelijkse ongelijkheid.

Verondersteld kan worden dat tijdens het tweede laagwater geen verzilt water van de Nieuwe Maas in de richting van de Hollandsche IJssel is gestroomd.

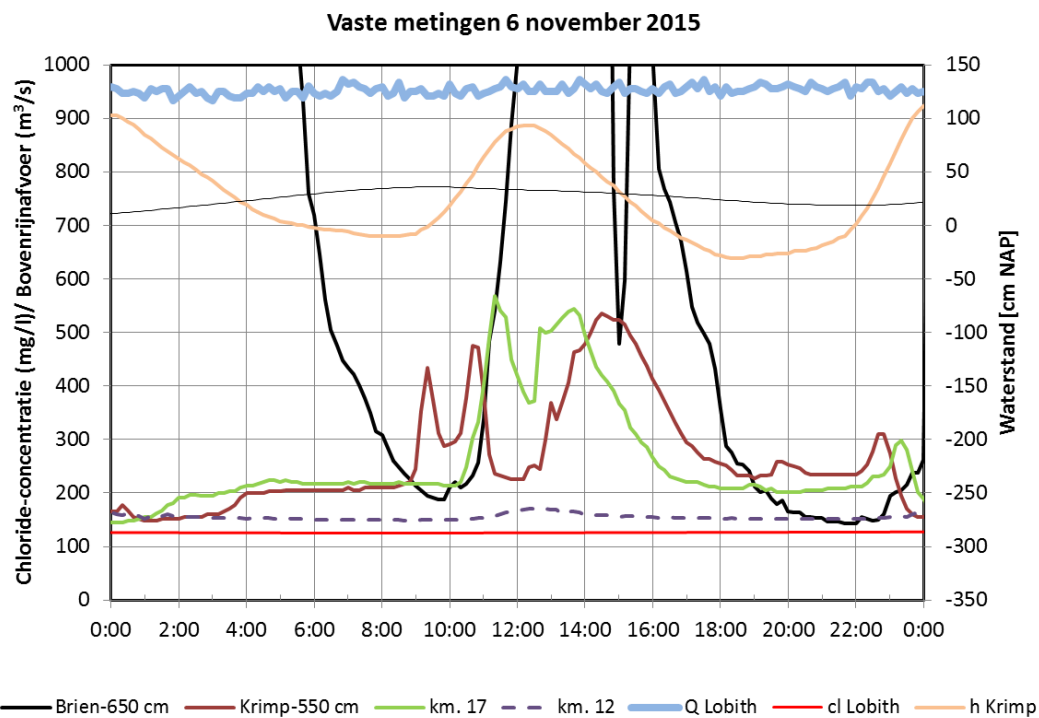
- De grotere verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel tijdens deze dag in vergelijking met de eerdere dagen is het gevolg van de afgenomen Bovenrijnafvoer.



Figuur D.6 Metingen op 5 november 2015.

5 november:

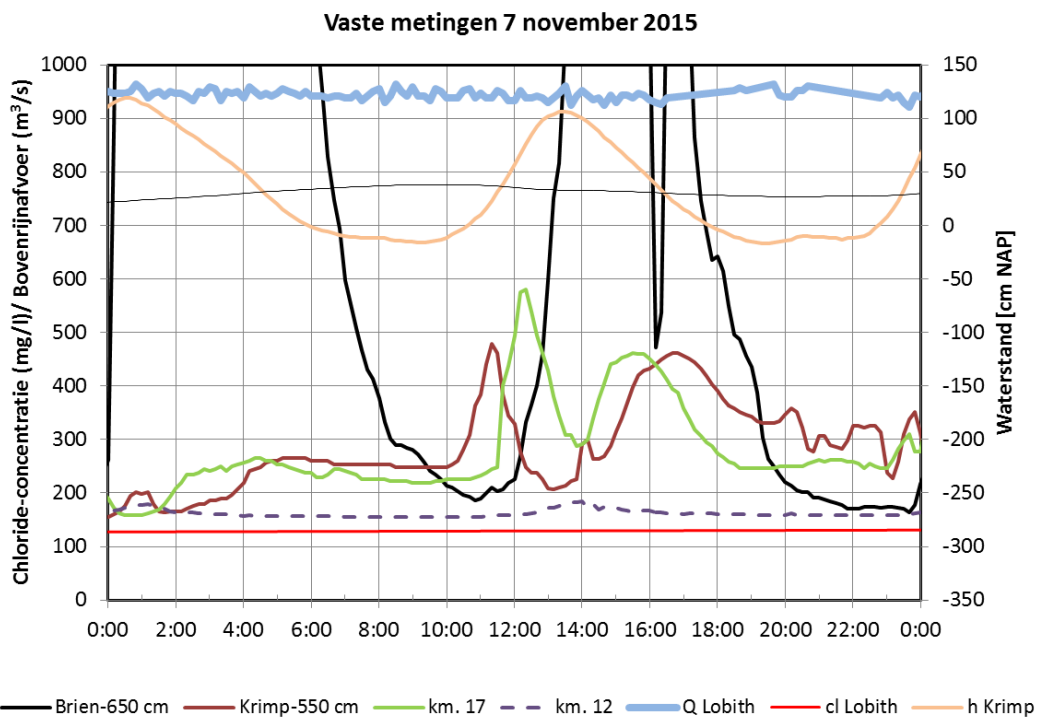
- De verziltingskarakteristieken zijn gelijk aan die op 4 november en eerdere dagen.
- Opvallend is dat de maximale chlorideconcentratie in km. 17 hoger is dan die in Krimpen.
- Na het tweede laagwater treedt slechts een kleine piekconcentratie in Krimpen en km. 17 op.
- De maximale verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel is op deze dag groter dan op 4 november.



Figuur D.7 Metingen op 6 november 2015.

6 november:

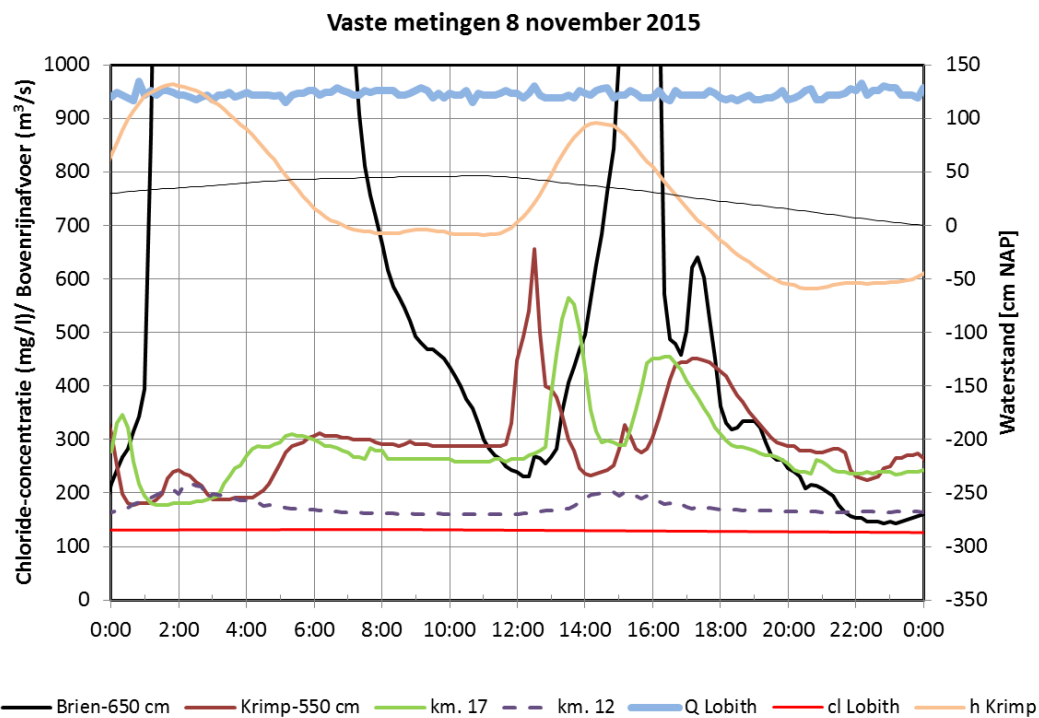
- Bij begin instroming van de Hollandsche IJssel neemt de chlorideconcentratie in Krimpen direct toe, zoals dat ook het geval is bij de voorafgaande dagen. Opvallend is nu dat tijdens instroming sprake is van 2 opeenvolgende pieken. Beide pieken zijn ook aanwezig in km. 17. Na hoogwaterkeringing komt na enige tijd de “zoutprop” weer terug, eerst in km. 17 en daarna in Krimpen. De beide pieken zijn dan samengesmolten, vermoedelijk door menging.
- Rond het tweede laagwater (18:30 uur) is de chlorideconcentratie in Krimpen iets hoger dan rond het eerste laagwater (8:00 uur). In km. 17 is dit niet het geval.
- De concentratiepiek aan het begin van instroming rond 23:00 uur is lager dan de piek tijdens de vorige periode met instroming (na 9:00 uur). Ook hier is waarschijnlijk rond het tweede laagwater minder verzilt water van de Nieuwe Maas in de richting van de mond van de Hollandsche IJssel gestroomd dan rond het eerste laagwater.
- In km. 12 is er een lichte toename van de chlorideconcentratie.
- De maximale verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel (Krimpen en km. 17) is op deze dag groter dan op 5 november.



Figuur D.8 Metingen op 7 november 2015.

7 november:

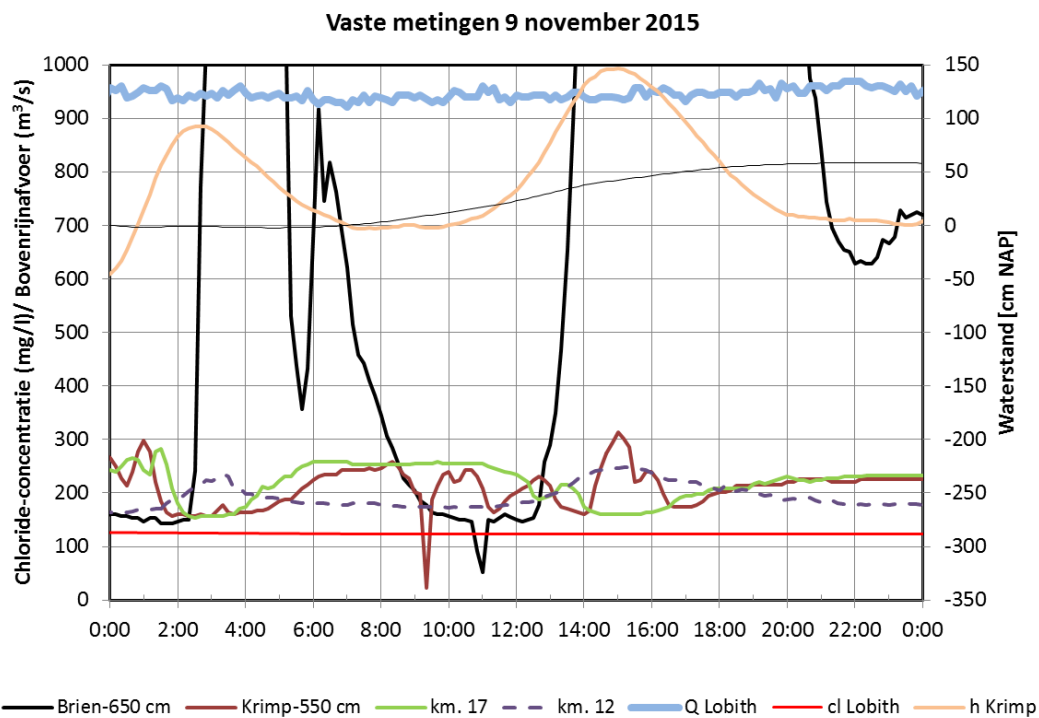
- De verziltingskarakteristieken zijn vergelijkbaar met die op de eerdere dagen. Er is nu weer sprake van 1 piek aan het begin van de periode met instroming (11:00 uur). De chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienenoordbrug is op dat moment laag, zodat de piek niet het gevolg is van toestroming van water vanaf de Nieuwe Maas.
- De chlorideconcentratie rond het tweede laagwater (20:00-22:00 uur) is weer toegenomen ten opzichte van het eerste laagwater van deze dag (09:00 uur), zowel in Krimpen als in km. 17.
- Aan het begin van instroming in de Hollandsche IJssel rond 23:00 uur treedt geen concentratiepiek op in Krimpen en in km. 17.
- De maximale concentratie in km. 12 is iets toegenomen ten opzichte van de voorafgaande dag.
- De maximale verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel (Krimpen en km. 17) is op deze dag vergelijkbaar met die op 6 november



Figuur D.9 Metingen op 8 november 2015.

8 november:

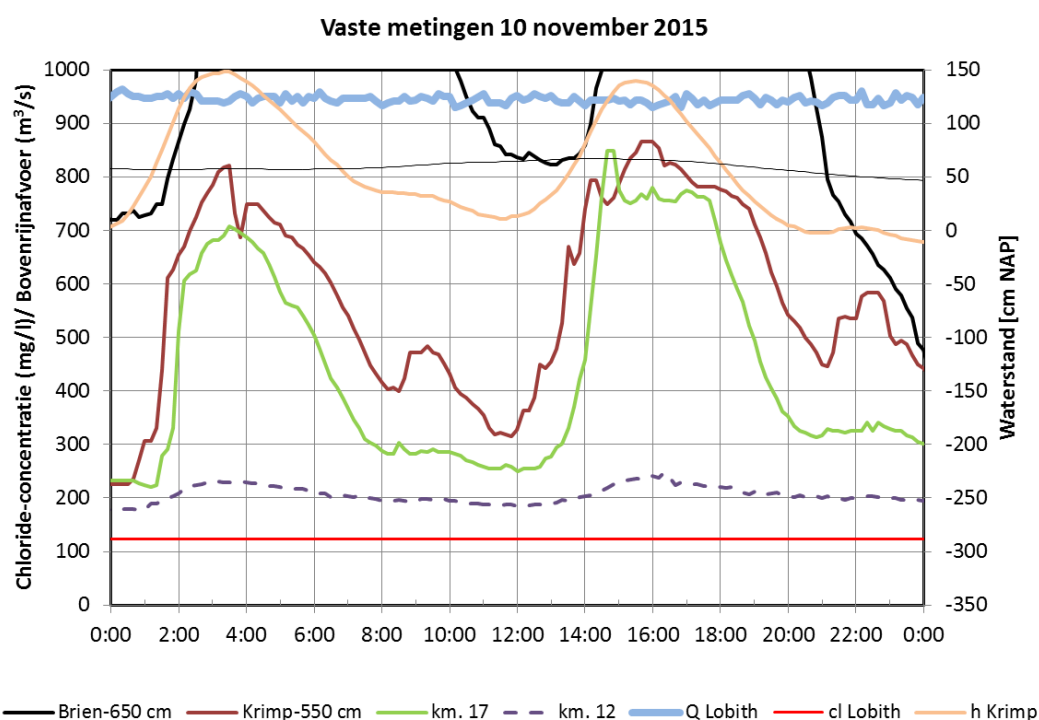
- Tijdens deze dag treedt een afwaaiing op wat zichtbaar is in een verlaagd laagwater.
- Aan het begin van de instroming van de Hollandsche IJssel, vanaf 12:00 uur, treedt weer een concentratiepiek op, eerst in Krimpen en 1 uur later in km. 17. Na hoogwater, tijdens uitstroming, komt de "zoutprop" weer langs, eerst in km. 17 en vervolgens in Krimpen. De chlorideconcentratie bij de van Brienoordbrug rond het eerste laagwater (08:00 uur) was hoog, zodat verzilt water naar de Hollandsche IJssel is gestroomd.
- Aan het begin van instroming in de Hollandsche IJssel (na 24:00 uur op 9 november, zie Figuur D.10) treedt geen concentratiepiek op. De chlorideconcentratie bij de van Brienoordbrug rond het tweede laagwater (21:00 uur) is laag en er is geen verzilt water naar de Hollandsche IJssel gestroomd.
- Tijdens het tweede laagwater (22:00 uur) is de chlorideconcentratie zowel in Krimpen als in km. 17 lager dan tijdens het eerste laagwater (rond 10:00 uur). Dit is mogelijk het gevolg van de extra uitstroming ten gevolge van de middenstandsverlaging.
- De maximale concentratie in km. 12 is groter dan tijdens 7 november.
- De maximale verzilting in de mond is vergelijkbaar met, of iets groter dan, de verzilting op 7 november.



Figuur D.10 Metingen op 9 november 2015.

9 november:

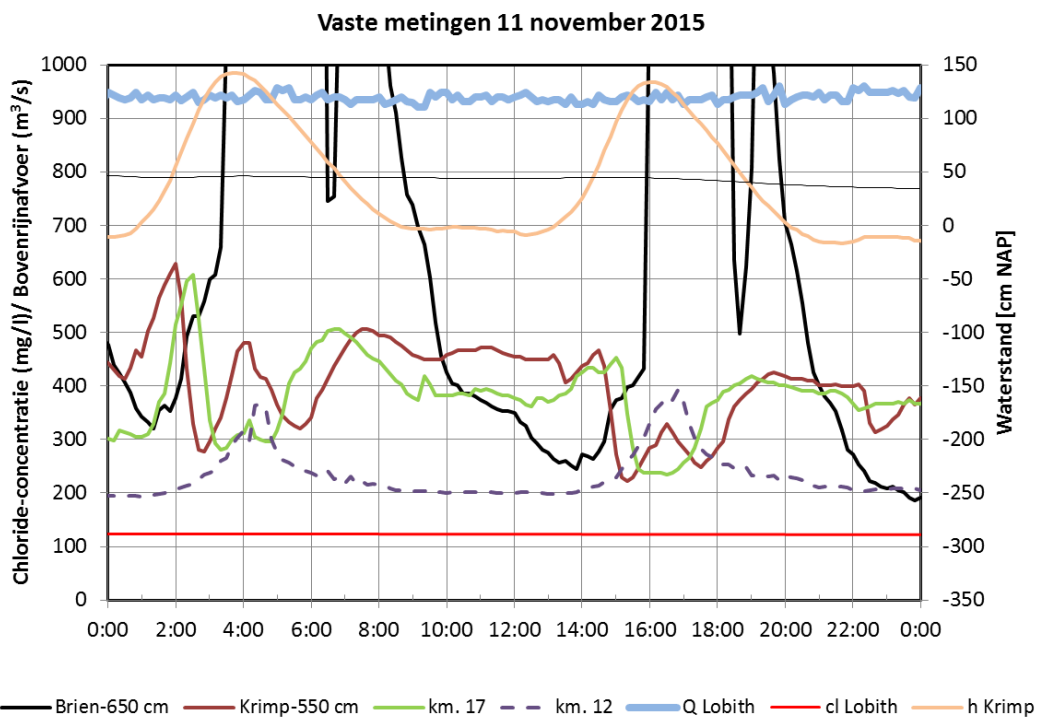
- Er zijn op deze dag geen duidelijke concentratiepieken aan het begin van instroming in de Hollandsche IJssel (na 10:00 uur). Op basis van de gemeten chlorideconcentratie bij de van Brienoordbrug rond laagwater zou dit wel worden verwacht.
- Ondanks de sterke toename van de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug als gevolg van de middenstandsopzet (verhoogd hoogwater) is er vrijwel geen verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel. Door de uitstroming van de Hollandsche IJssel na hoogwater wordt de zoutindringing tegengegaan.
- Aan het eind van de dag blijft tijdens laagwater de Nieuwe Maas bij de van Brienoordbrug nog sterk verzilt.



Figuur D.11 Metingen op 10 november 2015.

