



Memo

Aan
Karin Stone (RWS)

Datum	Aantal pagina's	
31 juli 2019	45	
Contactpersoon	Doorkiesnummer	E-mail
Meinard Tiessen	+31(0)88 335 7429	Meinard.Tiessen@deltares.nl
Wouter Kranenburg		Wouter.Kranenburg@deltares.nl

Onderwerp
Data-analyse Kierproef Haringvliet: ZS2019_1 Zoetspoelen (16-1-2019 – 28-1-2019)

1	Inleiding	3
1.1	Context	3
1.2	Doel van proef	4
1.3	Kennisvragen, onderzoeksvragen & hypothesen	4
2	Opzet proef	6
2.1	Aanpak	6
2.2	Interessegebied	8
2.3	Metingen: Meetlocaties en instrumenten	8
2.4	Omstandigheden gedurende de proef	8
2.4.1	Initiële condities	8
2.4.2	Afvoer Lobith	9
2.4.3	Windcondities	9
2.4.4	Waterstanden	10
2.4.5	Beheer Haringvlietssluisen	10
2.4.6	Debiet door de Haringvlietssluisen	11
3	Resultaten	12
3.1	Chloridegehalten van vaste meetlocaties	12
3.2	Incidentele chlorideprofielmetingen	15
3.3	Snelheidsmetingen	20
3.4	Overige meetresultaten	20
4	Analyse	21
4.1	Analyse van specifieke periodes en processen	21
4.1.1	Periode 1 (16-01-2019 – 19-01-2019): Zout inlaten en vollopen putten	21
4.1.2	Periode 2 (17-01-2019 – 29-01-2019): Zoetspoelen en ontzilting	23
4.1.3	Periode 3 (11-01-2019 – 17-01-2019): Voorafgaand aan proefperiode: Verzilting in put B	25

Datum
31 juli 2019

Pagina
2 van 45

4.2	Balansen en fluxen.....	26
4.2.1	Schatting watervolume en chloridevracht door de kering	26
4.2.2	Schatting van de chloridehoeveelheid in de diepe putten van het Haringvliet ...	27
4.3	Analyse toegespitst op de onderzoeksvragen	29
5	Discussie	32
5.1	Evaluatie methodiek	32
5.2	Evaluatie meetgegevens.....	32
6	Conclusies en aanbevelingen	33
6.1	Conclusies	33
6.2	Aanbevelingen.....	33
6.2.1	Mate van beantwoording onderzoeksvragen en aanpassing hypothesen.....	33
6.2.2	Vervolgstappen Lerend Implementeren	35
6.2.3	Mogelijke aanvullende analyses met behulp van huidige data.....	35
6.2.4	Aanvullende kennisvragen	35
6.2.5	Suggesties voor aanpassing of aanvulling van de meetbehoefte.....	35
Appendix A: Hypothesen en doelstellingen ‘Kieren’ uit “Onderzoeksplan Verzilting”		37
	Hypothesen Kieren	37
	Doelstelling eerste onderzoeken	40
Appendix B: Hypothesen en doelstellingen ‘Zoetspoelen’ uit “Onderzoeksplan Verzilting”		41
	Hypothesen Zoetspoelen	41
	Doelstellingen eerste onderzoeken	43
Appendix C: Hefhoogtes en doorstroomoppervlakte Haringvlietsluizen.....		44
Appendix D: Zoutgehaltes op overige meetlocaties.....		45

1 Inleiding

Dit document beschrijft de opzet, resultaten en analyse van de Kierproef **ZS2019_1**. Dit is de eerste zoetspoelproef uitgevoerd in het kader van het “Lerend Implementeren” van het Kierbesluit, welke heeft plaatsgevonden tussen 16 en 23 januari 2019. De data-analyse omvat de periode 16 t/m 28 januari 2019.

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 water in te laten zodat trekvisser makkelijker het Rijn- en Maasstroomgebied in kunnen trekken. Een neveneffect is dat hierbij zout 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 een eerste onderzoek gedaan naar Nalevering waarbij gekeken is naar menging en verspreiding van reeds aanwezig zout water in diepe putten (NL2018_0). In december 2018 is gestart met ‘visvriendelijk sluisbeheer’ waarbij de sluizen rond stroomkentering langer zijn opengelaten. Hierbij is onderzocht wat voor zoutbelasting dit met zich meebrengt (proef VK2018_1). De eerste zoetspoelproef (ZS2019_1) heeft plaatsgevonden in de periode 16 – 23 januari 2019. Hierbij stond de vraag centraal hoe (snel) de diepe putten in het Haringvliet vollopen bij het Inlaten van zout water, en hoe (snel) ze ook weer zoetspoelen wanneer vervolgens gespuid wordt.

In voorbereiding op de eerste periode van Lerend Implementeren zijn de onderzoeksplannen voor de diverse proeven uitgewerkt in “Onderzoeksplannen Verzilting” en het “Implementatieplan” van Hydrologic (2018). De meest relevante informatie hieruit over hypothesen en doelstellingen voor de zoetspoelproeven zijn opgenomen in de bijlage. Doel en hypothesen zoals hieronder aangegeven zijn daarop gebaseerd, maar ingekort en waar nodig aangepast. Dit laatste met name vanwege het feit dat de oorspronkelijke doelen zich sterk richten op relaties van diverse parameters met *stroomsnelheden* terwijl deze in de eerste proeven nog niet zijn gemeten. Daarnaast hebben de eerste proeven zich uiteindelijk met name gericht op verzilting en ontzilting van de diepe put in de voormalige zuidelijke stroomgeul van het Haringvliet (put D).

Datum
31 juli 2019

Pagina
4 van 45

1.2 Doel van proef

Het doel van het eerste zoetspoelonderzoek is het inzicht te vergroten in:

- 1) de mate van vollopen van de diepe putten, in het bijzonder de diepe put in de voormalige zuidelijke stroomgeul (put D), in relatie tot de grootte van de opening en de duur van het inlaten, en in:
- 2) de snelheid van zoetspoelen van de diepe putten, in het bijzonder put D, in relatie tot de afvoer van de Rijn en spuiopeningen.

1.3 Kennisvragen, onderzoeksvragen & hypothesen

Kennisvragen op de achtergrond van deze proef zijn:

- Hoe gedraagt het fysische en chemische systeem zich bij inlaten en spuien anders dan bij het huidige standaard sluisbeheer (LPH'84)? Hoe verspreidt bij het inlaten van zout water het zoute water zich over het Haringvliet?
- Hoe zet je de beheermaatregel zoetspoelen effectief in?
 - Wat zijn bepalende factoren in opmengen/afschaven van zoute laag (m.n. in putten/geulen) in situatie met geopende sluizen bij eb?
 - Onder welke omstandigheden kan zoetspoelen voor extra achterwaartse verzilting zorgen?

De specifieke onderzoeksvragen die centraal staan bij deze proef zijn hieronder weergegeven, samen met de hypothesen en de te onderzoeken parameters / relaties om de belangrijkste hypothesen te toetsen.

Onderzoeksvraag 1	Hoe en hoe snel lopen de diepe putten, i.h.b. put D, vol tijdens het inlaten van zout water?
Hypothese	1) De hoeveelheid zout die binnenkomt is afhankelijk van het instroomvolume en de chlorideconcentratie van het instromende water. Instroomvolume is afhankelijk van de inlaatopening, het verval over de sluizen en de duur van het inlaten. De concentratie van de instroom is afhankelijk van de concentratie en stratificatie van het water in de voordelta, die afhankelijk is van de voorgeschiedenis, en daarnaast mogelijk van instroomsnelheid (entrainment van zouter water). 2) De verspreiding van het instromende zoute water op het Haringvliet is naar verwachting afhankelijk van de snelheid van instroom (jet/pluim), het bodemprofiel en het reeds aanwezige zout. Aangezien zouter water zwaarder is dan het zoete rivierwater, is de verwachting dat indringing van het zoute water met name plaats zal vinden in de diepere lagen en dat het zout zich zal ophopen in de diepe putten. Naar verwachting gaat de verspreiding het snelste via de voormalige getijdegeul aan de zuidzijde en langzamer aan de noordzijde.
Toelichting	Onderzoeken van relatie tussen: • Aan de hand van hefhoogtes en verhangen: Afschatten van ingelaten volume. • Aan de hand van zoutmetingen: Inschatten ingelaten zoutgehalte en zoutvracht • Waargenomen zoutgehaltes in put D (vast en varend)

Datum
31 juli 2019

Pagina
5 van 45

Onderzoeksvraag 2	Hoe en hoe snel ontzilt de diepe putten, i.h.b. put D, tijdens het spuien?
Hypothese	1) De terugdringing van de hoeveelheid zout in de diepe putten is naar verwachting m.n. afhankelijk van het spuibolume, de mate van stratificatie in de uitgangssituatie en het bodemprofiel. Spuibolume wordt bepaald door de Bovenrijnafvoer, spuiopening en -duur, en verhang. 2) Uitstroming heeft direct effect op concentraties in de bovenste lagen van de waterkolom, die advectioneel wordt weggespoeld. Hiermee wordt de spronglaag verlaagd tot het niveau van de 'drempels' / 'putranden' in het Haringvliet. Bij lage snelheden zal verdere verlaging plaatsvinden door geleidelijke afschaving. Bij hogere snelheden zal mogelijk opmenging plaatsvinden, gevolgd door wegspoeling van het zout. Wind draagt ook bij aan opmenging en daarmee aan effectiviteit van het zoetspoelen. Naar verwachting gaat zoetspoelen het langzaamst voor de diepe putten aan de noordzijde van het Haringvliet.
Toelichting	Onderzoeken van relatie tussen: • Aan de hand van hefhoogtes en verhangen: Afschatten van spuibolume. • Aan de hand van zoutmetingen: Zoutgehalte, mate van stratificatie, positie grensvlak. • Ontzilting bovenlaag (zogezegd afschaven) en ontzilting gestratificeerde onderlaag (opmengen). • Rol wind (wind-gedreven opmenging) en waterstanden (beweging sensoren): Meenemen om effecten trachten los te koppelen.

2 Opzet proef

2.1 Aanpak

De proef is als volgt aangepakt: Op 16/1/2019 zijn tijdens twee achtereenvolgende vloed-fases de Haringvlietsluizen gedeeltelijk opengezet tijdens de periode dat de waterstand op zee hoger was dan op het Haringvliet ('vloed'). Hierdoor hebben we bewust zout water het Haringvliet ingelaten. Tussen de twee 'vloed-perioden' met gedeeltelijk geopende sluisen en tijdens de eb-perioden in de dagen daaropvolgend is gespuid door meerdere sluisopeningen.

De proef kan worden opgedeeld in drie fasen: In de eerste fase wordt zout water actief ingelaten, terwijl in een tweede fase bewust wordt getracht dit ingekomen zout weer uit te spoelen. Een laatste fase is wanneer tijdens "regulier" sluisbeheer het resterende zout wordt uitgespoeld. De proef wordt als afgesloten beschouwd als in put D geen verhoging in chlorideconcentratie meer waarneemt ten opzichte van de achtergrondconcentratie.

De reactie van het systeem, en in het bijzonder het verzilten en ontzilten van put D, zijn tijdens deze proef gemonitord door tijdens de hele periode chlorideconcentraties in het Haringvliet te meten vanaf vaste meetpunten (Landelijk Meetnet en pontons), en tussen 17 en 23/1/2019 ook profielmetingen uit te voeren vanaf een schip.

De proef is opgezet in drie fasen die hieronder zijn beschreven.

1. Inlaten (16 januari 2019, getij 30 en 31):

De eerste fase was bedoeld om de put D te vullen met zout water. Hiertoe is over 2 getijperiodes zout water ingelaten. Het spuien gebeurde volgens LPH84. Oorspronkelijk was het plan om 1 getij in te laten, maar dit bleek niet voldoende te zijn om de put te vullen. Oorzaak was de relatief lage chloridegehalte van het water aan zeezijde als gevolg van voorafgaande hoge spuidebieten. Daarom is besloten om ook een tweede getijperiode in te laten met een grotere opening.

- 2 opeenvolgende getijden ingelaten met respectievelijk opening 14 met 1,20 m (= 70 m²) en openingen 14 en 15 ieder met 1,50 m (= 176 m²).
- In de tussenliggende spuiperiode is gespuid volgens LPH84.
- Zoutriolen waren gesloten tijdens de spuiperiode.

2. Stabiliseren (17 jan 2019, getij 32 en 33)

De volgende fase was bedoeld om de bovenste laag zoet te spoelen, zodat een duidelijk zoet-zout grensvlak in de put D ontstaat. Dit werd gedaan door volgens LPH84 te spuien. Er werd niet ingelaten.

- 2 getijden spuien volgens LPH84.
- Zoutriolen waren ingesteld op 60 cm
- Eerste varende meting is uitgevoerd op 17 januari om de 0-situatie zoutverdeling op het Haringvliet bij de start van het zoetspoelen te bepalen.

3. Zoetspoelen (18 -23 jan 2019, getij 34 t/m 45)

De fase zoetspoelen was bedoeld om te bekijken hoe het zout in en om put D bij zoetspoelen zich gedraagt.

- Voor 12 getijperiodes is zoet gespoeld. Hiertoe is waar mogelijk met grotere openingen dan LPH84 gespuid. Er moest hierbij rekening gehouden worden met waterstanden bij

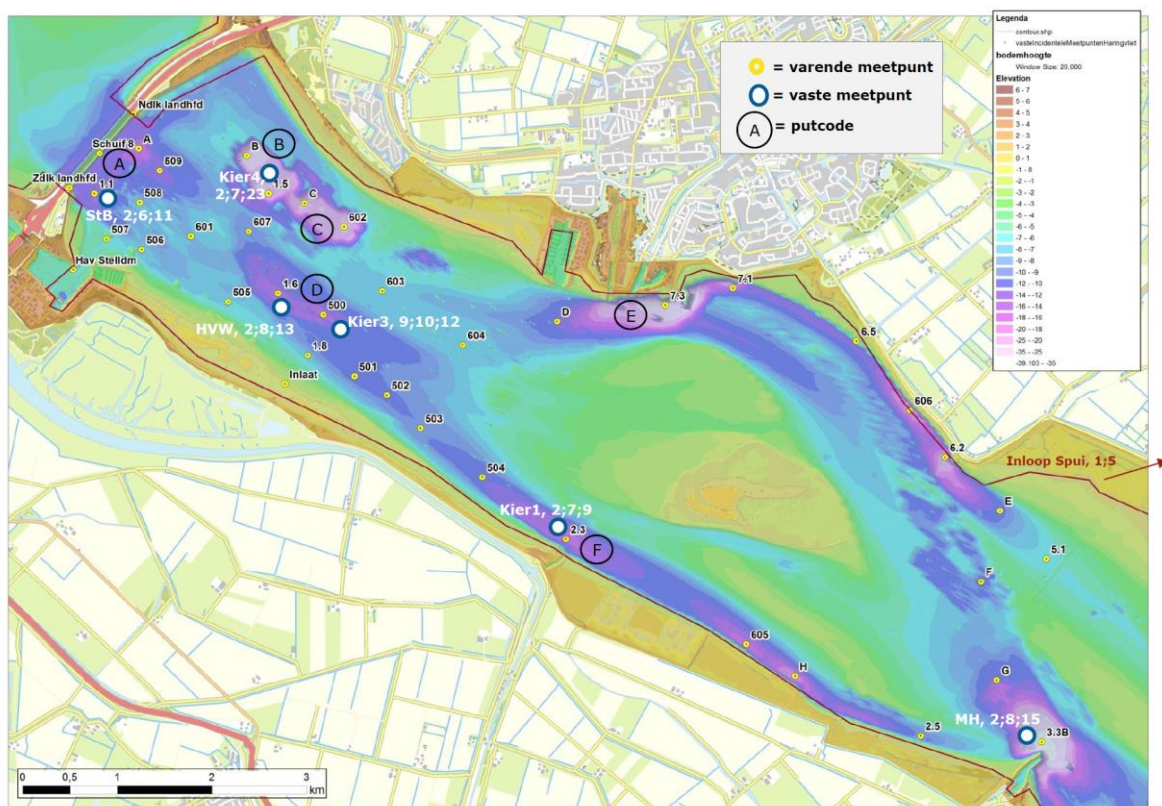
Datum
31 juli 2019

Pagina
7 van 45

Moerdijk, de stroomsnelheden in het Spui, Dordtsche Kil en Oude Maas en ongewenste verzilting bij Bernisse.

- Getij 34, 35 (18,19 jan) is volgens LPH'84 gespuid, er is geen grotere spuiopening toegepast omdat de afvoeren bij Lobith nog erg hoog waren.
- Getij 36 t/m 39 (19 t/m 21 jan) is minder dan LPH84 gespuid om te lage waterstanden bij Moerdijk te voorkomen.
- Getij 40, 41 is LPH gevolgd
- Getij 42 is minder dan LPH84 gespuid wegens Moerdijk.
- Getij 43 (22 januari) extra gespuid met 625 m²
- Getij 44 en 45 (23 januari): getij 44 extra gespuid met 568 m², getij 45 extra gespuid met 524 m².
- De zoutriolen waren ingesteld op 120 cm om zoveel mogelijk zout af te kunnen voeren. Dit zal overeen komen met een daadwerkelijke zoetspoelgebeurtenis waar ook het doel zal zijn om het Haringvliet zoveel als mogelijk zoet te spoelen.
- Op 19, 21 en 23 januari is een varende meting gedaan om de verandering van de zoutverspreiding op het Haringvliet, te bepalen.

