

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

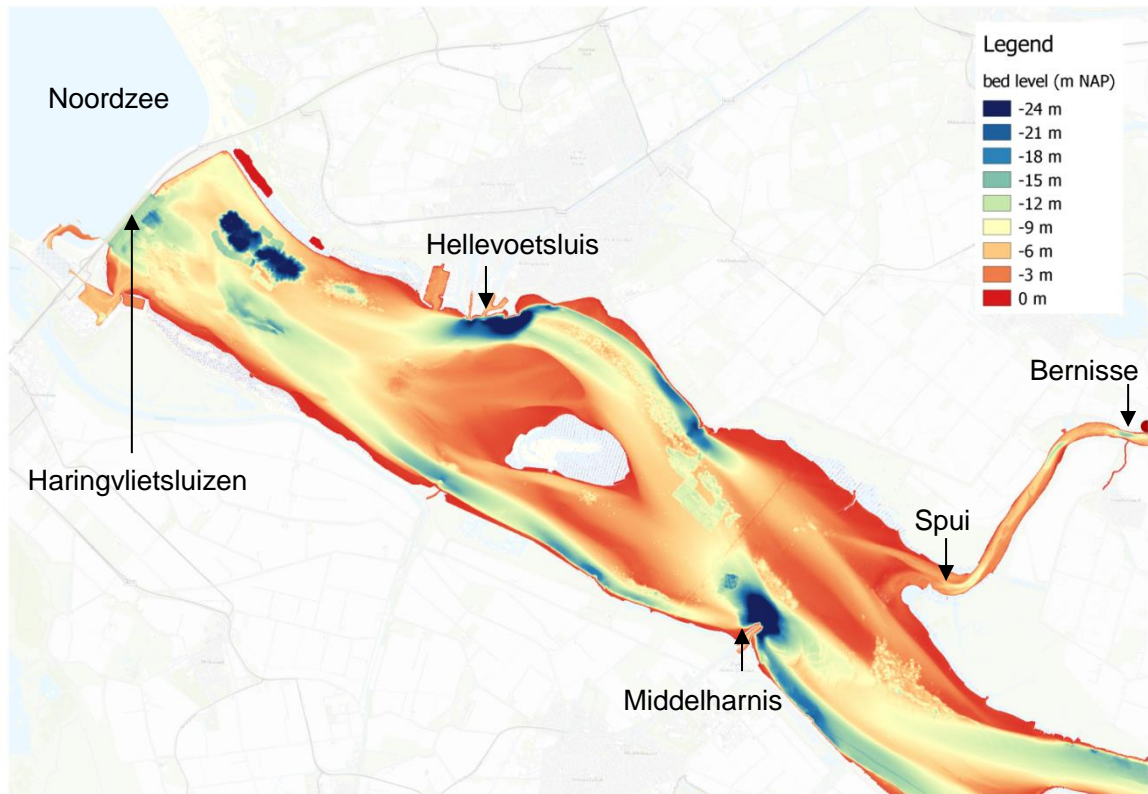
Waar de Nieuwe Waterweg in open verbinding staat met de zee, is het tussen de Noordzee en het Haringvliet een barrière, de Haringvlietsluizen. Het doel van het Haringvlietsluizencomplex is om stormvloed en op de Noordzee te keren, om de zoutindringing via de noordrand van het RMM-gebied te beperken door 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 terechtkomen 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 sluisen 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 maandelijkse 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 Haringvlietluizen 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 Krammersluisen.

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 Krammersluisen (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

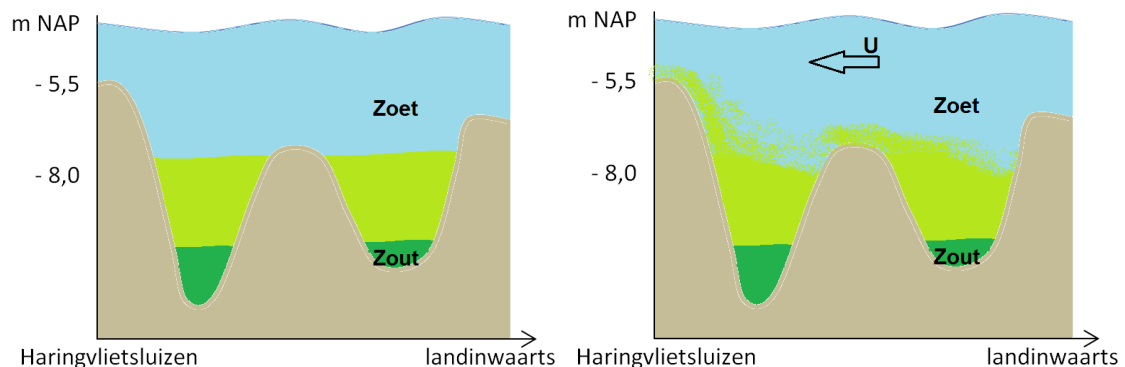
4.1 Geanalyseerde casussen

- 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.

