Memo

Aan
Karin Stone (RWS)

Datum
31 juli 2019

Aantal pagina's
32

Contactpersoon
Meinard Tiessen
Wouter Kranenburg

Doorkiesnummer
+31(0)88 335 7429

E-mail
Meinard.Tiessen@deltares.nl
Wouter.Kranenburg@deltares.nl

Onderwerp
Data-analyse Kierproef Haringvliet NL2018_0 Nalevering (15-7-2018 – 7-12-2018)

---

1 Inleiding 3
1.1 Context 3
1.2 Doel van proef 3
1.3 Kennisvragen, onderzoeksvragen & hypotheses 4
2 Opzet proef 6
2.1 Aanpak 6
2.2 Interessegebied 6
2.3 Metingen: Meetlocaties en instrumenten 6
2.4 Omstandigheden gedurende de analyse-periode 7
2.4.1 Initiële condities 7
2.4.2 Afvoer Lobith 8
2.4.3 Windcondities 9
2.4.4 Waterstanden 9
2.4.5 Beheer Haringvlietsluizen 9
3 Resultaten 10
3.1 Chloridegehaltes van vaste meetlocaties 10
3.2 Chloridegehaltes van incidentele, varende metingen 12
3.3 Snelheidsmetingen 12
3.4 Overige meetresultaten 13
4 Analyse 14
4.1 Analyse van specifieke periodes en processen 14
4.1.1 Periode 1 (15-07-2018 – 01-08-2018): Ontzilting ondiepe, oostelijke delen 14
4.1.2 Periode 2 (09-08-2018 – 13-08-2018): Tijdelijke windgedreven ontzilting van ondersensor Haringvliet West 16
4.1.3 Periode 3 (16-08-2018 – 05-10-2018): Ontzilting van ondersensor KIER 4 17

4.1.4 Periode 4 (06-10-2018 – 01-11-2018) Hernieuwde verzilting ondersensor KIER 4 en HARVWT 18
4.1.5 Periode 5 (15-07-2018 – 16-12-2018): Autonome trend in chloride concentraties en horizontale verspreiding zout nabij het wateroppervlakte 20
4.2 Analyse nader toegespitst op de onderzoeksvragen 22
4.3 Balansen en fluxen 24
4.3.1 Schatting watervolume en chloridevracht door de kering 24
4.3.2 Schatting van de chloridehoeveelheid in de diepe putten van het Haringvliet 24
5 Discussie 25
5.1 Evaluatie methodiek 25
5.2 Evaluatie meetgegevens 25
6 Conclusies en aanbevelingen 27
6.1 Conclusies 27
6.1.1 Mate van beantwoording onderzoeksvragen en aanpassing hypothesen 27
6.2 Aanbevelingen 29
6.2.1 Vervolgstappen Lerend Implementeren 29
6.2.2 Mogelijke aanvullende analyses met behulp van huidige data 29
6.2.3 Aanvullende kennisvragen 29
6.2.4 Suggesties voor aanpassing of aanvulling van de meetbehoefte 29
Appendix A: Hypothesen voor naleveringsonderzoek 31
Hypothesen 31

1 Inleiding

Dit document beschrijft de opzet, resultaten en analyse van Nalevering uit de diepe putten op het Haringvliet (NL2018_0). Dit is de eerste analyse in het kader van het “Lerend Implementeren” van het Kierbesluit. De onderzoeksperiode is 15 juli t/m 7 december 2018. De analyse is gericht op het onderzoeken van ‘nalevering’, dat is de verspreiding van zout water uit de diepe putten in het Haringvliet bij gesloten sluizen.

Dit onderzoek werd mogelijk nadat er bij onderhoud van de sluizen begin 2018 zout water het Haringvliet instroomde. Dit zoute water is in een diepe put ten westen van Hellevoetsluis terecht gekomen. De verspreiding van het zout uit deze put gedurende de zomer is onderzocht. De hoeveelheid zout was beperkt en heeft niet tot problemen geleid.

1.1 Context

In 2000 is het Besluit beheer Haringvlietsluizen (het Kierbesluit) politiek vastgesteld. Het Kierbesluit maakt het mogelijk de Haringvlietsluizen bij vloed open te zetten en zout water in te laten op de Haringvliet zodat trekvissen makkelijker het Rijn- en Maasstroomgebied in kunnen trekken. Een neveneffect is dat hierbij zout water het westelijk deel van het Haringvliet instroomt. Om te voorkomen dat de inname van zoetwater negatief beïnvloed wordt, is als randvoorwaarde opgenomen dat de zoetwaterinname ten oosten van de lijn Middelharnis-Spui is gegarandeerd. Innamepunten ten westen van die lijn zijn verplaatst naar een locatie ten oosten van de lijn.

November 2018 vond de starthandeling plaats. Omdat het openstellen van de sluizen bij vloed een nieuwe situatie is, is gestart met een fase van Lerend Implementeren. In deze fase worden onderzoeken uitgevoerd om de kennis over het systeem te vergroten. Bij het Lerend Implementeren worden drie situaties onderscheiden: ‘Kieren’, ‘Zoetspoelen’ en ‘Zoetgespoeld’. Tijdens het Lerend Implementeren worden voor elke situatie afzonderlijk proeven uitgevoerd, met – zo mogelijk – een steeds toenemende forcering, om zo een groeiend inzicht te verwerven in hoe zout water in het Haringvliet binnenkomt, zich onder verschillende omstandigheden verspreidt, en hoe gemakkelijk of moeilijk het kan worden uitgespoeld. Dit om het Kieren zo gecontroleerd en beheerst mogelijk te laten plaatsvinden.

Vanaf juli 2017 – dus nog voor de eerste keer daadwerkelijk Kieren – wordt de chlorideconcentratie in het Haringvliet behalve van reeds daarvoor bestaande vaste meetpunten ook gemonitord vanaf diverse meetpontons en met varende metingen. Daarbij is eerst gekeken naar menging en verspreiding van reeds aanwezig zout water onder invloed van wind over het Haringvliet (NL2018_0). De analyse is uitgevoerd voor de periode 15 juli t/m 7 december 2018. Door zeer lage afvoeren waren de Haringvlietsluizen in deze periode gesloten.

1.2 Doel van proef

Het doel van de data-analyse van de nalever-periode NL2018_0 is door RWS gedefinieerd als volgt:

Zicht krijgen op gedrag en verspreiding van achtergebleven zout in de put B gedurende de langdurig droge periode half juli t/m begin december 2018 waarbij de Haringvlietsluizen gesloten waren.

In deze memo wordt ook naar de overige delen van het Haringvliet gekeken, om te bepalen of er verziltings- en ontziltingsgebeurtenissen hebben plaatsgevonden gedurende de langdurig droge periode half juli t/m begin december 2018 waarbij de Haringvlietsluizen gesloten waren.

1.3 Kennisvragen, onderzoeksvragen & hypotheses

De overkoepelende kennisvraag waar in deze analyse wordt getracht antwoord op te vinden is:

- Hoe gedraagt het Haringvliet systeem en het in diepe delen achtergebleven zout zich bij lange tijd gesloten sluizen?
- Wat zijn de bepalende factoren voor verspreiding van zout vanuit de diepe putten?

Aanvullende vragen die daarbij door RWS zijn geformuleerd:

1 Welke eerste bevindingen zijn af te leiden op basis van de beschikbare informatie met betrekking tot de ontzilting van put B en is dit in lijn met de hypothese?
2 Welke aanvullende metingen zijn in vervolgonderzoek gewenst om proces ontzilting beter te kunnen volgen?
3 Kunnen we modellen gebruiken om beter zicht te krijgen op het ontziltingsproces?

Aanvullende vraag 1 wordt in het Hoofdstuk 4 Analyse opgepakt, terwijl vraag 2 wordt behandeld in Hoofdstuk 5 Conclusies en Aanbevelingen. Vraag 3 is hier niet in detail behandeld omdat de inzet van numerieke modellen buiten de scope van deze data-analyse valt. Echter, de mogelijkheden die het gebruik van numerieke modellen bieden voor het beter begrijpen van een vergelijkbare periode wordt kort in Hoofdstuk 5 aangestipt.

In het onderzoeksplan voor Kieronderzoek (zie Appendix A) en door RWS is een aantal dominante processen en condities gedefinieerd die kunnen zorgen voor zoutverspreiding vanuit de diepere delen van het Haringvliet in een situatie met (nagenoeg) gesloten sluizen:

- Turbulentie op het zoet-zout grensvlak (spronglaag). De drijvende kracht voor turbulentie op het grensvlak, waardoor entrainment van zout naar de ondiepere lagen plaatsvindt, is wind.
- Bepalend voor de mate waarin opmengingsprocessen vat kunnen krijgen op de zoutere onderlaag, is de verticale dichtheidsverdeling in de aanvangssituatie
- Dispersie.
- Scheefstand van de spronglaag
- Dichtheidsstroming van het zoutere water over de bodem.
- Advectief transport met retourstromingen bij verticale windcirculatie

De specifieke onderzoeksvragen die centraal staan bij deze proef zijn hieronder weergegeven, samen met de eerder verzamelde hypothesen over processen die hierbij mogelijk een rol spelen.

Onderzoeksvraag 1	Hoe ontzilten de diepe putten (met name put B) tijdens een periode van gesloten sluizen, en hoe hangt dit samen met de omgevingscondities?
Hypothese	Naar verwachting is wind de bepalende factor voor opmenging van zout water uit de diepe delen van het Haringvliet (put B). - Verticale menging en entrainment - Dichtheidstroming van zouter water over de bodem - Scheefstand van de spronglaag - Advectief transport door retourstroming

Toelichting	- Achterhalen van ontziltingsmomenten op basis van de gemeten zoutgehaltes in de diepe putten nabij de Haringvlietsluizen. - Bepaling omgevingsfactoren (wind) ten tijde van de ontziltingsincidenten - Trachten een relatie te leggen tussen ontzilting en omgevingsfactoren, mogelijk in samenhang met andere meetlocaties.

Onderzoeksvraag 2	Hoe verspreidt het zout afkomstig uit de diepe verzilte delen van het Haringvliet (met name put B) zich over het Haringvliet?
Hypothese	Naar verwachting wordt zout allereerst omhoog verplaatst door opmenging en verspreidt het zich vervolgens direct door advectie (retourstroming bij wind gedreven circulatie), dichtheidsstroming en dispersie over het Haringvliet.
Toelichting	- Tijdens en aansluitend op ontziltingsmomenten bekijken of overige meetstations aangepaste verzilting laten zien: - Bij toename in zoutgehalte: Achterhalen van mogelijk proces wat hieraan ten grondslag ligt.

Doordat ontzilting van een diepe put eigenlijk niet los kan worden gezien met verzilting van de omgeving van die put, worden beide onderzoeksvragen veelal gelijktijdig opgepakt.