10 november:

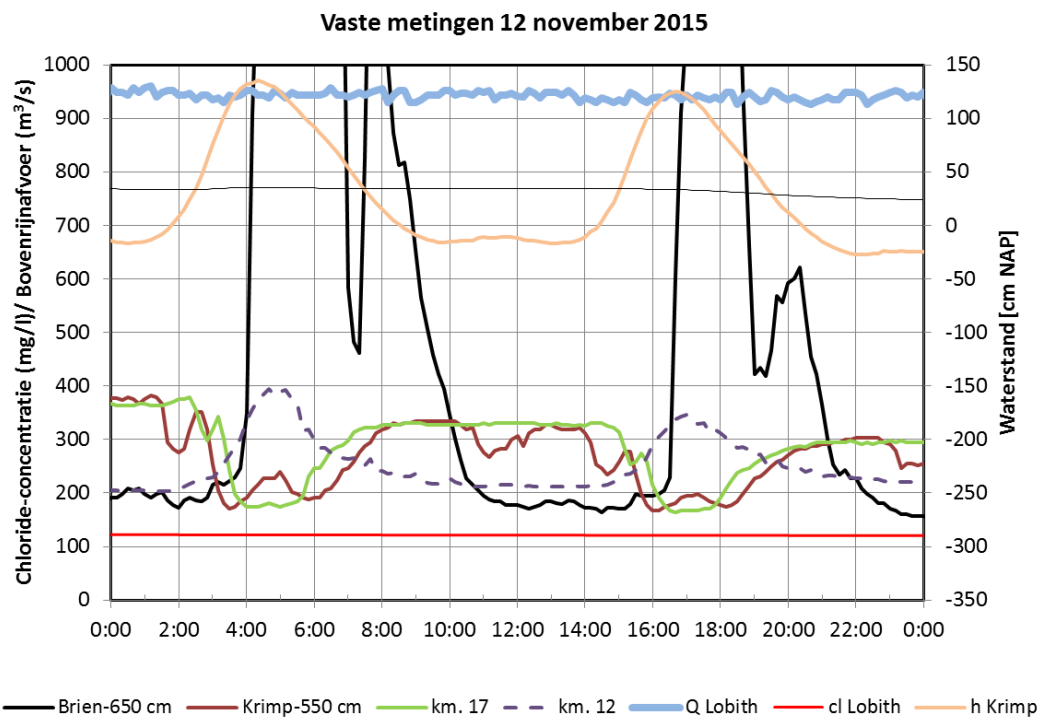
- De permanente verzilting van de Nieuwe Maas ter hoogte van de Hollandsche IJssel leidt tot een sterke verzilting van de Hollandsche IJssel bij Krimpen en km. 17. De verzilting begint wanneer de Hollandsche IJssel gaat instromen (vanaf 0:00 uur). Tijdens uitstroming daalt de chlorideconcentratie weer maar aan het eind van deze periode met uitstroming is de concentratie nog verhoogd: 300 mg/l op 12:00 uur bij Krimpen.
- Tijdens de volgende periode met instroming, na 12:00 uur, is er opnieuw verzilting in Krimpen en km. 17. Als de Hollandsche IJssel weer gaat uitstromen (vanaf 15:30 uur) dalen de concentraties, waarbij de concentraties in Krimpen en km. 17 aan het eind van deze periode iets hoger zijn dan aan het eind van de voorafgaande periode met uitstroming. De Hollandsche IJssel wordt in de mond dus geleidelijk zouter.
- In km. 12 wordt de chlorideconcentratie (nog) niet beïnvloed door de middenstandsopzet.



Figuur D.12 Metingen op 11 november 2015.

11 november:

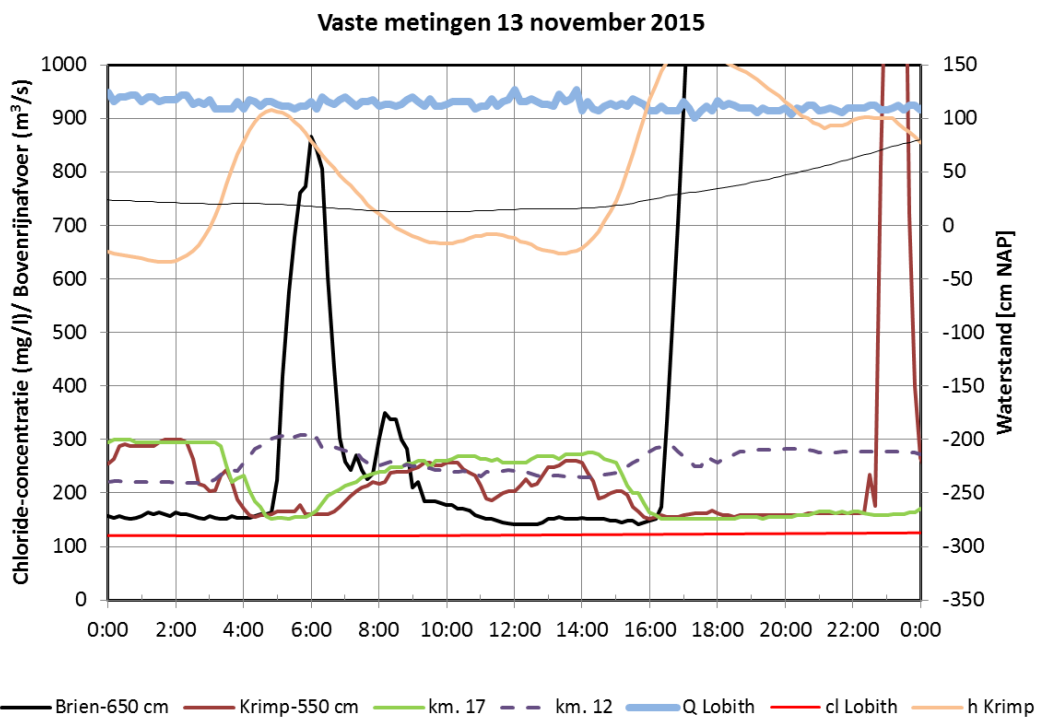
- Op deze dag is de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug lager dan op 10 november. Na het begin van instroming in de Hollandsche IJssel rond 01:00 uur treedt weer een concentratiepiek op in Krimpen en later in km. 17. Dit is niet het geval bij de 2^e instroomperiode vanaf 13:00 uur. Er treedt dan juist een verlaging van de chlorideconcentratie op, omdat op dat moment de concentratie in de Nieuwe Maas lager is dan in de Hollandsche IJssel.
- Aan het eind van de laatste uitstroomperiode op deze dag (20:00 uur) is de chlorideconcentratie lager dan aan het eind van de voorafgaande uitstroomperiode (8:00 uur). Deze afname komt door wegspoeling van verzilt water naar de Nieuwe Maas en vermoedelijk ook door dispersief transport in de richting van Gouda. De piek in km. 12 is dan het resultaat van dit dispersief transport.



Figuur D.13 Metingen op 12 november 2015.

12 november:

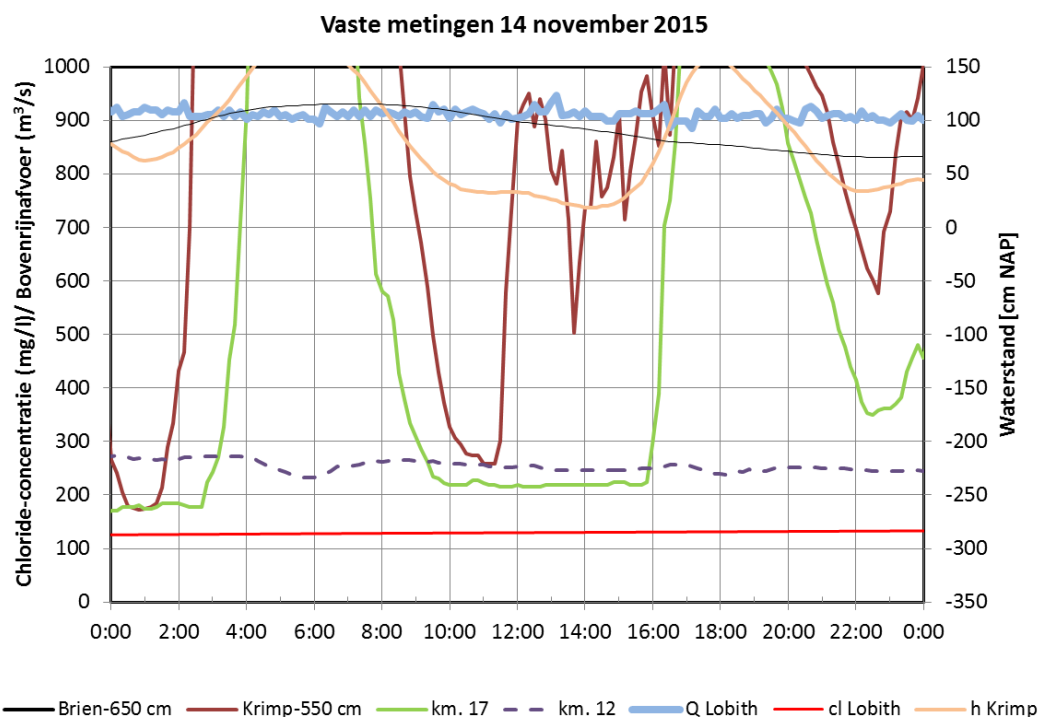
- Ook op deze dag neemt tijdens instroming van de Hollandsche IJssel (vanaf 01:00 uur) de chlorideconcentratie in Krimpen en km. 17 af, omdat de concentratie in de Nieuwe Maas lager is dan die in de Hollandsche IJssel.
- De chlorideconcentratie in de Hollandsche IJssel neemt geleidelijk af.
- In km. 12 is de verzilting vergelijkbaar met die op 11 november.



Figuur D.14 Metingen op 13 november 2015.

13 november:

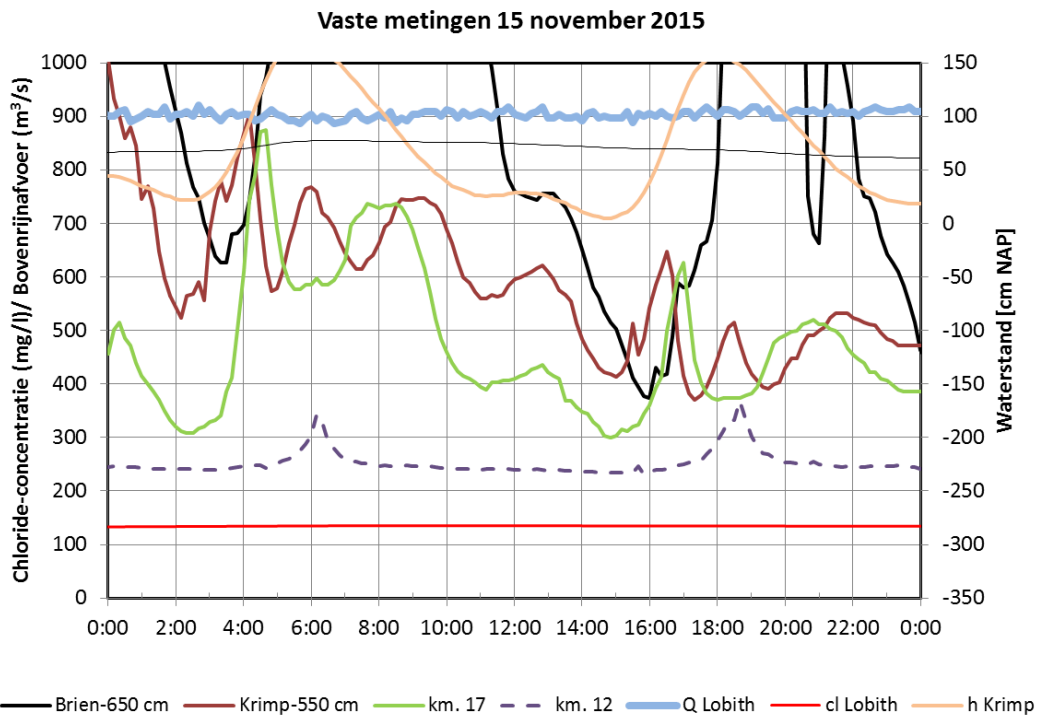
- Tijdens de eerste instroomperiode van de Hollandsche IJssel, vanaf 02:00 uur, neemt de chlorideconcentratie in Krimpen en km. 17 af omdat relatief zoet water vanuit de Nieuwe Maas toestroomt. Tijdens de tweede instroomperiode, vanaf 14:00 uur, is dit ook het geval.
- De maximale chlorideconcentratie in km. 12 neemt verder af terwijl de minimale concentratie iets toeneemt. Het chlorideverloop wordt dus in longitudinale richting meer “uitgesmeerd” (vlakker verloop).
- Aan het eind van deze dag vindt weer een (forse) middenstandsverhoging op resulterend in een grote toename van de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug. Omdat de Hollandsche IJssel op het moment van de verhoging uitstroomt (na 17:00 uur) wordt zoutindringing in de Hollandsche IJssel tegen gegaan, dit ondanks de hoge chlorideconcentratie in de Nieuwe Maas.



Figuur D.15 Metingen op 14 november 2015. De chlorideconcentratie bij de van Brienoordbrug is groter dan de maximale waarde van de verticale as.

14 november:

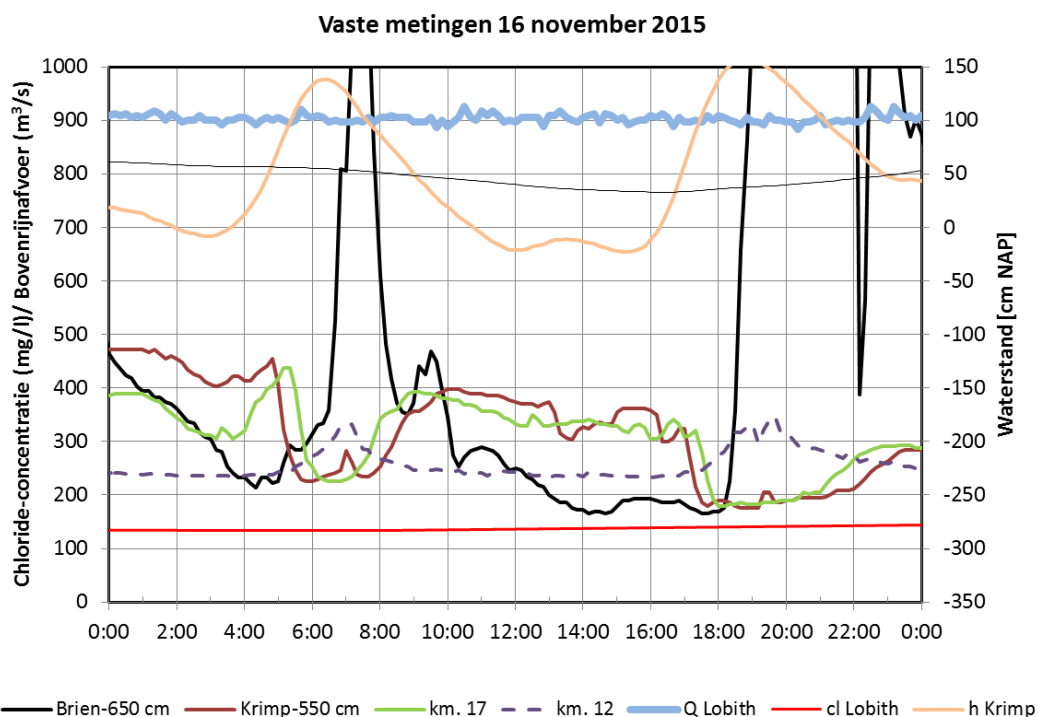
- Aan het begin van de eerste instroomperiode, vanaf 01:00 uur, is de Nieuwe Maas sterk verzilt (de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug valt buiten de schaal van de verticale as). Zodra de Hollandsche IJssel gaat instromen neemt de concentratie in Krimpen en, even later in km. 17, sterk toe.
- Tijdens uitstroming daalt de chlorideconcentratie weer, bijna tot de oorspronkelijke waarde van 150 mg/l. Aan het eind van deze dag, na de laatste uitstroomperiode, blijft de chlorideconcentratie in Krimpen en in km. 17 op een hoger niveau. De mond is dus permanent verzilt op deze dag.
- In km. 12 wordt de chlorideconcentratie niet beïnvloed door de verzilting van de mond.



Figuur D.16 Metingen op 15 november 2015.

15 november:

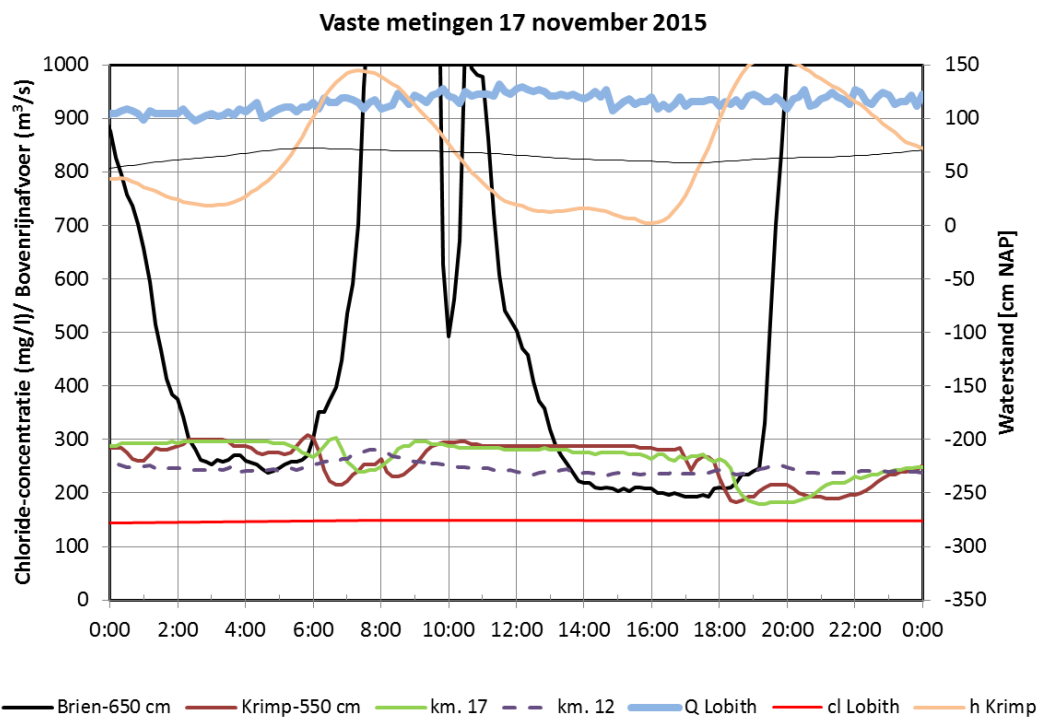
- Zowel in Krimpen als in km. 17 is sprake van permanente verzilting. Door dispersie kan een netto zouttransport plaatsvinden in de richting van Gouda.
- Het resultaat van het dispersieve transport is een toename van de chlorideconcentratie in km. 12.



Figuur D.17 Metingen op 16 november 2015.

16 november:

- Het chlorideverloop t.p.v. de van Brienoordbrug keert weer terug naar lagere waarden. Tijdens instroming van de Hollandsche IJssel neemt de concentratie in Krimpen en km. 17 af, omdat verzilt water in de Hollandsche IJssel wordt verdrongen door relatief zoet water afkomstig van de Nieuwe Maas.
- De chlorideconcentratie in de mond van de Hollandsche IJssel neemt langzaam af. In km. 12 is dat nog niet het geval.



Figuur D.18 Metingen op 17 november 2015.

17 november:

- Op deze dag neemt de chlorideconcentratie in Krimpen en km. 17 verder af.
- Ook het concentratieverloop in km. 12 is verder afgevlakt.

D.2 Vergelijking met zoutmetingen op 10 september 2013

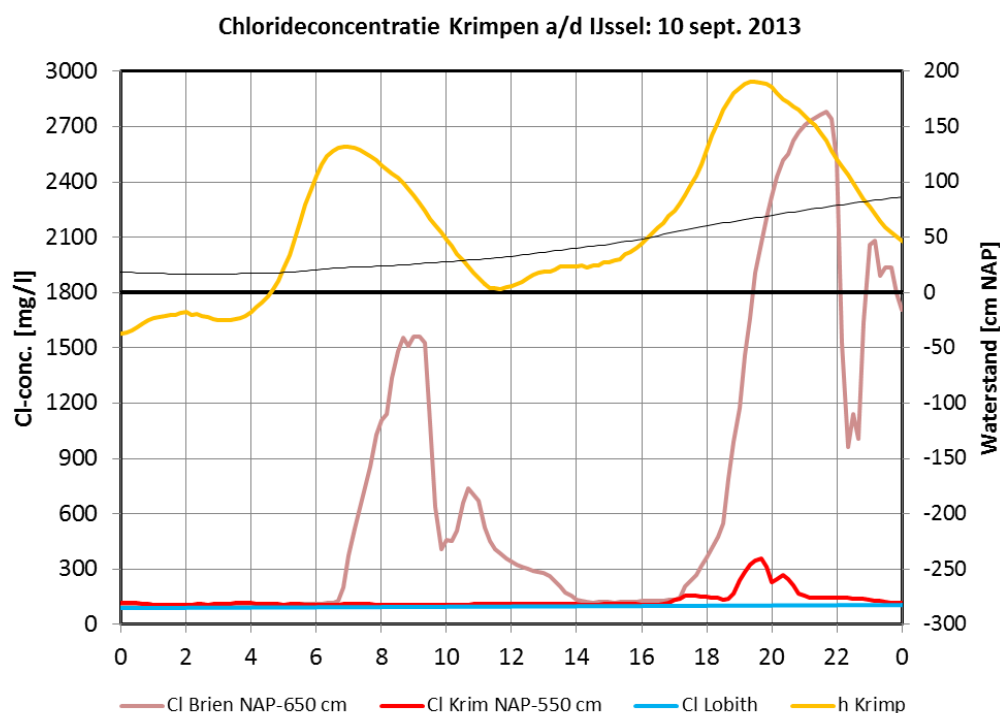
In Kuijper (2015) zijn zoutmetingen op 10 september 2013 geanalyseerd (Figuur 3.29 in Kuijper, 2015). Op deze dag zijn ook debietmetingen in de Hollandsche IJssel uitgevoerd. Figuur D.19 toont nogmaals de resultaten maar in plaats van het debiet wordt de waterstand te Krimpen a/d IJssel getoond, zoals dat ook is gedaan in de figuren in Par. D.1¹⁰. De Bovenrijnafvoer op 8 september 2013 was 1180 m³/s. Op 10 september is een middenstandsverhoging opgetreden wat heeft geleid tot een geringe toename van de chlorideconcentratie bij Krimpen a/d IJssel. De toename is vlak voor hoogwater als er nog instroming optreedt in de mond van de Hollandsche IJssel. Omdat het zout pas laat tijdens deze periode met instroming Krimpen bereikt, wordt het tijdens afgaand tij weer de Hollandsche IJssel uitgespoeld. In dit geval verzilt de Hollandsche IJssel dus niet verder opwaarts. In overeenstemming met de resultaten voor 2-17 november 2015 volgt ook hier dat de sterke verhoging van de chlorideconcentratie t.p.v. de van Brienoordbrug na het hoogwater van 19:30 uur niet merkbaar is bij Krimpen. Op dat moment stroomt de Hollandsche IJssel uit en wordt verzilting in deze riviertak tegengegaan.