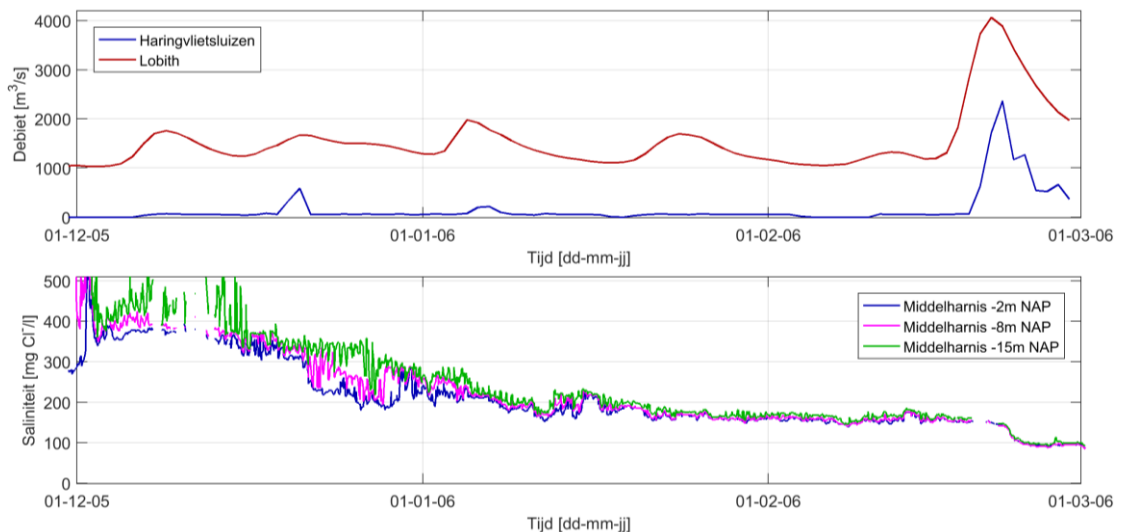


Figuur 4.1 Terugdringing van zout uit diepere bij lage spuidebieten (en zoetspoelen). Het in de diepe delen verzamelde zout wordt afgeschaafd, terwijl het zout in de diepste delen gehandhaafd blijft (Groenenboom, 2016).

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

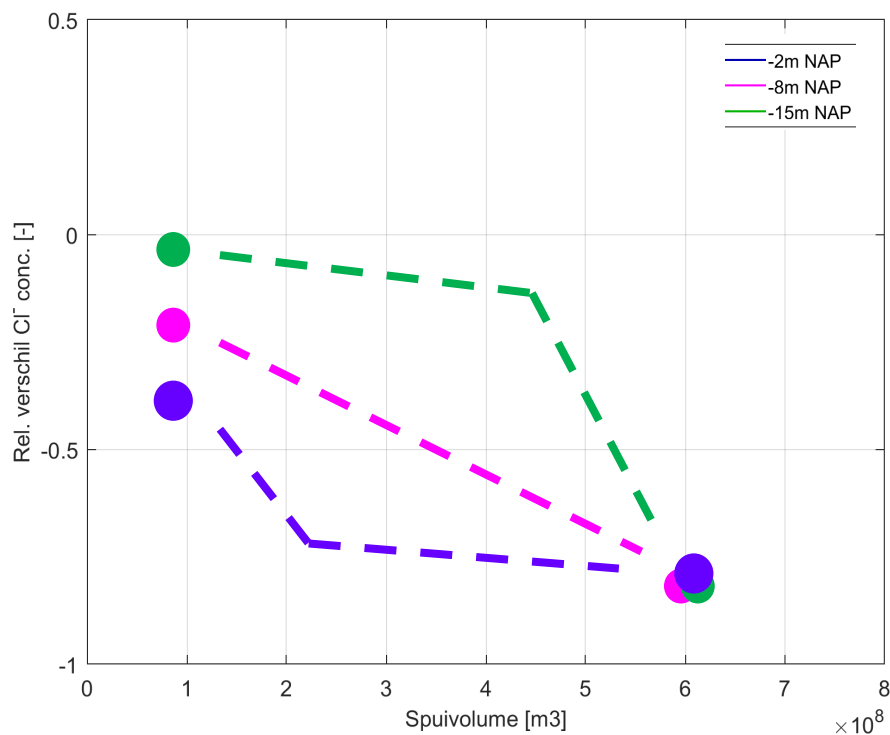
- Terugdringing van chloride concentraties met behulp van lage spuidebieten, zoals bij zoetspoelen, leidt tot een afname van chloride concentraties in bovenste lagen van de waterkolom. Terugdringing van chloride concentraties treedt hoofdzakelijk op tot de diepte van de drempels in het Haringvliet.
- 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.