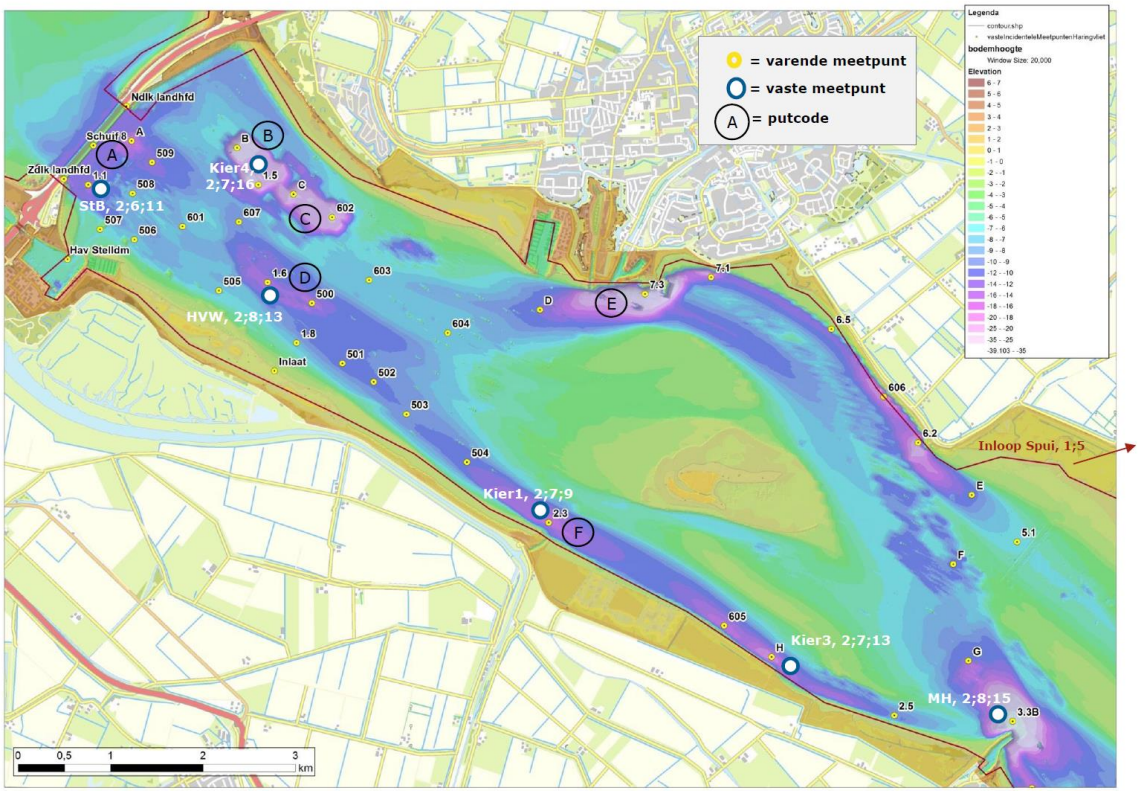
2 Opzet proef

2.1 Aanpak

Bij de nalever-periode NL2018_0 waren de Haringvlietsluizen gesloten vanwege de lange periode van droogte. De opzet van de analyse is: chlorideconcentraties in het systeem en forcering monitoren vanaf vaste meetpunten (Landelijk Meetnet en pontons) en proberen lessen te trekken over gedrag en verspreiding van zout in/uit put B door het zoeken naar verbanden tussen forcering en toestand(sverandering). Er is bij deze periode (verder) geen sprake van het ten behoeve van de analyse beïnvloeden van de omstandigheden, door bijvoorbeeld aangepast sluisbeheer.

2.2 Interessegebied

Het interessegebied tijdens deze periode is in het bijzonder put B. Dat is een voormalige zandwinput in het noordwesten van het Haringvliet, op ongeveer 1 tot 1,5 km van de Haringvlietsluizen, zie Figuur 2.1. Echter ook verzilting in andere delen van het Haringvliet (met name putten D en F) wordt in beschouwing genomen.



Figuur 2.1 Overzichtskaart met locaties van de vaste meetpunten (Landelijk Meetnet en pontons) en diepe putten. De figuur geeft ook locaties van incidentele (varende) metingen die voor deze analyse niet van toepassing zijn.

2.3 Metingen: Meetlocaties en instrumenten

Voor de periode van de analyse is informatie gebruikt over:

1) Hefhoogtes (Haringvlietsluizen nr. 1-17, allen dicht gedurende analyse)
2) Waterstanden (Hellevoetsluis, Moerdijk, Rak noord, Stellendam buiten, Haringvliet 10)

3) Rivierafvoeren (Lobith, Hagestein boven, Tiel Waal, Megen Dorp)
4) Windsterkte en -richting (Hoek van Holland, Haringvlietsluizen)
5) Chlorideconcentraties (vaste metingen)

Chlorideconcentraties zijn bepaald vanuit meting van elektrische geleidendheid in combinatie met watertemperatuur. Een overzicht van de vaste meetlocaties voor chlorideconcentraties is gegeven in Tabel 2.1, zie ook Figuur 2.1. De vaste meetdata zijn door Rijkswaterstaat gevalideerd en beschikbaar via DONAR. Merk op dat na afloop van deze analyse ponton Kier 3 is verplaatst en de verticale posities van de sensoren zijn aangepast (10/12/2018). Ook de verticale positie van de derde sensor van Kier 4 aangepast (11/12/2018). Deze periode is dus de enige analyse met de posities / dieptes zoals weergegeven in Tabel 2.1. Tijdens deze periode zijn geen (vaste of varende) snelheidsmetingen uitgevoerd.

Tabel 2.1 Overzicht meetlocaties chlorideconcentraties (vaste metingen)

Locatienaam	code in kaart	Positie RD		Dieptes sensoren (m)		
		X (m)	Y (m)			
Haringvliet West	HVW	64464	426510	-2	-8	-13
Inloop Spui		75618	422145	-1	-5	
Kier 1 ponton	Kier1	67724	423798	-2	-7	-9
Kier 3 ponton	Kier3	70421	422192	-2	-7	-13
Kier 4 ponton	Kier4	64600	427501	-2	-7	-16
Middelharnis Meetboei	MH	72525	421550	-2	-8	-15
Stellendam Binnen	StB	62822	427302	-2	-6	-11
Stellendam buiten meetboei		62259	427869	-2	-5	
Haringvliet 10		49862	431612	-2,5	-9	
Zuidland		78840	424680	-3		
Lobith ponton		203500	429750	-1		
Eijsden ponton		177000	310000	-1		

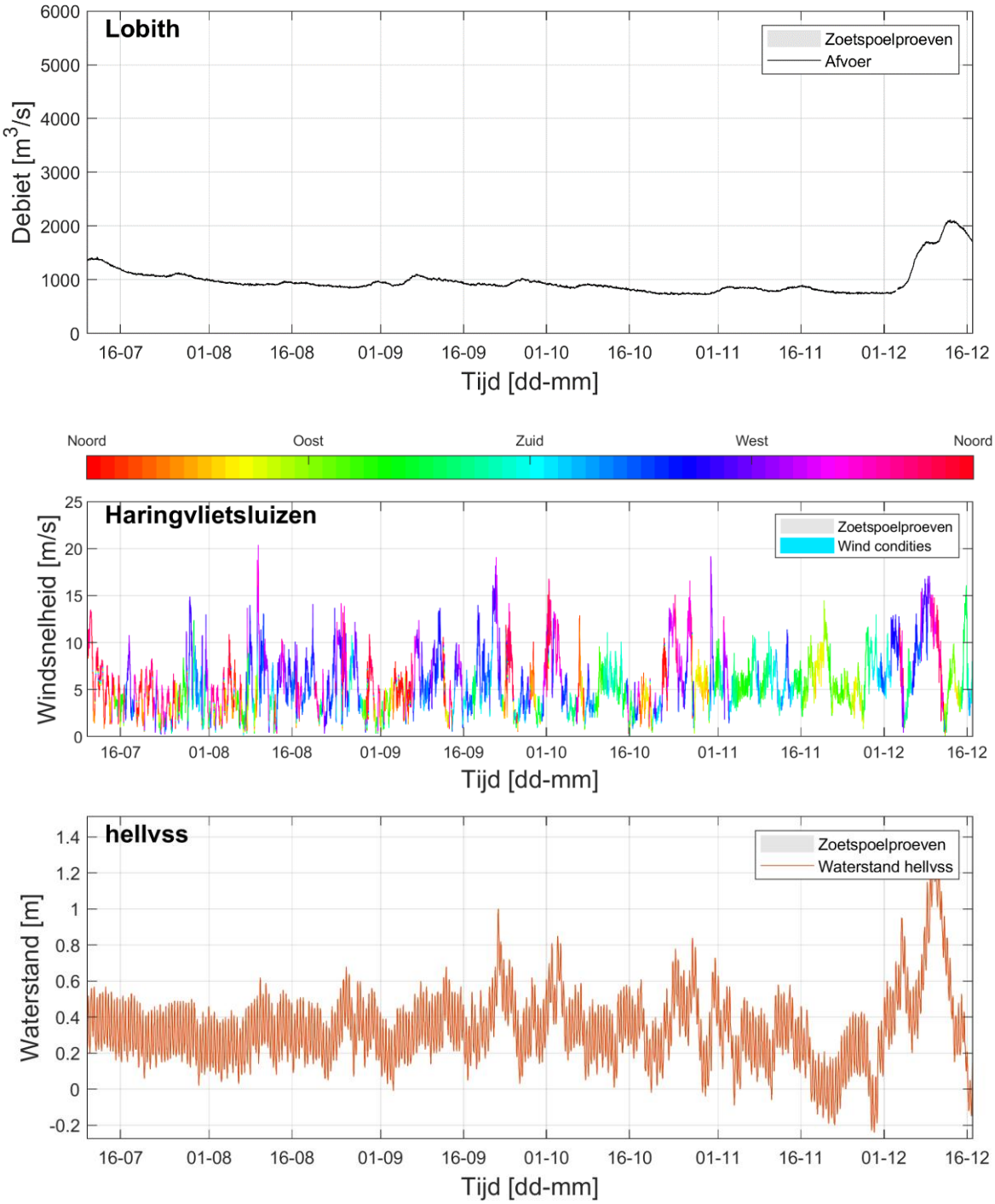
2.4 Omstandigheden gedurende de analyse-periode

2.4.1 Initiële condities

In juni 2018 is de afvoer bij Lobith een groot deel van de maand hoger geweest dan 2000 m^3/s, met daarbij twee kleine pieken van ongeveer 2600 en 2700 m^3/s. Het grootste deel van de maand is er dus gespuid door de Haringvlietsluizen. In de laatste week van juni is het debiet gestaag gaan afnemen, waarbij ook de doorstroomopening tijdens het spuien is teruggeschroefd. Vanaf 12 juli tot 7 december 2018 zijn de sluizen volledig gesloten geweest. Bij de aanvang van de analyse op 15 juli was de achtergrondconcentratie ongeveer 80 mg/l. In put B werd al enige tijd een ongeveer constante concentratie van 1800 mg/l gemeten op 16 m diepte (Kier 4). In put D (HVW) was de concentratie op -13 m rond de 500 mg/l, dat is ongeveer 400 mg/l hoger dan nabij het oppervlak op -2 m. Voor put F (Kier 1) zijn geen meetwaarden aanwezig van voor de aanvang van de periode (meetwaarden starten half oktober). In het oosten van de zuidelijke geul (Kier 3) waren de meetwaarden voor de bovenste en onderste sensor gelijk, rond de 90 mg/l. De situatie bij aanvang van de analyse-periode kan dus omschreven worden als zoetgespoeld, waarbij onderin put B en in beperkte mate ook put D nog wel water is achtergebleven met verhoogde chlorideconcentratie.

2.4.2 Afvoer Lobith

Voor de gehele periode is de rivierafvoer bij Lobith rond de 1000 m^3/s geweest.



Figuur 2.2 Afvoer bij Lobith, wind op het Haringvliet en waterstanden bij Hellevoetsluis voor de naleveringsperiode NL2018-0.

2.4.3 Windcondities

Tijdens de analyse-periode hebben zich enkele events voorgedaan waarbij de windsterkte boven de 15 m/s uitkwam. Deze vielen op/rond 10-8, 21-9, 1-10, 23-10 en 25-10. Daarbij kwam de wind uit het westen tot noorden. Event met piekwindsterkten tussen de 10 en 15 m/s zijn vaker voorgekomen. Daarbij kwam de wind regelmatig ook uit het zuidwesten. Er heeft zich 1 event voorgedaan met sterke oostenwind, en wel met een pieksterkte van 14 m/s op/rond 19-10.

2.4.4 Waterstanden

In de waterstanden is tijdens de analyse-periode een oscillatie waar te nemen met de periode van het getij. Er is zelfs een springtij-doodtij cyclus te zien. Daarnaast zijn er incidentele verhogingen van de ‘getijgemiddelde’ waterstand te zien die samenvallen met de momenten van sterke wind uit het westen tot noorden. Er is een duidelijke dip in de getijgemiddelde waterstand te zien rond 19/11, samenvallend met de sterke oostenwind.