Na 23 januari is gestopt met extra spuien en is weer overgegaan op LPH84. Op 28 januari was de chlorideconcentratie onderin put D bij meetpunt Haringvliet West op -13 m gedaald tot onder de 150 mg/l. De analyse van de meetgegevens wordt daarom uitgevoerd over de periode 16 t/m 28 januari.



Figuur 2.1 Overzichtskartaal met locaties van de vaste meetpunten (Landelijk Meetnet en pontons), incidentele (varende) metingen, en diepe putten.

Datum
31 juli 2019

Pagina
8 van 45

2.2 Interessegebied

Het interessegebied tijdens deze proef is het westelijk deel van het Haringvliet met in het bijzonder put D. Dat is een diep gedeelte in de voormalige zuidelijke stroomgeul, op 2 tot 3 km van de Haringvlietsluizen, zie Figuur 2.1.

2.3 Metingen: Meetlocaties en instrumenten

Voor de periode van de proef is informatie vergaard over:

- 1) Hefhoogtes (Haringvlietsluizen nr. 1-17)
- 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 en varende 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. Bij de varende metingen is op 17,19, 21 en 23 januari steeds een zuidelijke en een noordelijke track gevaren, waarbij steeds op gelijke locaties een profiel is gemeten. De locaties van de profielmetingen zijn ook weergegeven in Figuur 2.1. De vaste meetdata zijn door Rijkswaterstaat gevalideerd en beschikbaar via DONAR.

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	65176	426223	-9	-10	-12
Kier 4 ponton	Kier4	64600	427501	-2	-7	-23
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		

Tijdens deze proef zijn geen (vaste of varende) snelheidsmetingen uitgevoerd.

2.4 Omstandigheden gedurende de proef

2.4.1 Initiële condities

Eind 2018 heeft zich een kleine piek voorgedaan in de afvoer bij Lobith (3400 m³/s). Daaraan aansluitend is het debiet bij Lobith zo'n twee weken tussen de 1700 en 2100 m³/s geweest. Bij de aanvang van de proef was het debiet stijgende. Met uitzondering van de diepste sensor in put B (Kier 4, -23 m) en bij Stellendam (StB, -11 m) gaven alle sensoren in het Haringvliet op dat moment een chlorideconcentratie onder de 100 mg/l. De chlorideconcentratie aan de zeezijde

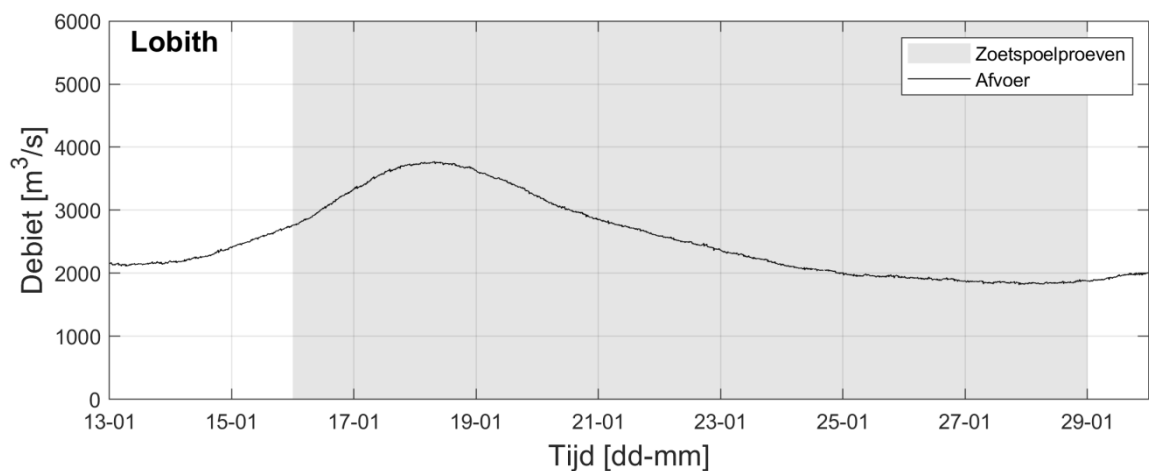
Datum
31 juli 2019

Pagina
9 van 45

van de kering was tijdens de afvoerpiek eind 2018 gedaald, maar in de eerste helft van januari 2019 weer gestegen met pieken tot zo'n 10.000 mg/l (Stellendam buiten, -5 m).

2.4.2 Afvoer Lobith

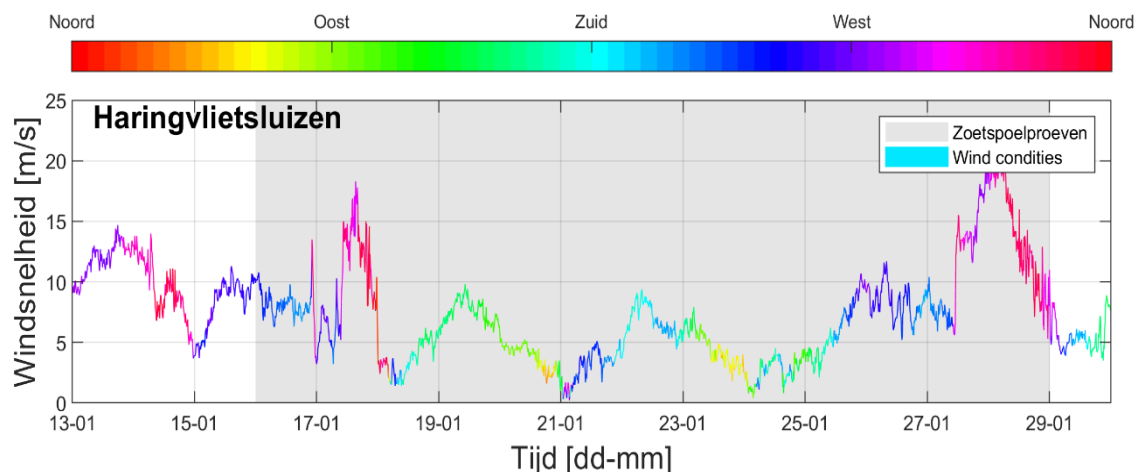
Tijdens de periode van de proef heeft zich een kleine piek voorgedaan in de rivierafvoer, met een piekwaarde van 3800 m³/s bij Lobith op 18/1. Op 26/1 was de afvoer bij Lobith weer gedaald tot onder de 2000 m³/s.



Figuur 2.2 Afvoer bij Lobith voor de periode van zoetspoelproef 1.

2.4.3 Windcondities

Tijdens de periode van de proef vertoonde de windsterkte op 17/1 een piek van 18 m/s en tegen het einde van de proef op 27/1 een piek van 20 m/s, beide uit noordwestelijke richting. Voor het overige deel van de tijd was de windsterkte 10 m/s of minder.



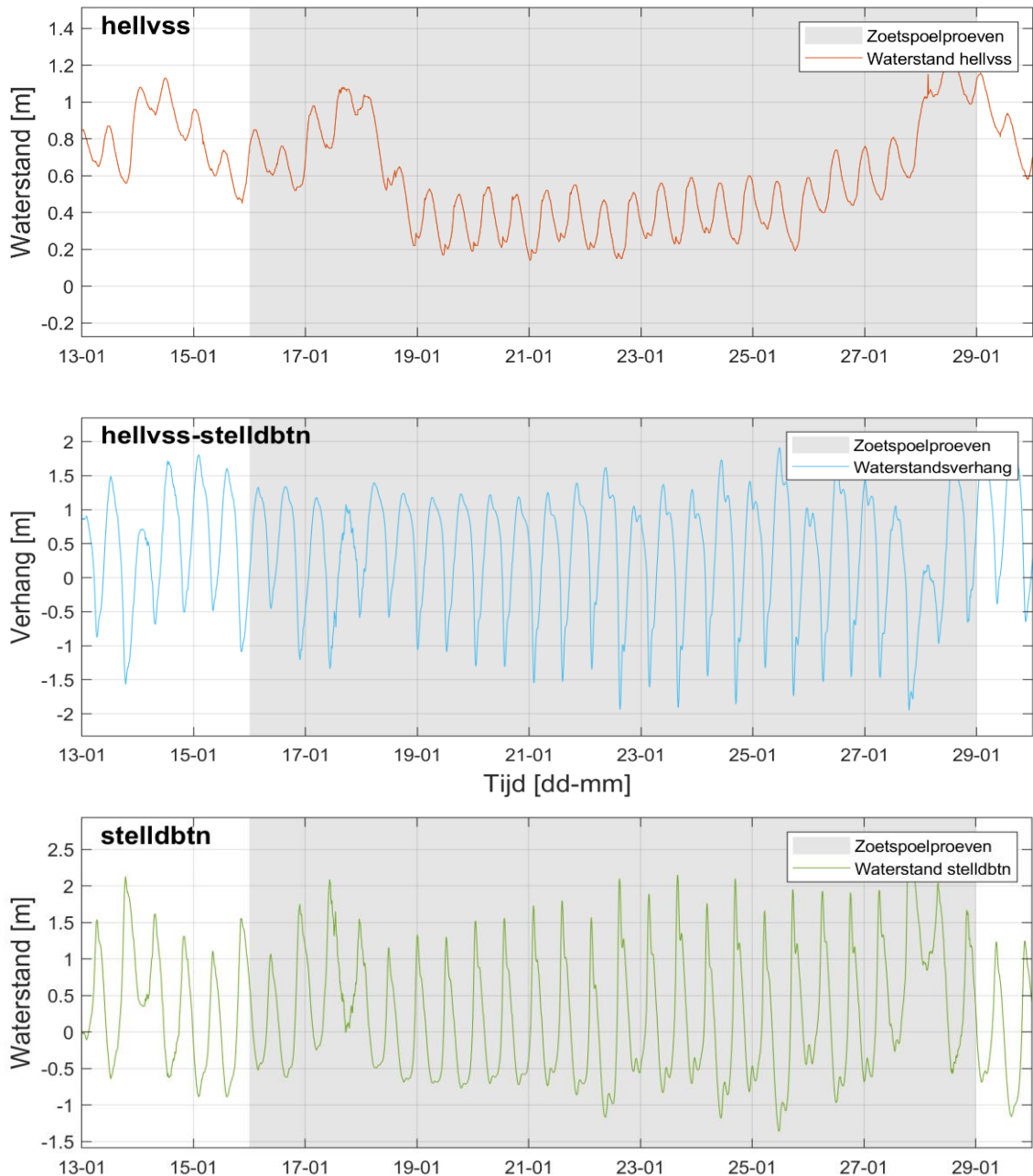
Figuur 2.3 Windcondities

Datum
31 juli 2019

Pagina
10 van 45

2.4.4 Waterstanden

In de waterstanden is tijdens de periode van de proef zowel in het Haringvliet als op zee een twee keer verhoging opgetreden in de getijgemiddelde waterstand. Deze verhogingen vielen samen met krachtige tot harde noordwestelijke wind.



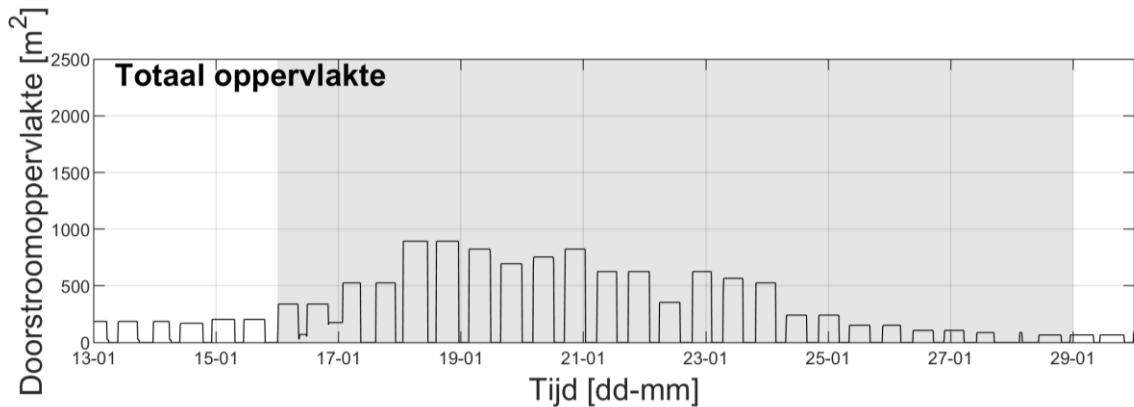
Figuur 2.4 Waterstanden aan weerszijden van de kering en het verhang over de kering.

2.4.5 Beheer Haringvlietsluizen

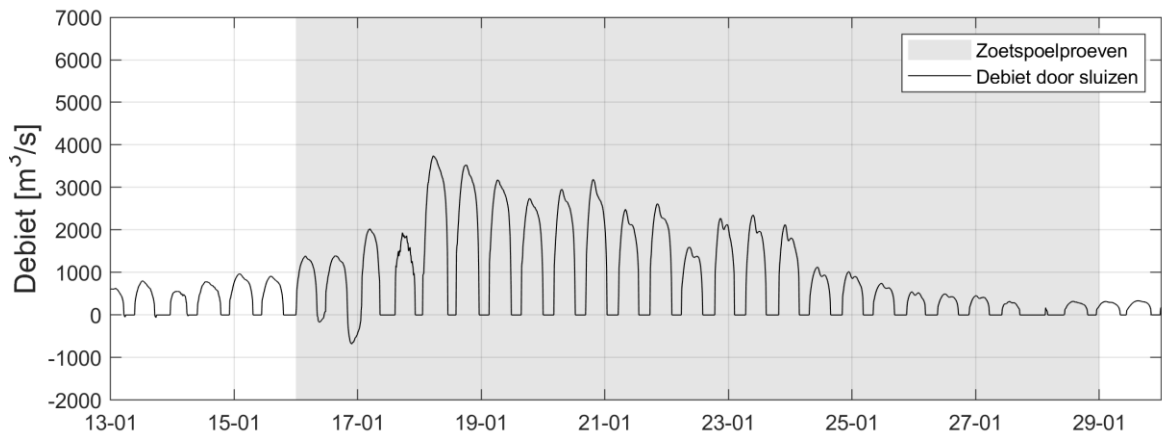
Figuur 2.5 toont de totale doorstroomoppervlakte van de Haringvlietsluizen in de periode rondom de proef. Hefhoogtes per sluis zijn weergegeven in de bijlagen (bijlage C).

Datum
31 juli 2019

Pagina
11 van 45



Figuur 2.5 Doorstroomoppervlakte Haringvlietsluizen [m²].



Figuur 2.6 Geschatte debiet door de Haringvlietsluizen in m³/s. Inlaten van water vanuit zee naar het Haringvliet wordt hier weergegeven met negatieve waarden.

2.4.6 Debiet door de Haringvlietsluizen

Gebruik makend van de totale doorstroomopening en het waterstandsverschil over de sluizen, is het debiet door de Haringvlietsluizen geschat met:

$Q = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$, waarin:

- Q Debiet door de Haringvlietsluizen [m³/s],
- A Doorstroomoppervlak [m²],
- g zwaartekrachtversnelling (9.81 [m²/s]),
- Δh Waterstandverschil over de sluizen [m], bepaald op basis van gemeten waterstanden te Hellevoetsluis en HA10.
- μ afvoercoëfficiënt [-].

De afvoercoëfficiënt is bepaald door te zoeken naar de coëfficiënt die – voor een periode waarin veel gespuid is – de beste vergelijking gaf van geschatte debieten met door het SOBEK-RE model van de RijnMaasMonding berekende debieten. De beste resultaten werden gevonden voor een coëfficiënt μ gelijk aan 0.8. De grootte van deze coëfficiënt is dus bepaald voor het spuien van de Haringvlietsluizen en vervolgens toegepast voor het schatten van het debiet tijdens Inlaten van zout water. De geschatte afvoeren door de Haringvlietsluizen voor zoetspoelproef 1 zijn weergegeven in Figuur 2.6.