Op 11 september, zie Figuur D.20, is aan het einde van de ebperiode in de Nieuwe Maas nog steeds sprake van verzilting bij de van Brienoordbrug. Zodra de Hollandsche IJssel na laagwater begint in te stromen wordt een toename van de chlorideconcentratie bij Krimpen

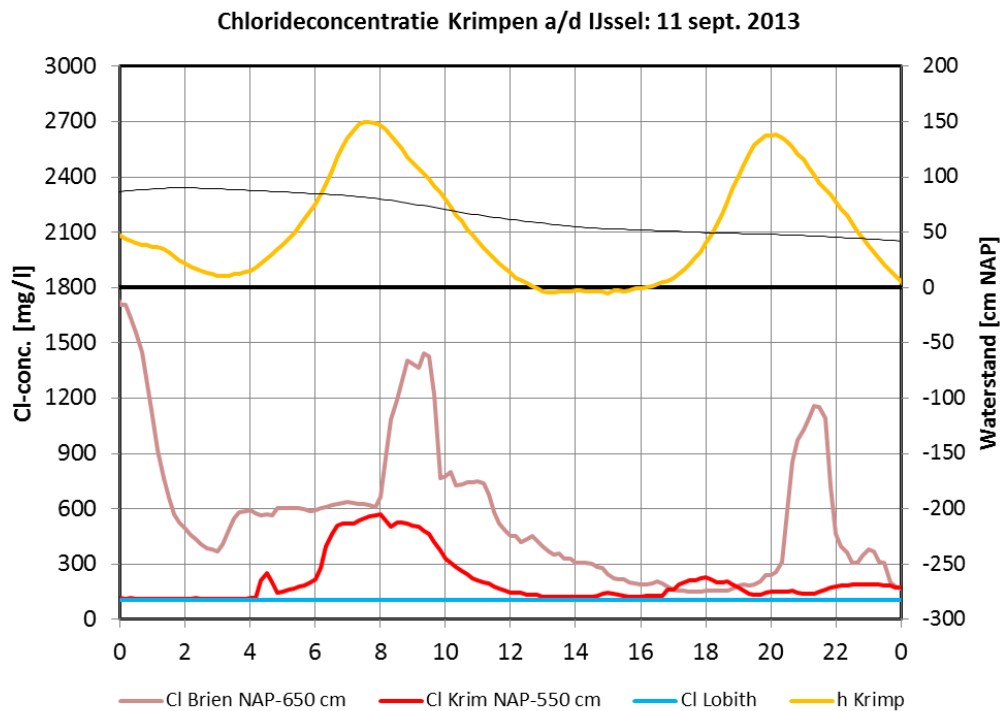
¹⁰ De maximale en minimale waarden van de assen voor de chlorideconcentratie en de waterstand verschillen van die in Figuur D.3 t/m Figuur D.18.

waargenomen. Na hoogwater, als de Hollandsche IJssel gaat uitstromen, neemt de concentratie bij Krimpen weer af tot de achtergrond waarde; het zout wordt weer de Hollandsche IJssel t.p.v. Krimpen uitgespoeld, waarschijnlijk mede geholpen door de middenstandsverlaging die dan optreedt. Aan het begin van de volgende getijperiode, als de Hollandsche IJssel weer gaat instromen, is er nog een geringe toename van de chlorideconcentratie. Kennelijk bevindt zich nog licht verzilt water in de mond tussen Krimpen en de Nieuwe Maas.

Op 12 september treedt geen verzilting meer op bij Krimpen a/d IJssel.



Figuur D.19 Chlorideconcentratie bij de van Brienoordbrug (NAP-650 cm) en bij Krimpen a/d IJssel (NAP-550 cm) en de waterstand te Krimpen a/d IJssel op 10 september 2013.



Figuur D.20 Chlorideconcentratie bij de van Brienoordbrug (NAP-650 cm) en bij Krimpen a/d IJssel (NAP-550 cm) en de waterstand te Krimpen a/d IJssel op 11 september 2013.

Verzilting van de mond van de Hollandsche IJssel bij Krimpen (in dit geval tot 600 mg Cl/l) hoeft dus niet te leiden tot een verzilting van Gouda zolang er geen sprake is van permanente verzilting. Verder blijkt dat als de middenstandsverhoging direct wordt gevolgd door een verlaging de tijdsduur met een verhoogde chlorideconcentratie in de mond van de Hollandsche IJssel kort is, d.w.z. het zoute water wordt de Hollandsche IJssel weer snel uitgespoeld. Verwacht mag worden dat bij een langdurige verzilting (langer dan een getijperiode) zout door dispersie de Hollandsche IJssel op kan trekken in de richting van Gouda. Deze situatie kan zich voordoen als de middenstand langdurig verhoogd blijft of als de Bovenrijnafvoer gedurende een lange tijd laag is.

D.2 Presentatie (Kennisdag Zoetwater, 8 november 2016)



Deltares
Enabling Delta Life



Werking Hollandsche IJssel

Onderdeel van de “Systeemanalyse Rijn-Maasmonding”

Kees Kuijper – Kennisdag Zoetwater

15 december 2016

Zoutindringing: onderzoeksmiddelen

Distance from the estuary mouth (km)	Salinity (‰) - LWS 29/05/1984	Salinity (‰) - HWS 29/05/1984
0	30	30
5	20	30
10	10	28
15	5	25
20	2	15
25	1	5
30	0	0

Systemanalyse: onderdeel van LT Verzilting

1. Wat is de stand van zaken met betrekking tot het project?

- In 2015 en 2016 debiet- en chloridemetingen geanalyseerd;
- Nieuwe metingen: wanneer zinvol (lage afvoeren) wordt door RWS gemeten in de HOIJS samen met waterschappen en HBR;
- (Voorspellende vergelijking voor de dispersiecoëfficiënt.)

2. Welke resultaten zijn er tot op heden behaald?

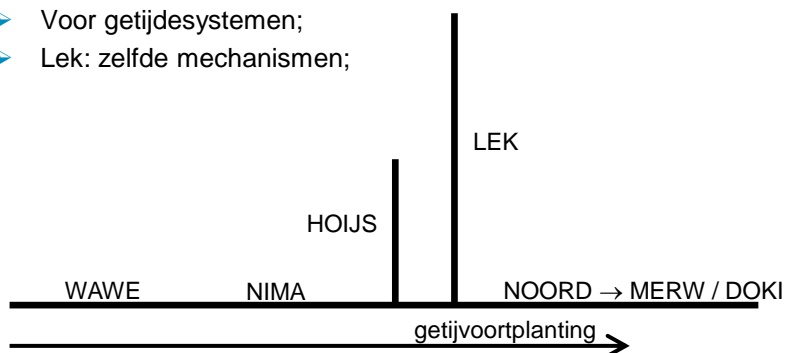
- Systeeminzicht HOIJS:
 - Debiet monding HOIJS;
 - Faseverschil debiet NIMA – HOIJS;
 - Permanente verzilting monding;
- Dispersiecoëfficiënt:
 - Van belang voor zoutindringing (in het algemeen);
 - Van belang voor (surplus) lozingsdebiet KWA (HOIJS).

15 december 2016

Deltares

3. Welke gebruikswaarde hebben de resultaten voor (andere) zoetwaterregio's?

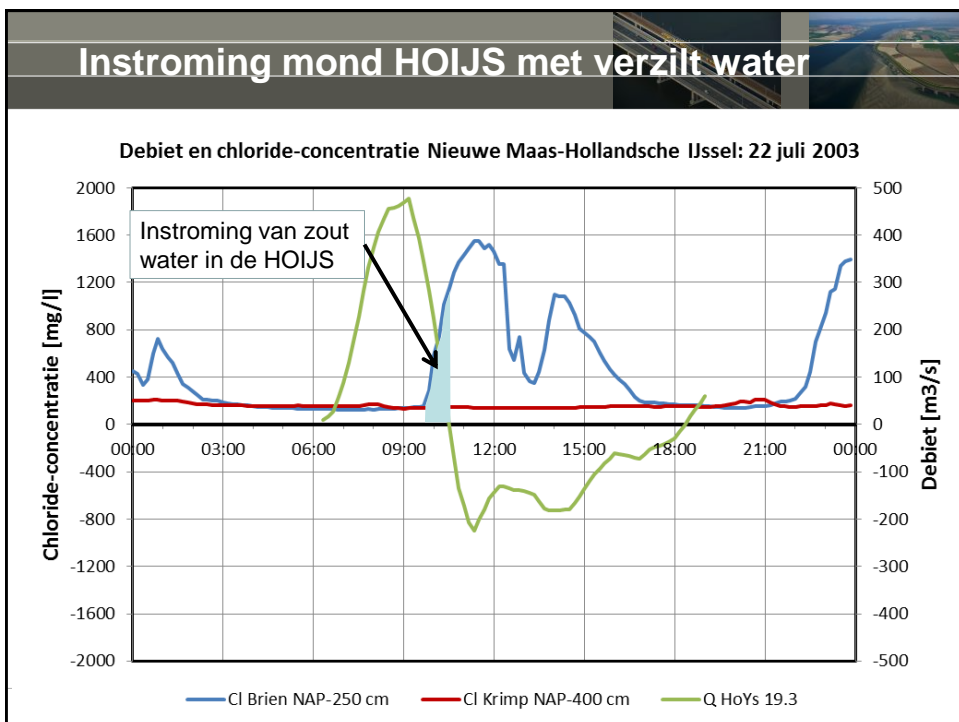
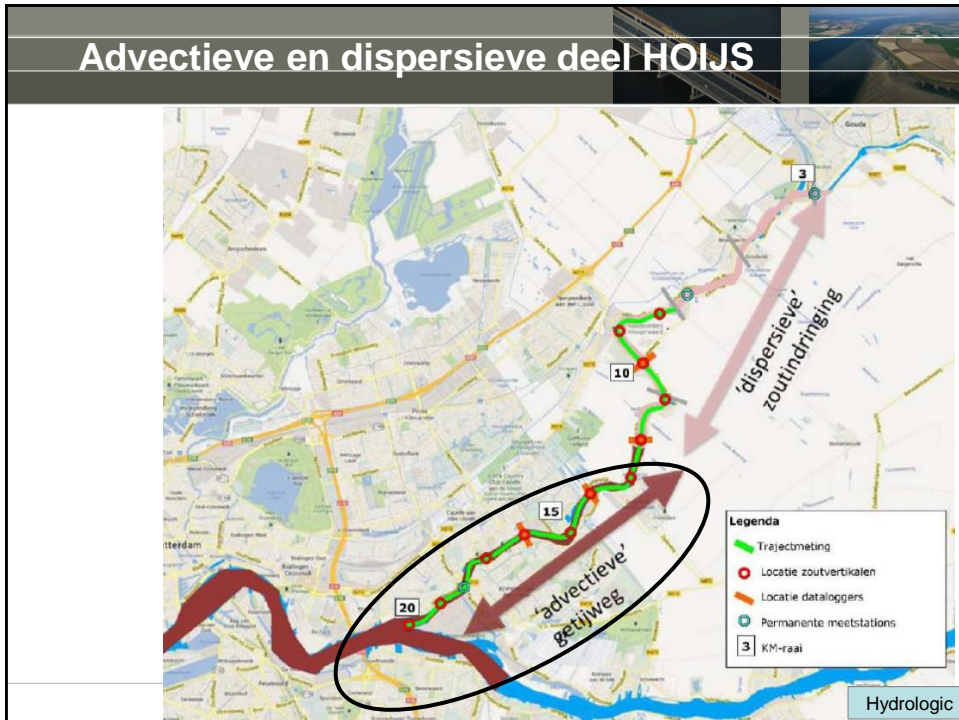
- Voor getijdesystemen;
- Lek: zelfde mechanismen;

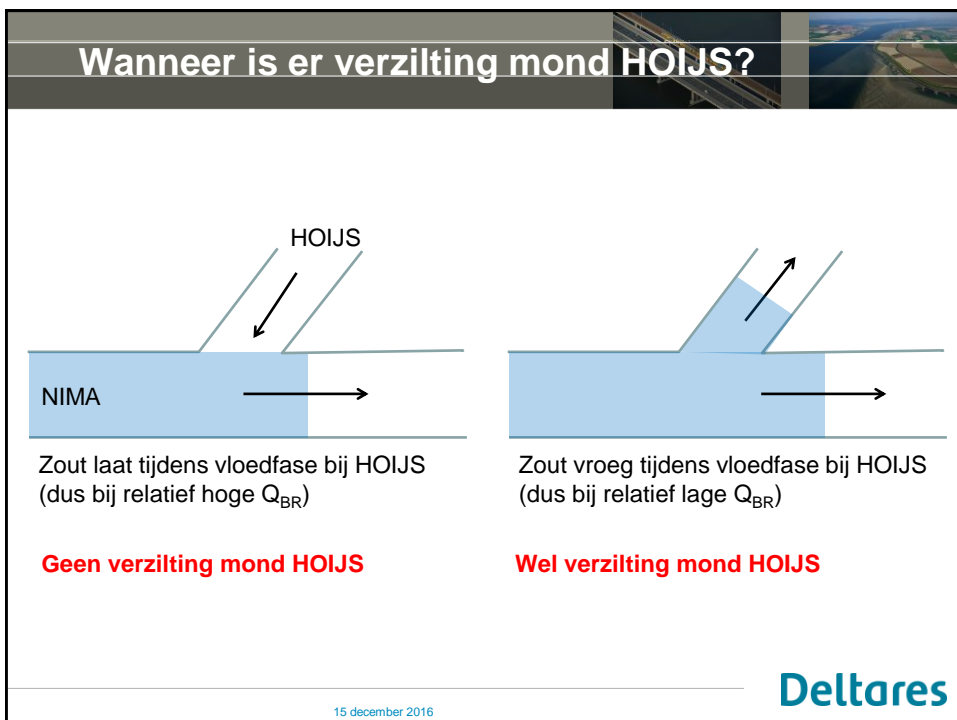
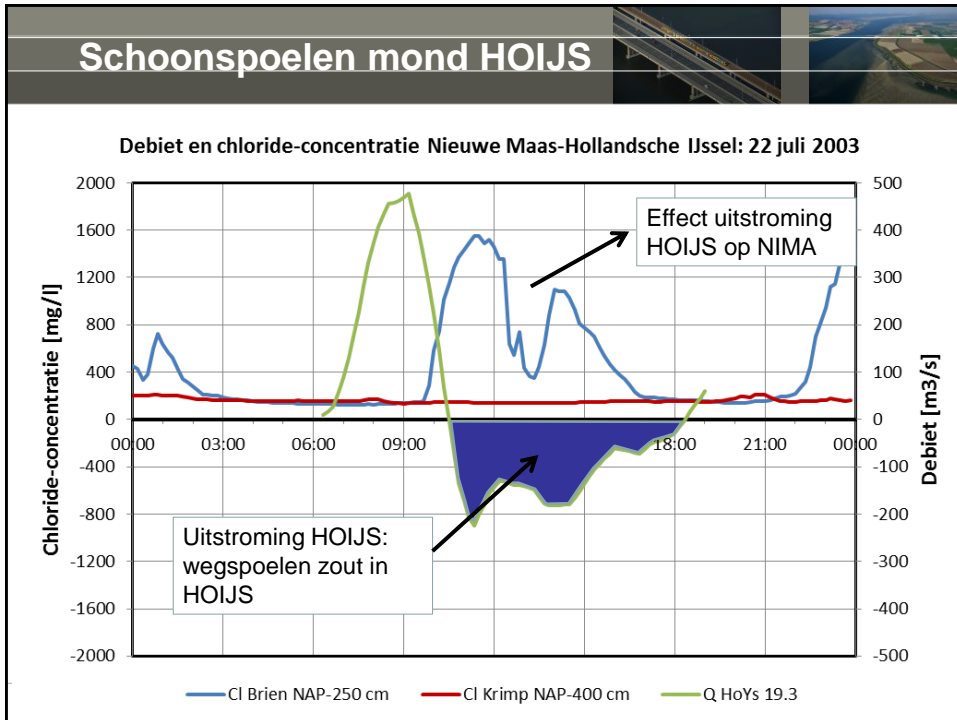


- Dispersiecoëfficiënt verschilt per riviertak → metingen en/of voorspellende vergelijking nodig.