2.4.5 Beheer Haringvlietsluizen

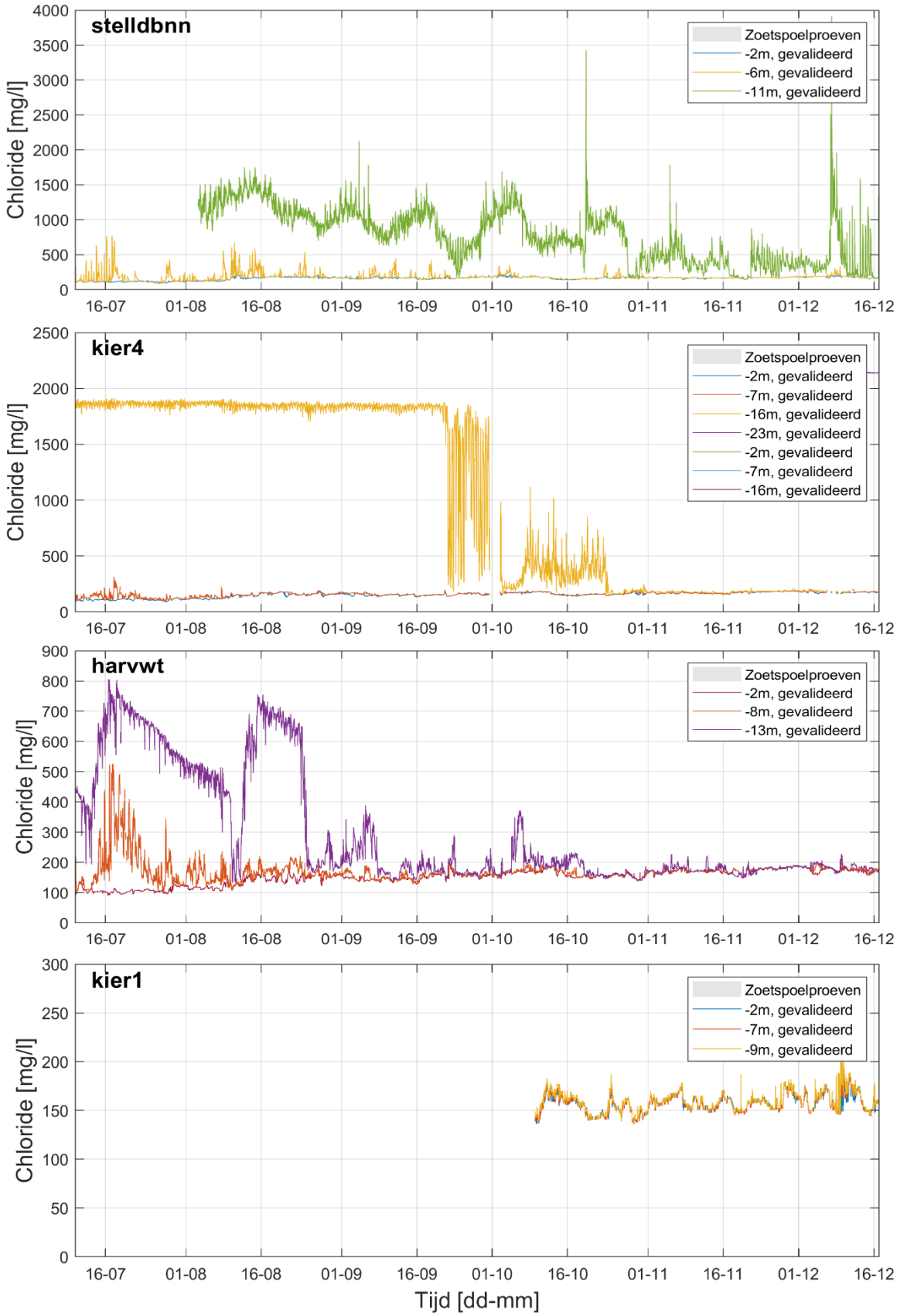
Tijdens deze proef zijn de Haringvlietsluizen van 12-7 tot 7-12 gesloten geweest. Er is geen informatie bekend over de inzet van de vissluizen en zoutriolen en ook het aantal scheepspassages en sluisbewegingen van de schutsluis is niet bij de analyse in beschouwing genomen.

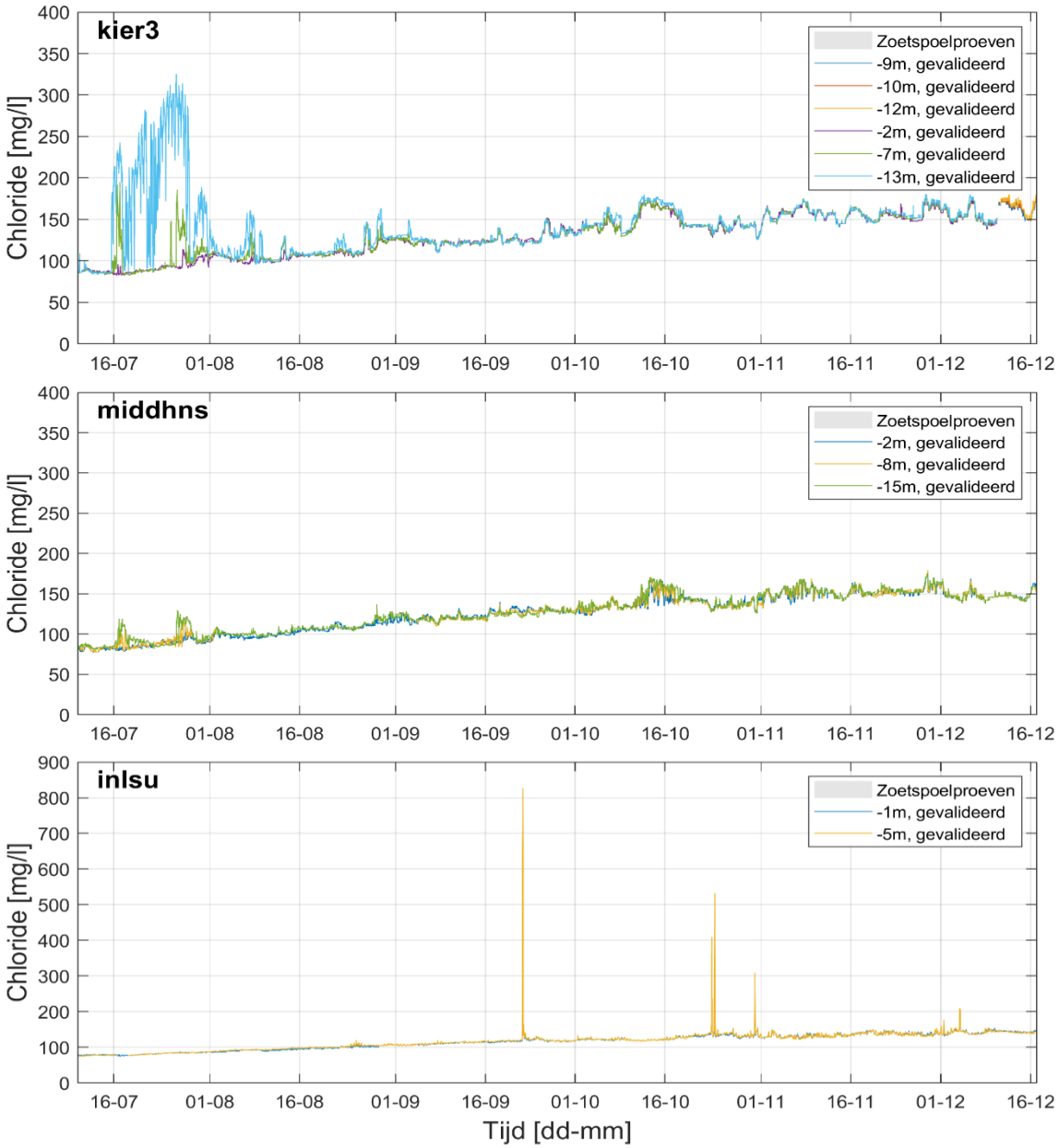
3 Resultaten

3.1 Chloridegehaltes van vaste meetlocaties

De metingen vanaf de vaste meetlocaties (meetnet en pontons) geven een beeld van de ontwikkeling van de chlorideconcentraties in de tijd. In de figuren hieronder (Figuur *3.1*) zijn de resultaten weergegeven gaande van west naar oost, vanaf Stellendam binnen tot Middelharnis. De locaties zijn: Stellendam binnen (in/nabij put A), Kier 4 (in put B, is noordelijke put), Haringvliet west (put D, in zuidelijke stroomgeul), Kier 1 (put F), Kier 3 (in de zuidelijke stroomgeul, al dicht bij Middelharnis) en meetpunt Middelharnis (in de diepe put bij Middelharnis).

- De metingen voor Stellendam binnen (Figuur 3.1) laten zien dat er zich water met verhoogde concentratie bevindt op/rond de -11 m. Op -6 m en -2 m is de concentratie aanzienlijk lager. Op -6 m gaat de concentratie incidenteel omhoog. Op langere termijn stijgt de concentratie op zowel -6 en -2 m geleidelijk, terwijl deze op -11 m geleidelijk afneemt. Daarnaast is er een schommeling in de concentratie op -11 m te zien die vooral lijkt samen te hangen met perioden van getij en springtij.
- Voor Kier 4 (put B) was de concentratie op grotere diepte (-16 m) vanaf het begin hoog en nagenoeg constant. Vanaf 19 september gaat deze plotseling oscilleren tussen 200 en 1900 mg/l. Rond 3 oktober is deze zelfs even gelijk aan de concentraties op geringere diepte. Daarna is er weer een periode van hogere concentraties, om vervolgens weer terug te keren naar de concentratie zoals ook gevonden hoger in de waterkolom. Op lange termijn vertonen de concentraties op geringere diepten een langzaam stijgende lijn.
- Dit is ook te zien voor Haringvliet west. Daar bevindt zich aan het begin van de analyse-periode water met verhoogde chlorideconcentratie op -13 m. Deze neemt in gestaag af tot rond 12 augustus wanneer een plotselinge toename samenvalt met een wind-event. Aansluitend neemt de concentratie vervolgens weer gestaag af. Ook hier nemen de concentraties op geringere diepte op langere termijn toe. In de middelste sensor (-8 m) zijn daarbij incidentele pieken en periode van concentratieverhoging waar te nemen.
- Daarbij lijkt het erop dat de periode van concentratieverhoging bij Haringvliet west -8 m (middensensor) vervolgens is terug te zien bij Kier 3 op -13 m. Het zout lijkt enigszins te zijn opgemengd en zich vervolgens op enige diepte te hebben verspreid naar het oosten. De concentratie wordt echter vrij snel weer uniform over de diepte, al neemt de concentratie op langere termijn duidelijk toe tot boven de 150 mg/l. Dit geldt ook meetpunt Middelharnis.


stelldbnn
Zoetspoelproeven
-2m, gevalideerd
-6m, gevalideerd
-11m, gevalideerd
Chloride [mg/l]
kier4
Zoetspoelproeven
-2m, gevalideerd
-7m, gevalideerd
-16m, gevalideerd
-23m, gevalideerd
-2m, gevalideerd
-7m, gevalideerd
-16m, gevalideerd
Chloride [mg/l]
harvwt
Zoetspoelproeven
-2m, gevalideerd
-8m, gevalideerd
-13m, gevalideerd
Chloride [mg/l]
kier1
Zoetspoelproeven
-2m, gevalideerd
-7m, gevalideerd
-9m, gevalideerd
Chloride [mg/l]
16-07
01-08
16-08
01-09
16-09
01-10
16-10
01-11
16-11
01-12
16-12
Tijd [dd-mm]



Figuur 3.1 Chlorideconcentraties bij Stellendam binnen, Kier 4 (put B, noordelijke put) en Haringvliet west (put D, put in zuidelijke stroomgeul) Kier 1 en Kier 3 (in zuidelijke geul voorbij put D), Middelharnis en Inloop Spui voor de nalever-periode NL2018-0. Door verschuiving van meetstations en sensordieptes zijn er in de legenda meer dieptes weergegeven dan gepresenteerd in het figuur. Voor deze periode zijn relevant: *Kier3: -2m (paars), -7m (groen), -13m (licht blauw), Kier4: -16m (geel), -7 (rood) en -2m (blauw)).*

3.2 Chloridegehaltes van incidentele, varende metingen

Voor deze analyse-periode niet van toepassing.