3 Resultaten

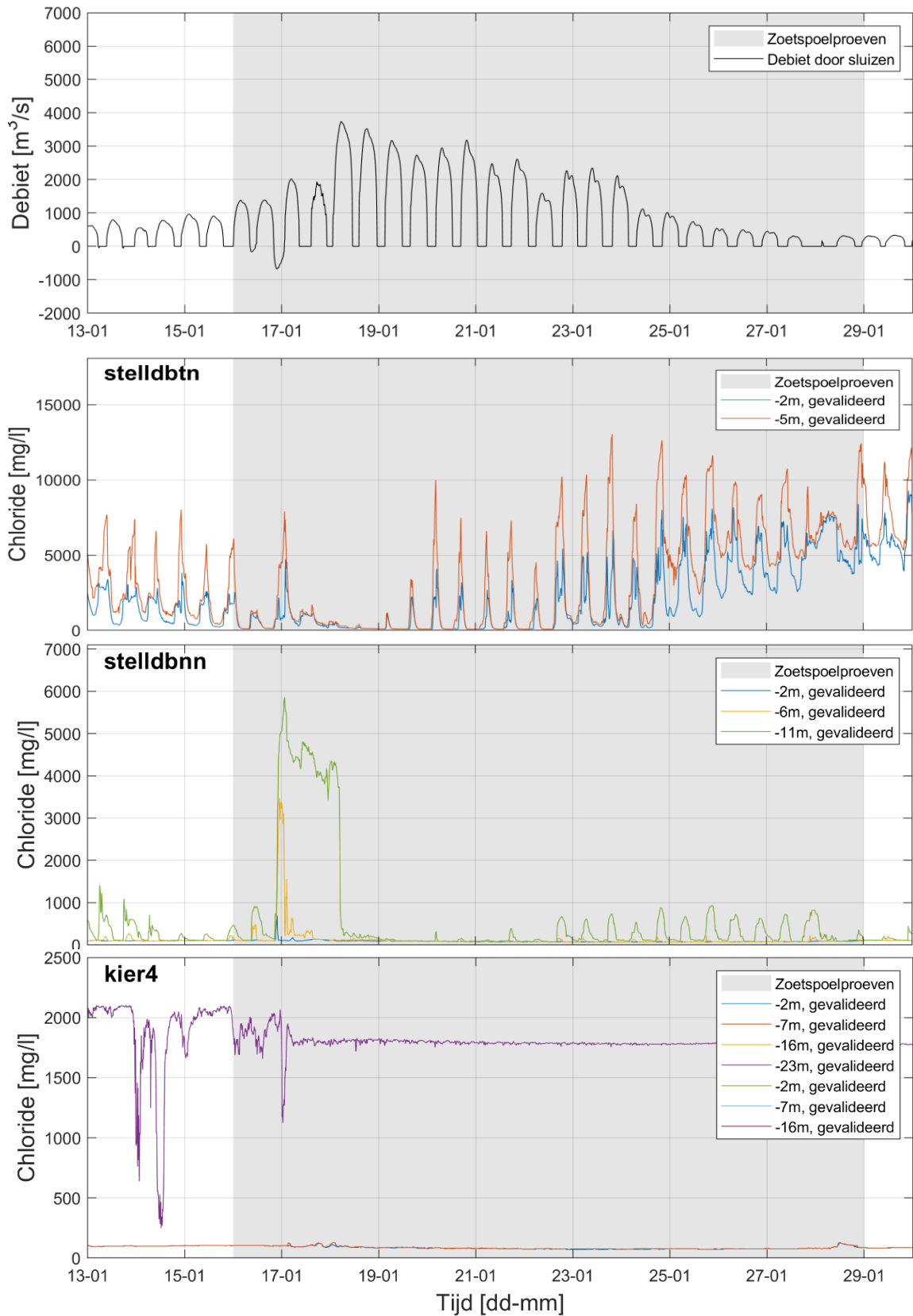
3.1 Chloridegehaltes van vaste meetlocaties

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 buiten als meetlocatie op zee, tot de eerste meetlocatie op het Haringvliet waar nauwelijks tot geen effect van het inlaten van zout water meer waarneembaar is. De locaties zijn: Stellendam buiten (op zee), Stellendam binnen (in/nabij put A), Kier 4 (in put B, is noordelijke put), Haringvliet west (put D, westzijde), Kier 3 (put D, meer naar het oosten), Kier 1 (put F). Omwille van de interpretatie is de geschatte afvoer door de Haringvlietssluisen in deze serie plots nogmaals weergegeven.

Stellendam buiten laat de variatie van de chlorideconcentratie aan de zeezijde van de sluisen zien. Daarbij valt op dat de concentratie tijdens de eerste vloedperiode waarin zout water ingelaten wordt bijzonder laag is ten opzichte van de voorafgaande vloedperiodes. Dit heeft te maken met de toename van het spuidebiet bij de aanvang van het inlaten van zout water. Het tijdens de tweede vloed ingelaten water resulteert echter veel hogere concentraties, terwijl het voorafgaande spuidebiet even groot is als voorafgaand aan de eerste vloedperiode. Volgens RWS is dit te verklaren omdat er toen met een grotere opening is ingelaten, waardoor zout water vanuit een diepere locatie verder van de sluisen is onttrokken. De dagen na het inlaten van zout water is de concentratie laag. Bij Stellendam binnen is het effect van het inlaten – althans, de tweede inlaatperiode - goed te zien: de concentratie op 11 m diepte wordt voor meerdere getijperiodes verhoogd (blijft hoog gedurende de 'stabilisatieperiode'). De concentratie neemt weer scherp af in de zoetspoelfase die op 18/1 van start gaat met hoge spoeldebieten. Bij de lagere zoetspoeldebieten later in januari zijn toch weer concentratiepieken te zien op 11 m. De verklaring is waarschijnlijk dat er op die momenten zout uit andere bronnen (schutsluisen, visssluisen, lekkage, ...) in de zoutvang terecht komt. Bij intensiever spuien zie je dit minder / niet, omdat dan het zoutgehalte op zee (en dus van de 'lekkages') lager is. Op 6 m diepte is het effect van het inlaten van zout water ook duidelijk waarneembaar, maar aanmerkelijk sneller weer gereduceerd dan op 11 m diepte. Op 2 m diepte is het effect gering. Voor Kier 4 valt op dat de concentratie voor het moment van inlaten van zout water al hoog was en op het moment van inlaten van zout water juist enigszins daalt. Tijdens het navolgende zoetspoelen blijft de concentratie vrijwel constant.

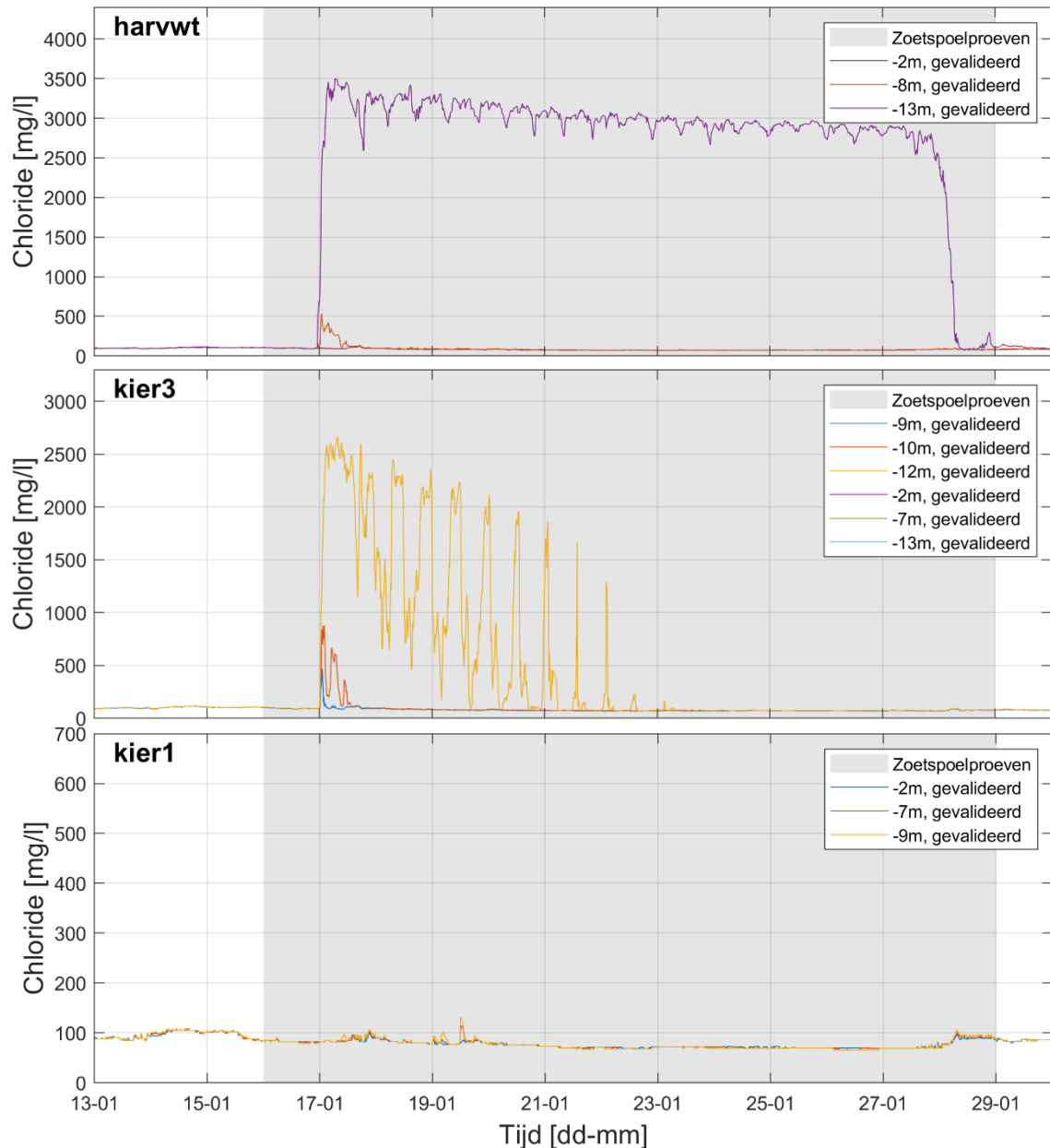
Datum
31 juli 2019

Pagina
13 van 45



Datum
31 juli 2019

Pagina
14 van 45



Figuur 3.1 *Tijdseries van chlorideconcentratie [mg/l] ter plaatse van de vaste meetpunten en pontons op verschillende hoogtes. 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: -12m (geel), -10m (rood), -9m (blauw), Kier4: -23m (paars), -7 (rood) en -2m (blauw).*

Bij Haringvliet west neemt de concentratie op 13 m diepte tijdens de tweede inlaat-vloedperiode aanmerkelijk toe. In de dagen daarna neemt deze geleidelijk af, tot een plotselinge grote afname op 27/1, die lijkt samen te vallen met de piek in wind vanuit het noordwesten. Tijdens de geleidelijke afname fluctueert de concentratie. Deze fluctuatie van de concentratie tijdens de geleidelijke afname is ook te zien bij Kier 3 op 12 m diepte. Daar fluctueert de concentratie soms wel 2000 mg/l over een halve getijperiode. Op deze diepte geldt dat na 12 spuiperioden, rond 22 januari 2019, het zout volledig is verdwenen en de concentratie gelijk is aan de achtergrondconcentratie. Bij Kier 1 is bij geen van de sensoren een duidelijk effect te zien van

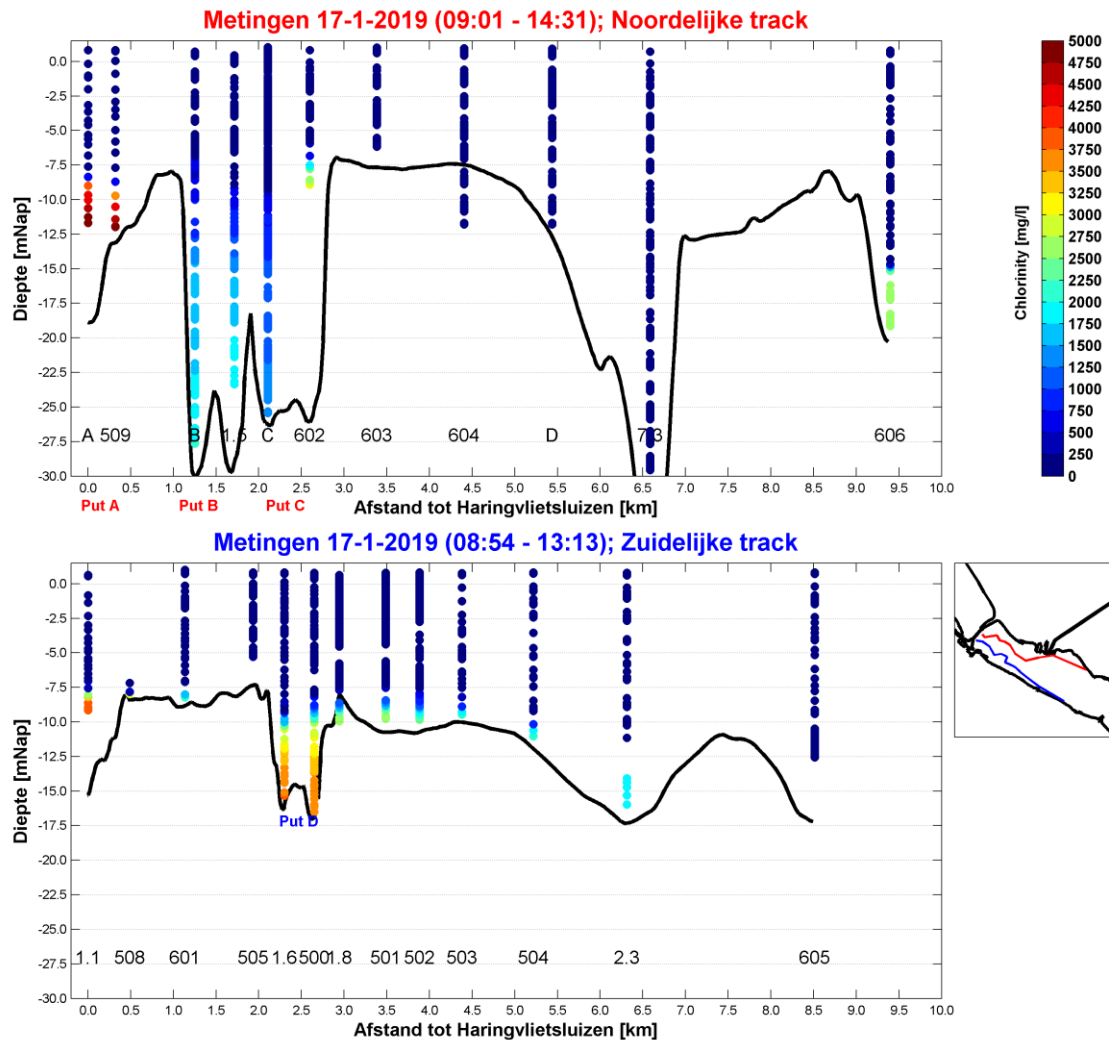
het inlaten van zout water en daaropvolgend zoetspoelen. Dat geldt ook voor de overige locaties (voor de volledigheid opgenomen in bijlage D).

3.2 Incidentele chlorideprofielmetingen

Figuur 3.2 tot Figuur 3.5 tonen de gemeten chlorideprofielen in zowel de noordelijke als de zuidelijke oude getijgeul, als functie van de diepte en de afstand vanaf de Haringvlietsluizen. De hoogste chlorideconcentraties, meer dan 5000 mg/l, worden gemeten direct na het inlaten in Put A (de directe nabijheid van de Haringvlietsluizen). Voor deze put geldt dat 2 dagen na de laatste inlaatperiode al het ingelaten chloride is uitgespoeld (dit komt overeen met de ontzilting bij STELLDBNN). Voor Put B, C en D geldt dat deze bij de eerste meting na het inlaten van zout water (17/1, tijdens 'stabilisatiefase') vanaf ongeveer 10 a 12 m onder NAP (net onder de drempel) tot aan de bodem verzilt zijn. Chlorideconcentraties in Put B & C bedragen ongeveer 1000 a 2000 mg/l en in Put D ongeveer 3000 mg/l. De zuidelijke put D is dus veel sterker verzilt. Dit kan niet meteen geïnterpreteerd worden als bevestiging van de hypothese dat verzilting sneller zal gaan aan de zuidkant, want in dit geval wordt het verklaard doordat zout water is ingelaten met sluis 14 en 15, aan de zuidzijde van de Haringvlietsluizen. Voor de noordelijke track is te zien dat put B over het algemeen wat zouter is dan put C. Voor de zuidelijke track laten de varende metingen zien dat het zoute water bij het inlaten van zout water in de zuidelijke geul tot voorbij put D komt (zie Figuur 3.2, met concentraties van bijna 2000 mg/l bij varende meting locatie 2.3, is put F). Op deze locatie is het zout echter ook snel weer weggespoeld, zie Figuur 3.3 tot Figuur 3.5. Dat geldt niet voor de waargenomen concentraties van rond de 2500 mg/l op meetlocatie 606 (noordelijke track) Deze verhoging lijkt echter geen effect van het inlaten van zout water, maar eerder een restant van een eerdere gebeurtenis van achterwaartse verzilting.