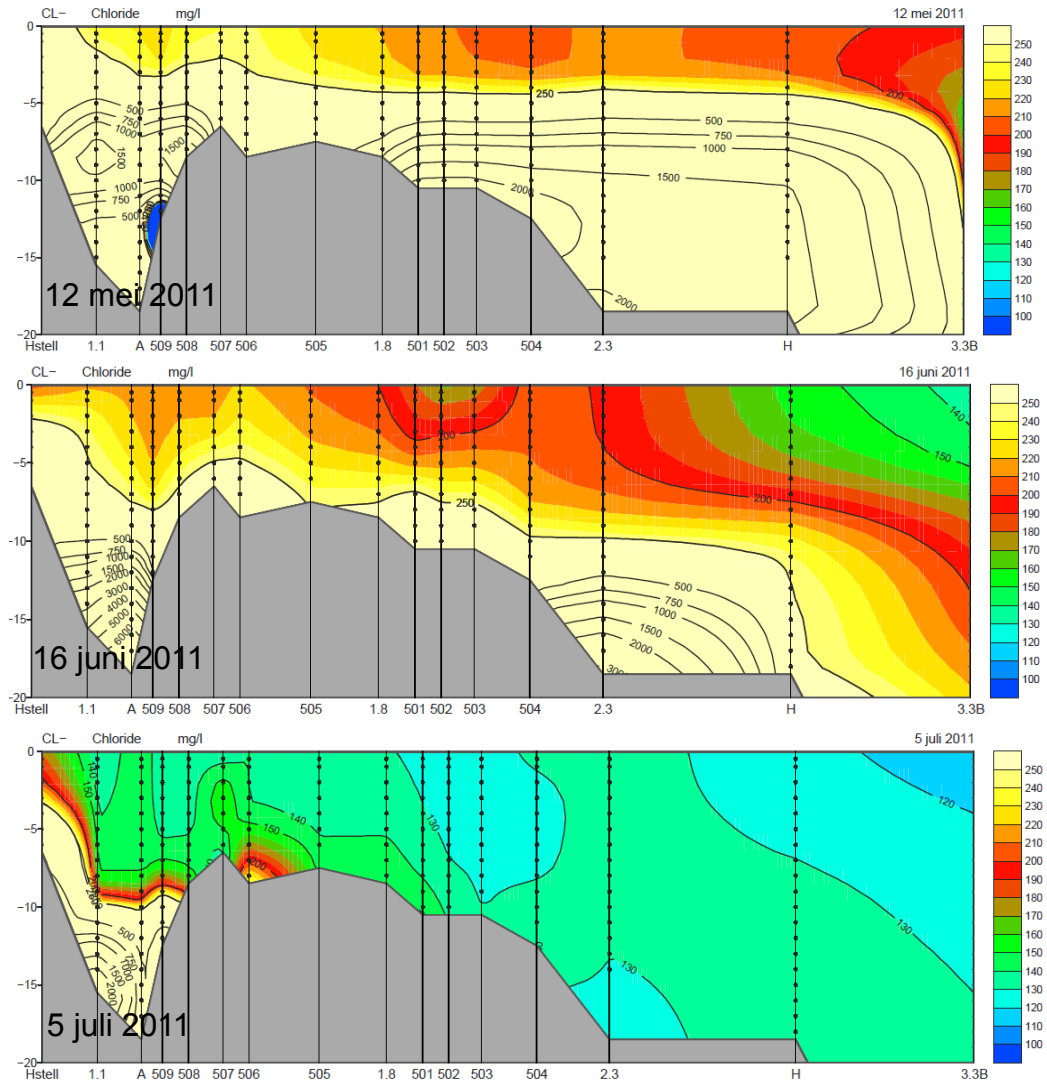
Figuur 4.3 Hypothetische relatie tussen spui-debiet door de Haringvlietsluizen en de relatieve afname van de Chloride concentratie voor verschillende dieptes (waaronder wordt verstaan: $(C_{i0}-C_{i1})/C_{i0}$).