3.3 Snelheidsmetingen

Voor deze analyse-periode niet van toepassing.

3.4 Overige meetresultaten

Voor deze analyse-periode niet van toepassing.

4 Analyse

4.1 Analyse van specifieke periodes en processen

Ten behoeve van de begripsvorming omtrent naleveringsperiodes en de zoutdynamiek die daarbij op kan treden, is een aantal periodes geselecteerd voor nadere analyse:

#	Van	Tot	Toelichting
1	15-07-2018	01-08-2018	Ontzilting ondiepe, oostelijke delen van het onderzoeksgebied
2	09-08-2018	13-08-2018	Tijdelijke wind gedreven ontzilting van ondersensor Haringvliet West
3	16-08-2018	05-10-2018	Ontzilting van ondersensor KIER 4
4	06-10-2018	01-11-2018	Hernieuwde verzilting ondersensor KIER 4 en HARVWT
5	15-07-2018	16-12-2018	Autonome trend in chloride concentraties en horizontale verspreiding zout nabij het wateroppervlakte

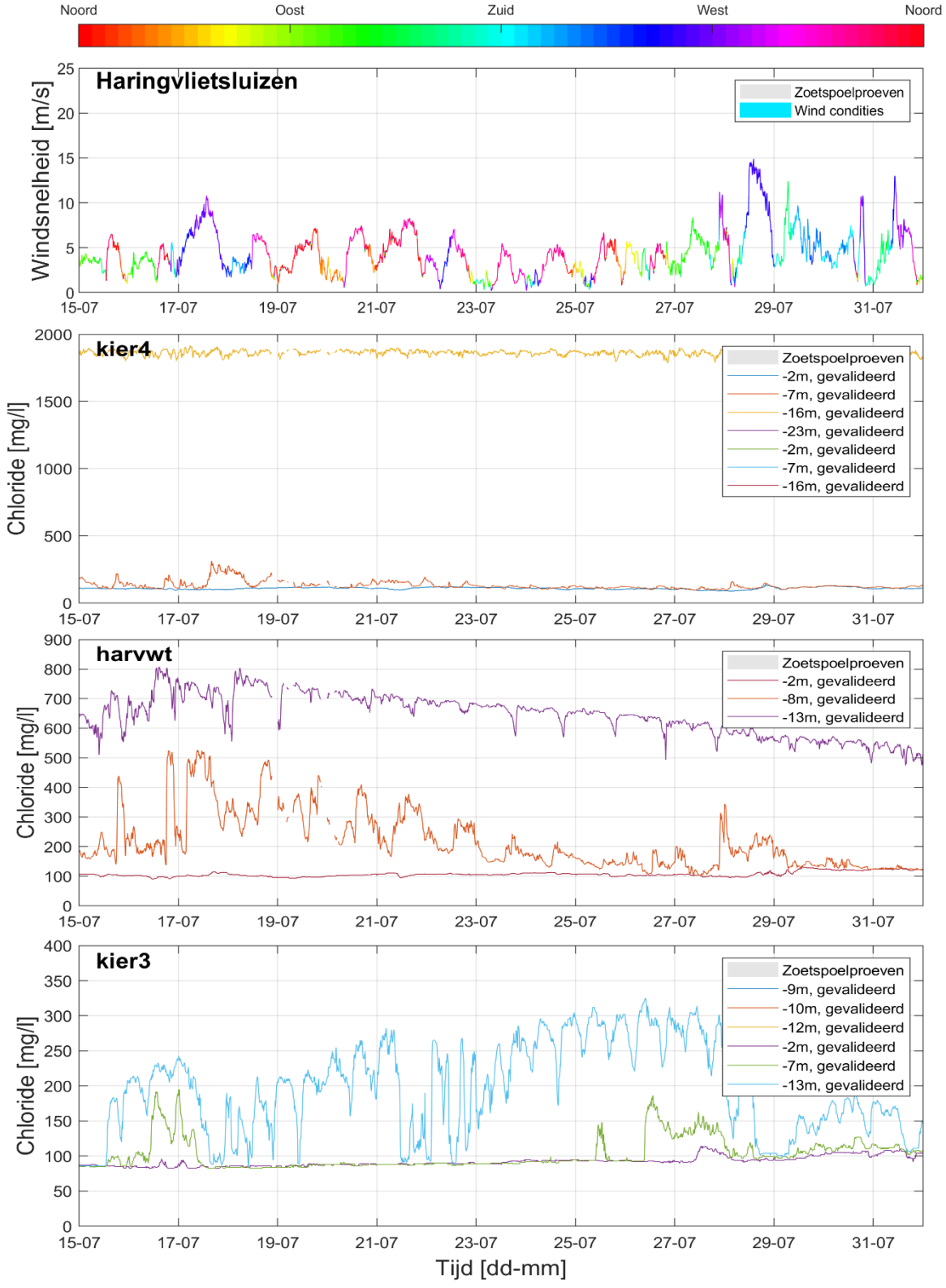
4.1.1 Periode 1 (15-07-2018 – 01-08-2018): Ontzilting ondiepe, oostelijke delen

Te zien is dat bij aanvang van de analyse periode (vanaf 15 juli) sprake is van toenemende verzilting op een groot aantal stations en verschillende dieptes. Daarbij is de verzilting bij de ondersensoren in het westelijk deel van het Haringvliet (HARVWT en Kier4) het hoogst en neemt deze af met diepte en afstand ten opzichte van de sluizen. De aanleiding voor deze verzilting is niet bekend en zou mogelijk kunnen komen door beheer en onderhoud voorafgaand aan de analyseperiode. Uit het meetpunt Stellendam Binnen (STELLDBNN in Figuur *3.1*) blijkt dat er al sprake is van aanzienlijke verzilting van de zoutvang, waarbij ook verhoogde concentraties worden geregistreerd op een diepte die hoger ligt dan de omliggende drempels. Naar verwachting stroomt in deze periode dus zout vanuit de zoutvang naar de rest van het Haringvliet. Duidelijk is in ieder geval dat een kleine windpiek (17 juli, maximaal 10m/s, NW 5Bft) geen aanleiding is tot de verzilting van de hogere dieptelagen aangezien bij HARVWT en KIER3 de verzilting al toeneemt voorafgaand aan de windpiek. Voor Kier 4 (middensensor -7m) geldt dat de grootste verziltingspiek wel aansluitend optreedt op de windpiek, maar daar is ook al periodiek sprake van verzilting voorafgaand aan de hardere wind.

Aansluitend op de windpiek (17 juli) geldt voor HAVRWT middensensor (-8m) en ook in beperkte mate voor de ondersensor (-13m) dat er sprake is van een zeer geleidelijke afname in de chlorideconcentratie over de volgende 10 dagen (tot 27 juli). Deze afname kan niet worden gerelateerd aan de wind en valt samen met een veel dynamischer verloop bij de ondersensor van KIER 3 (-13m). Dit laatste station is verder oostwaarts gelegen en hier ligt mogelijk de overgang tussen zoet en zout water ongeveer op de hoogte van de ondersensor. Het zoutverloop bij deze sensor lijkt enige correlatie met wind te hebben. Bij wind uit het westen tot noorden van meer dan +/- 7 m/s is sprake van een afname in het zoutgehalte, terwijl bij lagere windsnelheden (veelal uit andere richtingen) sprake is van een geleidelijke toename. Daarnaast lijkt het zoutgehalte een periodiek verloop te hebben dat overeenkomt met de getijfase. Mogelijk kan dit worden gerelateerd aan de variatie in de waterstand (en daarmee de sensordiepte). Dit wordt specifiek gevisualiseerd voor KIER4 in paragraaf 4.1.3.

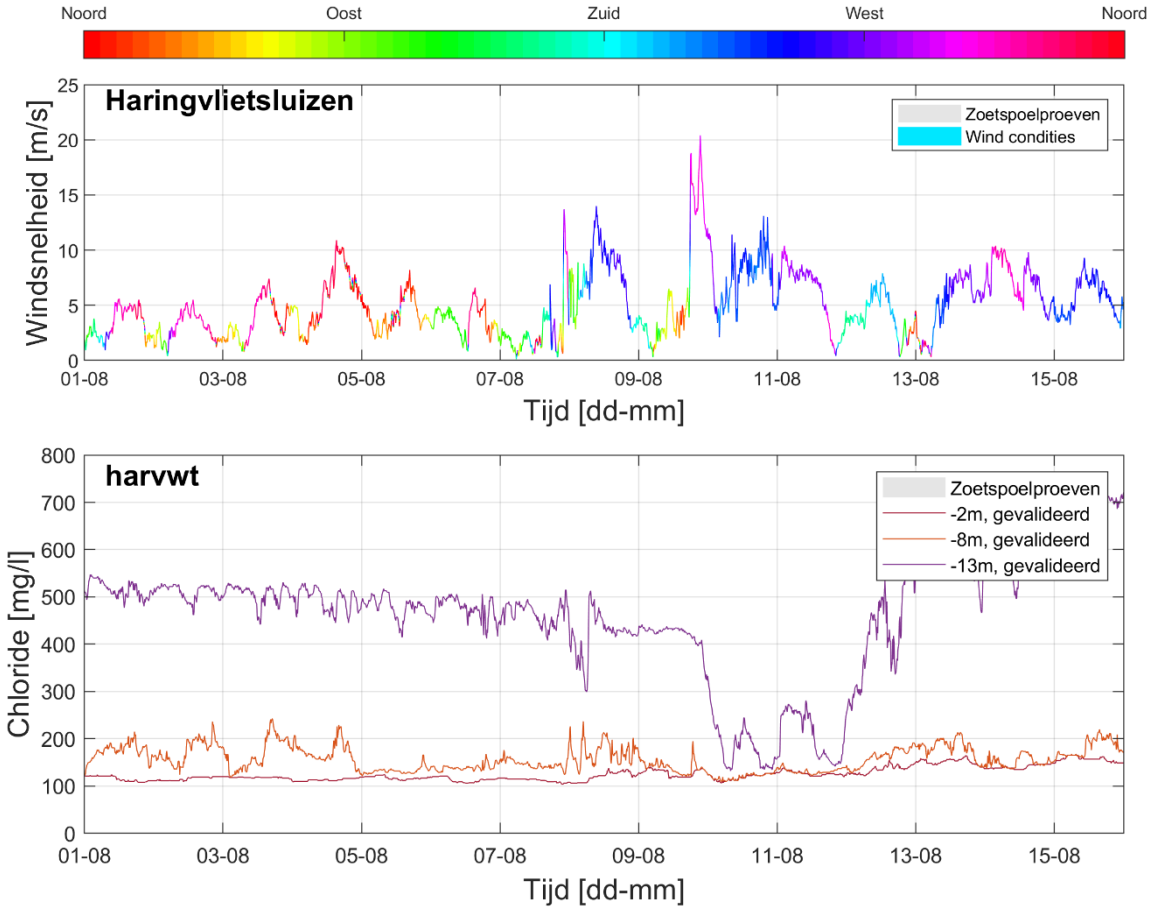
Eind juli (28ste) is dan sprake van een significante windpiek (14 m/s, W 7 Bft) waarna de middensensor bij HARVWT (-8m) ontzilt raakt, en ook de ondersensor bij KIER3 (-13m)

geleidelijk ontzilt. Dit laatste is meer geleidelijk (zout komt in eerste instantie nog terug), maar dit station wordt uiteindelijk permanent ontzilt (Figuur *3.1*).



Figuur 4.1 *Chloride concentratie en wind condities eind juli als het oostelijk deel van het Haringvliet ontzilt.*

4.1.2 Periode 2 (09-08-2018 – 13-08-2018): Tijdelijke windgedreven ontzilting van ondersensor Haringvliet West



Figuur 4.2 Chloride concentratie en wind condities ten tijde van tijdelijke ontzilting van ondersensor Haringvliet West (-13m).