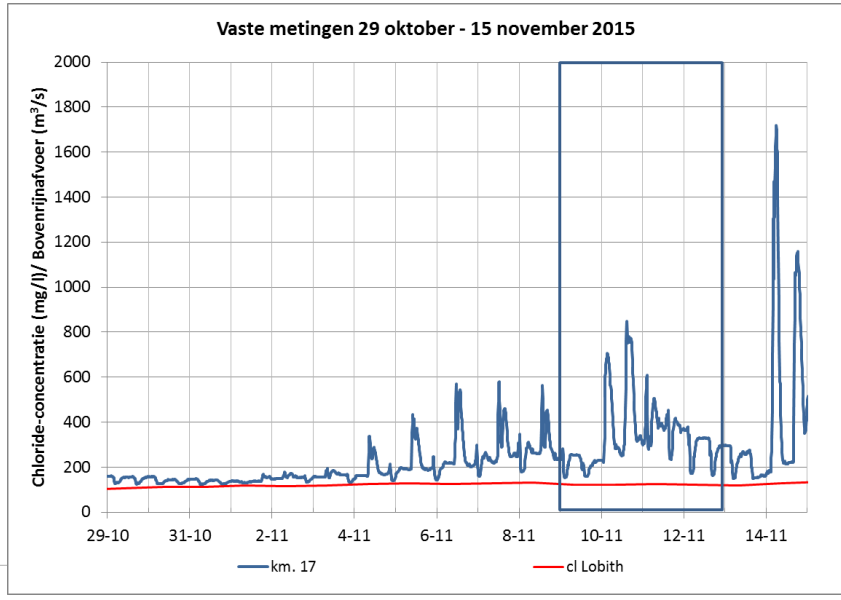
15 december 2016

Deltares

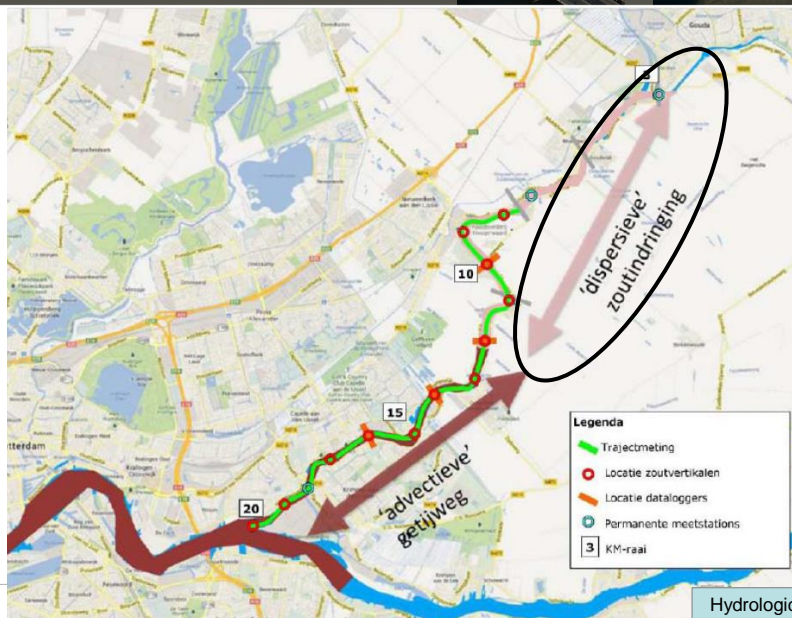


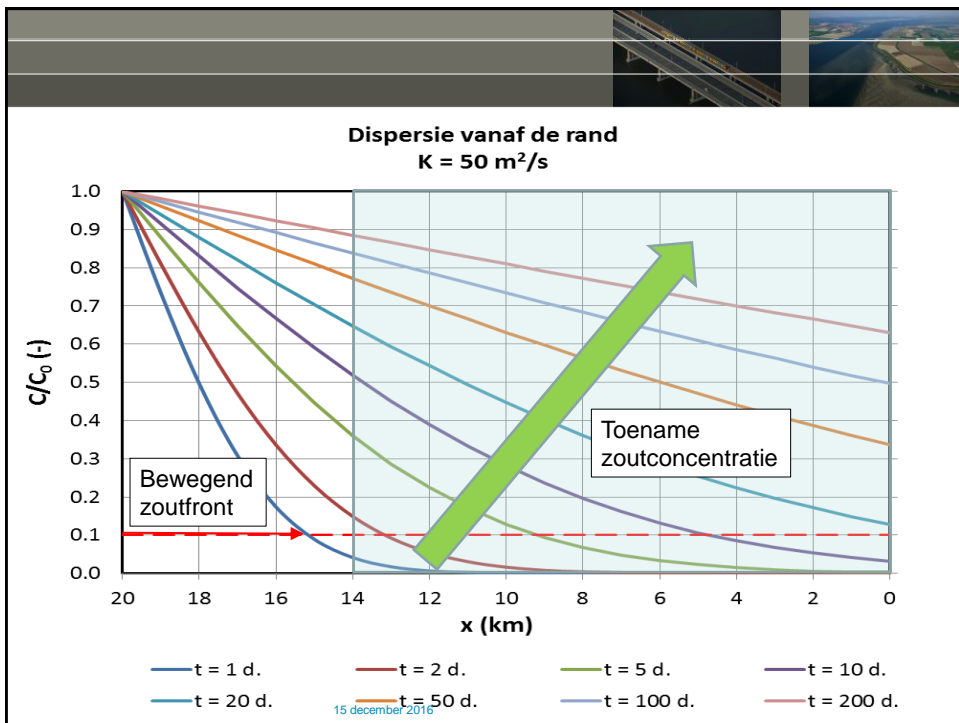
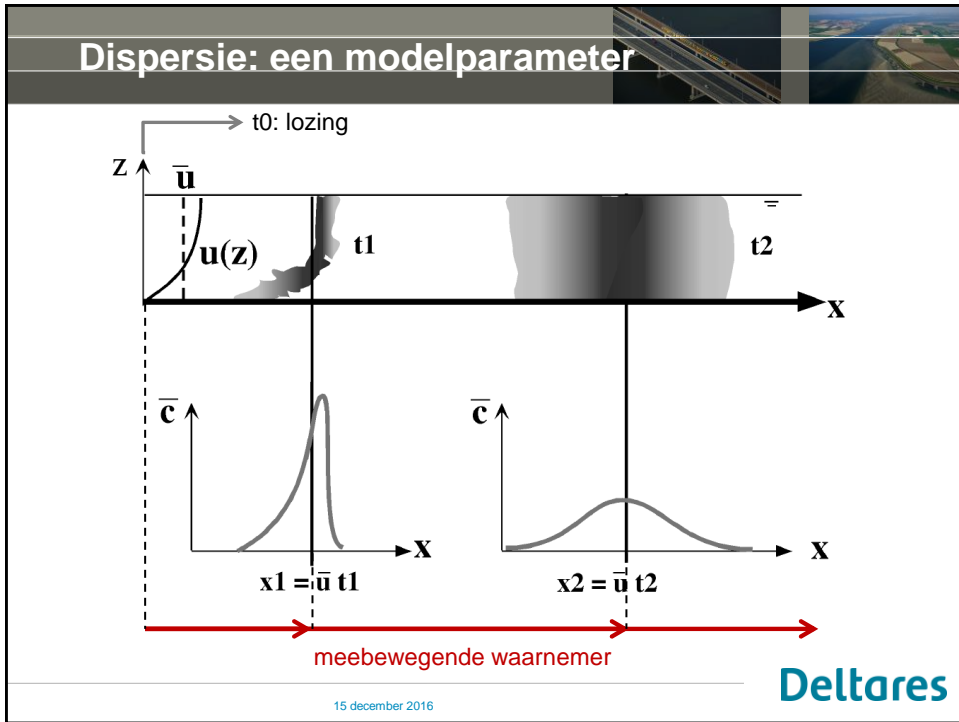


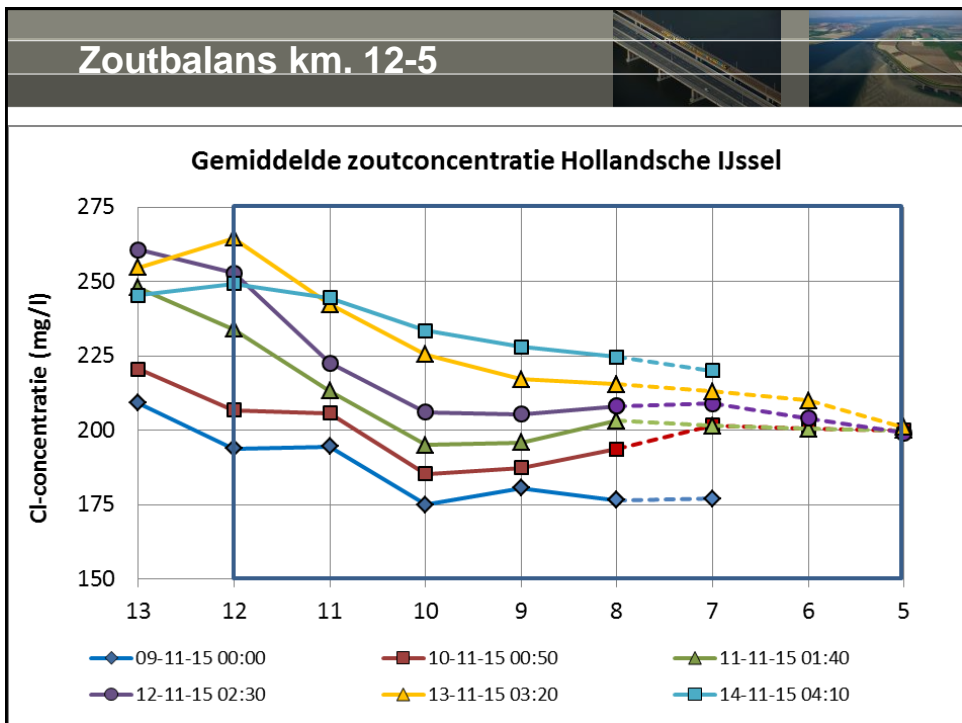
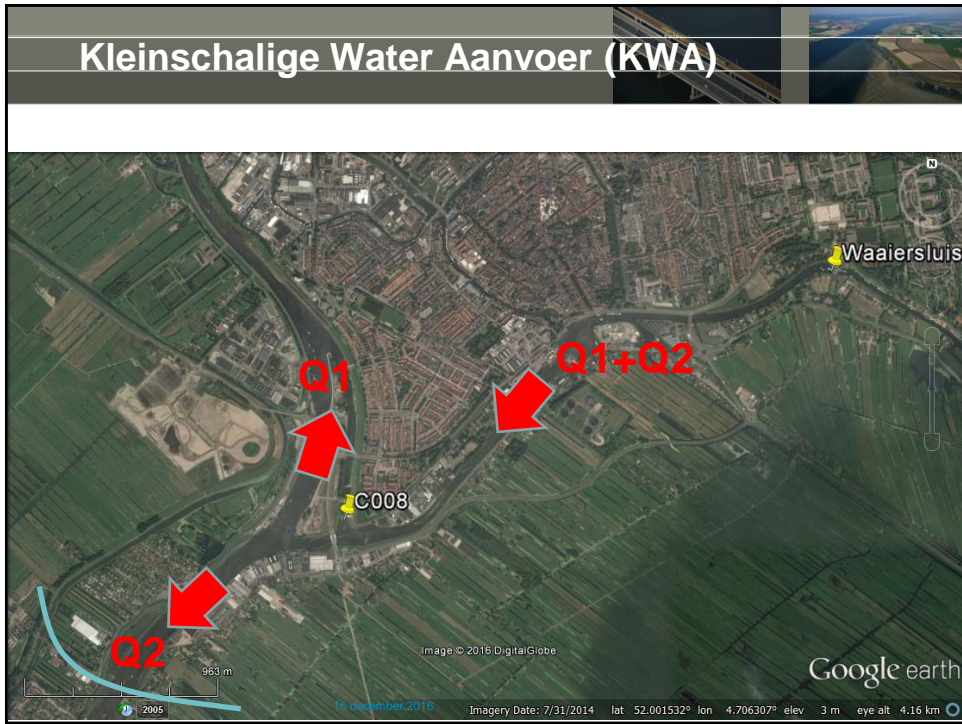
Permanente verzilting



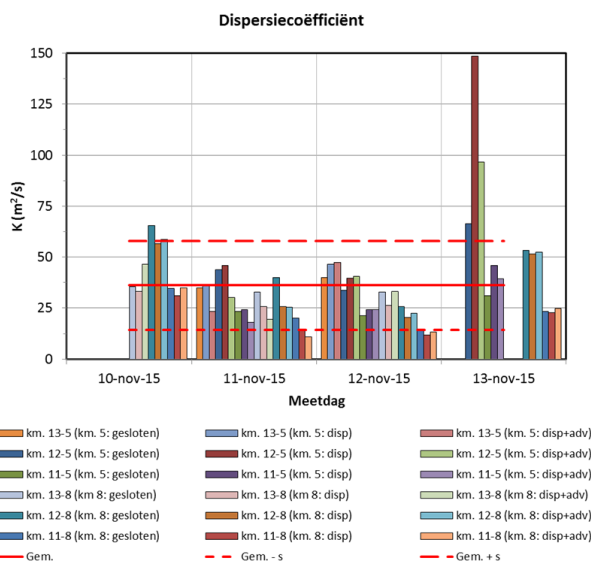
Advectieve en dispersieve deel HOIJS







Dispersiecoëfficiënt per variant



15 december 2016

Deltares

Slotopmerkingen

- Belang van het uitvoeren van metingen is nog steeds groot (systeeminzicht, kalibratie van modellen).
- Dispersiecoëfficiënt verschilt per gebied / riviertak.
- Dispersiecoëfficiënt is geen constante maar een “vergaarbak” van fysische processen. Hiermee rekening houden bij simuleren van scenario's (bv. coëfficiënt kan veranderen door een ingreep).
- (In 2016: onderzoek naar betrouwbare dispersievergelijking.)

15 december 2016

Deltares



Gelegenheid voor vragen

15 december 2016

Deltares

E Verziltingstypen per deelgebied

E.1 Memo

Memo

Aan
Neeltje Kielen, Francien van Luijn

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
20 december 2016	1230077-001-ZWS-0012	20
Van	Doorkiesnummer	E-mail
Marjolein Mens	+31(0)88335 8542	marjolein.mens@deltares.nl

Onderwerp
Karakterisering van deelgebieden in de Rijn-Maasmonding naar type verziltingsproces

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	nov. 2016	Marjolein Mens		Ymkje Huismans		Frank Hoozemans	
				Kees Kuijper			
2	Dec. 2016	Marjolein Mens*	<i>btk</i>	Kees Kuijper	<i>OK</i>	Frank Hoozemans	

* ivm zwangerschapsverlof van Marjolein Mens heeft Ymkje Huismans de commentaren van RWS verwerkt en heeft de definitieve review plaatsgevonden door Kees Kuijper.

1 Inleiding

1.1 Vraag

Het project Wabes (Rijkswaterstaat-WVL) heeft tot doel om inzicht te geven in de waterbeschikbaarheid op een groot aantal locaties langs het hoofdwatersysteem in Nederland. In overleg met regio's en sectoren worden op dit moment locaties gekozen waar waterbeschikbaarheid berekend zal worden. Waterbeschikbaarheid wordt uitgedrukt in een kans van overschrijden of onderschrijden van kritische waarden van afvoer, waterstand, chloride en/of temperatuur. Indien nodig worden kansen gekoppeld aan een minimale overschrijdingsduur. De onderliggende langjarige reeksen worden gesimuleerd met het Nationaal Water Model (NWM) op basis van 100-jarige reeksen van o.a. neerslag, verdamping en Rijn- en Maasafvoer.

In de Rijn-Maasmonding (RMM), waar waterbeschikbaarheid vooral afhangt van de chlorideconcentratie, wil RWS-WVL de keuze voor representatieve locaties onderbouwen vanuit kennis over de verziltingsprocessen. RWS-WVL heeft Deltares daarom gevraagd om RMM op te delen in deelgebieden en te beschrijven welke typische verziltingsprocessen per deelgebied kunnen optreden.

De kennis van verziltingsprocessen per deelgebied kan binnen Wabes gebruikt worden bij het beantwoorden van de volgende vragen:

- Welke statistische variabele is doelmatig om waterbeschikbaarheid op basis van chlorideconcentratie te kwantificeren (in relatie tot watergebruiker)?
- Op welke tijdschaal moeten verziltingsprocessen gemodelleerd worden?

1.2 Doel

Het doel van dit memo is om de Rijn-Maasmonding in te delen in deelgebieden naar type verziltingsproces en de typische verziltingsprocessen in voorbeeldfiguren te visualiseren. Elk

deelgebied wordt gekarakteriseerd aan de hand van tijdreeksen van chloride voor verschillende combinaties van getij/opzet en Rijnafvoer bij Lobith. Uit de karakterisering kan het volgende worden afgeleid:

- Welke forceringen (stormopzet, rivierafvoer, etc.) zijn dominant?
- Hoe (makkelijk) spoelt het zout weer weg?
- Zijn chlorideverhogingen kortdurend/hoog of langdurige/laag van aard?

1.3 Achtergrond/eerder onderzoek

In 2015 is binnen het project Systeemanalyse een overzicht gegeven van eerder onderzoek naar de kans op verzilting in de Rijn-Maasmonding (RMM), en is de doelmatigheid van verschillende verziltingsindicatoren verkend (Kranenburg e.a. 2015a). Een statistische variabele (of verziltingsindicator) is bijvoorbeeld het gemiddeld aantal overschrijdingsdagen per jaar.

Hieruit bleek dat de volgende overwegingen een rol spelen bij de keuze voor een verziltingsindicator:

1. Welke variabelen zijn interessant voor de gebruiker (bv aantal overschrijdingsdagen of gemiddelde concentratie per jaar)?
2. Welke verziltingsprocessen spelen een rol?
 - a. Welke forceringen (zeewaterstand, rivierafvoer) zijn dominant?
 - b. Hoe (makkelijk) spoelt het zout weer weg?
 - c. Zijn chlorideverhogingen kortdurend/hoog of langdurige/laag van aard?
3. Is er een buffer/ neemt de schade toe naarmate de overschrijding langer aanhoudt?
4. Bij welke minimale overschrijdingsduur ontstaan problemen/schade?
5. Indien met modelresultaten wordt gewerkt moet overwogen worden of de gewenste indicator op de gewenste tijdschaal nauwkeurig genoeg gemodelleerd kan worden.

In dit memo geven we per deelgebied antwoord op de tweede vraag: welke verziltingsprocessen spelen een rol? De doorvertaling naar verziltingsindicatoren en modelkeuze voor Wabes gebeurt hier niet.

2 Aanpak

Een eerste indeling in deelgebieden is gemaakt op basis van kennis uit de eerste fase van de systeemanalyse (Kranenburg e.a., 2015a), en komt grofweg overeen met de begrenzing van de riviertakken. Deze indeling is gegeven in Figuur 2.1. Het vervolg van dit memo geeft per deelgebied een overzicht van de verschillende verziltingsprocessen die er spelen of kunnen gaan spelen in de toekomst. Hierbij is aandacht besteed aan gemiddelde variatie in chlorideconcentraties, tijdschalen van verzilting, en ontwikkelingen in de toekomst.

Om verschillende processen te visualiseren is gebruik gemaakt van zoutmetingen in de periode 1996 – 2006 (uurwaarden), afvoermetingen bij Lobith (dagwaarden) en windopzet bij Hoek van Holland. De windopzet is gedefinieerd als het verschil in de gemeten waterstand en de gemodelleerde astronomische getijwaterstand. De windopzetreeks is door Tijssen en Diermanse (2009) afgeleid.

In elk deelgebied is in de meetreeks van een bijpassende meetlocatie gezocht naar een voorbeeld van elk van de volgende zes combinaties van Bovenrijnafvoer (Q_{BR}) en zeewaterstand (H):

- Normale afvoer ($Q_{BR} > 1700 \text{ m}^3/\text{s}$) en gemiddeld getij (opzet $\sim 0 \text{ m}$)
- Normale afvoer ($Q_{BR} > 1700 \text{ m}^3/\text{s}$) en windopzet (opzet $> 0.5 \text{ m}$)
- Lage afvoer ($1100 < Q_{BR} < 1700 \text{ m}^3/\text{s}$) en gemiddeld getij
- Lage afvoer ($1100 < Q_{BR} < 1700 \text{ m}^3/\text{s}$) en windopzet
- Zeer lage afvoer ($Q_{BR} < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$) en gemiddeld getij
- Zeer lage afvoer ($Q_{BR} < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$) en windopzet

De grenswaarden voor windopzet en afvoer zijn arbitrair en moeten als indicatief worden beschouwd. Het is bijvoorbeeld niet zo dat het systeem opeens heel anders reageert zodra de Rijnafvoer lager wordt dan 1700 of $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij sommige locaties is er geen onderscheid waar te nemen in verziltingsproces bij lage of zeer lage afvoer. Bovendien kunnen de precieze concentraties niet opgehangen worden aan enkel de combinatie van afvoer en windopzet. De gekozen grenswaarden voor afvoer zijn afgeleid uit het huidige sluitingsregime van de Haringvlietsluizen. Bij een afvoer van $Q_{BR} < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn de Haringvlietsluizen geheel gesloten. Tussen $1100 < Q_{BR} < 1700 \text{ m}^3/\text{s}$ staan de sluisen bij eb in beperkte mate open (25 m^2). Pas als de $Q_{BR} > 1700 \text{ m}^3/\text{s}$ gaan de sluisen bij eb verder open. Als grens voor windopzet is $\sim 0.5 \text{ m}$ aangehouden.

Figuur 2.2 geeft een kwalitatieve beschrijving van verziltingsprocessen die kunnen optreden bij elk van de zes combinaties. Met noordrand wordt grofweg het gebied van Nieuwe Waterweg tot Lek bedoeld, en met zuidrand het gebied van Haringvlietsluizen tot de Biesbosch.

Waar nodig is tevens gebruik gemaakt van recente studies naar verzilting in deelgebieden:

- Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel: Afleiding dispersiecoëfficiënt (Kuijper, 2016)
- Noord-Zuidrelaties Rijn-Maasmonding & werking van grote en kleine knoppen voor verzilting (Huismans, 2016)

Onderstaande tabellen geven de zeer lage-afvoergebeurtenissen bij Lobith ($Q_{BR} < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$) en de lage-afvoergebeurtenissen ($Q_{BR} < 1700 \text{ m}^3/\text{s}$) weer met een duur van meer dan 30 dagen in de periode 1996 – 2006. Binnen deze periodes is gezocht naar situaties van windopzet. Omdat de grenswaarden arbitrair zijn, is ervoor gekozen om de selectie van typische combinaties niet verder te automatiseren. Bij wijze van voorbeeld geeft Figuur 2.3 de Bovenrijnafvoer en windopzet voor de tweede helft van 2003 met daarin geselecteerde periodes. Voor veel locaties gaven deze perioden in 2003 een goede indicatie van de typische verziltingsprocessen onder deze omstandigheden.

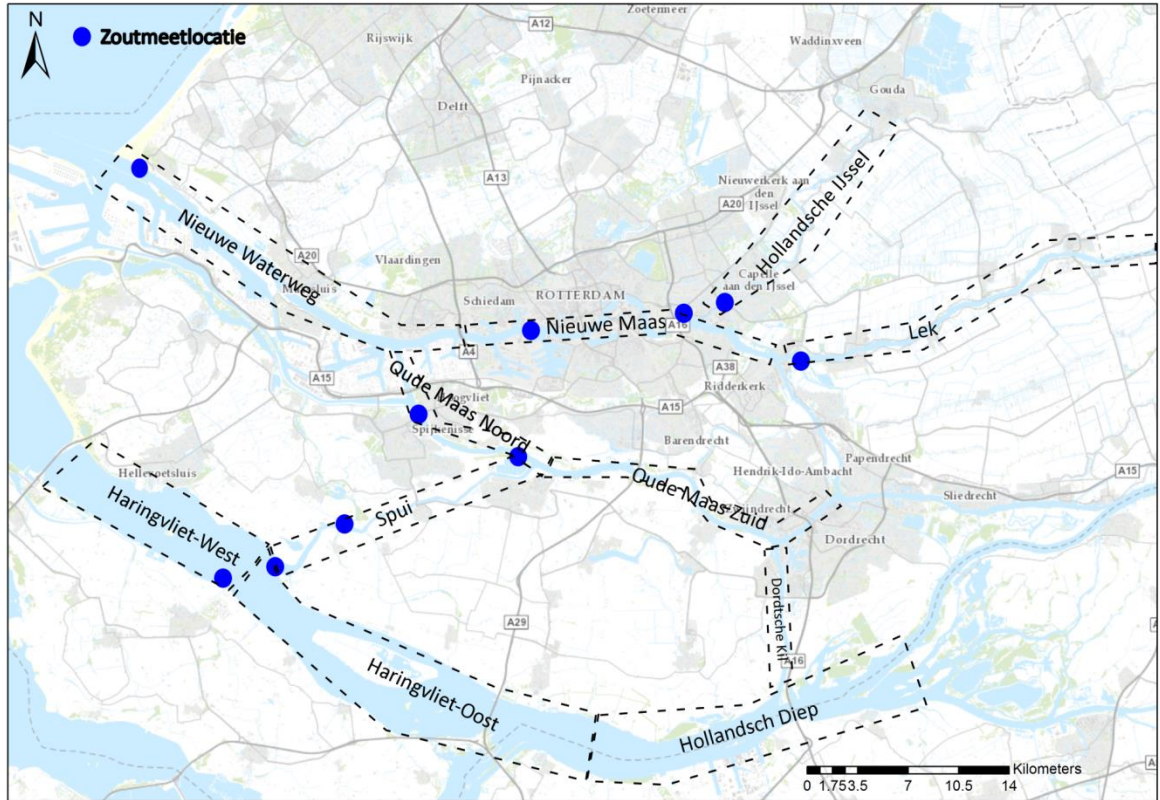
In een vervolgstudie zou het interessant zijn om de selectie van 'omstandigheden' te automatiseren, zodat ook statistiek afgeleid kan worden. Op basis hiervan kan ook de gevoeligheid van de grenswaarden worden onderzocht. Ter illustratie is in Bijlage A een beknopte statistische analyse gedaan naar de duur van lage afvoeren bij Lobith, op basis van de afvoermeetreeks. Elk jaar treedt er een periode op van lage afvoeren ($< 1700 \text{ m}^3/\text{s}$) die 30 dagen of langer aanhoudt. Zeer lage afvoeren ($< 1100 \text{ m}^3/\text{s}$) die meer dan 30 dagen aanhouden komen ongeveer eens in de vijf jaar voor.