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.

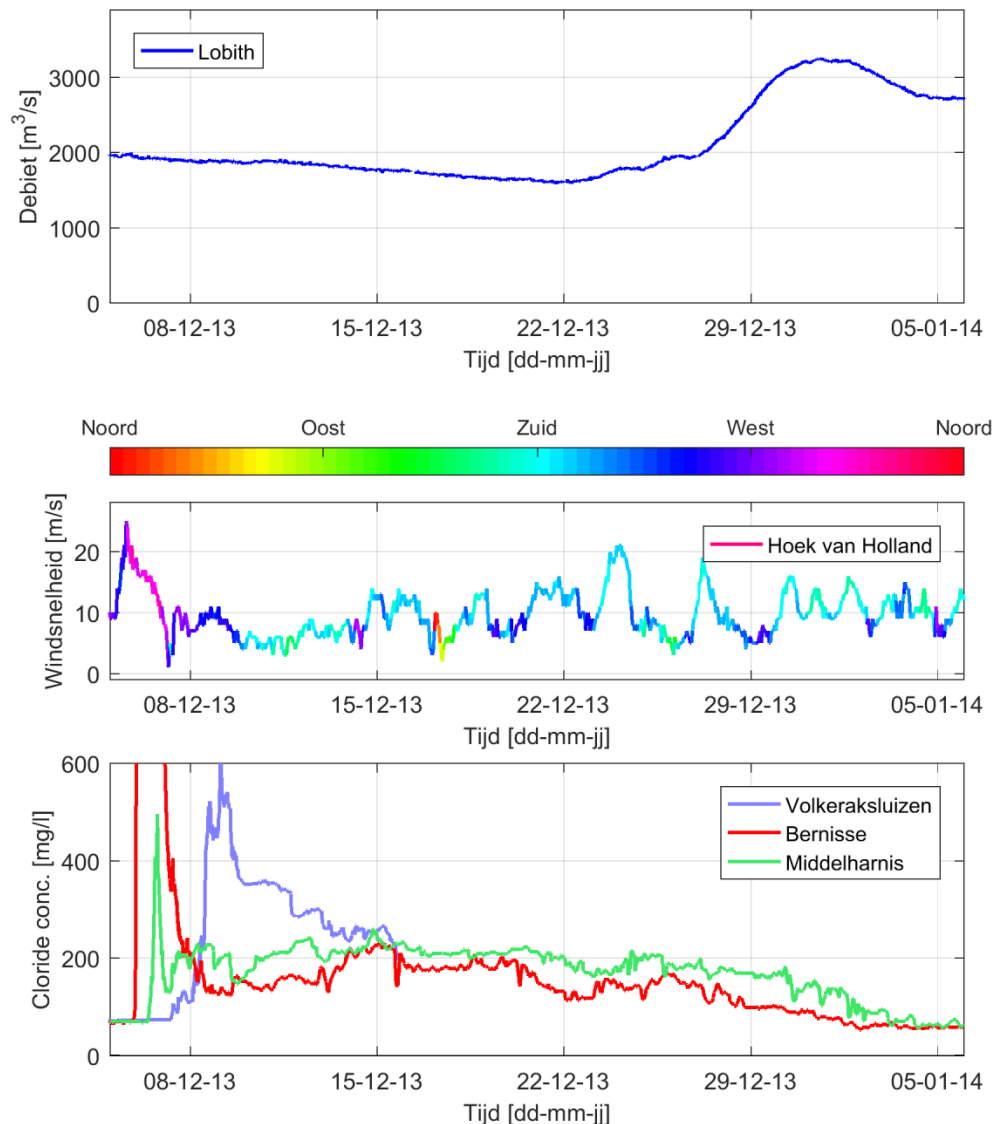
5 Zoutverspreiding vanuit diepere delen

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 innamepunt 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 geplot 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 snuffe 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*.
- Huisman, 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.