In Figuur 4.2 word de ontwikkeling van het zoutgehalte in put D (HARVWT) weergegeven wanneer er een storm passeert (9 augustus). Te zien is dat voorafgaand aan de storm al sprake was van een geleidelijke ontzilting (tot 400 mg/l) van de diepste sensor en periodiek verhoogde concentraties bij de middensensor (tot 200 mg/l). Bij aanvang van de storm (tot 20m/s, NW 8 Bft) neemt de concentratie bij de ondersensor snel af tot die vergelijkbaar is met de concentraties op de midden en bovensensoren. De hogere sensoren laten echter geen abrupte of significante toename in zoutgehaltes zien tijdens deze periode wat suggereert dat er in ieder geval geen sprake is van “pure” verticale opmenging. Wel is er sprake van een meer geleidelijke verhoging van de chlorideconcentraties aan het wateroppervlakte in het westelijk deel van het Haringvliet (zie paragraaf 4.1.5). Het water lijkt dus wel te worden opgemengd (dit geldt mogelijk ook voor andere verzilte delen van het Haringvliet) maar dit opgemengde water wordt blijkbaar ook horizontaal sterk vermengd. Mogelijk stroomt dit opgemengde licht-verzilte water deels gelijk weg richting het ZO als gevolg van de wind. Dit laatste is echter niet waargenomen bij andere meetlocaties. Zo is ter hoogte van Kier 3 direct voorafgaand aan de

storm sprake van een lichte verhoging van de chloride concentratie welke tijdens de storm juist afneemt.

Als de wind afneemt, blijft het zoutgehalte bij de ondersensor van HARVWT nog tijdelijk laag, waarna deze (bij verdere afname en draaiing van de wind naar Z) snel toeneemt tot ongeveer 700 mg/l. Daarmee lijkt te kunnen worden geconcludeerd dat er geen sprake is van volledige opmening van deze put. Mogelijk veroorzaakt de storm scheefstand van de spronglaag, waardoor de sensor tijdelijk lagere chloride concentraties heeft geregistreerd. Echter, het is ook niet uit te sluiten dat de waargenomen toename in Chloride concentratie bij HARVWT vanaf 12 augustus het gevolg is van toelevering vanuit andere gebieden. Alhoewel andere meetstations geen afname in chloride concentraties laten zien, is het mogelijk dat in andere putten ook sprake is geweest van scheefstand van de spronglaag waardoor zout over de drempel kan worden geduwd. Het huidige meetnet (met slechts 3 sensoren over de diepte) is niet gedetailleerd genoeg om voor elk van de verzilte putten dit te kunnen vastleggen.

Tot slot, de concentratie ter hoogte van de ondersensor van HARVWT is aan het einde van deze periode hoger dan die aan het begin. Een verklaring voor deze toename zou verzilting vanuit andere gebieden kunnen zijn, of mogelijk enige opmening van een nog verder verzilte onderlaag. Echter beide effecten zijn niet te bepalen aan de hand van de huidige metingen.

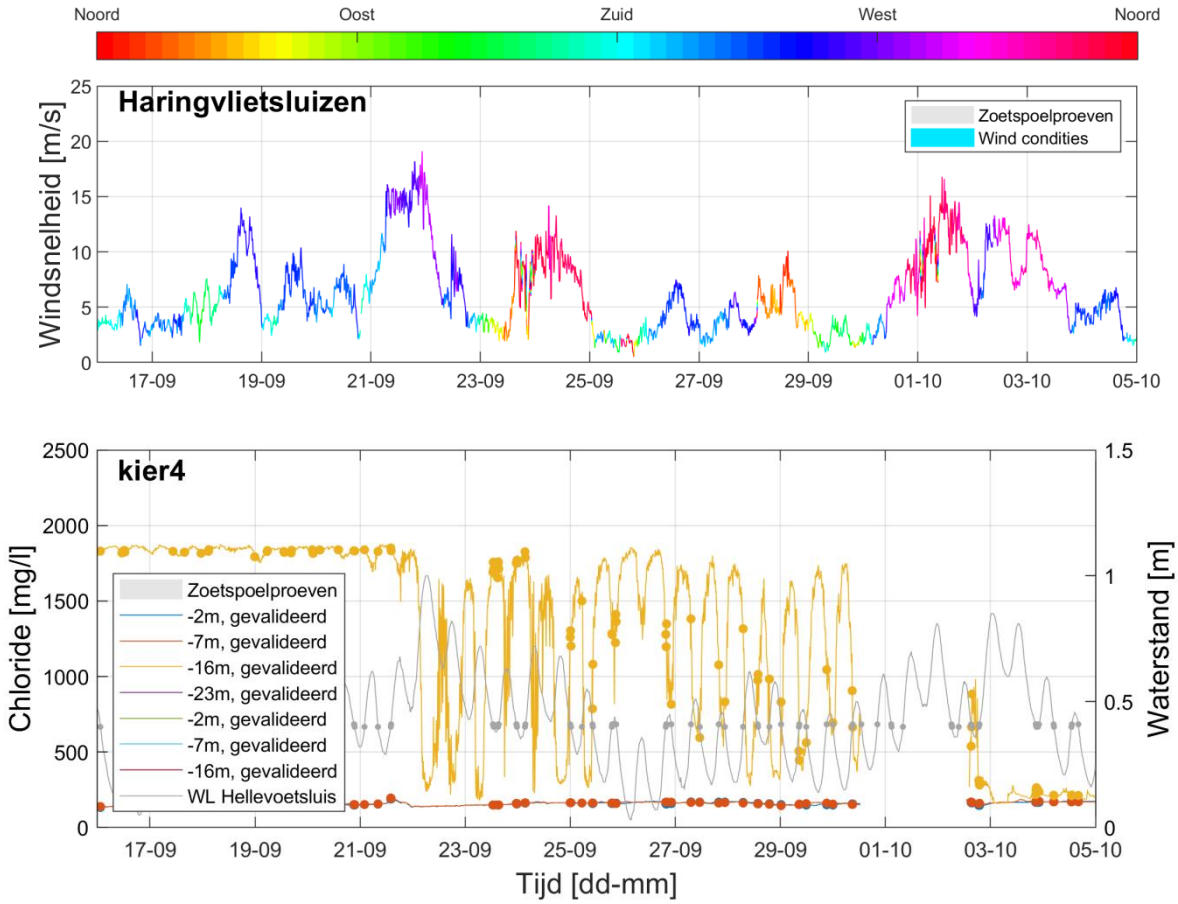
4.1.3 Periode 3 (16-08-2018 – 05-10-2018): Ontzilting van ondersensor KIER 4

In de periode vanaf 22 september tot 3 oktober is sprake van een geleidelijke ontzilting ter hoogte van de ondersensor (-16m) van meetpunt Kier 4 in Put B. Het verloop van de ontzilting laat een zeer sterke fluctuatie zien over iedere getijperiode, welke mogelijk kan worden gerelateerd aan de verticale verschuiving van de sensor als gevolg van waterstandsfluctuaties. In Figuur 4.3 wordt ter indicatie van deze relatie het waterstandsverloop bij Hellevoetsluis weergegeven en worden momenten met gelijke waterstand (-0.4m NAP) aangeduid met stippen. Voor een nadere toelichting/inventarisatie hiervan wordt verwezen naar: “Data-analyse Kierproef Haringvliet ZS2019_1 Zoetspoelen (16-1-2019 – 28-1-2019)”.

Te zien is dat aansluitend op een periode me harde wind (21 en 22 september, maximaal 15m/s, W 7 Bft) dit fluctuerende zoutverloop begint, en dat na een tweede periode met harde wind (1-3 oktober, 15 m/s NNW 7 Bft) sprake is van een over de getijperiode continue ontzilting.

Deze periode laat daarmee zien dat windcondities rond 7 Bft leiden tot opmenging van een verzilte onderlaag (tot 1700 mg/l), en dat deze verticale opmening tot een diepte van ongeveer 16m doorwerkt.

Het blijft echter lastig om de ontzilting bij HARVWT (9-10 aug, windsnelheid 20m/s) te relateren aan de hier waargenomen ontzilting (windsnelheid 15 m/s). Door het verschil in diepte van de sensor, kan de verschillende manier van ontzilting (instantaan bij HARVWT (-13m) en geleidelijk bij KIER 4, -16m) niet direct worden teruggeleid aan de windsnelheid, omdat de wind gedreven verticale menging ook afneemt over de diepte. Daarnaast is ook sprake van een verschillend zoutgehalte en daarmee dichtheid, welke verticale menging ook beïnvloed. Sterkere stratificatie (zoals bij KIER 4) bemoeilijkt de verticale opmening.

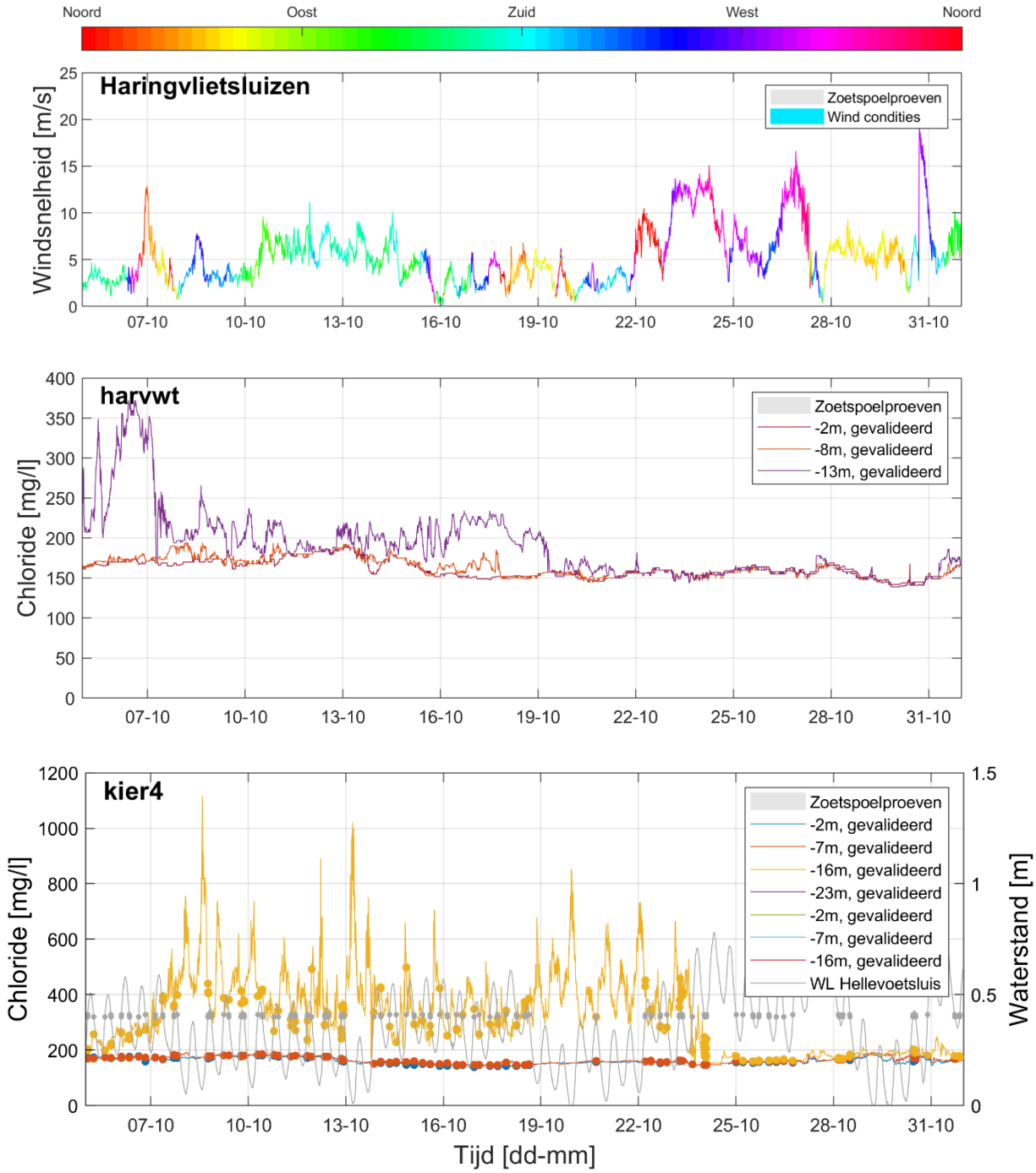


Figuur 4.3 Chlorideconcentraties op het Haringvliet bij Kier 4 (put B), samen met wind (boven) en waterstanden op het Haringvliet.