Datum
31 juli 2019

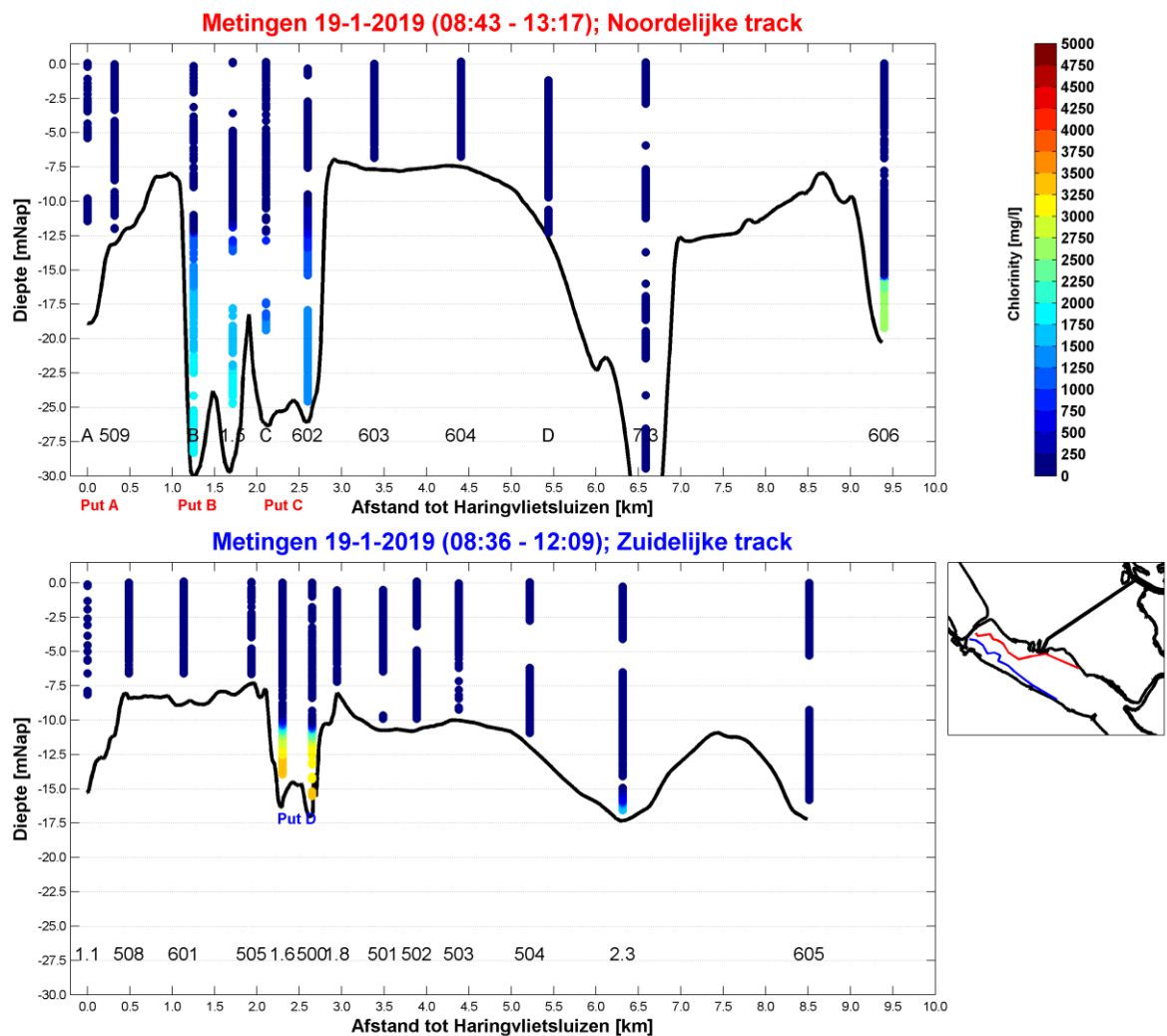
Pagina
16 van 45



Figuur 3.2 Incidentele varende meting met zoutprofielen op 17 januari 2019

Datum
31 juli 2019

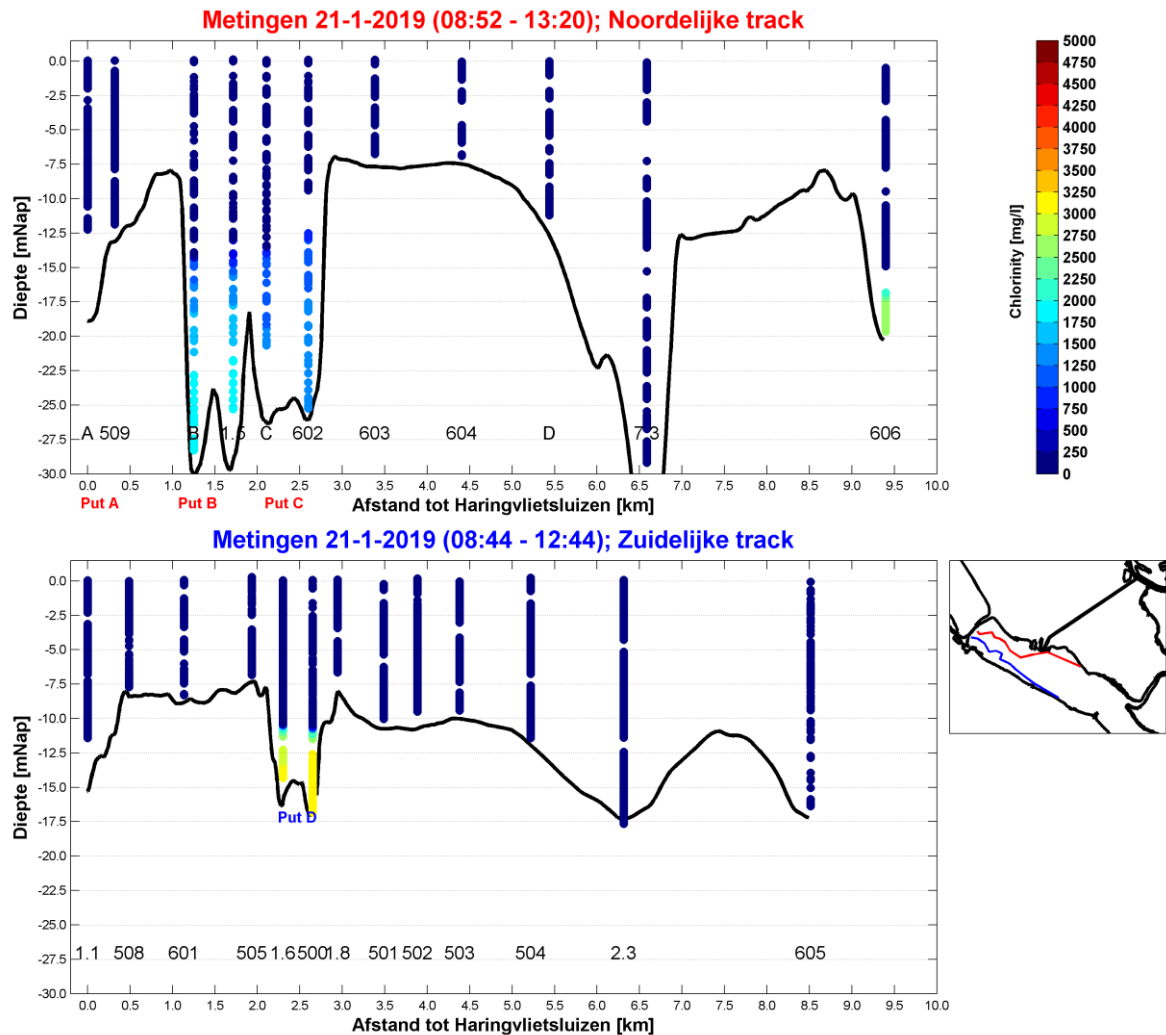
Pagina
17 van 45



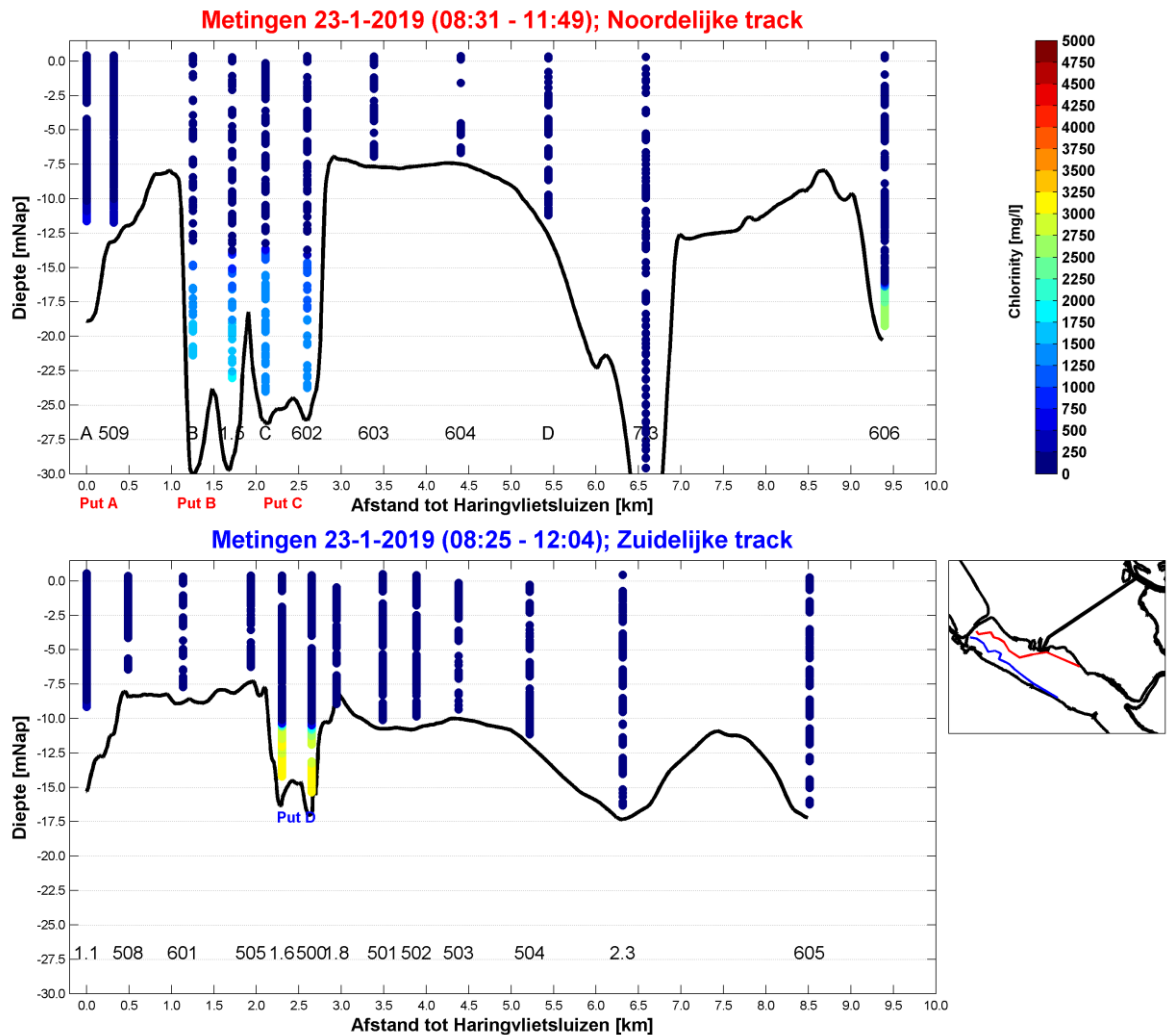
Figuur 3.3 Incidentele varende meting met zoutprofielen op 19 januari 2019

Datum
31 juli 2019

Pagina
18 van 45



Figuur 3.4 Incidentele varende meting met zoutprofielen op 21 januari 2019

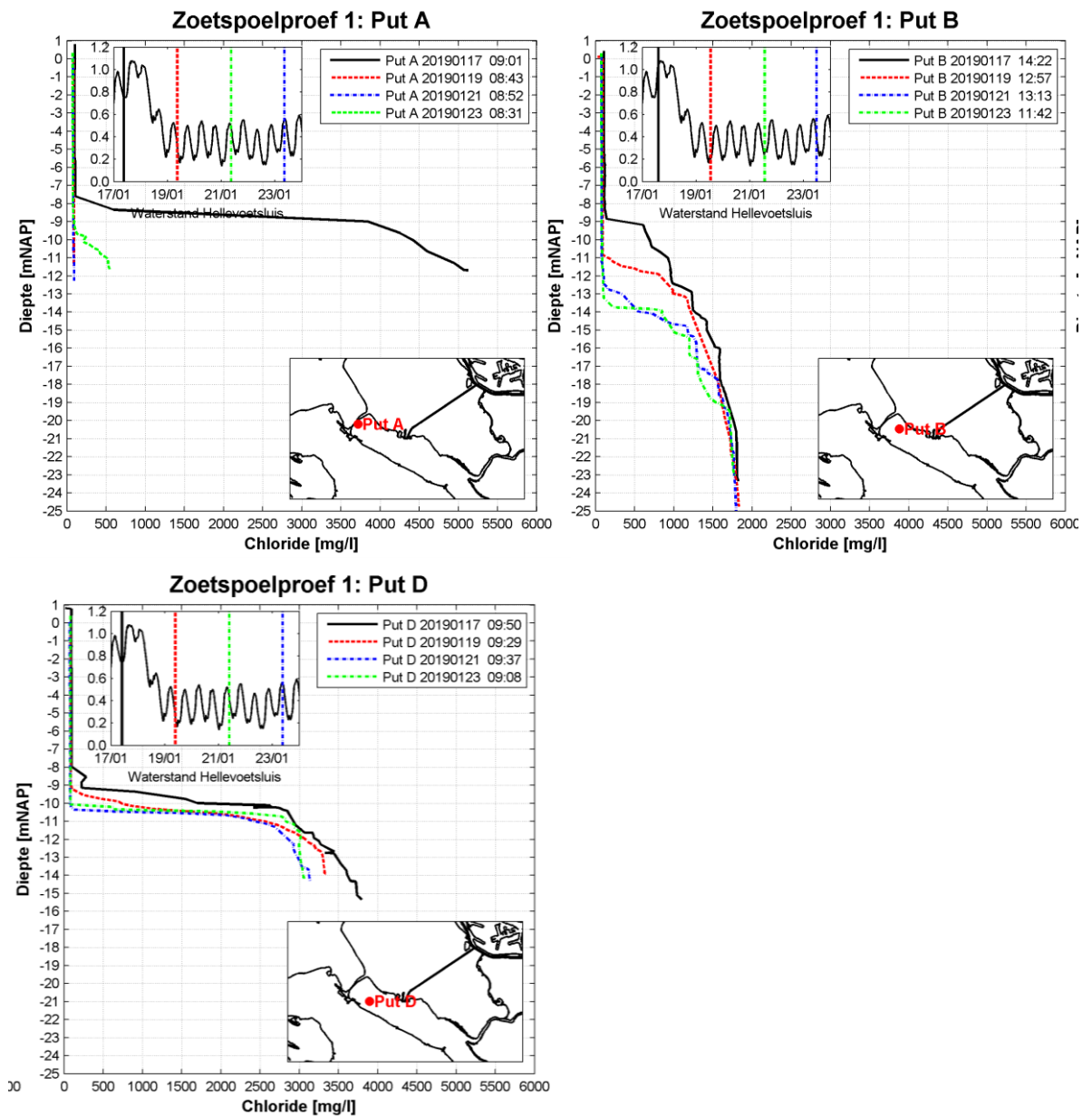


Figuur 3.5 Incidentele varende meting met zoutprofielen op 23 januari 2019

Met het verstrijken van de tijd lijkt het grensvlak in put D iets scherper te worden. Tegelijk verplaatst het tussen 17 en 21/1 enigszins naar beneden en nemen de chlorideconcentraties af. Van 21/1 tot 23/1 is niet veel verandering waar te nemen. Om dit beter te besturen zijn voor put A, B en D afzonderlijk profielen geplot in Figuur 3.6. Hierin is te zien dat het grensvlak tussen 17 en 21 januari zakt van 9.0 m naar 10.5 m en de sprong inderdaad iets scherper wordt.

Datum
31 juli 2019

Pagina
20 van 45



Figuur 3.6 Chloride concentraties over diepte voor verschillende diepe delen van het Haringvliet over tijd op basis van de varende metingen.

3.3 Snelheidsmetingen

Voor deze proef niet van toepassing.

3.4 Overige meetresultaten

Voor deze proef niet van toepassing.

4 Analyse

In de hierna volgende analyse wordt, gebruik makend van de vaste/platform metingen, afzonderlijk ingezoomd op de fase van inlaten en vollopen van de putten (inlaten en stabiliseren) en de fase van zoetspoelen en ontzilting. Ook wordt kort aandacht besteed aan de periode voorafgaand aan de proef, vanwege opvallende waarnemingen in die periode in put B. Vervolgens wordt vanuit de tijdseries en varende metingen een berekening opgezet om de zoutvracht en zoutvoorraad te schatten.

4.1 Analyse van specifieke periodes en processen

Om een beter begrip te krijgen in de dynamiek en processen die een rol spelen bij de verzilting en ontzilting van verschillende delen van het Haringvliet, wordt een drietal periodes gedefinieerd waar in meer detail naar wordt gekeken

#	Van	Tot	Toelichting
1	16-01-2019	19-01-2019	Inlaten van zout en vollopen putten.
2	17-01-2019	29-01-2019	Zoetspoelen en ontzilting.
3	11-01-2019	17-01-2019	Voorafgaand aan proefperiode: Verzilting in put B.

4.1.1 Periode 1 (16-01-2019 – 19-01-2019): Zout inlaten en vollopen putten

Figuur 4.1 en Figuur 4.2 tonen nogmaals het verloop van de chlorideconcentraties in westelijk deel van het Haringvliet, nu ingezoomd op de eerste fase van Zoetspoelproef 1. Figuur 4.1 kijkt naar de zuidelijke geul, Figuur 4.2 afzonderlijk naar de noordelijke put. In de figuren is nu ook het geschatte debiet door de Haringvlietssluzen geplot.

De diepere sensoren bij meetstations STELLDBNN, HARVWT en Kier3 in tonen duidelijk de toename ten gevolge van het inlaten van verzilt water tijdens of kort na de tweede vloedperiode. Interessant is wat de ondiepere sensoren kunnen vertellen over de wijze waarop de putten zich vullen. Het valt op dat de concentratie voor Stellendam-binnen -2 m direct na maximale instroom alweer afneemt. Mogelijk wijst dit op een instroomstraal (een 'buoyant jet') die alleen bij maximale instroomsnelheid effect laat zien op -2 m, en bij lagere snelheden al voor de positie van Stellendam-binnen volledig naar beneden is gezakt. Op -6 m neemt de concentratie direct af op het moment van stromingskentering. Hier lijken we 'afschaving' te zien. Opvallend is dat de concentratie op -6 m kortstondig toeneemt kort na het begin van het spuien. Mogelijk wordt hier door de hogere stroomsnelheden zouter water van grotere diepte opgemengd.