Tabel 2.1 Overzicht van lage-afvoergebeurtenissen bij Lobith in de periode 1996-2006. Met maximaal tekort wordt het maximale verschil tussen afvoer en drempelwaarde bedoeld in de beschouwde periode.

startjaar	startdatum	einddatum	duur (dagen)	Maximaal tekort (m ³ /s)
1996	03-Apr	21-May	48	570
1996	27-Jul	21-Oct	86	623
1997	17-Aug	13-Dec	118	769
1998	24-Jun	14-Sep	82	717
1999	30-Aug	30-Sep	31	564
2003	10-Apr	12-May	32	341
2003	15-Jun	11-Jan	210	905
2004	24-Jul	26-Aug	33	432
2004	07-Sep	21-Oct	44	536
2005	14-Jul	24-Aug	41	376
2005	22-Sep	17-Feb	148	710
2006	07-Jul	15-Aug	39	527
2006	19-Oct	23-Nov	35	506

Tabel 2.2 Overzicht van zeer lage-afvoergebeurtenissen bij Lobith in de periode 1996-2006

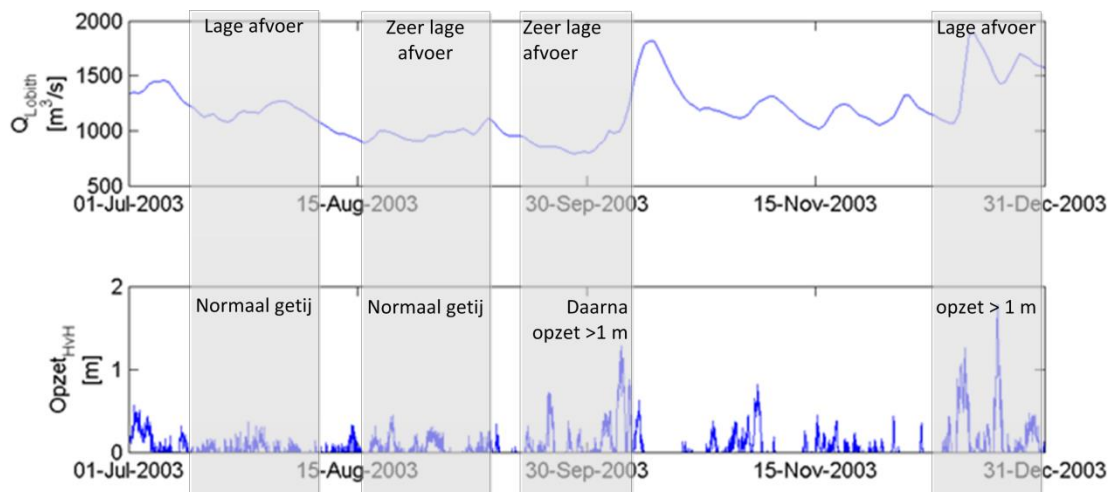
Jaar	start	eind	duur (dagen)	maximaal tekort(m ³ /s)
2003	08-Aug	08-Oct	61	305



Figuur 2.1 Deelgebieden in de Rijn-Maasmond waar andere type verziltingsprocessen spelen (blauwe stippen zijn de vaste zoutmeetlocaties)

Zeewaterstand bij Hoek van Holland	Windopzet (> 0.5 m)	Invloed getij/opzet ver bovenstreams merkbaar (noordrand) en kans op achterwaartse verzilting (zuidrand)	Invloed getij/opzet ver bovenstreams merkbaar (noordrand) en kans op achterwaartse verzilting (zuidrand)	Kans op achterwaartse verzilting (zuidrand)
	Normaal getij	Zouttong rukt op (noordrand) Achtergrondconcentraties rivierwater nemen toe	Zouttong rukt op (noordrand) Achtergrondconcentraties rivierwater nemen licht toe	Zout grofweg tot Brienoordbrug (Nieuwe Maas) en tot Spijkenisse (Oude Maas)
		Zeer laag (< 1100 m ³ /s)	Laag (1100 < Q < 1700 m ³ /s)	Normaal (Q > 1700 m ³ /s)
		Bovenrijnafvoer Q		

Figuur 2.2 Kwalitatieve beschrijving van verziltingsprocessen die kunnen optreden bij gegeven combinatie van Bovenrijnafvoer en zeewaterstand bij Hoek van Holland



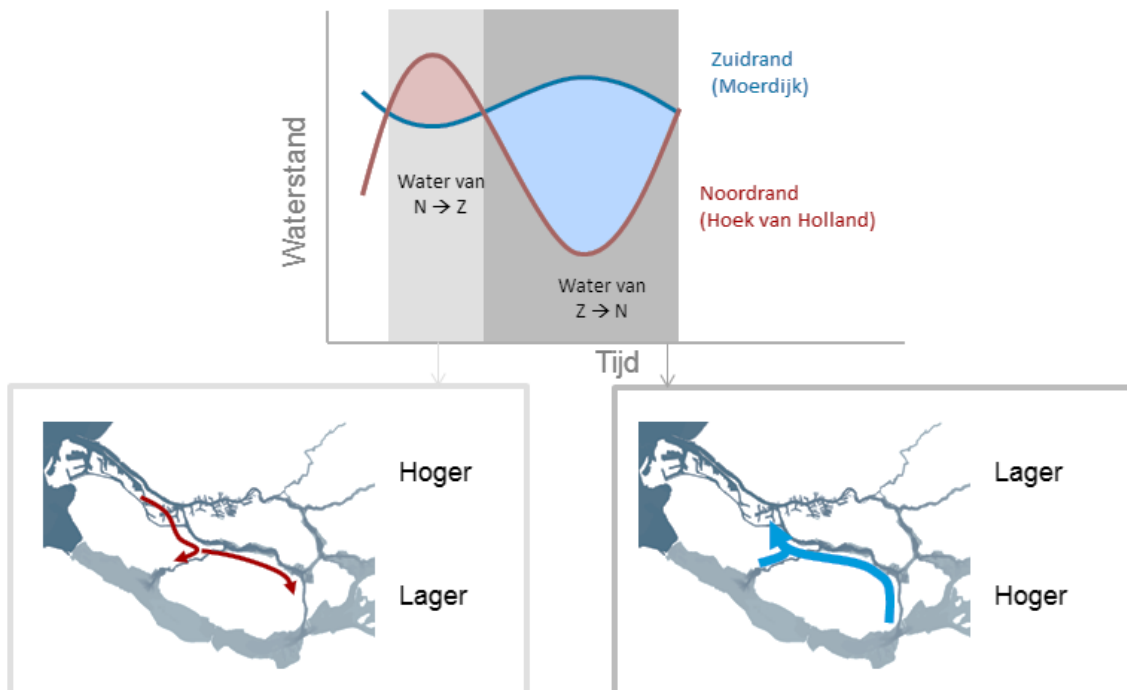
Figuur 2.3 Illustratie van de (visuele) selectie van periodes met verschillende combinaties van Bovenrijnafvoer en windopzet die zijn opgetreden in 2003

3 Karakterisering per deelgebied

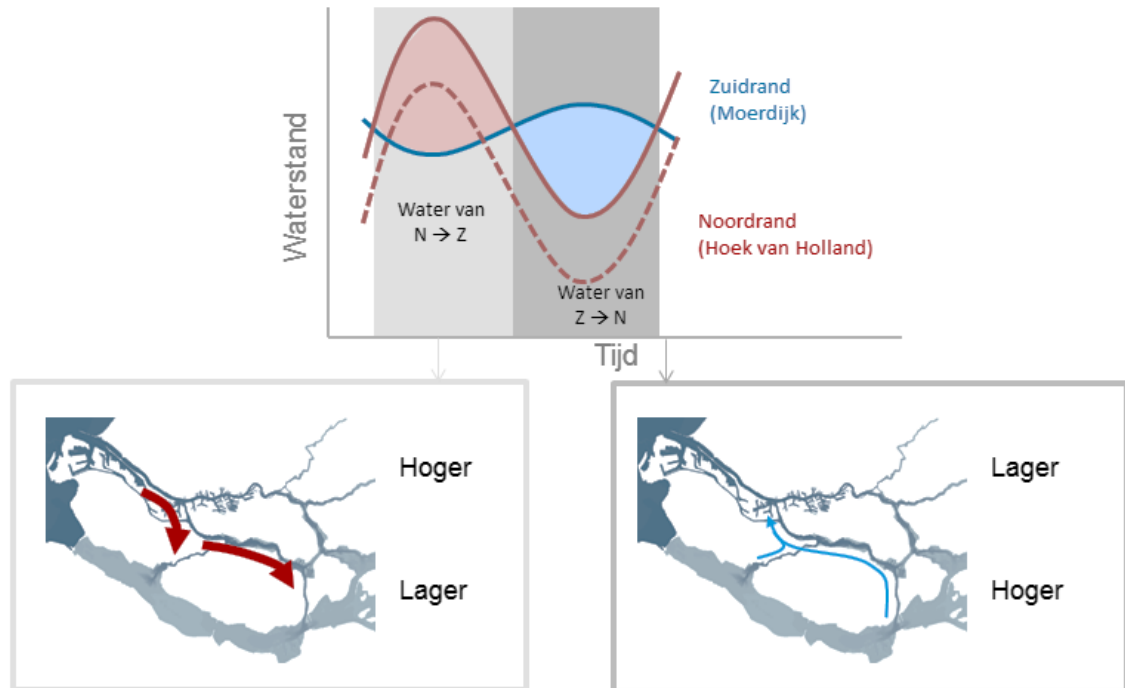
In dit hoofdstuk wordt een karakterisering per deelgebied gegeven. Omdat de noord- en de zuidrand in de basis door andere factoren verzilt, wordt dit onderscheid hieronder eerst kort toegelicht. Daarna zullen per deelgebied de verziltingstypen in detail worden beschreven.

3.1 Noord- versus zuidrand

Onder noordrand verstaan we Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en Lek. Onder zuidrand verstaand we Haringvliet, Hollandsch Diep, Spui, Oude Maas en Dordtsche Kil). Verzilting aan de noordrand wordt grotendeels bepaald door windopzet en rivierafvoer. Door windopzet dringt het zout verder in; rivierafvoer zorgt juist voor tegendruk. Hoe hoger de afvoer, hoe meer windopzet nodig is voor hoge zoutindringing en hoe lager de afvoer hoe minder windopzet nodig is voor een hoge zoutindringing. Omdat in de huidige situatie de zuidrand is afgesloten met de Haringvlietsluizen, kan zout de zuidrand alleen bereiken via de noordrand of via een lekverliezen via de sluizen. Hoe ver het zoute water de Rijn-Maasmonding binnendringt richting de zuidrand tijdens de vloedfase en zich weer terugtrekt tijdens de eb fase van het getij, is afhankelijk van het waterstandsverschil tussen Hoek van Holland en Moerdijk (Huismans 2016), zie figuur 2.2 en 2.3. Hierin is windopzet een belangrijkere speler dan afvoer.



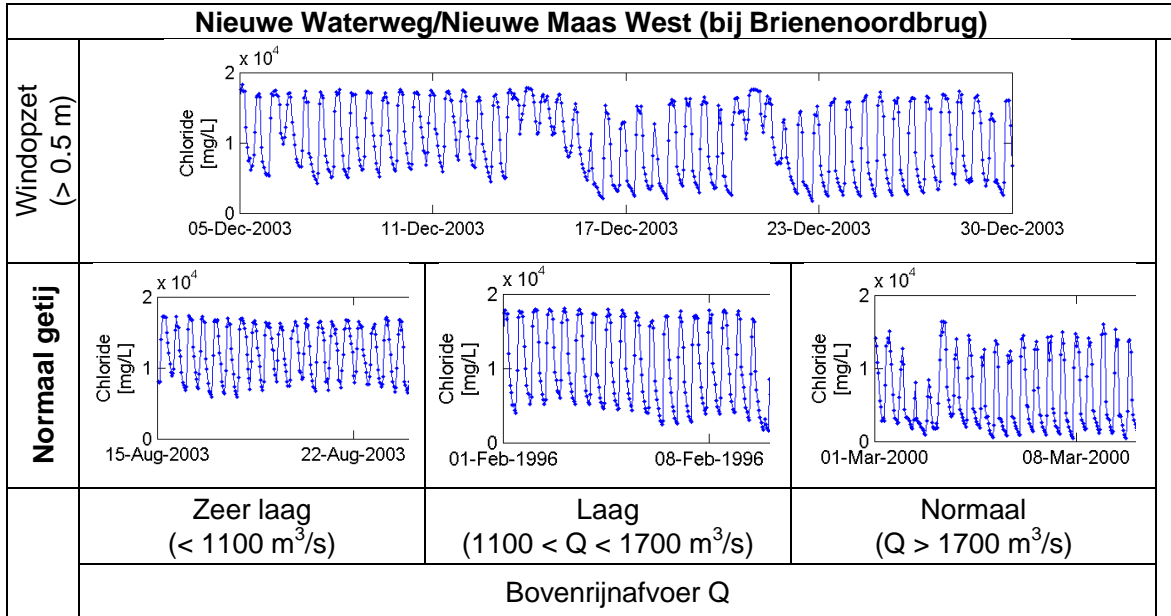
Figuur 3.1 Waterbeweging tussen noord en zuid onder normale condities (bron: Huismans, 2016)



Figuur 3.2 Waterbeweging tussen noord en zuid onder extreme condities, zoals bijvoorbeeld peilopzet ten gevolge van wind (bron: Huismans, 2016)

3.2 Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas West

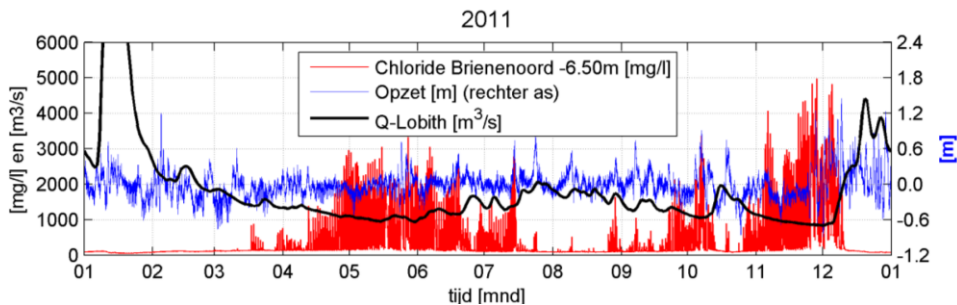
In dit deelgebied volgt de chlorideconcentratie direct het getij. Hierbij worden de chlorideconcentraties in de Nieuwe Waterweg voornamelijk bepaald door het chloridegehalte van het zeewater, de variaties in zeewaterstand (getij en windopzet) en de rivierafvoer. Onder normale omstandigheden variëren de chlorideconcentraties grofweg tussen 10.000 en 20.000 mg/l bij Hoek van Holland. Naarmate de afvoer lager wordt, worden concentraties bij eb hoger. Stormopzet maakt de variatie in concentraties kleiner. Een combinatie van lage afvoer en stormopzet zorgt voor een kleinere variatie in concentraties en gemiddeld hogere concentraties dan onder normale omstandigheden.



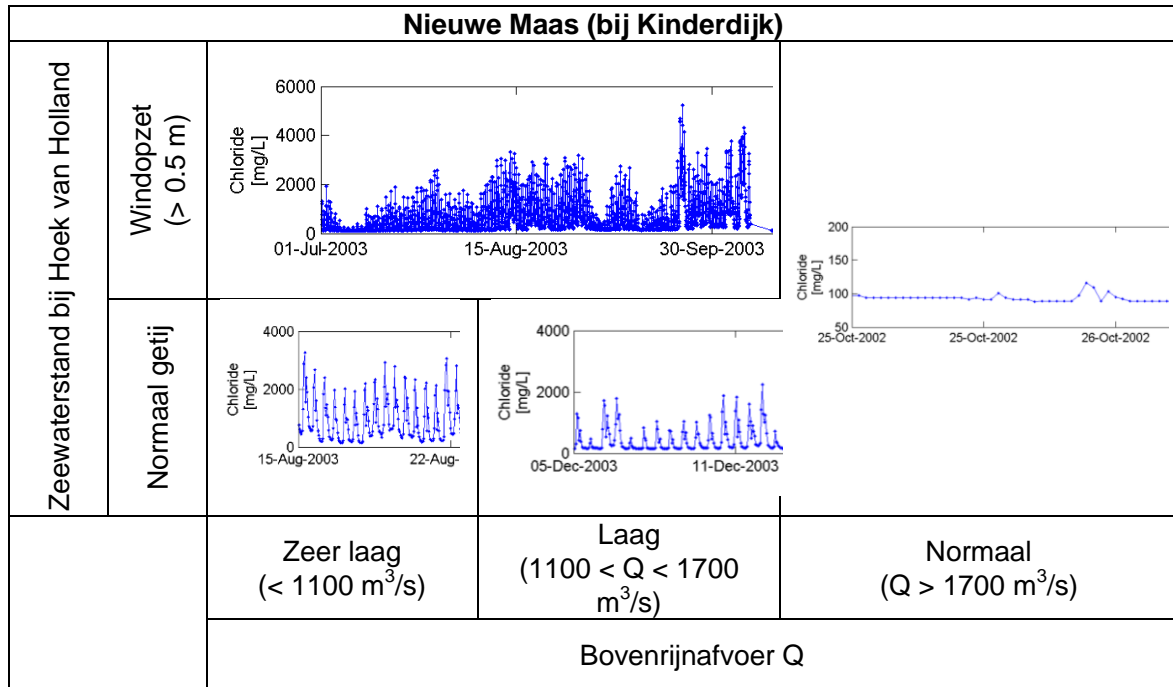
3.3 Nieuwe Maas Oost

De Nieuwe Maas Oost (volgens de indeling van Beneluxtunnel tot aan Kinderdijk) staat ook onder invloed van getij, maar de invloed van de getijbeweging op chlorideconcentraties is afhankelijk van de afvoer. Onder normale afvoeromstandigheden zijn de chlorideconcentraties gelijk aan de achtergrondconcentratie van het rivierwater, welke varieert tussen 60 en 90 mg/l voor afvoeren tussen de 1700 m³/s en 4000 m³/s (regressierelatie is beschreven in onder andere Kranenburg e.a., 2015a). Zodra de afvoer lager wordt of de windopzet hoger komt de ‘zouttong’ verder landinwaarts en gaat de chlorideconcentratie het getij volgen. Bij welke grenzen dit precies gebeurt is in dit project niet nader onderzocht. Onder deze omstandigheden kan de chlorideconcentratie ter hoogte van Kinderdijk oplopen tot 2000 mg/l (zonder opzet) of 5000 mg/l (met opzet). Met andere woorden: hoe hoger de afvoer hoe minder windopzet nodig is om chlorideconcentraties te laten oplopen.

Figuur 3.3 illustreert dit aan de hand van meetgegevens in 2011 ter hoogte van de Van Brienoordbrug). In de periode jan – feb 2011 was de afvoer normaal tot hoog en bleef de chlorideconcentratie laag ondanks de stormopzet begin februari. Daarna kwam er een aantal lage-afvoerperiodes waarbij de chlorideconcentratie toenam: onder andere de perioden mei/juli, begin oktober en november. Tijdens deze perioden zijn chloridepieken te zien die samenvallen met stormopzet, met de hoogste pieken en sterkste windopzet eind november. Begin december nam de afvoer weer toe en ging de chlorideconcentratie significant omlaag.