4.1.4 Periode 4 (06-10-2018 – 01-11-2018) Hernieuwde verzilting ondersensor KIER 4 en HARVWT

Direct aansluitend op de in de paragraaf hierboven beschreven ontzilting, treed hernieuwde verzilting van de ondersensor van KIER4 op (Figuur 4.4). De mate van verzilting is lager dan die voorafgaand aan de ontzilting was. Het startpunt van deze verzilting valt samen met een windpiek uit het NO (7 oktober, 13m/s, 6 Bft), waarna een periode optreedt met langdurig wind uit het oosten tot zuiden. In deze periode is sprake van permanente verzilting welke een sterk fluctuerend karakter vertoont welke deels samenvalt met de waterstandsvariatie. De terugkomst van de verzilting aansluitend op het verzoeten suggereert ook hier dat er geen sprake is van volledige verticale opmening tijdens het voorafgaande wind event (1 oktober), maar mogelijk eerder verplaatsing van de zoute laag.

Ook HARVWT (-13m) laat een lichte toename in chlorideconcentratie zien tijdens deze periode (Figuur *3.1*), maar deze treed enkele dagen voorafgaand aan de windpiek op. Beide sluiten elkaar echter niet uit. Met het oog op het ontbreken van stormen en andere harde wind condities lijkt het te zijn uitgesloten dat hier sprake is van een door verticale opmenging uit nog diepere lagen veroorzaakte verzilting.



Figuur 4.4 Hernieuwde verzilting van ondersensoren bij HARVWT en Kier 4 vanaf begin oktober, in combinatie met windcondities.

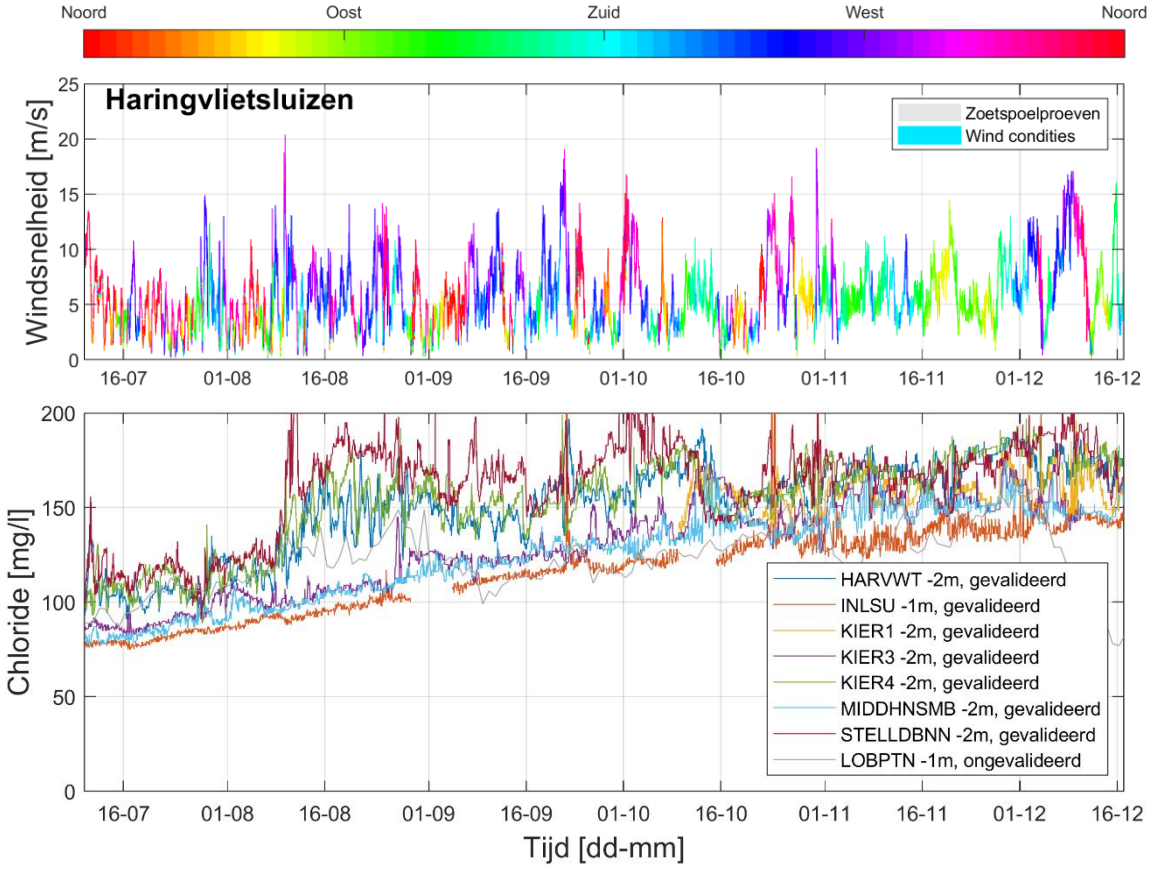
Mogelijk is er sprake van zout dat zich uit bijvoorbeeld de zoutvang verplaatst. De eerdere verzilting bij HARVWT suggereert dat het overlopen van de zoutvang mogelijk al optrad voorafgaand aan de NO windpiek (7 oktober). De wind piek kan er echter toe hebben geleid dat het zout zich nabij de bodem verder in oostelijke richting heeft kunnen verplaatsen. In de aansluitende periode met continue (maar zeer matige) oostenwind (10-15 oktober) wordt

verzilting niet alleen bij KIER en HARVWT, maar ook MIDDLHNS, KIER1 en KIER3 waargenomen. Dit suggereert dat de oostenwind leidt tot een transport langs de bodem van verzilt water vanuit HARVWT (onder andere) naar oostelijk gelegen meetlocaties. Dit stromingspatroon moet (in principe) samenvallen met een naar het westen gedreven verplaatsing aan het wateroppervlakte, waarvan enige indicatie wordt gevonden in de zoutgehaltes aan het wateroppervlak (zie paragraaf 4.1.5). Deze verhoging in zoutgehalte bij de oostelijke stations wordt wel tot op zekere hoogte voor alle dieptelagen waargenomen. Dit komt vermoedelijk doordat er sprake is van relatief licht-verzilt water, wat verticaal eenvoudiger doormengt, zoals ook al optreedt rond 13 oktober bij HARVWT.

De ontzilting van HARVWT en KIER4 treedt op als de wind vanaf 22 oktober weer toeneemt en uit het noorden tot westen komt. Voor het resterende deel van deze naleveringsperiode is geen sprake meer van verhoogde chloride concentraties bij de ondersensoren in de diepe putten en voormalige getijdegeulen van het Haringvliet met uitzondering van de zoutvang.

Tot slot is er sprake van uitval van alle sensoren bij KIER4 rond 1 oktober. Alhoewel de sensordiepte aansluitend niet is verplaatst, is de ontwikkeling van het zoutgehalte daarna duidelijk anders dan voorafgaand aan deze interruptie.

4.1.5 Periode 5 (15-07-2018 – 16-12-2018): Autonome trend in chloride concentraties en horizontale verspreiding zout nabij het wateroppervlakte



Figuur 4.5 Ontwikkeling van Chloride concentraties aan het wateroppervlakte in het Haringvliet en relevante overige stations (Inloop Spui (INLSU) en Lobith (LOBPTN))

Een laatste aandachtspunt is de autonome ontwikkeling in chloride concentraties en daaraan gekoppeld de mogelijke horizontale verspreiding van zout uit de diepere delen. Om beide effecten van elkaar te kunnen ontkoppelen is in Figuur 4.5 het verloop van het zoutgehalte bij de bovenste sensoren in het Haringvliet en enkele aanvullende stations weergegeven. Te zien is dat allen een geleidelijke verzilting doormaken welke wordt veroorzaakt door de toenemende chlorideconcentratie bovenstrooms (Lobith). Daarnaast is ook te zien dat de meetstations in het westelijk deel van het Haringvliet (STELLDBNN, KIER4, HARVWT) over het algemeen een hogere chlorideconcentratie registreren dan oostelijker gelegen stations (KIER3, MIDDELHARNIS en INLSU). Door zoutlekkage blijft ook bij gesloten sluizen sprake van een beperkte mate van zoutindringing in het westelijk deel. Naar verwachting wordt door dispersie dit zout geleidelijk naar het oppervlakte gebracht.

Twee momenten zijn daarnaast nog relevant:

- Vanaf de stormpiek van 9 augustus (tot 20m/s, NW 8 Bft) is er sprak van een plotselinge toename in de verzilting in het westelijk deel van het Haringvliet. Deze relatief harde windcondities hebben klaarblijkelijk geleidt tot verticale opmenging van verzilt water uit de diepere delen van het Haringvliet.
- Vanaf 16 oktober is er sprake van een zoutgehalte in het westelijk deel van het Haringvliet die overeenkomt met het zoutgehalte in het oostelijk deel. Het beeld daarbij is dat de periode met oostenwind er toe heeft geleid dat het zoete water aan het wateroppervlakte vanuit het oosten naar het westen is getransporteerd. Terwijl nabij de bodem juist verzilt water naar het oosten is gestroomd (zie ook paragraaf 4.1.4). In de weken daarna treed weer een geleidelijke relatieve verzilting van het westelijk deel op als gevolg van (naar verwachting) dispersie en wind gedreven verticale opmenging.

4.2 Analyse nader toegespitst op de onderzoeksvragen

De verschillende ontziltingsmomenten voor verschillende putten samen met de omgevingsfactoren en de mate van verspreiding is aangegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Indicatie karakteristieken van ontziltingsmomenten gedurende NL2018_0. Onder "Terugkeer verzilting" wordt verstaan in welke mate er indicaties zijn dat er eigenlijk geen sprake is geweest van daadwerkelijke ontzilting maar slechts van een tijdelijke verplaatsing die nadertijd wordt hersteld. Onder "Mate van verzilting" wordt het zoutgehalte bij de ondersensor op die locatie bedoeld, "Sterkte spronglaag" is het verschil in zoutgehalte tussen de boven- en ondersensor.

Wanneer	18-7 tot 19-7	17-7 tot 29-7	27-7 tot 1-8	9-8 tot 10-8	22-9 tot 1-10	7-10 tot 19-10	7-10 tot 25-10
Naam meetlocatie	KIER4	HARVWT	KIER3	HARVWT	KIER4	HARVWT	KIER4
Diepte [m]	-7	-8	-13	-13	-16	-13	-16
Mate van verzilting [mg/l]	250	500	300	400	1800	230	400
Sterkte spronglaag [mg/l]	150	400	200	250	1700	50	250
Windsnelheid (piek) [m/s]	10	7 tot 10	15	20	15	8	15
Windrichting (piek) [-]	NW	W tot N	W	NW	W en N	Z tot O	NW
Terugkeer verzilting	Nee	Nee	Nee	Ja	Mogelijk	Nee	Nee
Verticale opmening	Geen indicatie	Mogelijk	Mogelijk	Ja	Geen indicatie	Mogelijk	Geen indicatie
Horizontale verspreiding	Geen indicatie	Geen indicatie	Geen indicatie	Ja (boven)	Geen indicatie	Ja (onder)	Geen indicatie

Met name de mate van verticale opmening en horizontale verspreiding zijn lastig te bepalen omdat het meetnet zowel in de verticaal als horizontaal verre van gebiedsdekkend is. Hier aangegeven zijn alleen de momenten waarop dit (enigszins) kon worden afgeleid op basis van de overige metingen.

Uit deze meetgegevens valt niet op te maken of er bij een lagere mate van stratificatie (spronglaag sterkte) ontzilting optreed bij lagere windsnelheden. Echter heeft de hoogste windsnelheid wel geleid verticale opmening, maar wordt deze niet aansluitend geregistreerd in omliggende meetstations. Hier geldt juist ook voor dat de wind ten dele heeft geleidt tot slechts een verplaatsing van de verzilting (of door scheefstand) welke na de storm weer wordt hersteld.