Voor Haringvliet-west en Kier3 valt op dat de verhoging van de concentraties een stuk later in de tweede vloedperiode optreedt dan bij Stellendam-binnen. Dit kan 'slechts' komen door de afstand, maar zou er ook op kunnen duiden dat put A (Stellendam-binnen) zich eerst op moet vullen voordat er zout in put D terecht komt. Opvallend is ook dat de maximale concentratie op -13 m respectievelijk -12 m bereikt wordt na omkering van de stroming. Mogelijk duidt dit erop dat terwijl de stroming bovenin tijdens het spuien alweer naar het westen is gericht er onderin nog (door dichtheidsverschillen gedreven) stroming naar het oosten plaatsvindt. Dit valt pas met zekerheid vast te stellen aan de hand van de nog uit te voeren stromingsmetingen.

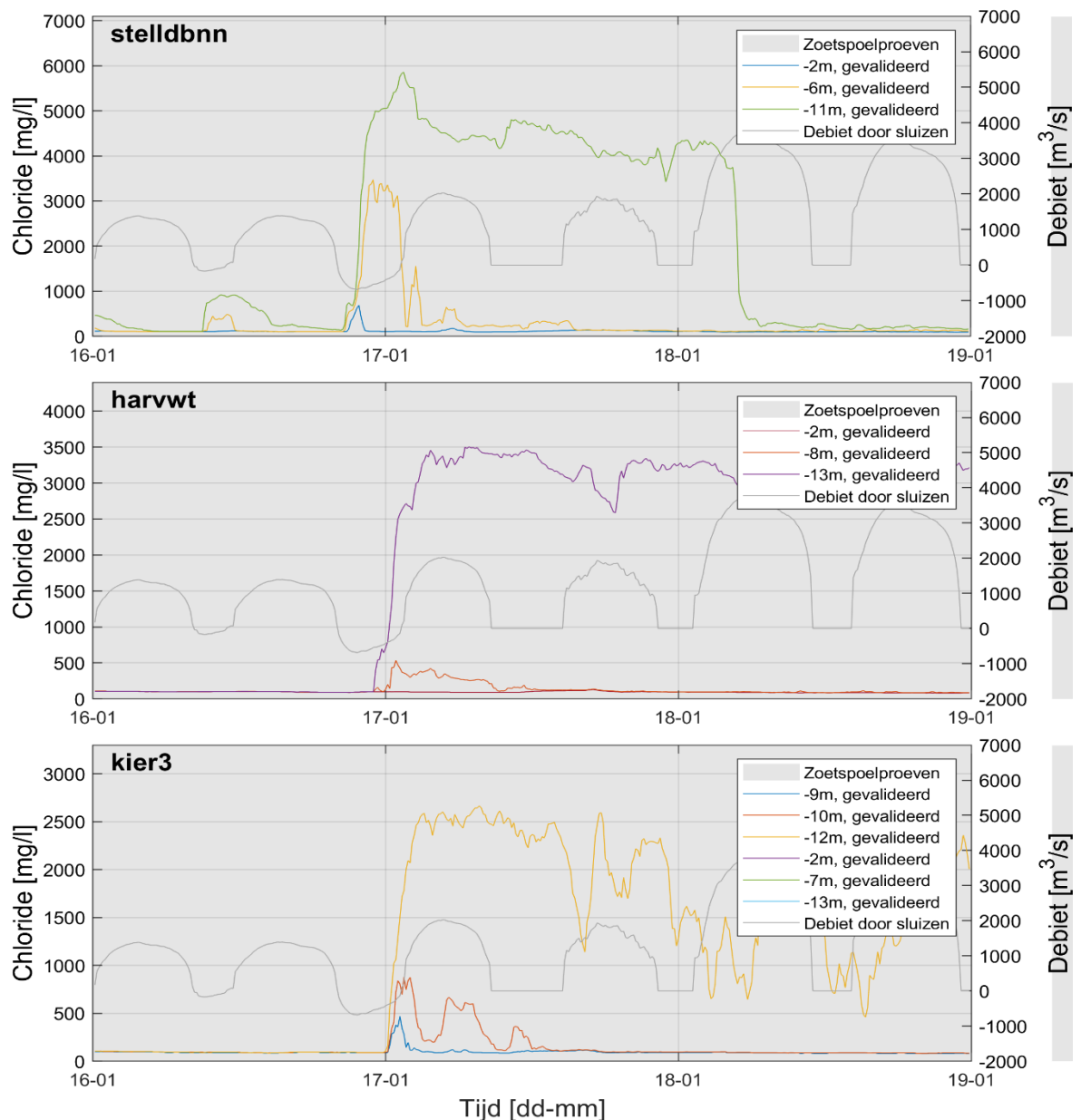
Vergelijking van Haringvliet-west op -8 m met Kier3 -9 m laat zien dat de verhoogde concentratie bij Kier3 -9 m sneller verdwijnt dan bij Haringvliet-west. Blijkbaar is er ook in de put sprake van een horizontale zoutgradiënt (zouter aan de westkant). Opvallend zijn ook de concentratiepieken bij Kier3 -10 m. De tweede piek zou kunnen duiden op entrainment, terwijl de derde mogelijk wat waterstandsfluctuaties samenhangt. Dit is nog niet helemaal duidelijk. Men moet wel bedenken

Datum
31 juli 2019

Pagina
22 van 45

dat het grensvlak bij Kier3 scherp is, waardoor met een klein beetje scheefstand, verticale beweging of opmenging al voor vrij grote concentratieveranderingen kunnen zorgen.

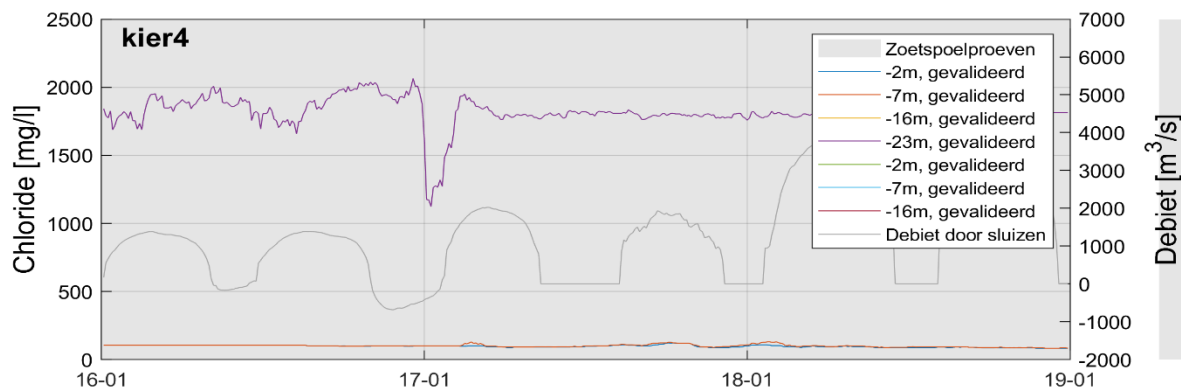
Voor Kier4 -23 m (Figuur 4.2) valt op dat de concentratie juist even afneemt tijdens het inlaten. Mogelijk is dit gerelateerd aan een stroming over put B/C ten gevolge van het inlaten van verzilt water. Het lijkt niet gerelateerd te zijn aan de wind, omdat een windpiek in de uren na deze schommeling in het zoutgehalte een windpiek optreedt (NW, 18m/s) die geen effect op het zoutgehalte lijkt te hebben.



Figuur 4.1 Verloop chloride concentraties in westelijk deel van het Haringvliet tijdens de eerste fase van Zoetspoelproef 1. In de figuren is ook het geschatte debiet door de Haringvlietssluzen geplott.

Datum
31 juli 2019

Pagina
23 van 45



Figuur 4.2 Verloop chloride concentraties bij Kier 4, in de noordelijke put (B/C), tijdens de eerste fase van Zoetspoelproef 1, gecombineerd met debiet door de sluizen.

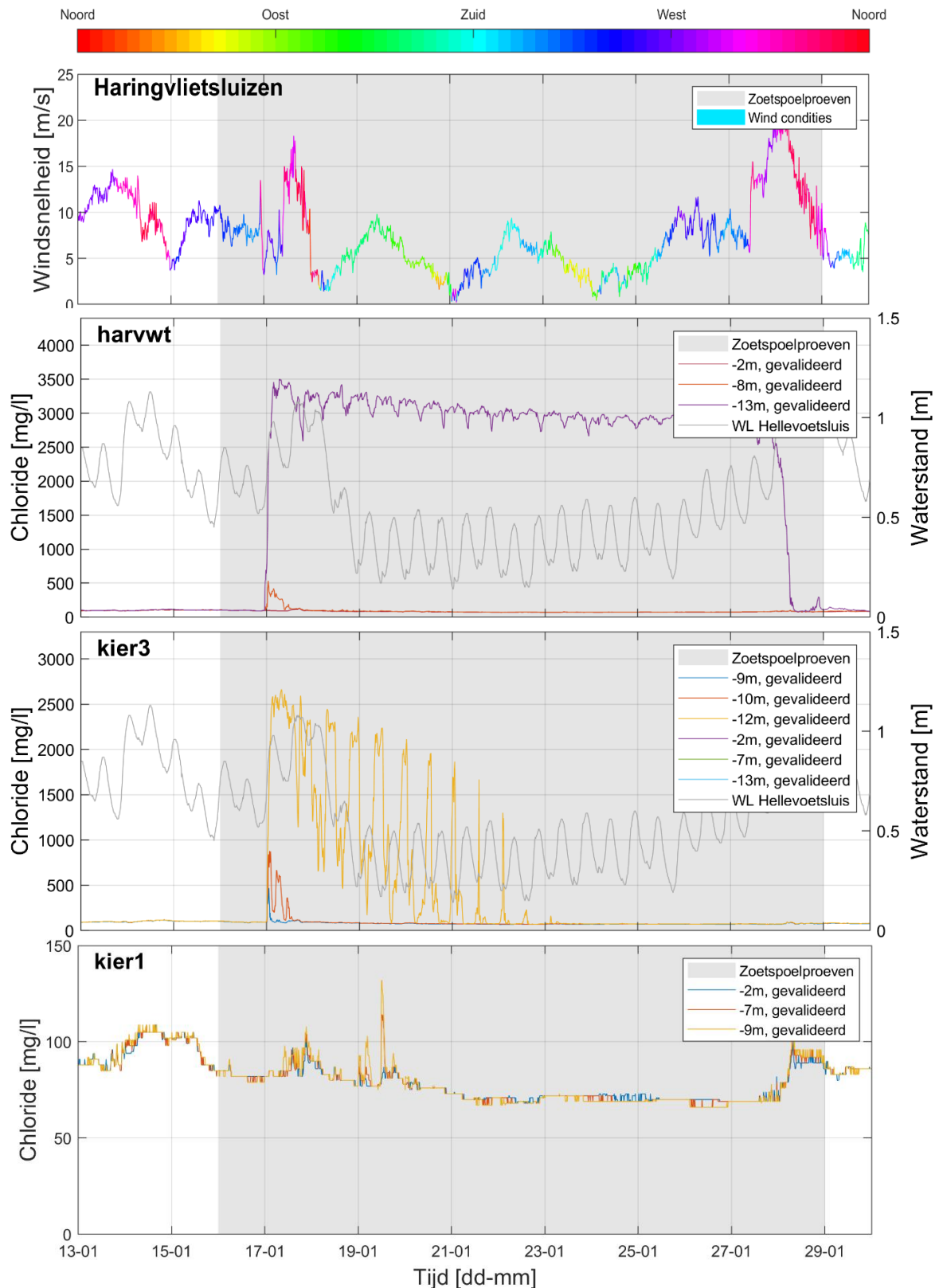
4.1.2 Periode 2 (17-01-2019 – 29-01-2019): Zoetspoelen en ontzilting

Vanaf 17/1 vindt eerst het stabiliseren plaats (2 getijperioden) en vervolgens vanaf 18/1 het zoetspoelen. In deze tijd is daalt de concentratie bij Haringvliet-west -13 m geleidelijk, al schommelt het signaal enigszins tijdens het dalen. Op 28/1 is een plotselinge scherpe daling waar te nemen. Deze valt duidelijk samen met het wind event op die dag. Hierdoor wordt het zout uit de put opgemengd, waardoor het niveau van het grensvlak wordt verlaagd, en kan het opgemengde zout zich met de stroming op geringere diepte over het Haringvliet verspreiden en/of bij spuien worden afgevoerd. Opvallend is dat de sensoren op geringere diepte niet echt een stijging laten zien. Wel is een geringe verhoging waar te nemen in de concentraties bij Kier 1, die met dit zelfde event in verband gebracht kan worden (dit is geen effect van achterwaartse verzilting, want inlaat spui vertoont geen verzilting). Vanuit aanwezige zoutvolumes zou ingeschat kunnen worden hoeveel verhoging veroorzaakt zou kunnen worden door opmenging van zout uit put D, mits er vanuit gegaan kan worden dat geen verzilting vanuit andere delen afkomstig is.

Ook voor Kier3, -12 m valt een afname waar te nemen tijdens het zoetspoelen. In vergelijking met Haringvliet-west -13 m zijn de schommelingen bij Kier3 -12 m tijdens de afname opvallend groter. Ook is het concentratieniveau al eerder gereduceerd tot het niveau van de concentratie hoger in de waterkolom. Merk op dat het eerste gedeelte van het zoetspoelen samen valt met een piek in de rivierafvoer, waardoor met een flink debiet wordt gespuid. Merk verder op dat – zoals ook uit de varende metingen bleek – de spronglaag in put D zich rond de -12 m bevindt. De grote schommelingen worden daarom hoogstwaarschijnlijk vooral verklaard door op en neer bewegen van de sensor door een gebied met sterke verticale gradiënt in concentratie. Het lijkt erop dat op 23/1 het grensvlak zodanig is verlaagd dat deze onder het bereik van de sensor terecht is gekomen. De sensor bij Haringvliet-west -13 m ligt dieper waardoor deze op dat moment nog niet zoet wordt. Echter, als er sprake zou zijn van het geleidelijke uitzakken van de spronglaag, dan zou de sensor op -13m ook na verloop van tijd vergelijkbare schommelingen moeten gaan vertonen (na 23/1) dat dit niet het geval is, suggereert dat die sensor ofwel door de diepte (minder stroming en wind effecten) ofwel door de locatie (andere zijde van put D) een ander gedrag vertoont.

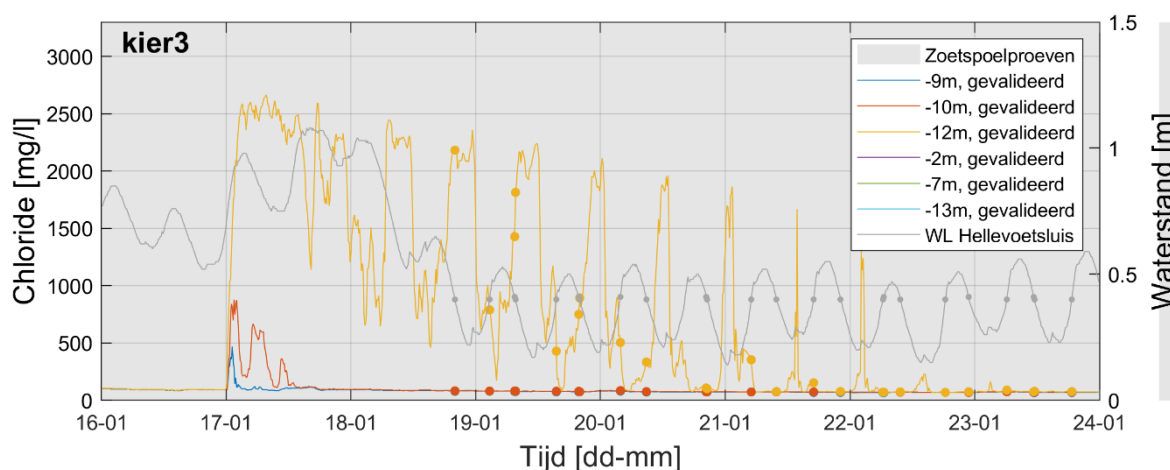
Datum
31 juli 2019

Pagina
24 van 45



Figuur 4.3 Chlorideverloop in put D (HARVWT, Kier3) en verderop in de zuidelijke geul (Kier1) in combinatie met de waterstand bij Hellevoetsluis, en wind en debiet in bovenste panels.

De samenhang waterstand en concentratiefluctuaties is verder onderzocht in Figuur 4.4. De figuur laat zien dat de concentratie fluctueert met de periode van de waterstandsfluctuatie, en naar beneden gaat als de waterstand stijgt. Dit bevestigt de uitleg dat de variatie wordt verklaard door op en neer bewegen van de sensor. Om te onderzoeken of dit de volledige verklaring is, is de hoogte van de onderste sensor van platform Kier3 ten opzichte van NAP geschat door de waterstand in Hellevoetsluis op te tellen bij de hoogte van de sensor ten opzichte van het waterniveau. Vervolgens zijn momenten geselecteerd waarop de sensor een bepaalde hoogte passeert (grijze puntjes), en is gekeken naar de chlorideconcentratie op die momenten. Als de op deze manier geschatte hoogte de daadwerkelijke hoogte ten opzichte van NAP is, en een grensvlak alleen langzaam zakt terwijl het horizontaal blijft, dan zou de chlorideconcentratie op de geselecteerde momenten (gele puntjes) in de tijd alleen af kunnen nemen. Dat blijkt niet helemaal het geval. Dat kan betekenen dat de waterstand in Hellevoetsluis niet helemaal weergeeft wat er bij Kier3 gebeurt (fluctuaties op het Haringvliet). Het kan ook betekenen dat de grenslaag zelf niet helemaal horizontaal staat, maar een oscillatie vertoont. Er zijn mogelijk bewegingen die samenhangen met de waterstandsfluctuatie. Het zou interessant zijn dit verder te onderzoeken voor een andere proef. In dit geval wordt de vergelijking bemoeilijkt door de grote opzet aan het begin van de proef.