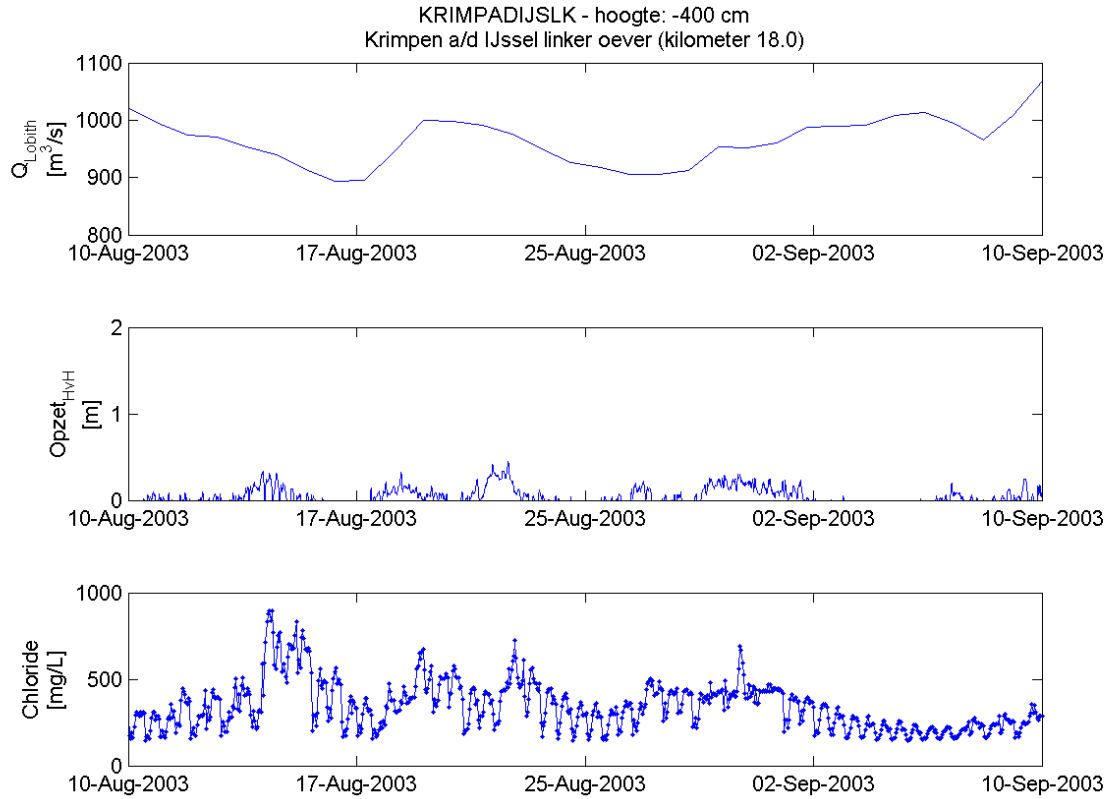
Figuur 3.3 *Debiet bij Lobith (zwart), chlorideconcentratie bij meetpunt Briennoord op -6.50 m NAP (rood) en de stormopzet bij Hoek van Holland (blauw, rechter as) voor heel 2011 (Kranenburg, 2015b).*



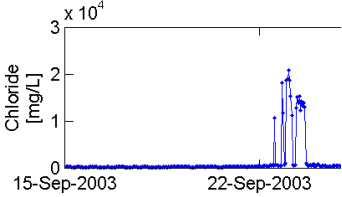
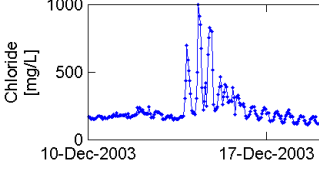
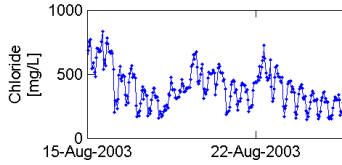
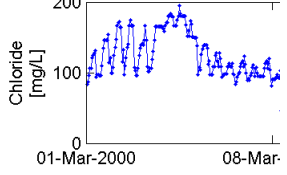
3.4 Hollandsche IJssel

Verzilting van de Hollandsche IJssel treedt alleen op wanneer het zout tot aan Krimpen aan de IJssel komt. Dit gebeurt vooral bij langdurig lage of zeer lage afvoeren. Hoe dit precies in zijn werk gaat wordt uitgebreid beschreven in Kuijper et al. (2016). Belangrijkste bevinding is dat verzilting van de Hollandsche IJssel pas optreedt als de monding van de Hollandsche IJssel bij zowel eb als bij vloed verzilt. De minimale chlorideconcentraties bij Krimpen hebben daarom een grotere indicatieve waarde dan de maximale concentraties.

Onder normale omstandigheden zie je bij Krimpen kleine fluctuaties in chlorideconcentraties rondom grofweg 100 mg/l. Bij lagere afvoeren gaan de concentraties iets omhoog richting 200 mg/l. Zowel voor lage als hogere rivierafvoeren kan windopzet leiden tot een verhoging van de chlorideconcentraties. Hierbij geldt hoe hoger de afvoer, hoe sterker de windopzet moet zijn voor een merkbaar effect. Om meer inzicht te krijgen in het optreden van verzilting van de monding Hollandsche IJssel of een vuistregel op te stellen zou deze relatie gekwantificeerd kunnen worden. Met het oog op de bevindingen van Kuijper et al. (2016) is het hierbij relevant om hierbij een relatie te leggen met de situaties waarbij de monding Hollandsche IJssel bij zowel eb als vloed verzilt, omdat dit meer bepalend is voor eventuele verzilting bij Gouda. Zoals geïllustreerd in de tabel treedt dit met name op bij zeer lage rivierafvoer (zie figuur bij zeer lage afvoer en normaal getij). Bij normale afvoer gecombineerd met windopzet kan deze verzilting ook optreden, maar alleen voor de duur van de windopzet (zie figuur normale afvoer en windopzet), welke meestal korter is dan de duur van een lage rivierafvoer. Voor de wat hogere afvoeren wordt de (getijgemiddelde) chlorideconcentratie bepaald door de Bovenrijnafvoer; ondanks de fluctuaties als gevolg van windopzet, blijft de concentratie onder 200 mg/l. Bij lage afvoeren gaan de gemiddelde concentraties omhoog door de hogere achtergrondconcentratie, én wordt de concentratie gevoeliger voor windopzet. Dit is duidelijk te zien in augustus 2003 (Figuur 3.4), toen de afvoer zeer laag was en chloride een vergelijkbare fluctuatie vertoont als de windopzet. Bij zeer lage afvoeren wordt zeewater dus dominant en worden fluctuaties in concentraties groter, volgens de meetreeks eind september 2003 zelfs tot 20.000 mg/l.



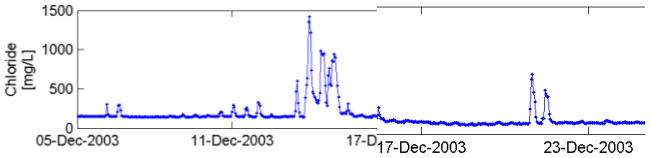
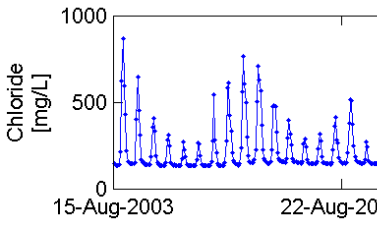
Figuur 3.4 Bovenrijnafvoer, windopzet en chlorideconcentraties bij Krimpen aan den IJssel voor de periode 10 aug. – 10 sept. 2003

Hollandsche IJssel (bij Krimpen aan de IJssel)			
Zeewaterstand bij Hoek van Holland	Windopzet (> 0.5 m)		
	Normaal getij		
		$Cl^- \sim 200 \text{ mg/l}$	$Cl^- \sim 100 \text{ mg/l}$
		Zeer laag ($< 1100 \text{ m}^3/s$)	Laag ($1100 < Q < 1700 \text{ m}^3/s$)
		Normaal ($Q > 1700 \text{ m}^3/s$)	
Bovenrijnafvoer Q			

3.5 Lek

Bij zeer lage afvoeren is de door het getij bepaalde chlorideconcentratie merkbaar tot aan de monding van de Lek. Wanneer ook de afvoer over de Lek erg laag wordt (orde enkele m³/s), kan zout door middel van dispersief transport (mengingsprocessen ten gevolge van o.a. concentratieverschillen) de Lek verder binnendringen. Omdat dit een relatief langzaam verziltingsproces is, vergt het een lange periode (orde weken tot maanden) van lage afvoer. Vermoedelijk is dit proces vergelijkbaar met de verzilting van de Hollandsche IJssel, waarbij de monding langdurig bij eb- en vloed verzilt moet zijn voor er verzilting van een groter deel van de tak op kan treden. Windopzet kan dit proces wel versnellen, maar is niet noodzakelijk voor verzilting.

Onder normale omstandigheden volgt de chlorideconcentratie de achtergrondconcentratie van de Rijn: als de afvoer omlaag gaat, neemt de chlorideconcentratie in de monding (licht) toe. Zolang de afvoer hoog genoeg is speelt windopzet geen rol. Concentraties schommelen rond de 100 mg/l. Zodra de afvoer lager wordt dan grofweg 1700 m³/s wordt de chlorideconcentratie in de monding beïnvloed door de windopzet. Bij zeer lage afvoeren kan ook zonder windopzet verzilting van de monding optreden: 100 – 1000 mg/l. In het voorbeeld in onderstaande tabel treedt echter geen *permanente* verzilting op (bij eb en vloed) bij zeer lage afvoer. Het zou interessant zijn om te onderzoeken of verzilting van de Lek in het verleden is voorgekomen en bij welke combinatie van afvoer en windopzet dit was.

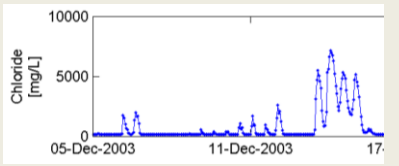
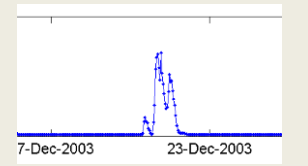
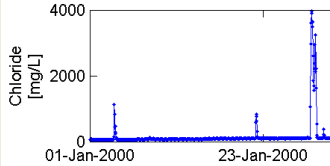
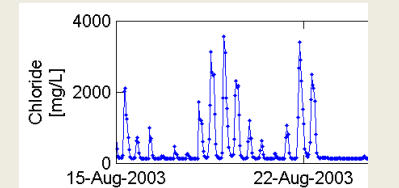
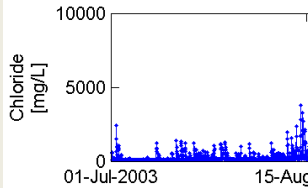
Lek (bij Kinderdijk)		
Zeewaterstand bij Hoek van Holland	Windopzet (≥ 0.5 m)	
	Normaal getij	
		Cl ⁻ ~ 100 mg/l
	Zeer laag (< 1100 m ³ /s)	Laag ($1100 < Q < 1700$ m ³ /s)
	Normaal ($Q > 1700$ m ³ /s)	
	Bovenrijnafvoer Q	

3.6 Oude Maas

Het westelijke deel van de Oude Maas verzilt onder normale condities, terwijl in het oostelijke deel de chlorideconcentraties worden bepaald door de achtergrondconcentratie van het rivierwater¹. In de Oude Maas is altijd sprake van stroomkentering: bij vloed stroomt het water nabij het splitsingspunt Waterweg-Oude Maas richting Zuid/Oost en bij eb weer richting

¹ Waar deze grens precies ligt hangt af van de condities, en is niet nader gekwantificeerd in dit project.

Noord/West. Omdat de Oude Maas één van de verbindende takken is tussen de noord- en de zuidrand zal met name bij grote windopzet en een relatief lage waterstand op de zuidrand meer water van de noord- naar de zuidrand stromen en als gevolg hiervan ook een grotere zoutindringing optreden op de Oude Maas. Ook bij lage afvoeren door Oude Maas is er minder tegendruk en kan het zout verder indringen. Wind- en stormopzet hebben dan een groter effect en concentraties (bij Beerenplaat) kunnen hoger worden (tot grofweg 10.000 mg/l).

Oude Maas (bij Beerenplaat)				
Zeewaterstand bij Hoek van Holland	Windopzet (> 0.5 m)			
	Normaal getij			Cl⁻ ~ 100 mg/l
		Zeer laag (< 1100 m³/s)	Laag (1100 < Q < 1700 m³/s)	Normaal (Q > 1700 m³/s)
Bovenrijnafvoer Q				

3.7 Spui

Wanneer de Oude Maas verzilt tot voorbij de ingang van het Spui, kan er ook zout door het Spui naar het Haringvliet worden getransporteerd (achterwaartse verzilting). Bij lage rivierafvoeren zijn de Haringvlietsluizen gesloten. Daardoor zal er, als de opzet voorbij is, getijgemiddeld een debiet van zuid naar noord optreden in het Spui. Hiermee zal het zout dat via achterwaartse verzilting in het Haringvliet is terechtgekomen, in lagere concentraties ook weer terug kunnen worden geleverd aan het Spui (terug- of nalevering). Deze nalevering kan lang aanhouden, maar komt in elk geval ten einde wanneer de rivierafvoer stijgt en de Haringvlietsluizen weer opengaan (uitspoeling).

Chlorideconcentraties in Spui variëren voornamelijk met rivierafvoeren: onder normale getijomstandigheden varieert de concentratie ongeveer tussen 40 en 130 mg/l. De concentratie kan op drie manieren tijdelijk toenemen:

- 1 Bij zeer lage Bovenrijnafvoeren (< 1100 m³/s) kan de chlorideconcentratie oplopen tot ongeveer 170 mg/l (zie Bonte and Zwolsman 2009). Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de hogere achtergrondconcentratie van het rivierwater. Deze concentraties kunnen weken tot maanden aanhouden, afhankelijk van de rivierafvoer.
- 2 Bij verhoogde waterstanden aan de noordrand ten opzichte van de zuidrand, bijvoorbeeld bij windopzet, kan achterwaartse verzilting optreden. Bij een beperkte mate en duur zal het zoute water met vloed alleen het Spui binnenlopen en zodra de stormopzet voorbij is

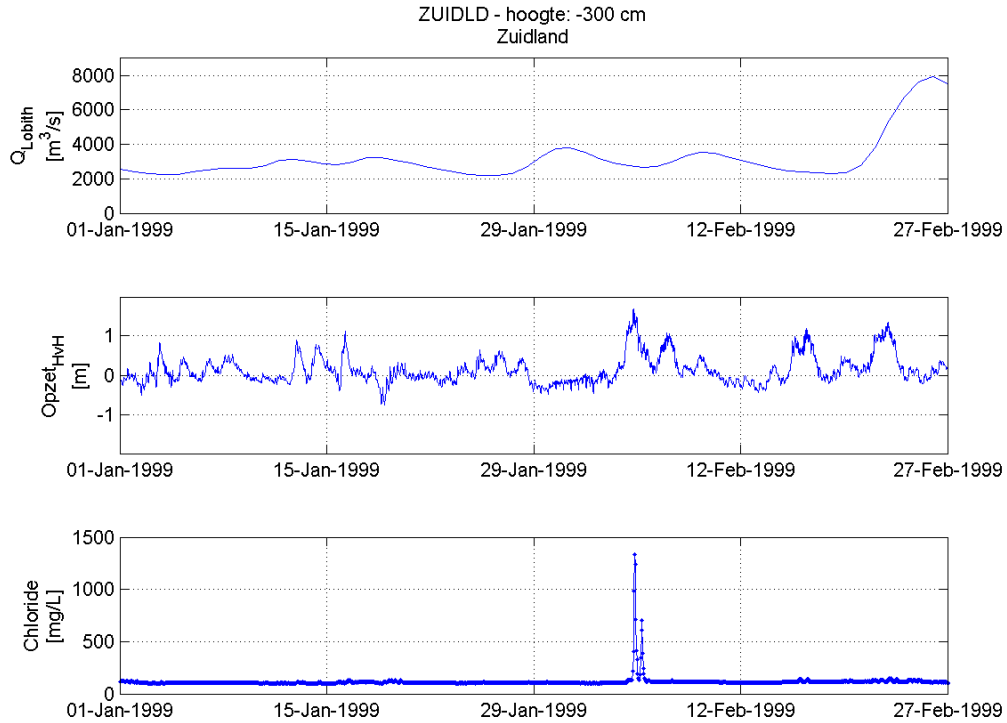
met eb weer uit het systeem stromen. Wanneer de waterstanden aan de noordrand in hogere mate en voor langere duur verhoogd zijn zal het water via het Spui en/of de Dordtsche Kil naar Haringvliet/Hollandsch Diep kunnen stromen. Dit zorgt voor korte hoge chloridepieken (tot 10.000 mg/l). Afhankelijk van de rivierafvoer (en daarmee het openen van de Haringvlietsluizen) zal het zout snel of langzaam uitspoelen. Hoewel de chloridepiek van korte duur is kunnen verhoogde concentraties nog weken aanhouden.

- 3 Nalevering: indien zout het Haringvliet/Hollandsch Diep heeft bereikt kan het hier bij lage rivierafvoeren weken tot maandenlang achterblijven. Bij elk getij zal dan een deel van het zout vrijkomen en via het Spui weer terug naar de noordrand stromen, dit noemen we nalevering.

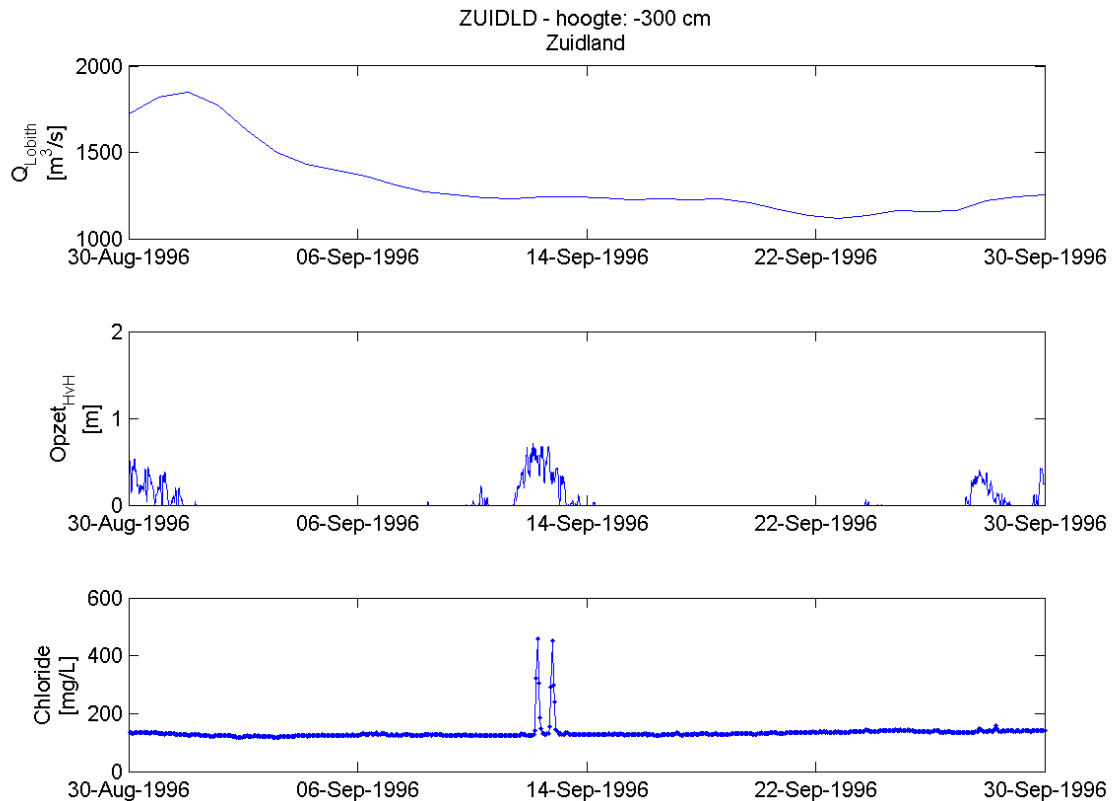
Hoe ver het zoute water de Rijn-Maasmonding binnendringt tijdens de vloedfase en zich weer terugtrekt tijdens de eb fase van het getij, is afhankelijk van het waterstandsverschil tussen Hoek van Holland en Moerdijk. Hierin is windopzet een belangrijkere speler dan afvoer. Uit het onderzoek naar Noord-Zuidrelaties (Huismans, 2016) is gebleken dat achterwaartse verzilting niet enkel optreedt bij lage of zeer lage afvoeren. Van de 25 door RWS gerapporteerde cases van achterwaartse verzilting traden er 12 op bij normale afvoeren en 13 bij lage of zeer lage afvoeren (zie ook Huismans, 2016).

Figuur 3.5 laat een voorbeeld zien van bovengemiddelde Bovenrijnafvoer ($\sim 3000 \text{ m}^3/\text{s}$) en toch verzilting in het Spui. Bij hoge afvoeren zal de verzilting ten gevolge van windopzet meestal kort van duur zijn, omdat bij geopende Haringvlietsluizen het zout snel weer wegspoelt. Door de korte duur heeft deze vorm van verzilting voor Bernisse minder grote consequenties.