Met name oostenwind (7-10 tot 19-10, Tabel 4.1) lijkt (zoals ook al eerder bleek in begin 2018) te leiden tot horizontale verspreiding van verzilting. Tijdens oostenwind ontstaat er een circulatiepatroon dat leidt tot naar het westen gericht transport aan het wateroppervlakte (wat veelal leidt tot verzoeting) en tot naar het oosten gericht transport nabij de bodem (wat veelal leidt tot verzilting). Bij een storm uit het W tot N (8-8 tot 10-8) treed ook (mogelijk) horizontale verspreiding van verzilt water op, alleen hier gaat het om door verticale opmenging veroorzaakte verzilting in de bovenlaag die juist in het westelijk deel van het Haringvliet wordt waargenomen. (Dit wordt echter bij andere harde windcondities uit het W tot N niet waargenomen.)

Onderzoeksvraag 1	Hoe ontzilten de diepe putten (met name put B) tijdens een periode van gesloten sluizen, en hoe hangt dit samen met de omgevingscondities?
Hypothese	Naar verwachting is wind de bepalende factor voor opmenging van zout water uit de diepe delen van het Haringvliet (put B). - Verticale menging en entrainment - Dichtheidstroming van zouter water over de bodem - Scheefstand van de spronglaag - Advectief transport door retourstroming

Onderzoeksvraag 2	Hoe verspreidt het zout afkomstig uit de diepe verzilte delen van het Haringvliet (met name put B) zich over het Haringvliet?
Hypothese	Naar verwachting wordt zout allereerst omhoog verplaatst door opmenging en verspreidt het zich vervolgens direct door advectie (retourstroming bij wind gedreven circulatie), dichtheidsstroming en dispersie over het Haringvliet.

De verschillende periodes die hierboven zijn beschreven laten zien dat ontzilting veelal windgedreven is, en dat (ondanks de lange duur) geen sprake is van significante ontzilting als gevolg van dispersieve processen. Dispersie lijkt wel tot leiden tot verzilting van de bovenlaag van met name het westelijk deel van het Haringvliet.

Voor ontzilting van diepe putten geldt dat er een relatie moet worden bepaald tussen:
- De mate van forcering (windsnelheid)
- De diepte waarop het zout zich heeft verzamelt
- De mate van stratificatie

De theorie is dat hoe groter de mate van stratificatie of de diepte waarop de verzilting zit, hoe harder de wind moet zijn om verticale opmenging of zelfs ontzilting te veroorzaken. Daarbij speelt nog wel mee dat hard wind ook kan leiden tot scheefstand van de spronglaag in een verzilte put waarbij zout aan de ene zijde van de put net over de drempel kan gaan stromen.

Uit de analyse blijkt dat bij een lagere mate van stratificatie (spronlaag sterkte) ontzilting optreed bij lagere windsnelheden. Al is slechts indicatief vast te stellen dat een mate van stratificatie van 400 mg/l Cl opmengt bij windsnelheden tot 10m/s, terwijl een stratificatie van 1500 mg/l Cl opgemengd raakt bij een pieksnelheid van 15 m/s. Daarnaast blijkt uit de metingen duidelijk dat hoge windsnelheden leiden verticale opmening, waar dat bij lagere windsnelheden niet wordt waargenomen. Echter, waarschijnlijk is dit gerelateerd aan de beperkte mate van verzilting die hiermee wordt opgeheven, waardoor de toename in chlorideconcentratie aan het oppervlakte (en in de omgeving) te gering blijft om te worden waargenomen.

De diepte van de sensor is uiteraard niet gelijk aan die van de spronglaag. Toch bied ontzilting van een bepaalde dieptesensor een indicatie dat de spronglaag dus die diepte heeft gepasseerd tijdens een ontziltingsevent. Te zien is dat sensoren die dichter bij het wateroppervlakte zijn ontzilten bij lagere windsnelheden. Echter deze relatie is niet eenduidig, omdat dit ook afhangt van de mate van stratificatie.

Uit de hierboven beschreven periodes blijkt dat verticale opmenging veelal niet wordt waargenomen omdat wind ook leidt tot horizontale stromingspatronen waardoor opgemengd

verzilt water veelal niet direct boven de diepe sensor wordt waargenomen. Daarnaast is op basis van deze metingen het niet mogelijk scheefstand direct waar te nemen. Hiervoor moeten minimaal twee sensoren in een put worden geplaatst die tegelijkertijd een verschillend zoutgehalte op een zelfde diepte registeren. Er is echter wel op verschillende momenten sprake van fluctuerende zoutgehaltes, dit kan ofwel samenvallen met een getij-gerelateerde waterstandvariatie (en daarmee sensordiepte) of met het eerst daadwerkelijk uit de put stromen van verzilting welke aansluitend weer terugstroomt.

Op basis van de hierboven beschreven periodes kan echter wel worden geconcludeerd dat advectief transport als gevolg van retourstroming met name bij oostenwind leidt tot verspreiding van verzilting in oostelijke richting. Waar begin 2018 (toen dit ook optrad) nog sprake was van een aanzienlijke windsnelheid, kan aan de hand van deze resultaten worden opgemaakt dat ook bij gematigde windsnelheden (5-10m/s) al sprake kan zijn van horizontale verplaatsing van verzilting naar het oosten toe.

4.3 Balansen en fluxen

4.3.1 Schatting watervolume en chloridevracht door de kering

Dit is niet uitgevoerd voor deze analyse-periode, omdat aanvullend vergelijkingsmateriaal in de vorm van varende zoutmetingen niet in deze periode zijn uitgevoerd.

4.3.2 Schatting van de chloridehoeveelheid in de diepe putten van het Haringvliet

Vanwege het ontbreken van achtereenvolgende varende metingen, is dit niet uitgevoerd.

5 Discussie

5.1 Evaluatie methodiek

De hier beschreven periode trad op voorafgaand aan de eigenlijke start van het Lerend Implementeren en de uitvoer van het Kierbesluit. Om alvast een 0-meting te hebben, waren de meetpontons al wel in het Haringvliet geplaatst, waardoor ook tijdens deze periode gemeten is. De periode van uitzonderlijke droogte en daarmee langdurig gesloten Haringvlietsluizen viel samen met een al (enigszins) verzilt Haringvliet waardoor een uitgelezen kans bestond om nalevering te onderzoeken.

De opgetreden verzilting is daardoor zonder bewust handelen opgetreden. Deze heeft echter wel waardevolle inzichten kunnen bieden. De manier waarop de verzilting is gecreëerd is misschien niet voor herhaling vatbaar, maar de mate van verzilting en de gemeten ontziltingsprocessen zijn zeer informatief. In de toekomst zou dan ook een enigszins vergelijkbare opzet kunnen worden nagestreefd. Mogelijk is het wel nuttig om een uitgangssituatie te creëren waarbij het Haringvliet sterker is verzilt, omdat dit naar verwachting dichter in de buurt gaat komen van het toekomstige beheer. Daarnaast is het wenselijk om vooral de grenzen van het beheer op te zoeken en is daarvoor ook een sterkere mate van verzilting gewenst. In de tijdens deze periode opgetreden situatie is er slechts sprake geweest van zeer beperkte verzilting van de oppervlaktelaag bovenop de autonome ontwikkeling in zoutgehalte, naar verwachting zal in de toekomst deze grens verder opgezocht worden.

5.2 Evaluatie meetgegevens

Doordat de analyse-periode voorafgaand aan de eigenlijke start heeft plaatsgevonden zijn er geen aanvullende (varende) metingen uitgevoerd, en is bijvoorbeeld ook geen inzicht geweest in de inzet van zoutriolen, vissluizen en de scheepvaartbewegingen door de schutsluis. Omdat tijdens deze periode niet bewust verzilting het systeem is ingelaten, zijn deze termen juist zeer relevant.

Doordat zoutlekkage zo relevant is, is de mate van verzilting van de zoutvang (en het mogelijke overlopen) cruciaal. Zo lijkt er sprake te zijn geweest van aanvulling van de verzilting van de diepe putten vanuit de zoutvang gedurende de analyse-periode. Echter, doordat in de zoutvang de sensoren alleen onderin de put, en ondieper dan de drempel naar de omliggende gebieden hebben gezeten, is het eigenlijke vol- en overlopen van de zoutvang niet gemeten.

De metingen hebben geen indicatie kunnen geven van scheefstand van de spronglaag. De mate waarin zout door scheefstand over een drempel naar een aangrenzende put kan stromen is daarmee nog niet onderzocht. Hiervoor moet in meer detail over de verticaal worden gemeten, maar ook moet er in de twee uiteindes van een put worden gemeten.

De totale verziltingsgraad / zoutvracht in het Haringvliet kan niet worden bepaald aan de hand van de hier beschikbare metingen. Dit zou een waardevolle indicatie kunnen zijn van de mate waarin verzilting in dit soort periodes verandert. Veelal (zoals uit deze data-analyse bleek) is het zoutgehalte in de putten relatief dynamisch en niet indicatief van de op/ontlading van het systeem. Om dit goed te kunnen bepalen zijn incidentele varende metingen gewenst.

Het gebruik van een 3D model kan waardevol zijn om de gaten tussen gemeten waardes beter te duiden en ook om nog aanvullende (bijvoorbeeld meer extreme) situaties te testen die niet tijdens de analyse-periode zijn opgetreden. Echter, een model moet ook gevoed worden en

daarvoor is het huidige meetnet onvoldoende. Een varende meting aan het begin van de analyse-periode kan een redelijke initiële verziltingsgraad opleveren die als startpunt kan dienen van modelsimulaties. Daarnaast is het van belang om te kunnen duiden wat de oorzaak gaat zijn van discrepanties tussen gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes. Veelal zal aan de hand van het huidige meetdata en het huidige meetnet kunnen worden achterhaald waardoor het model verschillende resultaten produceert. Aanvullende varende metingen kunnen echter ook daarbij een zeer nuttige bijdrage leveren.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De verschillende ontziltings- en verziltingsincidenten en periodes tijdens de analyse-periode zijn opgetreden, laten zien dat ontzilting veelal wind gedreven is, en dat ondanks de lange duur geen significante ontzilting als gevolg van dispersieve processen is waargenomen. Wel lijkt er als gevolg van dispersie sprake te zijn van een zoutgradiënt aan het wateroppervlakte tussen het oostelijk en westelijk deel van het Haringvliet

Bij ontbreken van spuien geldt voor ontzilting van diepe putten dat er een relatie moet worden bepaald tussen[1]:

- De mate van forcering (windsnelheid)
- De diepte waarop het zout zich heeft verzamelt
- De mate van stratificatie

Uit de data-analyse is de relatie tussen stratificatie en forcering enigszins waargenomen. Al is slechts indicatief vast te stellen dat een mate van stratificatie van 400 mg/l Cl opmengt bij windsnelheden tot 10m/s, terwijl een stratificatie van 1500 mg/l Cl opgemengd raakt bij een pieksnelheid van 15 m/s. Ook laten de meetresultaten zien dat sensoren die dichter bij het wateroppervlakte zijn ontzilten bij lagere windsnelheden. Echter deze relatie is niet eenduidig, omdat dit ook afhangt van de mate van stratificatie. Alhoewel de huidige analyse-periode dit niet verder heeft kunnen duiden, zal naar verwachting een sterkere mate menging als gevolg van wind nodig zijn om een sterker gestratificeerde put op te mengen. Daarnaast kan de bodemligging ook nog een invloed hebben, waardoor verschillende putten een verschillende wind-gedreven verticale opmening kunnen hebben.

Uit de hierboven beschreven periodes blijkt dat verticale opmenging veelal niet wordt waargenomen omdat wind ook leidt tot horizontale stromingspatronen waardoor opgemengd verzilt water veelal niet direct boven de diepe sensor wordt waargenomen.

Op basis van de hierboven beschreven periodes kan echter wel worden geconcludeerd dat advectief transport als gevolg van retourstroming met name bij oostenwind leidt tot verspreiding van verzilting langs de bodem in oostelijke richting. Daarbij kan aan de hand van deze resultaten worden opgemaakt dat ook bij gematigde windsnelheden (5-10m/s) al sprake kan zijn van horizontale verplaatsing van verzilting naar het oosten toe.