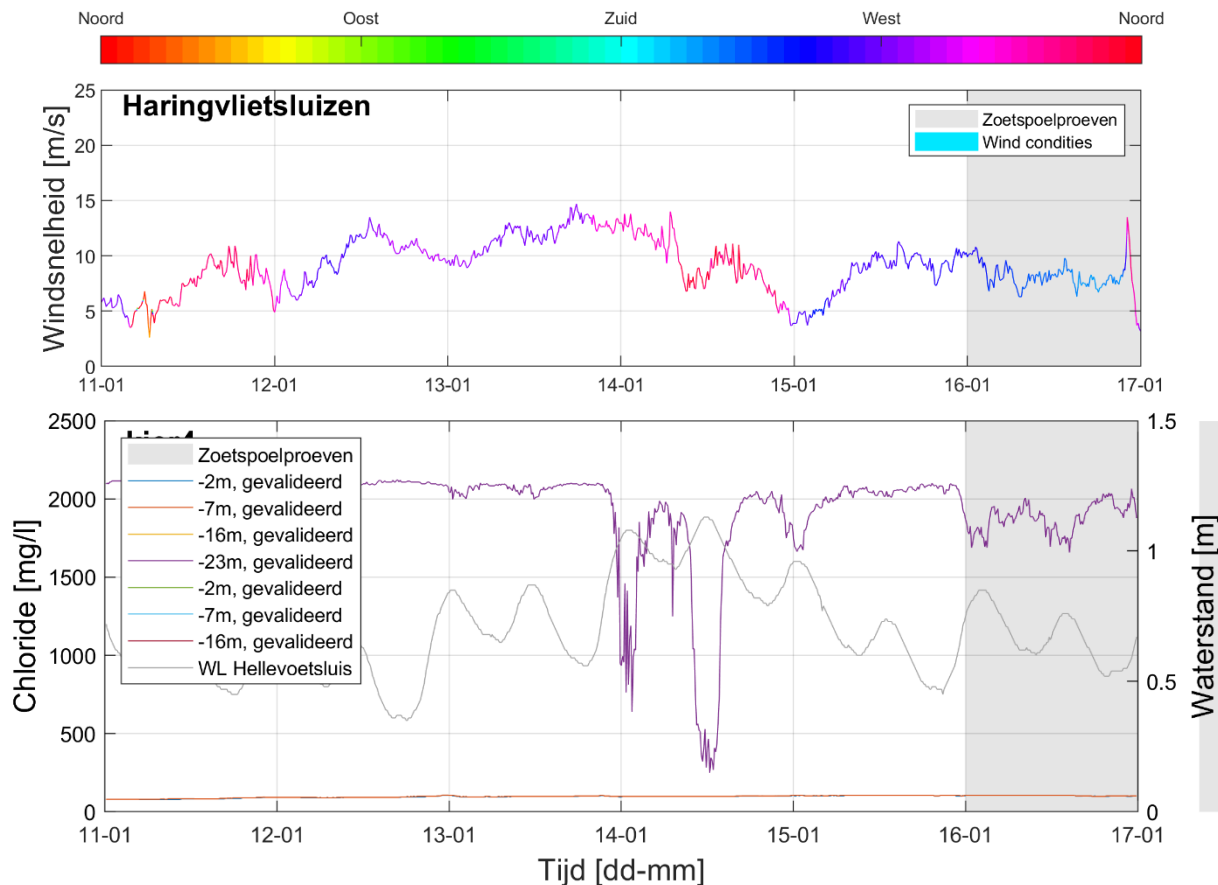


Figuur 4.4 Samenhang fluctuerende chlorideconcentratie en waterstandsfluctuaties.

- 4.1.3 Periode 3 (11-01-2019 – 17-01-2019): Voorafgaand aan proefperiode: Verziltig in put B
- Een opvallende waarneming is de fluctuatie in de chlorideconcentratie in put B (Kier4, -23 m) voorafgaand aan de proef. De vraag is of deze verklaard kunnen worden door ontziltig, wind of waterstandsfluctuaties. De combinatie met waterstand laat zien dat – net als voor Kier3, -12 m – de concentraties laag zijn bij verhoogde waterstand. Die is het gevolg van opzet ten gevolge van noordwesten wind. Dat deze verlaging van de concentraties vervolgens niet weer optreedt bij herhaling van de hoge waterstand (opzet event aan einde van de proef) wordt verklaard door het inlaten van zout water: er is in de tussentijd zout water bij gekomen, waardoor het grensvlak in put B/C is gestegen. Merk op dat er ook bewegingen (tilting grensvlak, stroming) kunnen zijn die dezelfde frequentie vertonen als de waterstandsfluctuatie. Dus de verticale verschuiving hoeft ook hier niet de volledige verklaring te zijn.

Datum
31 juli 2019

Pagina
26 van 45



Figuur 4.5 Boven: wind; Onder: samenhang chlorideconcentratie bij kier4 en waterstandsfluctuaties bij Hellevoetsluis.

4.2 Balansen en fluxen

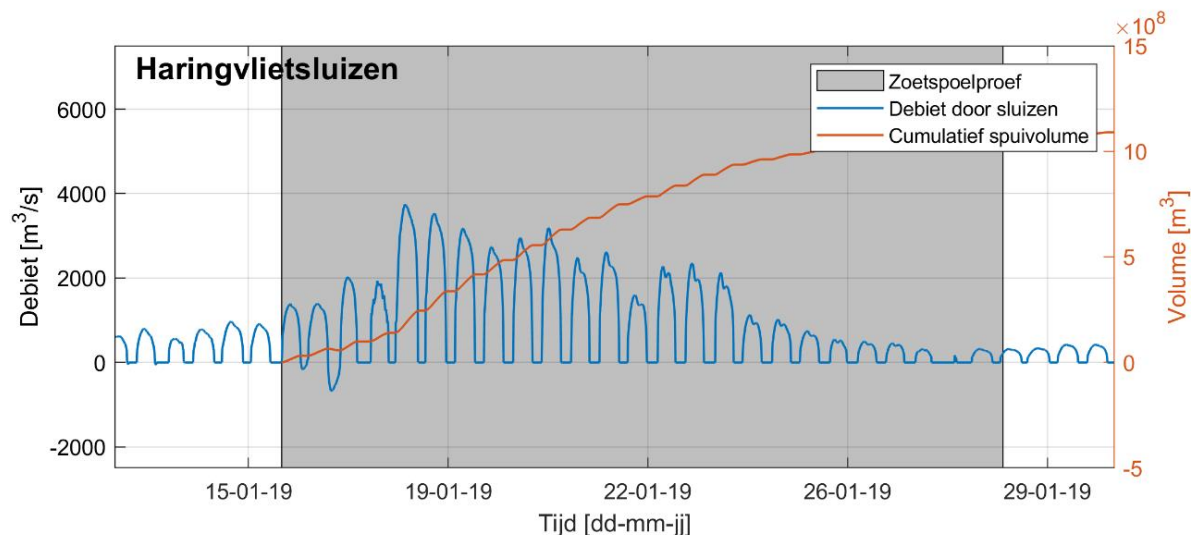
4.2.1 Schatting watervolume en chloridevracht door de kering

Watervolumes

Voor verdere analyse zijn de water volumes door de kering, zowel inkomend als uitgaand, geschat op basis van de momentane debieten die eerder zijn bepaald op basis het verhang over de kering (zie paragraaf 2.4.6). Voor de twee inlaatperiodes bedraagt de gesommeerde hoeveelheid ingelaten (zee) water ongeveer 10 miljoen m³. Voor de 10 spuiperioden na het inlaten, en de spuiperiode tussen de twee inlaatperiodes bedraagt de totale hoeveelheid gespuid Haringvlietwater ongeveer 700 miljoen m³.

Datum
31 juli 2019

Pagina
27 van 45



Figuur 4.6 *Debiet door sluizen en Cumulatief watervolume getransporteerd door sluizen na 16/1/2019.*

Chloridevrachten

De ingelaten chloridevracht is bepaald door het inkomende debiet te vermenigvuldigen met de chlorideconcentratie in de voordelta van het haringvliet in de nabijheid van de sluizen. Als proxy voor deze concentratie is het gemiddelde van de chlorideconcentratie gemeten te Stellendam-buiten op 2 en 5 m onder het wateroppervlak genomen. Deze schatting geeft een totaal van 17000 ton chloride ingelaten gedurende de twee inlaatperioden. De gespuide hoeveelheid chloride is niet geschat, omdat daarvoor teveel onzekerheid bestaat over de concentratie van het uitgelaten water.

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

De massa chloride in de diepe putten is geschat vanuit de varende metingen door:

- 1) Een hypsometrische curve, volume onder een bepaald niveau als functie van dat niveau, voor elke put afzonderlijk te bepalen,
- 2) De totale diepte te verdelen in een aantal lagen en vervolgens per laag de hoeveelheid chloride te bepalen als het laagvolume vermenigvuldigd met de concentratie in het laagmidden bepaald uit het gemeten chloride profiel,
- 3) De hoeveelheden per laag te sommeren over de gehele diepte.

De hoeveelheid chloride in de diepe putten, en gesommeerd over alle putten, wordt getoond in Figuur 4.7. De totale massa chloride direct na het inlaten, ongeveer 50 miljoen kg, is ongeveer drie maal de hoeveelheid die, geschat althans, is ingelaten (ongeveer 17 miljoen kg). Dit grote verschil wordt deels verklaard door:

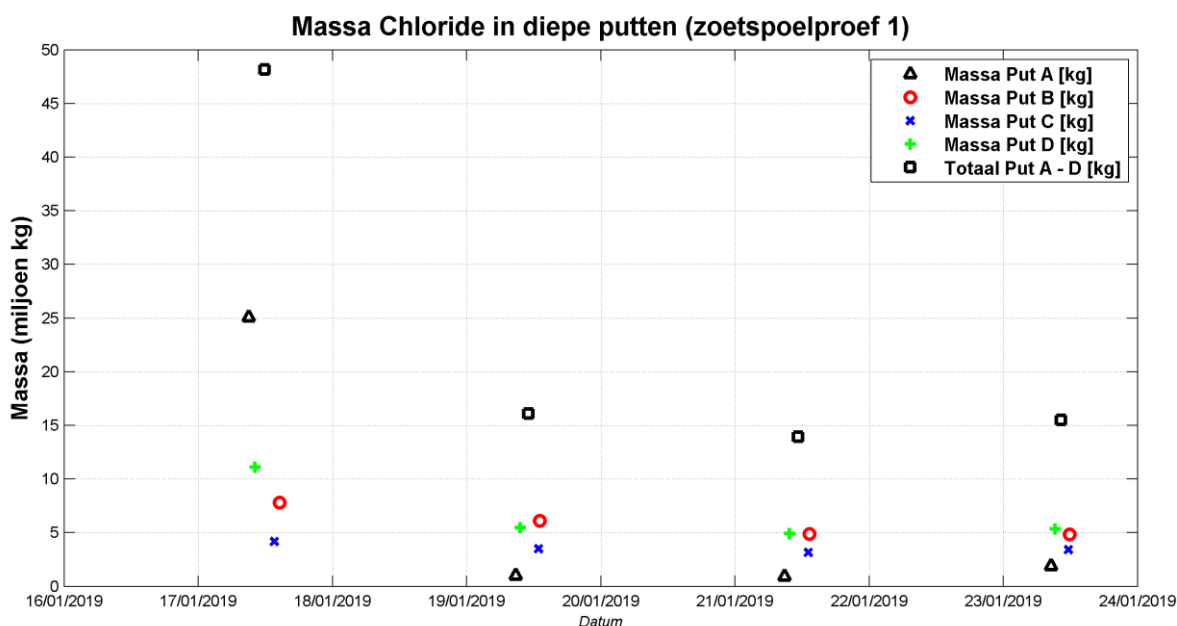
- Het niet “schoon” zijn van het Haringvliet bij aanvang van het inlaten. Niet bekend is hoeveel chloride aanwezig was in het Haringvliet voor de aanvang van het experiment. Voor volgende experimenten wordt aanbevolen om de T0 toestand voor aanvang van het experiment middels incidentele metingen in kaart te brengen.
- Zowel de ingelaten chloride hoeveelheid als de chloridehoeveelheid in de diepe putten zijn schattingen gebaseerd op aannamen. Een deel van de onzekerheid in de schatting zou wellicht weggenomen kunnen worden door in de sluizen zowel snelheid middels een ADCP meter als chloride te meten.

Datum
31 juli 2019

Pagina
28 van 45

- De schatting voor de chloridehoeveelheid in Put A is gebaseerd op het gemeten chlorideprofiel te meetlocatie A. Deze schatting kan verfijnd worden door meer meetpunten (1.1 en 509) in de massabepaling te betrekken.

De discrepantie tussen de beide chloride hoeveelheden, ingelaten en diepe putten, wordt vermoedelijk niet enkel en alleen verklaard door bovengenoemde redenen. Wat dan wel het grote verschil verklaart is op dit moment niet bekend.



Figuur 4.7 Massa Chloride in de diepe putten in het Haringvliet

Direct na het inlaten, 17 januari 2019, is de hoeveelheid chloride het grootst. Na twee dagen, 19 januari 2019, is nog maar ongeveer 30% van de oorspronkelijke hoeveelheid chloride aanwezig (ongeveer 15 miljoen kg tegen ongeveer 50 miljoen kg). Deze afname wordt voor een groot deel verklaard door het “schoonsoelen” van Put A (zwarte driehoek). Twee dagen later is de hoeveelheid zout in put B/C en D ook nog iets gezakt. Maar in de dagen daarna verandert er niet heel veel meer waar het de hoeveelheid chloride in de diepe putten betreft. Put A wordt dus binnen twee dagen schoongespoeld, en ook de hoeveelheid zout in put B/C en D daalt gedurende de eerste dagen van het zoetspoelen. Maar de hoeveelheid die achterblijft is in de dagen daarna vrij constant. Dat betekent waarschijnlijk dat veel langer dan de week die het experiment duurde nodig is om de nog aanwezige hoeveelheid zout uit te spoelen, of dat er een wind-event nodig is om de waterkolom op te mengen om de put daadwerkelijk leeg te spoelen.

Concluderend kan worden gesteld dat de ontzilting van het Haringvliet als gevolg van spuien redelijk effectief lijkt en dat met name put A (zoutvang) snel ontzilt. De discrepantie tussen de twee schattingen van de zoutvracht in het Haringvliet (bepaald aan de hand van debieten door de sluizen en op basis van zoutprofielen van varende metingen) is echter aanzienlijk en verder onderzoek is nodig om beide schattingen met meer zekerheid te kunnen bepalen en zo het verschil tussen beide zoutvrachtschattingen terug te brengen.

4.3 Analyse toegespitst op de onderzoeksvragen

Onderzoeksvraag 1	Hoe en hoe snel lopen de diepe putten, i.h.b. put D, vol tijdens het inlaten van zout water?
Hypothese	1) De hoeveelheid zout die binnenkomt is afhankelijk van het instroomvolume en de chlorideconcentratie van het instromende water. Instroomvolume is afhankelijk van de inlaatopening, het verval over de sluizen en de duur van het inlaten. De concentratie van de instroom is afhankelijk van de concentratie en stratificatie van het water in de voordelta, die afhankelijk is van de voorgeschiedenis, en daarnaast mogelijk van instroomsnelheid (entrainment van zouter water). 2) De verspreiding van het instromende zoute water op het Haringvliet is naar verwachting afhankelijk van de snelheid van instroom (jet/pluim), het bodemprofiel en het reeds aanwezige zout. Aangezien zouter water zwaarder is dan het zoete rivierwater, is de verwachting dat indringing van het zoute water met name plaats zal vinden in de diepere lagen en dat het zout zich zal ophopen in de diepe putten. Naar verwachting gaat de verspreiding het snelste via de voormalige getijdegeul aan de zuidzijde en langzamer aan de noordzijde.

Tijdens de proef wordt zout eerst en nagenoeg instantaan geregistreerd in put A (de zoutvang) en pas in een later stadium in put D (en mogelijk putten B/C). Tijdens de eerste inlaatperiode wordt alleen verzilting waargenomen in de zoutvang, wat suggereert dat de hoeveelheid inkomend water beperkt is, en de “jet” of “pluim” niet voorbij de zoutvang is gekomen. Bij de tweede inlaatperiode neemt eerst de verziltingsgraad in put A toe. Waarschijnlijk pas als deze put overloopt, verspreid het zout zich via de bodem verder naar het oosten richting put D. De verspreiding naar het oosten verloopt via de diepere delen en met name nabij de bodem, en het verzilte water komt pas bij put D (en B/C) aan tegen het einde van de tweede inlaatperiode. De verspreiding loopt door na stromingskentering. Het zout hoopt zich op nabij de bodem in de diepe putten.

De schommeling in chloride concentratie bij Kier4 (-23m) valt samen met het verzilten van put D (ondersensoren van Kier3 en HARVWT). Omdat put B/C (Kier4) meer westelijk gelegen is, is er mogelijk in beperkte mate sprake van snellere verzilting via de zuidzijde.

De hoeveelheid ingekomen water is afgeschat aan de hand van de hefhoogtes en het verval over de sluizen. De daaraan gekoppelde schatting van de hoeveelheid ingekomen zout laat een aanzienlijk verschil (17 miljoen kg) zien met de hoeveelheid zout in het Haringvliet zoals die bepaald is op basis van de varende metingen (50 miljoen kg).