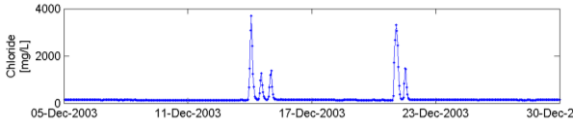
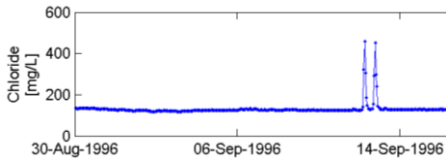
Figuur 3.6 laat een voorbeeld zien van verzilting van Spui bij lage Bovenrijnafvoer en beperkte windopzet. Van de combinatie zeer lage afvoeren met geen of beperkte windopzet zijn in de periode 1996-2006 geen voorbeelden gevonden die in Spui tot verzilting leiden, maar dit wil zeker niet zeggen dat het niet kan optreden.



Figuur 3.5 Chlorideconcentraties bij Spui als gevolg van normale Bovenrijnafvoer en flinke windopzet en in de periode 1 jan. – 27 feb. 1999



Figuur 3.6 Chlorideconcentraties in Spui als gevolg van lage Bovenrijnafvoer en beperkte windopzet, in de periode 30 aug. – 30 sept. 1996

Spui (bij Zuidland)			
Zeewaterstand bij Hoek van Holland	Windopzet (> 0.5 m)		
	Normaal getij	<p>[geen voorbeeld gevonden]</p> 	<p>Cl⁻ ~ 100 mg/l</p>
		<p>Zeer laag (< 1100 m³/s)</p>	<p>Laag (1100 < Q < 1700 m³/s)</p>
		<p>Normaal (Q > 1700 m³/s)</p>	
<p>Bovenrijnafvoer Q</p>			

3.8 Haringvliet-West en Haringvliet-Hollandsch Diep

De chlorideconcentraties op het Haringvliet en in het Hollandsch Diep worden onder normale omstandigheden vooral bepaald door de achtergrondconcentratie van het rivierwater. Door achterwaartse verzilting (met name onder invloed van windopzet) komt er zout binnen, dat voor een deel wordt opgeslagen in diepe geulen en voor een ander deel mengt met de rest van het water. Wind speelt een belangrijke rol bij het mengingsproces.

Met het nieuwe sturingsprogramma van de Haringvlietsluizen kan in dit gedeelte van het Haringvliet 'voorwaartse verzilting' ontstaan (zie Huismans, 2016). Ook onder normale omstandigheden kan de zoutconcentratie hierdoor oplopen, en onder bepaalde omstandigheden voor verhoogde zoutconcentraties nabij Bernisse kunnen zorgen. Er is hier nog weinig kennis over. Duidelijk is wel dat zout dat vanuit het Haringvliet het Spui binnenkomt in de toekomst niet per se vooraf wordt gegaan door achterwaartse verzilting. Dit speelt in het westelijke deel van het Haringvliet.

Verzilting in Haringvliet/Hollandsch Diep is slecht te koppelen aan afvoeren en zeewaterstanden. Onder normale omstandigheden is het water hier zoet (achtergrondconcentratie rivierwater). Als hier via de noordrand (door achterwaartse verzilting) of via de Haringvlietsluizen zout terechtkomt, zal het zich langzaam mengen met het zoete water. Hoe dit verloopt is moeilijk vooraf te voorspellen en zeer locatie-afhankelijk. Er is daardoor niet één representatief punt in Haringvliet aan te wijzen.

Ook voor het Hollandsch Diep is niet 1 representatief punt aan te wijzen. Hollandsch Diep is een apart deelgebied, omdat verzilting via de Haringvlietsluizen niet aan de orde zal zijn met het toekomstige kierbesluit. Ook treedt achterwaartse verzilting nog minder frequent op dan in het Haringvliet, omdat zout via de Dordtsche Kil binnenkomt. Door het ontbreken van een vast meetpunt in Hollandsch Diep was hier geen data-analyse mogelijk.

4 Samenvatting en aanbevelingen

In dit memo is een indeling gemaakt van de RMM in deelgebieden die te typeren zijn naar verziltingsproces. Voor elk deelgebied zijn voor verschillende combinaties van Bovenrijnafvoer en zeewaterstand (getij en windopzet) voorbeeldfiguren gemaakt van de bijbehorende chlorideconcentraties op basis van metingen. Dit geeft inzicht in de chlorideconcentraties en variaties hierin als gevolg van deze 'forceringen' op de rand van het systeem.

Op basis van de meetreeks 1996 – 2006 zijn voor representatieve (meet)punten in de meeste deelgebieden typische gebeurtenissen gevonden die visualiseren hoe chloride reageert op verschillende combinaties van zeewaterstand en Bovenrijnafvoer. Voor de noordrand kan de reactie van chloride eenvoudiger gekoppeld worden aan deze 'forceringen' dan voor de zuidrand. Voor de noordrand geldt dat hoe verder stroomopwaarts, hoe lager de afvoer moet zijn of hoe hoger de windopzet voordat verzilting kan optreden. Omdat chlorideconcentraties bij Krimpen een sterke relatie hebben met afvoer en lage-afvoerperiodes meestal lang aanhouden (orde weken tot maanden), houdt verzilting hier ook lang aan. Voor de 'dode takken' Hollandsche IJssel en Lek konden geen uitspraken worden gedaan door het ontbreken van langjarige meetreeksen verder opwaarts in de rivier. Het is wel duidelijk dat in ieder geval voor de Hollandsche IJssel dispersie een belangrijke rol speelt, wat iets zegt over de traagheid van het verziltingsproces. Ook spelen onttrekkingen een grote rol, omdat hierdoor bij lage afvoer negatieve afvoeren kunnen optreden, waardoor zout als het ware de rivier opgetrokken wordt.

Voor de zuidrand is het minder eenduidig om een relatie te leggen met windopzet en Bovenrijnafvoer, omdat historie (chloride in voorgaande tijdstappen) en sturing van de Haringvlietsluizen hier zeer bepalend zijn. In Spui is onder vrijwel alle omstandigheden verzilting mogelijk, maar bij normale afvoeren moet de windopzet wel groot zijn om zout 'het hoekje om' te krijgen. De meeste verziltingspieken zijn van korte duur en daardoor minder relevant. Nalevering kan voor langere verziltingsperiodes leiden, maar nalevering is in de beschouwde reeks (1996 – 2006) niet voorgekomen. Voor Haringvliet en Hollandsch Diep is het verziltingsproces sterk afhankelijk van de locatie.

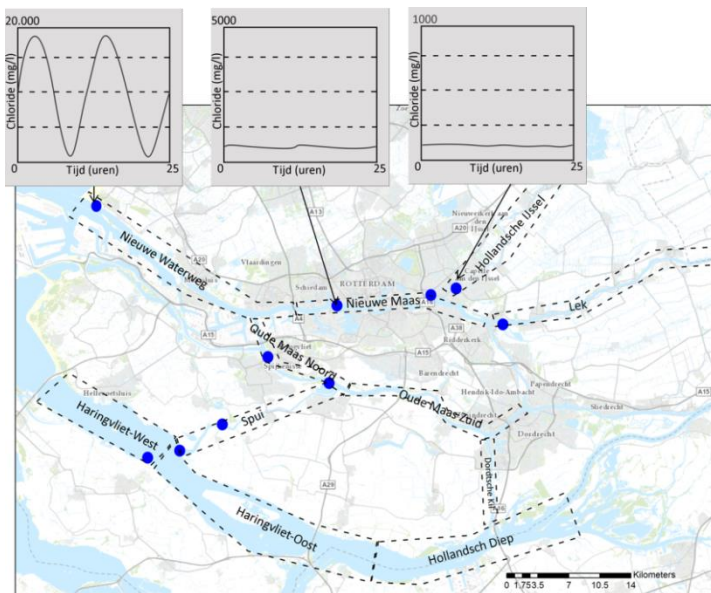
Aanbevelingen

Een logische vervolgstap op deze verkennende analyse is een uitgebreide data-analyse waarin gekeken wordt naar opgetreden verzilting en de omstandigheden (afvoer, zeewaterstand/getij) die dit veroorzaakt heeft. Dit geeft aanknopingspunten voor de kans op verzilting in relatie tot verwachte ontwikkelingen in zeespiegel en afvoer als gevolg van klimaatverandering. Voor de noordrand zou daarnaast een vergelijkbare analyse als voor de Hollandsche IJssel (Kuijper 2016) nuttig zijn, om te kijken of op de Lek vergelijkbare processen spelen. Voor de zuidrand kan aansluiting worden gezocht bij de studie naar achterwaartse verzilting en de invloed van de werking van de Haringvlietsluizen (Huisman, 2016).

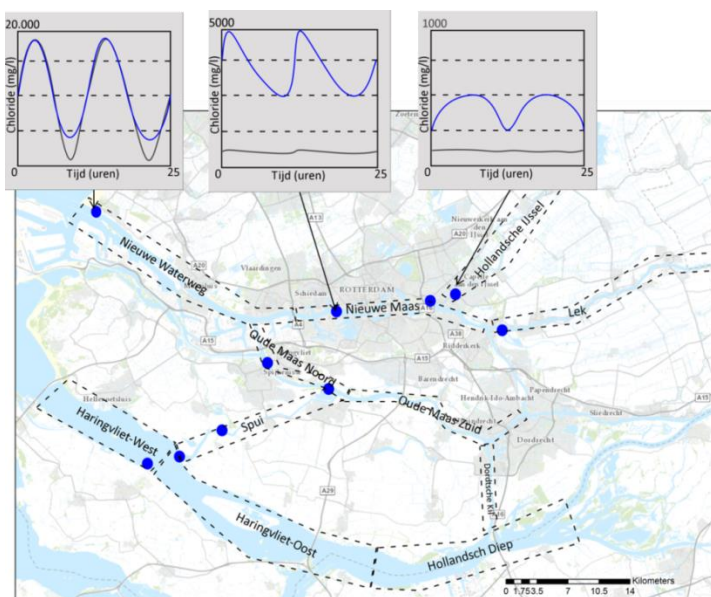
Als onderdeel hiervan kan chlorideconcentratie uitgezet worden tegen zowel windopzet als Bovenrijnafvoer, om zo meer inzicht te krijgen in de maatgevende condities voor verzilting per locatie. Iets vergelijkbaars is eerder gedaan voor Krimpen in Van den Boogaard (2015).

In vervolg op dit memo kan het nuttig zijn om de figuren uit H3 per deelgebied samen te vatten en te vereenvoudigen in een gebiedsoverzicht per combinatie van afvoer en getij. Een voorbeeld is gegeven in Figuur 4.1 en Figuur 4.2.

Een logische vervolgvraag in de context van het Wabes-project is wat de typering betekent voor de te hanteren statistische methode ter kwantificering van de waterbeschikbaarheid in RMM. Om deze zoektocht verder te ondersteunen zou voor elk deelgebied statistische analyses gedaan kunnen worden op basis van de meetreeks. Hierbij kan dan gevarieerd worden in tijdstap (uurwaarden, dagwaarden) en type statistiek (bv. overschrijdingsdagen per jaar), om inzicht te krijgen in welke statistische methode/indicator het beste past bij het type verziltingsproces. Deze kennis kan vervolgens ook gebruikt worden in de keuze voor het onderliggende modelinstrumentarium dat voor Wabes gebruikt wordt.



Figuur 4.1 Vereenvoudigde weergave van chloridevariatie op verschillende locaties in RMM bij normale afvoer en normaal getij



Figuur 4.2 Vereenvoudigde weergave van chloridevariatie op verschillende locaties in RMM bij lage afvoer en normaal getij

5 Referenties

Bonte, M. and G. Zwolsman (2009). "Klimaatverandering en verzoeting van de Rijn." H2O 20.

Huismans, Y. (2016) Noord-Zuidrelaties Rijn-Maasmonding & werking van grote en kleine knoppen voor verzilting: Deelproject Systeemanalyse en Slim Watermanagement. Deltares rapport 1230080-007.

Kranenburg et al. (2015a) Systeemanalyse van de Rijn-Maasmonding voor verzilting: Factsheets proceskennis, systeemkennis, modelinstrumentarium en statistiek. Deltares rapport 1220107-002.

Kranenburg (2015b) Evaluatie van het OSR-model voor zoutindringing in de Rijn-Maasmonding (II): Onderdeel KPP B&O Waterkwaliteitsmodelschematisaties 2015. Deltares rapport 1220070-000.

Kuijper, K. (2016) Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel: Afleiding dispersiecoëfficiënt. Deltares rapport 1230077-001.

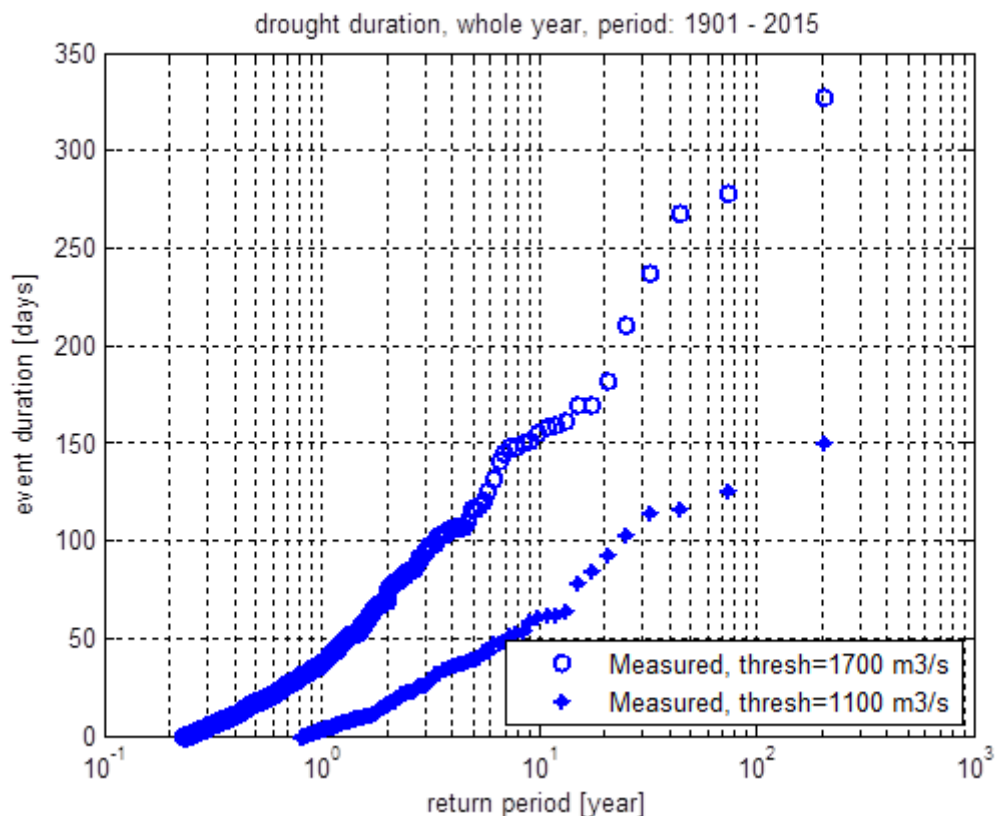
Tijssen en Diermanse (2009) Stormopzetduur en stormduur bij Hoek van Holland: SBW-Belastingen. Deltares rapport 1200264-001.

Van den Boogaard, H. F. P. (2015) Effectbepaling verdieping Nieuwe Waterweg op KWA. Deltares rapport.

Bijlage A: Statistische analyse van de duur van lage afvoeren bij Lobith

Figuur 5.1 geeft de frequentiecurve van de duur van lage-afvoerperiodes in het zomerhalfjaar op basis van de meetreeks van dagafvoeren bij Lobith (1901-2015). Als grenswaarden zijn 1100 en 1700 m³/s gekozen. Elk jaar treedt er een periode op van lage afvoeren (< 1700 m³/s) die 30 dagen of langer aanhoudt. Zeer lage afvoeren (<1100 m³/s) die meer dan 30 dagen aanhouden komen ongeveer eens in de vijf jaar voor.

Vervolgens kunnen periodes geselecteerd worden binnen de lage-afvoerperiodes waarbij de windopzet groter was dan x m (afhankelijk van de locatie). Dit samen geeft een indicatie van de kans op verzilting op een bepaalde locatie.



Figuur 5.1 Duur (dagen) van periodes van lage afvoer bij Lobith uitgezet tegen de geschatte herhalingsperiode, voor twee grenswaarden (1100 en 1700 m³/s).

E.2 Presentatie (RMM Systeemanalyseoverleg, 15 september 2016)




Onderscheid deelgebieden t.b.v. verziltingsstatistiek

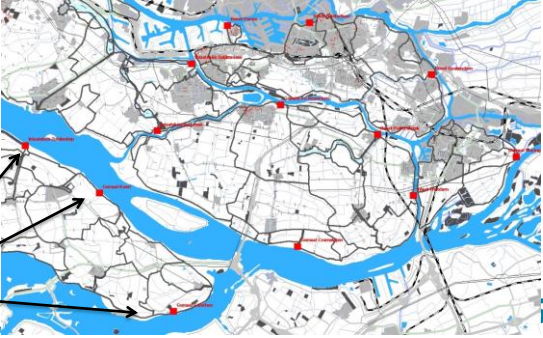
Deelprojecten van:
Systeemanalyse

15 december 2016

Aanleiding/vraag

RWS project Waterbeschikbaarheid HWS:

- Statistische analyse chlorideconcentraties op basis van langjarige reeks NWM voor representatieve locaties (inlaatpunten)
- Deze presentatie: deelgebieden onderscheiden wat betreft het type verziltingsproces:
- = input voor keuze methode statistiek



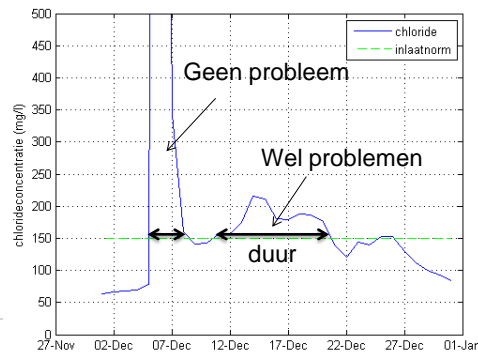
Inlaatpunten WSHD

15 decembe

Verziltingsstatistiek

Vershillende indicatoren mogelijk (mede afhankelijk van de gebruiker):

- Aantal overschrijdingsdagen per jaar
- Gemiddelde concentratie per jaar
- Aantal overschrijdings events van minimale duur x, per jaar
- ...



15 december 2016

Doel

Doel: deelgebieden onderscheiden naar type verziltingsproces, op basis van $Q_{\text{Bovenrijn}}$ en H_{HvH}

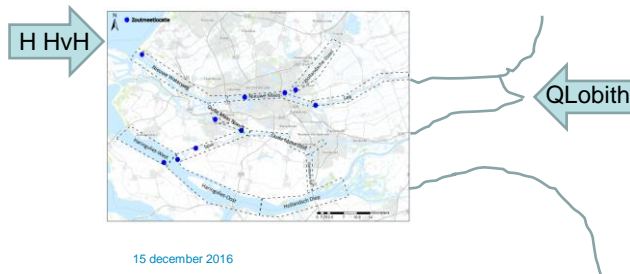
Karakterisering gaat in op:

- Welke forceringen (stormopzet, rivierafvoer, etc.) zijn dominant?
- Hoe (makkelijk) spoelt het zout weer weg?
- Zijn chlorideverhogingen kortdurend/hoog of langdurige/laag van aard?
- Wat is de chloridevariatie?