6.1.1 Mate van beantwoording onderzoeksvragen en aanpassing hypothesen

Hieronder wordt kort een overzicht gegeven van de mate waarin de proef en de aansluitende data-analyse inzicht heeft kunnen bieden ter beantwoording van de kennisvragen. Daarnaast worden de hypothesen behorende bij de onderzoeksvragen aangescherpt op basis van de kennis en resultaten die voortvloeien uit de hierboven beschreven proef. In *italics* zijn aanvullingen aangegeven, terwijl originele tekst die komt te vervallen is ~~doorgestreept~~.

[1] Voor een volledig overzicht van ontziltingsrisico's zou daarnaast nog de mate waarin gespuid kan worden, moeten worden gekarakteriseerd.

Onderzoeksvraag 1	Hoe ontzilten de diepe putten (met name put B) tijdens een periode van gesloten sluizen, en hoe hangt dit samen met de omgevingscondities?
Mate van beantwoording	Bij naar verwachting een relatief beperkte mate van verzilting van het Haringvliet is aan de hand van deze resultaten indicatief vast te stellen welke processen en onder welke condities putten worden opgemengd. Wind is hierbij dominant. Bij een grotere mate van verzilting moet nog wel worden bekeken wat de risico's en processen zijn voor opmenging.
Aangepaste hypothese	*Bij gesloten Haringvlietsluizen* ~~Naar verwachting~~ is wind de bepalende factor voor opmenging van zout water uit de diepe delen van het Haringvliet (put B). - Verticale menging en entrainment, *welke naar verwachting samen valt met horizontale wind-gedreven verplaatsing in de hogere lagen van de waterkolom. (Dit is slechts beperkt waargenomen.)* - Dichtheidstroming van zouter water over de bodem*, hetgeen specifiek samenvalt met "advectief transport door retourstroming".* - Scheefstand van de spronglaag *(De meetgegevens konden hierover geen uitsluitsel geven.)* - Advectief transport door retourstroming *welke met name optreedt bij oostenwind. Het verzilte water verplaatst zich dan nabij de bodem in oostelijke richting, terwijl een zoete bovenlaag zich naar het westen verplaatst. Dit treedt op bij een periode (orde dagen) met gematigde tot krachtige wind (>5m/s) uit Z tot O.*

Onderzoeksvraag 2	Hoe verspreidt het zout afkomstig uit de diepe verzilte delen van het Haringvliet (met name put B) zich over het Haringvliet?
Mate van beantwoording	Door de beperkte mate van verzilting is de mate van verzilting als gevolg van verticale opmenging niet goed te kwantificeren met deze gegevens. De tijdens de analyse-periode opgetreden oostenwind was echter wel zeer informatief voor advectief transport langs de bodem.
Aangepaste hypothese	- *Bij harde wind (20 m/s, mogelijk ook lager)* ~~Naar verwachting~~ wordt zout ~~allereerst~~ *tegelijkertijd* omhoog verplaatst door opmenging en ~~verspreidt het zich vervolgens direct~~ *horizontaal door de wind voortgestuwd.* - *Bij gematigde Z tot O wind* door advectie (retourstroming bij wind gedreven circulatie) *en* dichtheidsstroming *wordt verzilt water nabij de bodem in oostelijke richting verplaatst. (Zie ook hypotheses bij onderzoeksvraag 1)* - Dispersie over het Haringvliet. *(Meetgegevens konden hierover geen uitsluitsel geven.)*

6.2 Aanbevelingen

6.2.1 Vervolgstappen Lerend Implementeren

In principe heeft deze analyse-periode veel waardevolle informatie opgeleverd waarmee met enig vertrouwen een volgende periode met gesloten Haringvlietsluizen kan worden tegemoet gezien. Echter, de mate van verzilting was naar verwachting laag ten opzichte van de toekomstige Kier-situatie en de mate waarin opmenging van diepe putten leidt tot verzilting bovenstrooms is nog niet goed te bepalen. Tot slot kan met het huidige meetnet niet voor alle processen bepaald worden of die relevant zijn gebleken. Zo kan scheefstand van de spronglaag niet worden afgeleid met in iedere put slechts een enkele meetlocatie met sensoren op 3 dieptes.

6.2.2 Mogelijke aanvullende analyses met behulp van huidige data

Het kan zeer nuttig en waardevol zijn om een 3D model op te zetten om bij benadering deze analyse-periode te simuleren. Alhoewel de meetdata beperkingen hebben voor het opzetten van een model (in verband met beperkte horizontale en verticale resolutie), kan aan de hand van enkele aannames een kwalitatief vergelijkbare situatie worden gemodelleerd. Dit bied inzicht in de vaardigheden van het model, maar daarnaast kunnen de modelresultaten ook worden gebruikt om hiaten in de huidige kennis (op basis van meetdata alleen) te duiden. Zo kan gekeken worden in welke mate er nu daadwerkelijk sprake is van verticale opmenging als gevolg van wind-events, en kan ook de ruimtelijke verspreiding van opgemengd verzilt water worden onderzocht. Beide processen zijn slechts zeer beperkt of niet waarneembaar gebleken in de huidige meetresultaten.

Het vol- en overlopen van de zoutvang is zeer relevant in periodes met gesloten Haringvlietsluizen. Omdat er geen gegevens bekent zijn van zoutlekkages via andere bronnen en putten (vissluizen, scheepvaartsluizen en zoutriolen) en de middensensor te hoog in de waterkolom hing om de vullingsgraad van de put te meten, is hier in deze analyse geen aandacht besteed. Doordat er geen andere verziltingsbronnen (behalve de bovenstroomse rivierafvoer) zijn, is het bepalen van deze termen cruciaal voor het afschatten van de mate van verzilting van het Haringvliet in de zoetgespoelde situatie waarin nalevering op kan treden.

6.2.3 Aanvullende kennisvragen

Naast dat het wenselijk is om een naleveringsproef te doen met een hogere mate van verzilting van het Haringvliet, kan het aansluitend nuttig zijn om deze aanvullend proef naast deze periode te leggen om te kijken in hoeverre kwantificeerbare relaties te zijn af te leiden.

Tijdens deze analyse-periode was de vullingsgraad en het zoutgehalte in de putten het gevolg van een samenloop van omstandigheden. Een meer gerichte aanpak waarin mate stratificatie en spronglaagdiepte worden gevarieerd, kan bijdragen in het bepalen van de mate van opmenging bij verschillende windcondities. Daarnaast kan deze kennis aansluitend worden gebruikt om te bepalen wat de consequenties en risico's zijn van het behouden van een bepaalde mate van verzilting en vullingsgraad ten tijde van lage rivierafvoeren.

6.2.4 Suggesties voor aanpassing of aanvulling van de meetbehoefte

- Voor het meten van scheefstand in een put zijn een tweetal meetlocaties nodig (in de op de wind-as georiënteerde uiteindes van dezelfde put) die gedetailleerder over de verticaal bepalen wat de spronglaagdiepte is.
- Voor een kwantificeerbare bepalen van de ontzilting over tijd tijdens een storm is het gewenst gedetailleerde verticaalprofielen te bepalen in een verzilte put.

- De meetlocaties zijn al aangepast aansluitend op deze periode. Toen zijn meetlocaties die ver van de Haringvlietsluizen waren dichterbij geplaatst. Alhoewel dit zeer zinvol kan zijn, bleek uit de meetdata van deze periode dat juist ook de achtergrondconcentratie stroomopwaarts relevant is. Voor het bepalen van een stroomopwaartse achtergrondconcentratie zijn geen drie sensoren over de diepte noodzakelijk. Een mogelijk meetpunt wat hiervoor gebruikt zou kunnen worden is Rak Noord nabij de Volkeraksluizen. Deze is echter slechts deels representatief, omdat zoutlekkage via de Volkeraksluizen hier ook (mogelijk in de toekomst) wordt meegenomen.
- De dieptes van de verschillende sensoren zou verbeterd kunnen worden.
    - Tijdens de analyse-periode waren er indicaties van het overlopen van de zoutvang. Echter doordat de middensensor hoger dan de drempelwaarde lag, werd het vol- en overlopen van de zoutvang niet geregistreerd en kon alleen (indirect en vrij onzeker) aan de hand van omliggende meetpunten bepaald worden dat de zoutvang mogelijk is overgelopen. De middensensor in de zoutvang zou net onder de drempelhoogte moeten worden geplaatst om daadwerkelijk effectief het vollopen te registeren.
    - Meer algemeen: sensoren aan het wateroppervlakte bieden weinig aanvullende informatie als de middensensor ook boven de drempelhoogte zit. Beiden verplaatsen zodat 1 onder de drempelhoogte zit, en 1 er net boven zou meer inzichtelijk zijn.

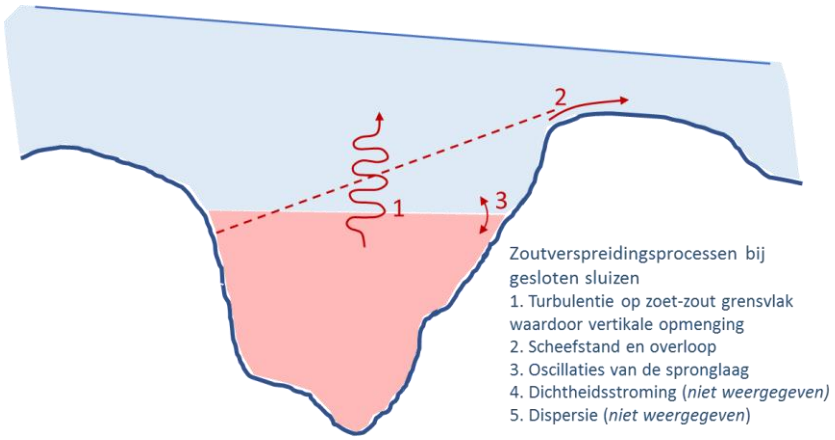
Appendix A: Hypothesen voor naleveringsonderzoek

Deze tekst is afkomstig uit het door Hydrologic opgestelde onderzoeksplan voor Kieronderzoek: "P925 Onderzoeksplannen Verzilting D01 - juli 2018".

Hypothesen
De hypothesen beschrijven wat wordt verwacht dat gaat gebeuren, welke processen daaraan ten grondslag liggen en waarop we deze inzichten baseren (referentie events / onderbouwingen in paragraaf (niet opgenomen in document)). Bij nieuwe inzichten kunnen de hypothesen worden bijgesteld.

1 **Processen die kunnen zorgen voor zoutverspreiding vanuit de diepere delen** van het Haringvliet in een situatie met (nagenoeg) gesloten sluizen zijn:
Voor met name verticale verspreiding:
- Turbulentie op het zoet-zout grensvlak (spronglaag) waardoor verticale opmenging plaatsvindt. Dit is naar verwachting het grootste risico en kan worden veroorzaakt door wind of getijdebeweging (vulling en lediging van het bekken). Vanwege de beperkte getijdebeweging zal wind hier naar verwachting de meest bepalende factor zijn.
- Oscillaties van de spronglaag, waardoor ook opmenging plaatsvindt. De kans hierop is naar verwachting klein.
- Dispersie. Dit is naar verwachting een langzaam proces.

Voor met name horizontale verspreiding:
- Scheefstand van de spronglaag (veroorzaakt doordat wind scheefstand aan het oppervlak veroorzaakt) waardoor overloop (door dichtheidsstroming) naar een volgende put of geul. Door dichtheidsverschillen zal de scheefstand van de spronglaag groter zijn dan de scheefstand aan het oppervlak.
- Dichtheidsstroming van het zoutere water over de bodem.
- Advectief transport met retourstromingen bij verticale windcirculatie.



2 **De drijvende kracht voor turbulentie op het grensvlak**, waardoor entrainment van zout naar de ondiepere lagen plaatsvindt, is wind.

- Welke combinatie van windkracht en -richting hiervoor zorgen is niet bekend. Een eerste inschatting (*expert judgement*) is dat effect merkbaar kan zijn vanaf windkracht 6-7 (*onderbouwing 2A en 2B*).
- Het getijdeffect op het Haringvliet is naar verwachting te beperkt om ook voor substantiële opmenging te zorgen.

4 **Bepalend voor de mate waarin opmengingsprocessen vat kunnen krijgen op de zoutere onderlaag**, is de verticale dichtheidsverdeling in de aanvangssituatie.