Onderzoeksvraag 2	Hoe en hoe snel ontzilten de diepe putten, i.h.b. put D, tijdens het spuien?
Hypothese	1) De terugdringing van de hoeveelheid zout in de diepe putten is naar verwachting m.n. afhankelijk van het spuivolume, de mate van stratificatie in de uitgangssituatie en het bodemprofiel. Spuivolume wordt bepaald door de Bovenrijnafvoer, spuiopening en -duur, en verhang.

Datum
31 juli 2019

Pagina
30 van 45

	2) Uitstroming heeft direct effect op concentraties in de bovenste lagen van de waterkolom, die advectioneel wordt weggespoeld. Hiermee wordt de spronglaag verlaagd tot het niveau van de 'drempels' / 'putranden' in het Haringvliet. Bij lage snelheden zal verdere verlaging plaatsvinden door geleidelijke afschaving. Bij hogere snelheden zal mogelijk opmenging plaatsvinden, gevolgd door wegspoeling van het zout. Wind draagt ook bij aan opmenging en daarmee aan effectiviteit van het zoetspoelen. Naar verwachting gaat zoetspoelen het langzaamst voor de diepe putten aan de noordzijde van het Haringvliet.
--	---

Ontzilting van put B/C (Kier4) aan de noordzijde van het Haringvliet is niet opgetreden. Deze put is aanzienlijk dieper dan die aan de zuidzijde (put D, Kier3 en HARVWT). Voor de ontzilting van de zoutvang (put A) en put D kunnen de volgende karakteristieken worden afgeleid:

Tabel 4.1 Karakteristieken bij ontzilting van diepe putten tijdens Zoetspoelproef 1. De kleurcodes geven de verwachte aanleiding voor ontzilting weer (geel: uitzakken; rood: afvoer (snel); lichtrood: afvoer (afschaving); groen: wind)

Karakteristieken ontzilting	Mate van verzilting [mg/l]	Ontziltings-periode [dd-mm-jj]	Debiet [m3/s]		Wind		Toelichting
			H'sluizen	Lobith	Snelheid [m/s]	Richting	
Put A -2 STELLDBNN	0						Geen verzilting waargenomen.
-6 STELLDBNN	300	16-01-19	1500	2900	7	ZW	Ontzilting direct na eerste inlaatperiode. Mogelijk door spuien en/of inzet zoutriolen
-11 STELLDBNN	900	16-01-19	1500	2900	7	ZW	Ontzilting direct na eerste inlaatperiode. Mogelijk door spuien en/of inzet zoutriolen
Put A -2 STELLDBNN	600	16-01-19	0	3000	10	W	Verzilting weg voorafgaand aan spuien. Zout zakt uit en verspreidt zich vermoedelijk langs de bodem.
-6 STELLDBNN	3000	17-01-19	0	3300	13	NW	Verzilting weg voorafgaand aan spuien. Zout zakt uit en verspreidt zich vermoedelijk langs de bodem.
-11 STELLDBNN	4500	18-01-19	3500	3800	15	NNW	Snelle ontzilting bij hervatten spuien.
Put D -2 HARVWT							Geen verzilting waargenomen.
-8 HARVWT	400	17-01-19	2000	3300	13	NW	Snelle ontzilting bij hervatten spuien.
-9 KIER3	400	17-01-19	2000	3300	13	NW	Snelle ontzilting bij hervatten spuien.
-10 KIER3	500	17-01-19	2000	3300	13	NW	Snelle ontzilting bij hervatten spuien.
-12 KIER3	2500	17-01-2019 tot 23-01-2019	2500 (gemm)	3300	13	NW	Geleidelijke ontzilting als gevolg van spuien: Afschaven spronglaag
-13 HARVWT	3000	27-01-2019 tot 28-01-2019	0	1900	20	NW	Snelle ontzilting door harde wind

In de tabel wordt onderscheid gemaakt tussen ontzilting na de eerste inlaatperiode (alleen put A verzilt) en na de tweede inlaatperiode. Voor de eerste inlaatperiode geldt dat de mate van verzilting beperkt is gebleven en ontzilting direct na de inlaatperiode optrad bij zowel -6 als -

Datum
31 juli 2019

Pagina
31 van 45

13m. Ontzilting was waarschijnlijk het gevolg van het beperkte spuien dat tussen beide inlaatperiodes is gedaan.

Te zien is dat ontzilting van de bovensensoren in de zoutvang (-2 en -6m) na de tweede inlaatperiode het gevolg is van uitzakken van het verzilte water (er wordt niet gespuid, en de wind is beperkt). De ontzilting van de ondersensor in de zoutvang en de ondiepere delen van put D (-8 tot -10m) kan gekoppeld worden aan het hervatten van het spuien. De verhoogde chloride concentratie in combinatie met de diepere diepte leidt er toe dat de ondersensor van de zoutvang pas bij een hoger spuidebiet (een dag later) wordt ontzilt dan de sensoren in put D. De diepste sensor die op deze manier wordt ontzilt ligt op -10m, wat net onder de drempelhoogte is (8 – 9m) tussen put A en put D.

Voor de diepere delen van put D geldt dat hier sprake is van in eerste instantie een meer geleidelijke ontzilting (-12m) die enkele dagen duurt en waarbij naar verwachting de sensor gedurende sommige getijperiodes zich door de spronglaag heen beweegt. Hier lijkt sprake te zijn van een geleidelijke afschaving van de spronglaag. De ontzilting van de diepste sensor in put D is daarna weer abrupt en valt samen met gesloten Haringvlietsluizen en een storm (20m/s, NW). Dit laatste leidt waarschijnlijk tot verticale opmenging en horizontale verspreiding (niet waargenomen) van de zoute onderlaag.

5 Discussie

5.1 Evaluatie methodiek

De gehanteerde methodiek - waarbij eerst kortstondig zout water wordt ingelaten om verzilting het Haringvliet (en met name de diepe putten) in te krijgen en daarna te spuien om er voor te zorgen dat de bovenlaag zoet wordt – lijkt effectief te zijn geweest. De mate van verzilting viel na de eerste inlaatperiode tegen. Dit werd waarschijnlijk veroorzaakt doordat aan zeezijde slechts sprake was van een beperkte mate van verzilting (vanwege grote spui volumes voorafgaand aan de proefperiode) en een beperkt doorstroomoppervlakte. Tijdens een tweede inlaatperiode werd verzilting wel tot voorbij de zoutvang gerealiseerd. Daaropvolgend is (met variërend spui volume) getracht de verzilte putten weer zoet te spoelen. Dit is effectief gebleken. De ontzilting van put D werd voor de ondiepere delen veroorzaakt door spuien, terwijl de diepste sensor werd ontzilt als gevolg van windgedreven opmenging.

5.2 Evaluatie meetgegevens

Uit de aanwezige meetgegevens zijn lessen geleerd over het verzilten en ontzilten van de diepe putten. Dit kan nog verbeterd worden bij aanwezigheid van varende metingen direct vanaf de start van het experiment (waarbij ook de verspreiding van het inkomende zout in kaart kan worden gebracht), metingen van de stroomsnelheid en het profiel daarvan op diverse locaties in het gebied, en door een hogere verticale resolutie van de vaste metingen, zoals nu al wordt toegepast tussen de -9 en -13 m NAP in put D. Verder zou het voor het nader bepalen van de precieze verbanden van chlorideconcentratie-fluctuaties met waterstand nuttig zijn waterstandsinformatie te hebben op tenminste 1 andere locatie in het westelijk deel van het Haringvliet. Dit om te bepalen of Hellevoetsluis representatief is voor het hele gebied, dan wel of er scheefstanden optreden over het westelijk deel van het Haringvliet – en hoe groot die zijn en de omstandigheden waaronder deze optreden.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Twee vragen stonden in deze proef centraal, één met betrekking tot het vollopen en één met betrekking tot het ontzilten van de diepe putten.

Tijdens een eerste vloed fase waarbij zout water is ingelaten (doorstroomoppervlakte 70m²) wordt alleen beperkte verzilting in de zoutvang gerealiseerd. Dit komt mede doordat de verziltingsgraad aan zeezijde in de aanloop naar de proef aanzienlijk was afgenomen (Figuur 3.1). Tijdens een tweede inlaatperiode is het doorstroomoppervlakte opgerekt (176m²) waardoor zouter water is aangetrokken en ingelaten in het Haringvliet. Daardoor is niet alleen de zoutvang verzilt geraakt, maar is aansluitend ook verzilting in oostelijk gelegen delen waargenomen. Verzilting van de rest van het Haringvliet treed pas op als de zoutvang gaat overlopen. Echter, dit gaat daarna relatief snel (einde van de inlaatperiode) en leidt tot instantane toename in chloride concentraties die vergelijkbaar zijn met die in de bovenlaag van de zoutvang.

De ontzilting van de zoutvang vond plaats tijdens de eerste twee spuiperiodes na het inlaten, waarbij de bovenlaag al ontzilte voordat met spuien was begonnen. De ontzilting in de bovenlaag is naar verwachting niet gerelateerd aan spuien, maar wordt veroorzaakt door uitzakken en horizontale verspreiding via de voormalige getijdegeulen. De diepe delen van de zoutvang raakten ontzilt toen het maximale spuidebiet tijdens een eb-fase werd opgerekt van 2000 m³/s naar 3500 m³/s.

De ontzilting van de meer oostelijk gelegen diepe putten was meer geleidelijk. De bovenlaag vertoonde maar een beperkte mate van verzilting (400 mg/l) en werd tijdens de eerste spuiperiode (max 2000 m³/s) zoetgespoeld. Er zijn aanwijzingen dat het hierbij gaat om afschuiving van het zoute water uit de bovenlaag. Er zijn minder duidelijke aanwijzingen voor opmenging ten gevolge van de ebstroming. Vanaf een diepte van -12m (2500 mg/l) was er sprake van een meer geleidelijk proces waarbij de sensor enige dagen ter hoogte van de spronglaag leeg te hangen. Een storm aan het einde van de proefperiode leidde er uiteindelijk toe dat de put tot een diepte van -13m (3000 mg/l) werd ontzilt. Het zoetspoelen gedurende 12 getijden met een debiet van 2000 - 3500 m³/s voor was daarvoor nog niet genoeg. Verzilting die aan de noordzijde op een diepte van 23m was waargenomen, is niet dankzij het zoetspoelen in beweging gekomen.

6.2 Aanbevelingen

6.2.1 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~~.

Datum
31 juli 2019

Pagina
34 van 45

Onderzoeksvraag 1	Hoe en hoe snel lopen de diepe putten, i.h.b. put D, vol tijdens het inlaten van zout water?
Mate van beantwoording	Voor een bepaalde mate van verzilting aan zeezijde in combinatie met doorstroomoppervlakte en verhang is nu een indicatie van de mate van verzilting van het Haringvliet bekend. Deze is relatief beperkt gebleken (zeker na de eerste inlaatperiode).
Aangepaste hypothese	1) De hoeveelheid zout die binnenkomt is afhankelijk van het instroomvolume en de chlorideconcentratie van het instromende water. Instroomvolume is afhankelijk van de inlaatopening, het verval over de sluizen en de duur van het inlaten. De concentratie van de instroom is afhankelijk van de concentratie en stratificatie van het water in de voordelta, die afhankelijk is van de voorgeschiedenis, en daarnaast mogelijk waarschijnlijk van de instroomsnelheid. <i>Bij hogere instroomsnelheden is er dan sprake van (entrainment van zouter water).</i> 2) De verspreiding van het instromende zoute water op het Haringvliet is naar verwachting afhankelijk van de snelheid van instroom (jet/pluim), het bodemprofiel en het reeds aanwezige zout. <i>De resultaten tot nu toe (met beperkte inlaatopeningen) geven geen indicatie dat deze jet/pluim zich voorbij de zoutvang uitstrekt. In eerste instantie lijkt de zoutvang vol te lopen, waarna het zout zich verder oostwaarts verspreid. Aangezien zouter water zwaarder is dan het zoete rivierwater, is de verwachting vindt de indringing van het zoute water met name plaats zal vinden in de diepere lagen en hoopt het zout zich zal ophopen in de diepe putten. Naar verwachting gaat dit Door de diepere bodemligging gaat dit mogelijk iets sneller het snelste via de voormalige getijdegeul aan de zuidzijde dan aan de noordzijde (tijdens deze proef is via de zuidzijde ingelaten, wat ook een verklaring hiervoor kan zijn).</i>
Onderzoeksvraag 2	Hoe en hoe snel ontziltten de diepe putten, i.h.b. put D, tijdens het spuien?
Mate van beantwoording	Deze vraag is nu ten dele beantwoord voor de combinatie verziltingsgraad en stratificatie (beide beperkt), spui volumes via de Haringvlietssluisen (gematigd, maximaal 3500 m ³ /s) en wind condities (enkele storm 20m/s, NW). Andere condities moeten nog worden onderzocht.
Aangepaste hypothese	1) De terugdringing van de hoeveelheid zout in de diepe putten is naar verwachting m.n. afhankelijk van het spui volume, de mate van stratificatie in de uitgangssituatie, en het bodemprofiel en de windcondities. Spuivolume wordt bepaald door de Bovenrijnafvoer, spuiopening en -duur, en verhang. 2) Uitstroming heeft direct effect op concentraties in de bovenste lagen van de waterkolom, die advectioneel wordt weggespoeld. Hiermee wordt de spronglaag verlaagd tot het niveau van de 'drempels' / 'putranden' in het Haringvliet. Bij lage snelheden zal verdere verlaging

	<i>tot onder het niveau van de drempels plaatsvinden door geleidelijke afschaving. Bij hogere snelheden zal mogelijk opmenging plaatsvinden, gevolgd door wegspoeling van het zout. (Niet waargenomen tijdens deze proefperiode.) Wind draagt ook bij aan opmenging en daarmee aan effectiviteit van het zoetspoelen. Een windsnelheid van 20m/s (NW) leidt tot opmenging tot -13m (3000mg/l). Naar verwachting gaat zoetspoelen het langzaamst voor de diepe putten aan de noordzijde van het Haringvliet (put B/C is niet zoetgespoeld tijdens deze proefperiode).</i>
--	---

6.2.2 Vervolgstappen Lerend Implementeren

De mate waarin dit stadium qua begripsvorming voor Lerend Implementeren kan worden afgerond is afhankelijk van de kennisontwikkeling die in de andere zoetspoelproeven wordt opgedaan. Deze vraag kan daarom pas worden beantwoord in samenspraak met de conclusies uit de andere zoetspoelproeven (ZS2019_1 tm 3).

6.2.3 Mogelijke aanvullende analyses met behulp van huidige data

- Op dit moment worden de varende metingen alleen gebruikt voor het bepalen van een massa zout in het Haringvliet. Deze gegevens zouden ook nog gebruikt kunnen worden om de zoutgehaltes van de vaste sensoren verder te duiden, bijvoorbeeld de fluctuaties bij put D (-12m).
- Het kan zeer nuttig en waardevol zijn om een 3D model op te zetten om bij benadering deze proefperiode 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 biedt 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 naar de verplaatsingssnelheid van het zoute front, 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.

6.2.4 Aanvullende kennisvragen

Verplaatsing van het zoute front: Dit proces is eigenlijk onderdeel van het Kieren, maar kan ook al onderzocht worden in de beginfase van de Zoetspoelproef.

6.2.5 Suggesties voor aanpassing of aanvulling van de meetbehoefte

Twee vragen stonden in deze proef centraal, één met betrekking tot het vollopen en één met betrekking tot het ontzilten van de diepe putten. Hieronder wordt specifiek benoemd welke metingen gewenst zijn om deze vragen verder te kunnen onderzoeken en beantwoorden:

- Met het oog op de eerste categorie is het van belang om de varende metingen eerder te laten beginnen, zodat er een goed beeld is van de aanvangssituatie van de proef.
- Voor de tweede categorie geldt dat in veel hypothesen over ontzilting een belangrijke rol is weggelegd voor de stroomsnelheid. Om de hypothesen daadwerkelijk te kunnen toetsen is het daarom van belang de stroomsnelheid ook daadwerkelijk te meten.
- Verder geldt dat de verticale profielen van de chlorideconcentratie in de putten een scherpe gradiënt kunnen vertonen. Om vanuit vaste metingen een goed inzicht te kunnen krijgen in het 'zoutvolume' en de positie van het grensvlak, en zo op den duur wellicht een goede relatie af te kunnen leiden voor hoeveelheid aanwezig zout en/of

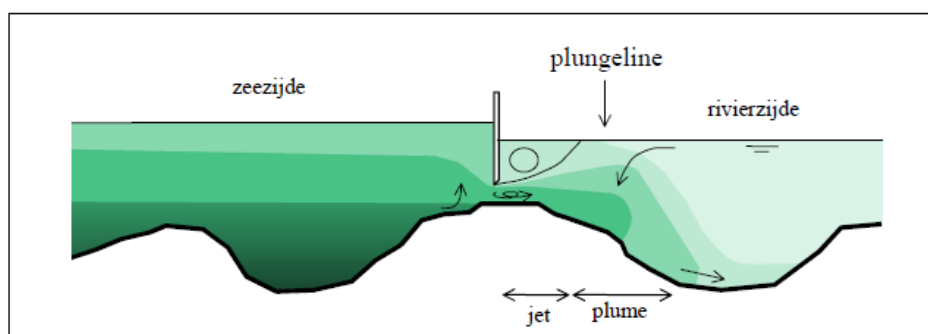
- positie grensvlak als functie van o.a. spuidebiet, is het noodzakelijk te meten met een hogere resolutie in de verticaal, in put D met name tussen de 9 en 13 m beneden NAP.
- Verder zou het voor het nader bepalen van de precieze verbanden van chlorideconcentratiefluctuaties met waterstand nuttig zijn waterstandsinformatie te hebben op tenminste 1 andere locatie in het westelijk deel van het Haringvliet. Dit om te bepalen of Hellevoetsluis representatief is voor het hele gebied, dan wel of er scheefstanden optreden over het westelijk deel van het Haringvliet – en hoe groot die zijn en de omstandigheden waaronder deze optreden.