Deltares

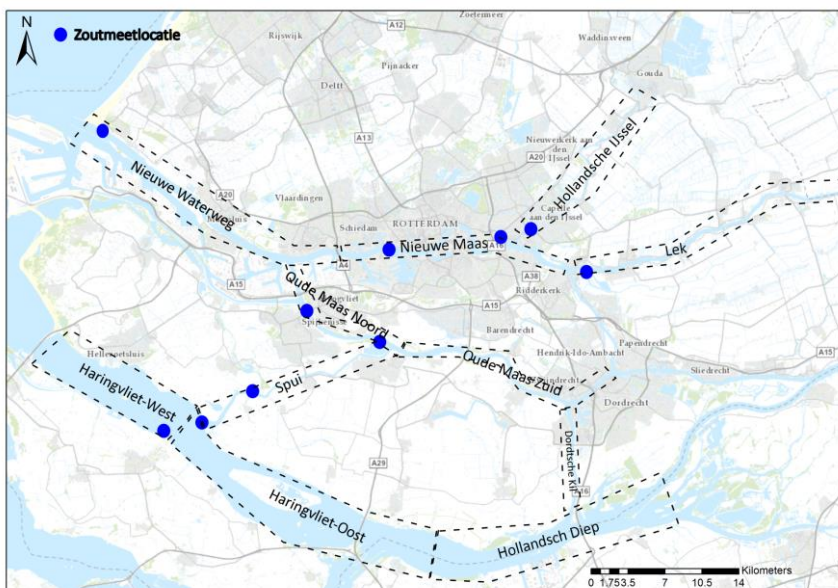
Aanpak

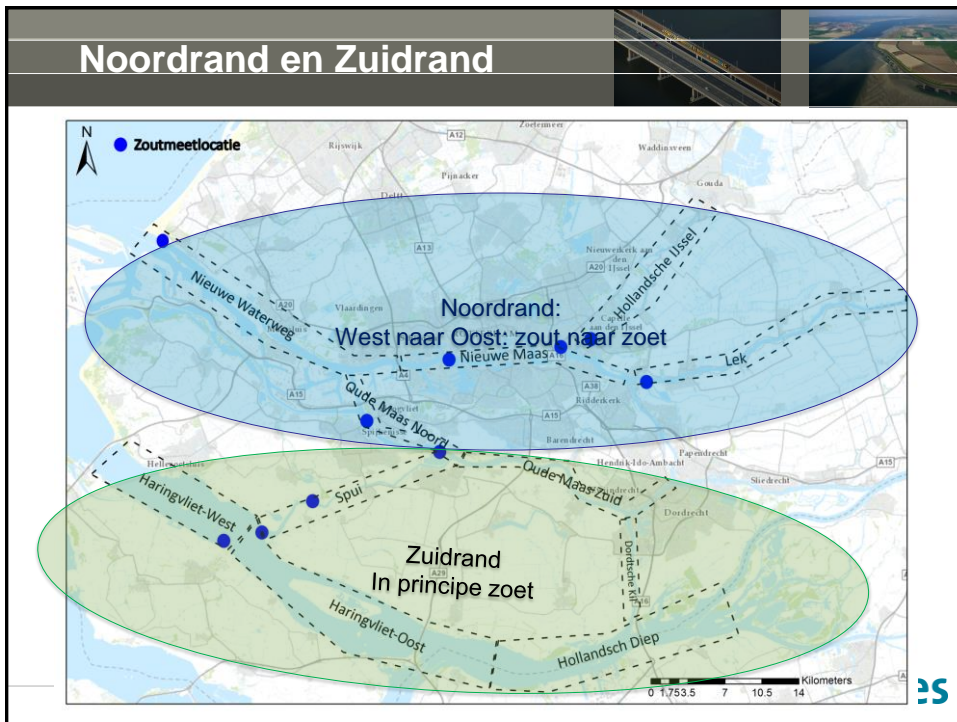
- Deelgebieden gekarakteriseerd aan de hand van tijdreeksen van chloride voor combinaties van stormopzet en rivierafvoer Lobith
- Metingen 1996-2006
- Karakterisering in versimpelde schetsen



Deltares

Gebiedsindeling + meetlocaties

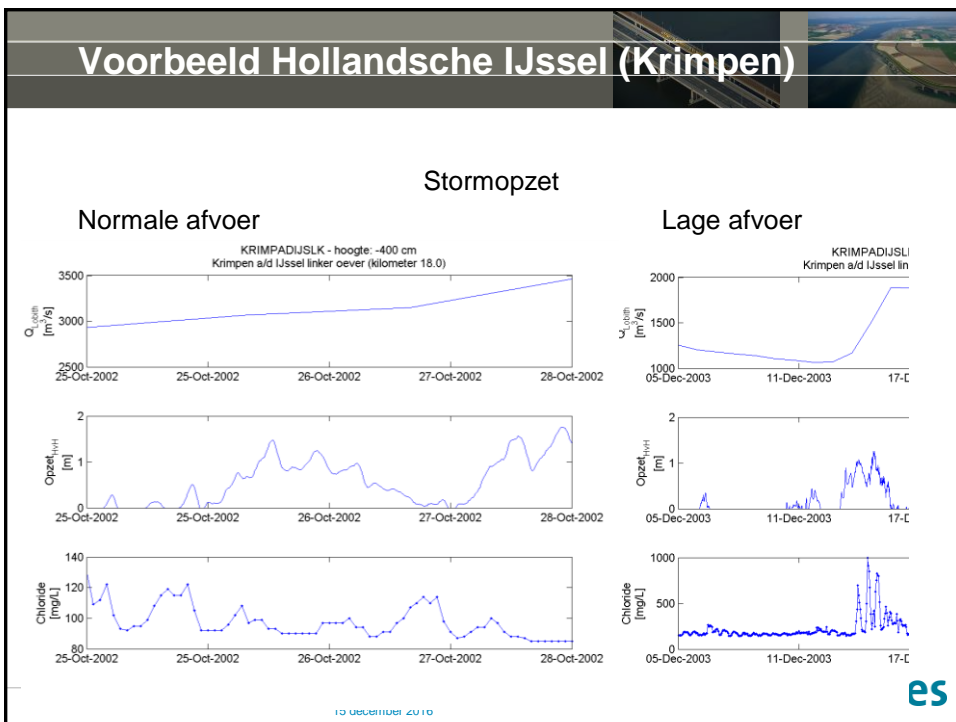
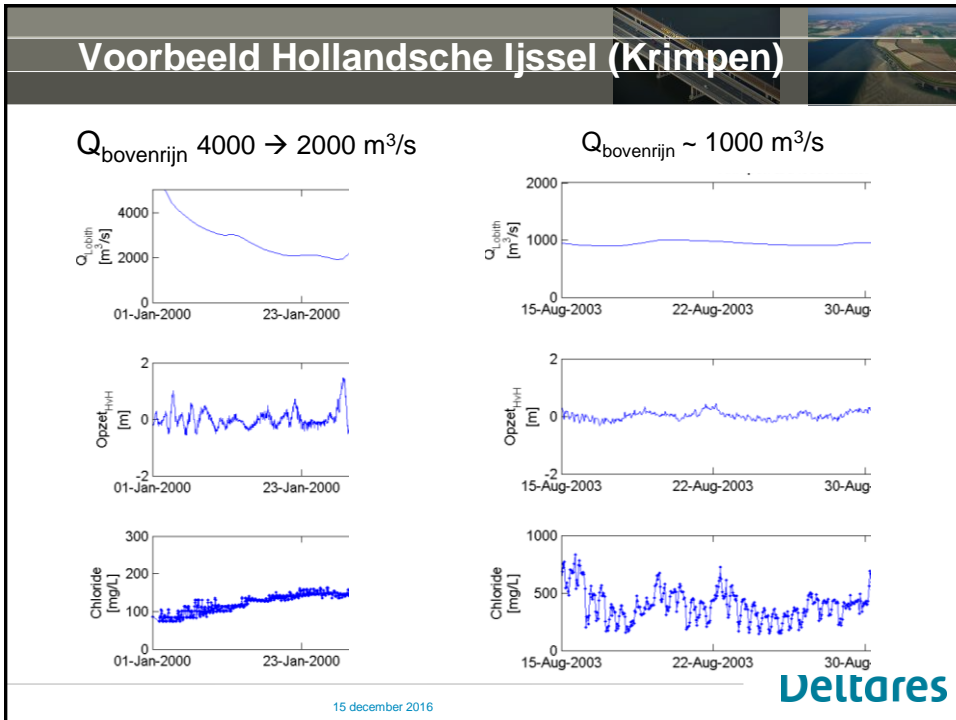


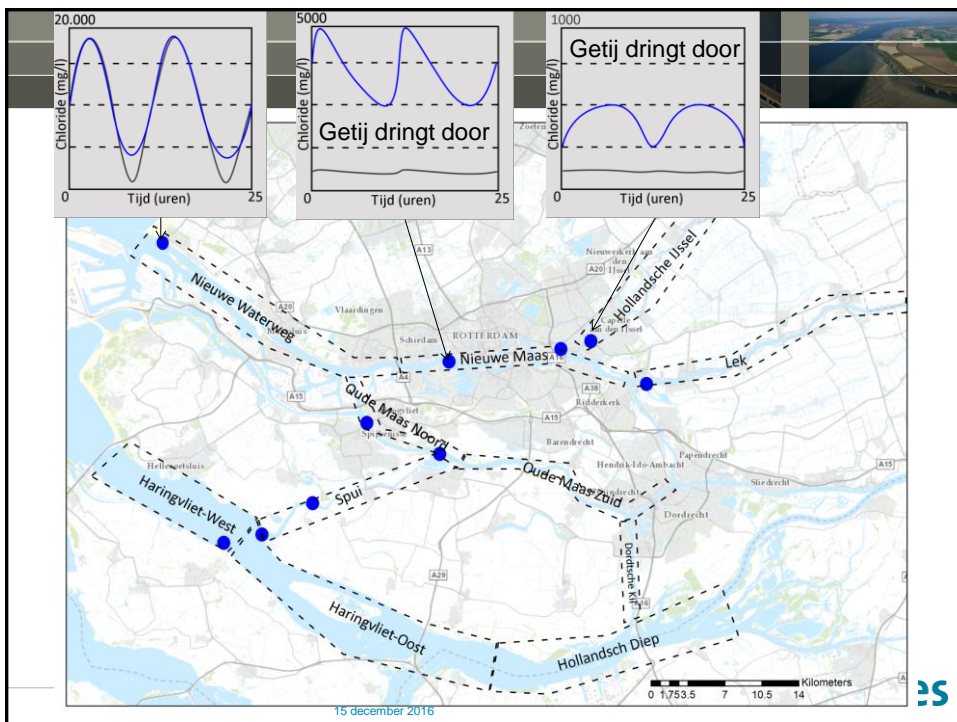
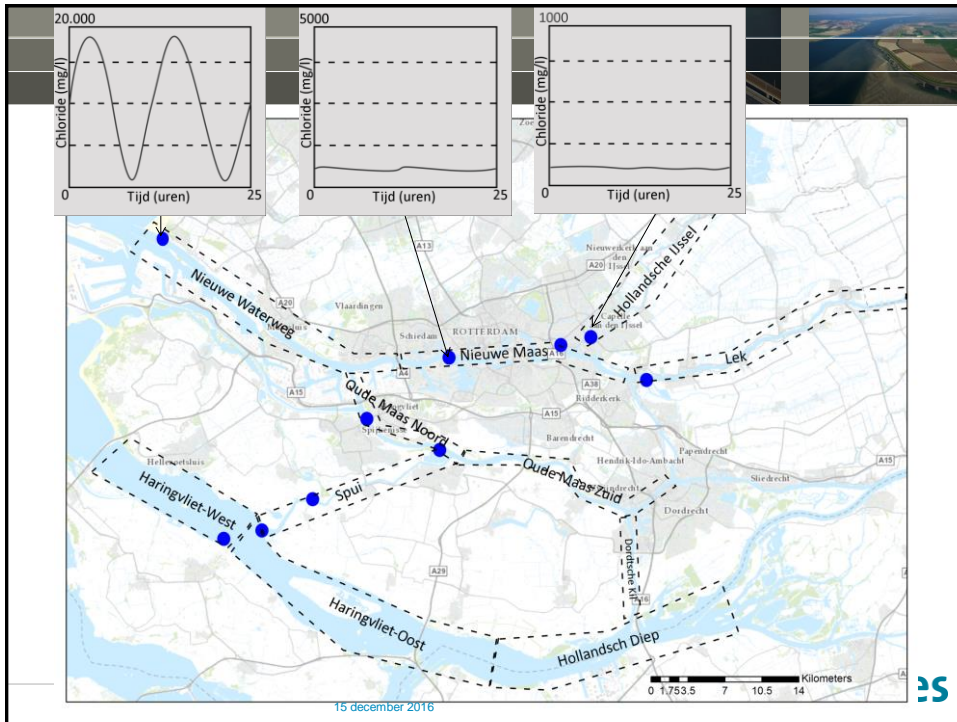


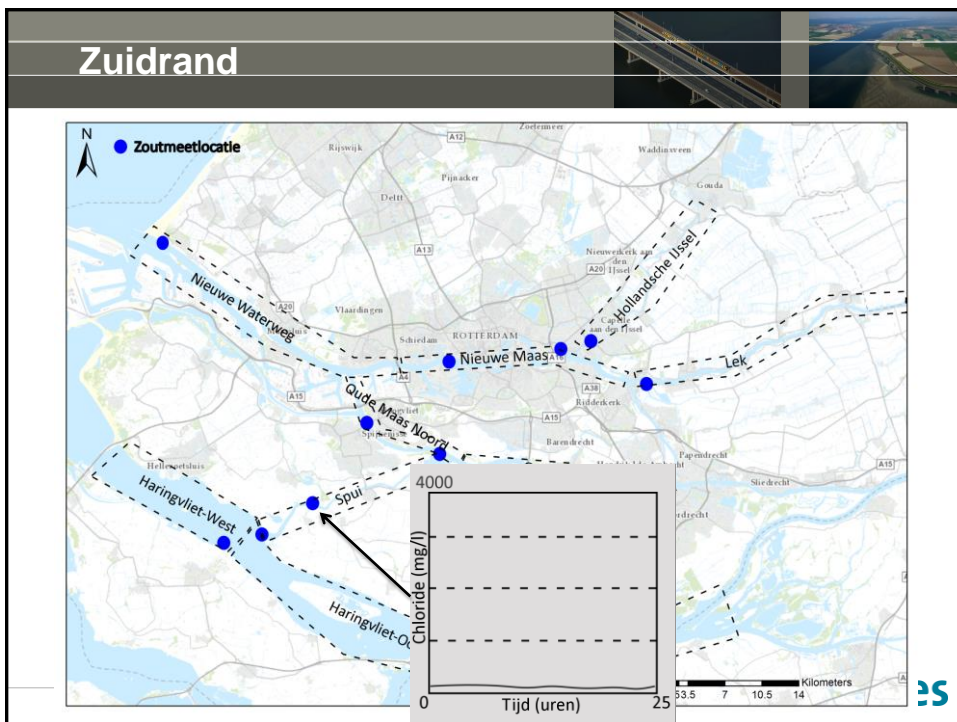
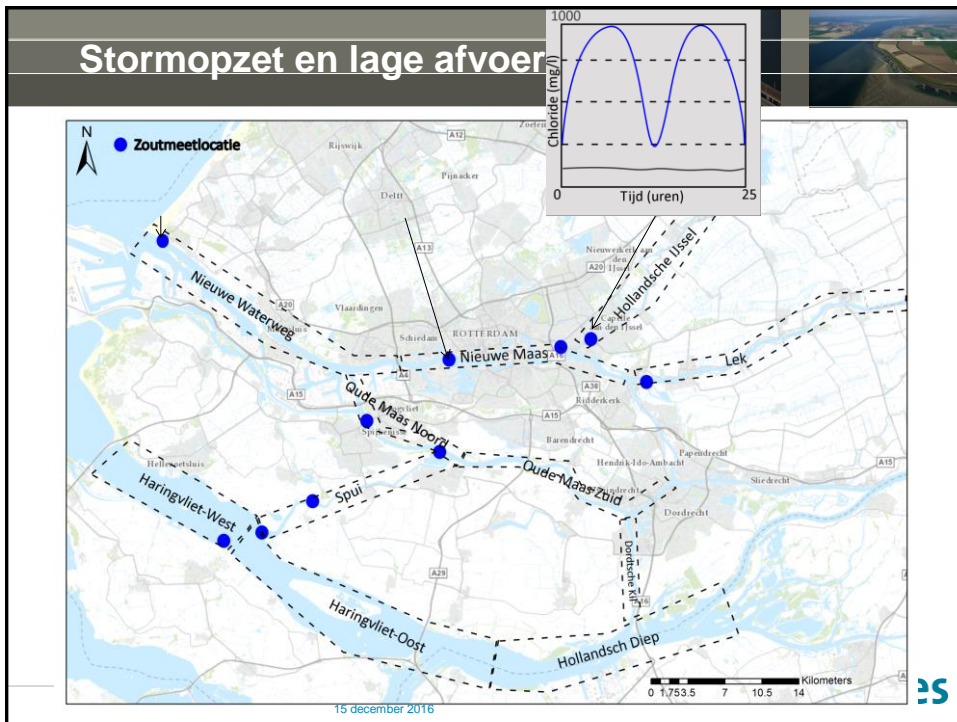
Indeling 'omstandigheden'

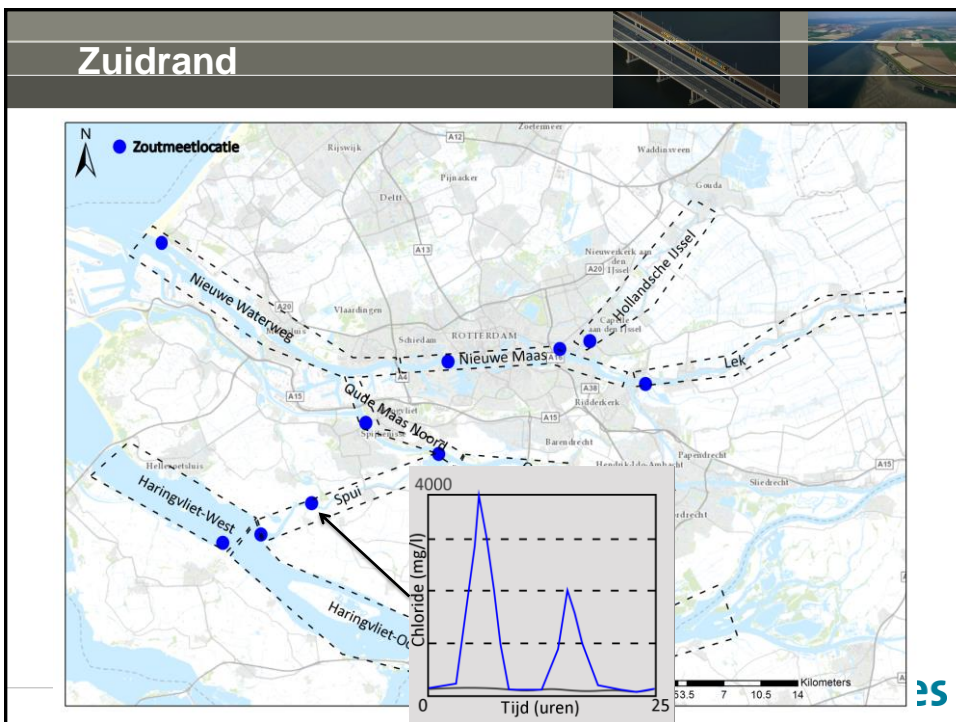
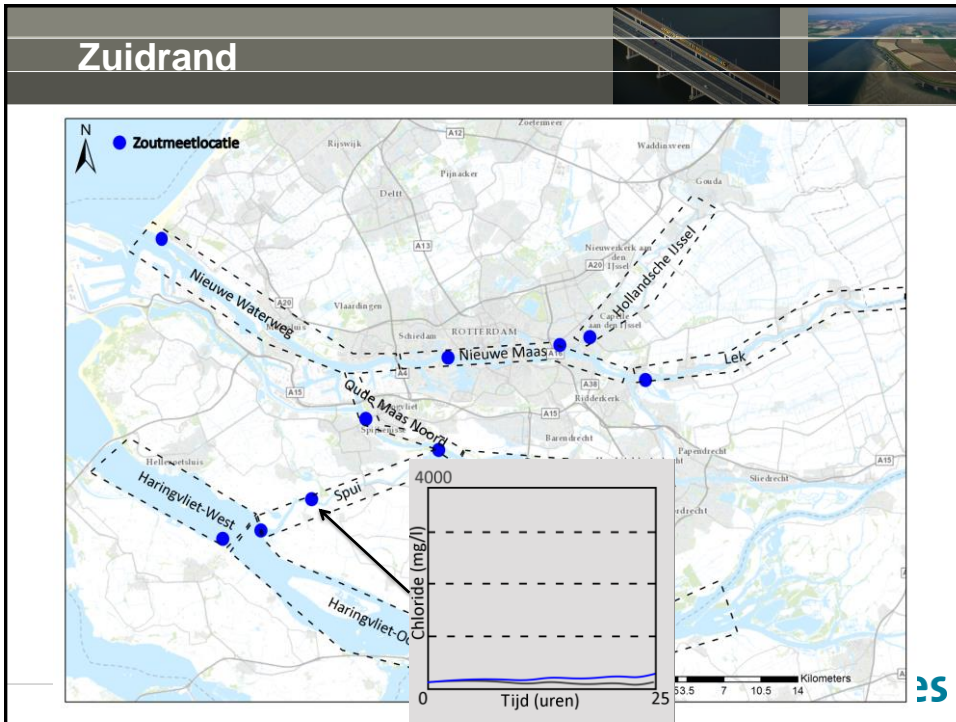
Zeewaterstand bij Hoek van Holland	Stormopzet (> 1 m)			
	Normaal getij			
		Zeer laag (< 1100 m ³ /s)	Laag (1100 < Q < 1500 m ³ /s)	Normaal (Q > 1500 m ³ /s)
		Bovenrijnafvoer Q		

Deltares

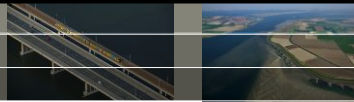








Conclusie/boodschap



- Indeling in deelgebieden naar verziltingsprocessen is gelukt op basis van H_{HvH} en $Q_{\text{Bovenrijn}}$
- Maar let op:
 - Historie van afvoerverloop is mede bepalend
 - Haringvlietsluizen zijn mede bepalend
 - Maasafvoer niet meegenomen

Vervolg vraag:

- Wat betekent dit voor statistische methode Wabes?