Appendix A: Hypothesen en doelstellingen ‘Kieren’ uit “Onderzoeksplan Verzilting”

Onderstaande tekst is afkomstig uit “Onderzoeksplan Verzilting” (Hydrologic, 2018) hoofdstuk 5.

Hypothesen Kieren

- 1 **Bepalend voor de hoeveelheid zout die binnenkomt** bij een vloedopening zijn:
 - Chlorideconcentraties (mate van stratificatie) voordelta
 - Grootte opening (hefhoogte zeeschuif)
 - Duur opening
 - Verval over de kering (afhankelijk van astronomisch getij, afvoer van de rivieren, momentane windeffecten, naijling van eerdere afwijkingen op astronomisch getij, effecten sluisbeheer)
- 2 **Bepalend voor de instroom vanuit de voordelta** is de stratificatie van de chlorideconcentraties in de voordelta, welke afhankelijk is van het voorgaande beheer van de sluizen, stroming op zee, wind en getijde.
 - Na een lange periode van periodiek spuien wordt direct voor de kering een grotere stratificatie van de voordelta verwacht. Hoe groter de spuivolumes des te lager zullen de chlorideconcentraties direct voor de kering zijn.
 - Nabij de sluizen vindt onder invloed van de hoge stroomsnelheden mogelijk een aanzuigende werking (entrainment) plaats op het water uit de diepere lagen.
 - Naast processen in verticale vlak spelen ook processen in horizontale vlak een rol. Ook in het horizontale vlak kunnen snelheidsverschillen worden waargenomen, met zelfs een retourstroming tijdens het inlaten.



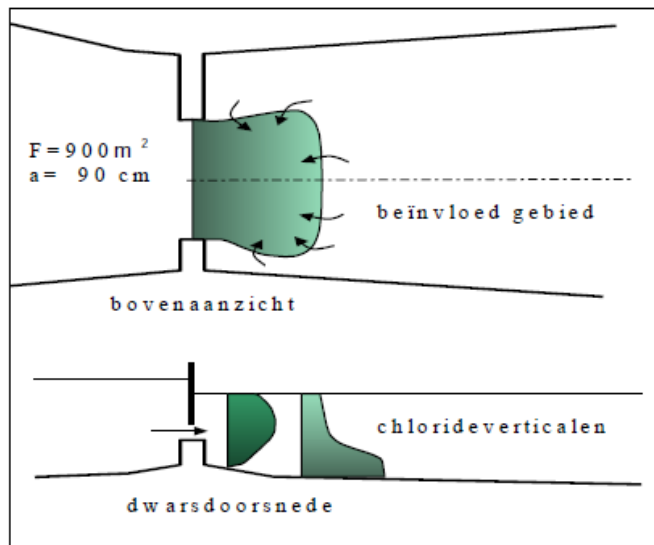
Figuur 6.1 *Entrainment van zout water uit de diepere lagen in de voordelta naar de instroom van de Haringvlietsluizen (Rijkswaterstaat 2003).*

- 3 **Bepalend voor de menging direct na de kering** is de snelheid waarmee het indringende zeewater het nagenoeg stilstaande zoete water van het Haringvliet instroomt via de sluisopeningen.
 - Bij instroom in het Haringvliet ontstaat een jet (schietend water) van enkele tientallen meters en menging met het ontvangende water in een beperkt gebied aan de oostzijde van de sluizen.
 - Een grotere sluisopening (grotere hefhoogte van de zeeschuif, maar gelijkblijvend totaal doorstroomoppervlak) zorgt voor beperktere verdere zoutindringing (*onderbouwing 3A*).

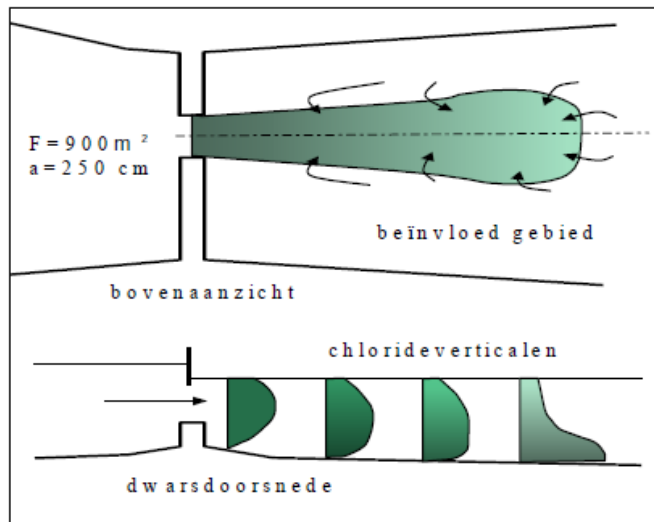
Datum
31 juli 2019

Pagina
38 van 45

- Dit kan te maken hebben met de grotere jet en daardoor meer turbulentie en menging direct na de sluizen, of doordat bij een grotere opening water met een andere samenstelling uit de voordelta wordt aangetrokken.
- Daarna zakt het zoute water uit (dichtheidsstroom) en ontstaat een gestratificeerde situatie (*onderbouwing 3B*). De afvoer van zoet rivierwater (tijdens spuiperiodes) via de bovenlaag versterkt de stratificatie van het systeem.

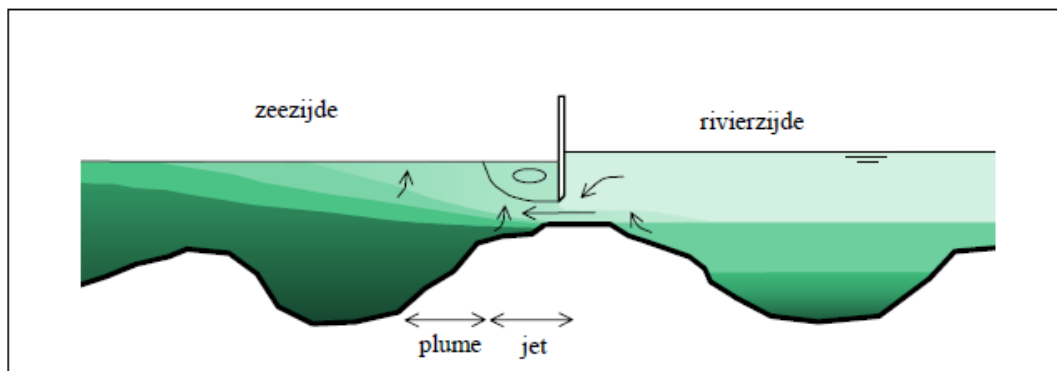


Figuur 3.5'



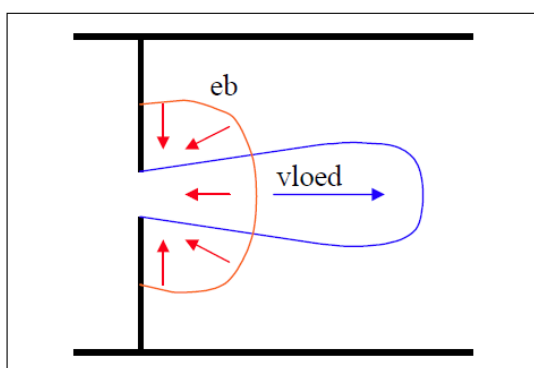
Figuur 6.2 Inlaten van zeewater met dezelfde totale opening maar verschillende sluisconfiguraties (Rijkswaterstaat 2003).

- 4 **Bepalend voor de uitstroom bij de ebopening** is de stratificatie van de chlorideconcentraties in het Haringvliet nabij de sluizen, welke vooral afhankelijk is van het voorgaande beheer van de sluizen en van wind.



Figuur 6.3 Afvoersituatie tijdens eb zoals verwacht in een min of meer dynamische stationaire situatie (Rijkswaterstaat 2003).

- Door het periodiek water in- en uitlaten bij vloed en eb stroomt niet hetzelfde water in en uit: dit zorgt voor een langwerpig instroompatroon via de sluizen het Haringvliet op en radiaal uitstroompatroon van het Haringvliet naar de sluizen. Bij het kieren zal netto zout aan het relatief zoete systeem worden toegevoegd, totdat zich een nieuw evenwicht heeft ingesteld.



Figuur 6.4 Een langwerpig instroompatroon het Haringvliet op en radiaal uitstroompatroon van het Haringvliet naar de sluizen zoals verwacht bij de Haringvlietssluisen tijdens kieren (Rijkswaterstaat 2003).

5 Zoutindringing verder op het Haringvliet vindt plaats door dichtheidsstroming.

- Bepalend voor de snelheid en de ruimtelijke spreiding van zoutindringing zijn het bodemprofiel, het reeds aanwezige zout (verzadiging) in diepere delen van het Haringvliet, en de spuivolumes.
- Het zoute water vult eerst de put naast de Haringvlietssluisen. Vervolgens ontstaat een dichtheidsstroming over de bodem (bij de visintrekproef van 1994 - vloedopening 120-240 m² - is de dichtheidsstroming ingeschat met een snelheid van 0.25 m/s en een laagdikte van 2 m).
- De zoutindringing gaat dan het snelste via voormalige getijdegeul zuidzijde (min NAP -8 tot -10 m) (*onderbouwing 5A*). De relatief hoge bodemligging aan de westkant van put Middelharnis beperkt de (horizontale) snelheid van zoutindringing vanaf dat punt.
- Zoutindringing gaat langzamer via de ondiepere noordzijde met verhoogde delen (max NAP -5 tot -8 m) tussen de putten (*onderbouwing 5B*). Eerst vullen de zandwinputten bij Hellevoetssluys, voordat het zoute water verder stroomt.

- 6 **Bepalend voor het bereiken van een dynamisch evenwicht** is de verhouding tussen het zout dat met de vloedstroom door de sluizen binnenstroomt, en het zout dat met de ebstroom door de sluizen uitstroomt.
- Op een gegeven moment is de hoeveelheid zout op het Haringvliet dynamisch stabiel. Afhankelijk van de grootte van de opening kan dat één tot enkele weken (bij grote opening) tot enkele maanden (bij kleine opening) duren (*expert inschatting*).
 - De ruimtelijke spreiding hoeft daarmee echter nog niet stabiel te zijn. Dat is vooral afhankelijk van de tegendruk door de rivierafvoer.

Doelstelling eerste onderzoeken

De eerste kieronderzoeken moeten het inzicht vergroten in:

- Stuurbaarheid van dynamisch evenwicht.
- Duur van bereiken dynamisch evenwicht.
- Processen die van invloed zijn op de zoutindringing (vloedstroom) en de stuurbaarheid daarvan: snelheid en ruimtelijk patroon.

NB. Naast de onderzoeken zoals in dit hoofdstuk beschreven, geeft het inlaten van zout water als voorbereiding op de eerste onderzoeken naar zoetspoelen en opmenging ook al inzicht in zoutindringing bij vloedopening: namelijk hoe (volgorde en snelheid) de eerste putten gevuld raken met zout water bij een kleine vloedopening.

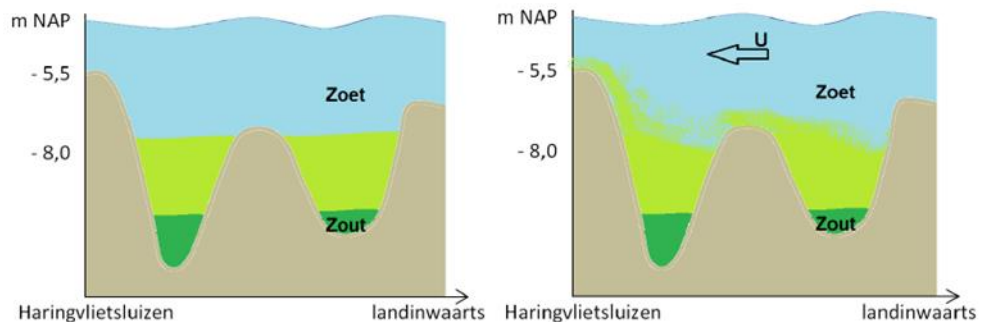
Appendix B: Hypothesen en doelstellingen ‘Zoetspoelen’ uit “Onderzoeksplan Verzilting”

Onderstaande tekst is afkomstig uit “Onderzoeksplan Verzilting” (Hydrologic, 2018) hoofdstuk 3.

Hypothesen Zoetspoelen

- 1 **Bepalend voor de effectiviteit van zoetspoelen (terugdringing totale hoeveelheid zout in Haringvliet)** zijn de volgende factoren, waarvan de verwachte invloed wordt toegelicht in de hypothesen 2 tot en met 5.
 - Het spuidebiet bij de Haringvlietssluisen. Mogelijkheden afhankelijk van Bovenrijnafvoer, verval over de kering en grootte ebopeningen.
 - Het bodemprofiel van het Haringvliet dat mede bepalend is voor de ruimtelijke variatie in stroomsnelheden op het Haringvliet.
 - De duur waarmee wordt gespuid. Vooral van belang bij relatief lage spuidebieten.
 - De windkracht en -richting. Vooral van belang bij relatief lage spuidebieten.
 - De mate van stratificatie (zoet-zout) in de uitgangssituatie. Hoe sterker gestratificeerd het systeem is, hoe lastiger opmenging en zoetspoelen is.
 - De ruimtelijke verdeling van het zout in de uitgangssituatie: in welke delen van het Haringvliet en op welke dieptes.
- 2 Bepalend voor de mogelijkheden (potentie) van zoetspoelen is **het toelaatbare en fysiek mogelijke spuidebiet bij de Haringvlietssluisen**.
 - Bij een ebstroom is er vrijwel direct effect op de concentraties in de *bovenste lagen* van de waterkolom. Dit deel van de waterkolom wordt advectioneel weggespoeld (*onderbouwing 2A*), waarmee eventuele verhoogde chlorideconcentraties worden teruggebracht tot nagenoeg de achtergrondconcentratie van het rivierwater op dat moment. De spronglaag wordt op deze manier verlaagd tot het bodemniveau van de hogere delen (‘drempels’) in het Haringvliet, die liggen op NAP -8 tot -5 m (zie bodemprofiel Haringvliet).
 - o NB. Aangezien zouter water zwaarder is dan het zoete rivierwater, vindt indringing van het zoute water met name in de diepere lagen plaats. Daarom is de verwachting dat met het advectioneel wegspoelen van de bovenste lagen slechts een beperkt deel van het aanwezige chloride uit het Haringvliet wordt weggespoeld. In situaties waarin door verticale opmenging (bijv. door wind) ook in de bovenste lagen verhoogde chlorideconcentraties voorkomen, kan het zoetspoelen van de bovenste lagen echter erg belangrijk zijn voor de functionaliteit van de inlaatlocaties (onttrekkingen vaak uit bovenste lagen).
 - Voor de *diepere lagen* van de waterkolom is de effectiviteit van zoetspoelen afhankelijk van het al dan niet toenemen van de stroomsnelheden en turbulentie in deze diepere delen. Bij een beperkte ebstroom is alleen sprake van een afschaafproces (*shear stress*), waardoor de spronglaag langzaam wordt verlaagd. De concentraties onder de spronglaag nemen echter nauwelijks af (*onderbouwing 2B*). Wanneer door een grotere ebstroom ook de lokale stroomsnelheden toenemen, kan turbulentie op het zoet-zout grensvlak ontstaan, waardoor het zoute water uit de diepere lagen wordt opgemengd en advectioneel kan worden weggespoeld. Bij welke ‘hogere stroomsnelheden’ dit effect kan worden verwacht, verschilt per put (diepte en geometrie) en is onderwerp van de eerste

onderzoeken van Lerend Implementeren. Op basis van de huidige inzichten is de verwachting dat verticale opmenging plaatsvindt *vanaf* een spuidebiet tussen de 1000 en 2000 m³/s spuidebiet bij de sluizen.



Figuur 6.5 Uitspoelen van zout water uit putten bij lage spuidebieten. Het zoute water wordt op het grensvlak van zoet en zout 'afgeschaafd', terwijl het zoute water op grotere waterdiepte aanwezig blijft (Deltares, 2016b).

- De grootte van de ebstroom wordt *primair bepaald door de sluisopeningen en het verval over de sluizen*. Het verval over de sluizen wordt bepaald door de uitgangswaterstand in het bekken en het laagwater op zee. De toelaatbare variatie in sluisopening wordt bepaald door de Bovenrijnafvoer, de wens om de ebdebieten door het Spui en de Dordtsche Kil te begrenzen (bepaalt ondergrens sluisopening) en de wens om voldoende waterstand bij Moerdijk te houden (bepaalt bovengrens sluisopening).
 - o NB. Een eerste spuiperiode is het verval over de kering over het algemeen het grootst waardoor een grote doorstroomopening dan ook voor het grootste debiet zorgt. Na een grote spui neemt het verval over de kering dusdanig af (*expert judgement*), dat de daaropvolgende spuiperiodes minder kan worden gespuid.
 - o NB. Voor de lokale stroomsnelheden zijn primair de grootte van de sluisopeningen en het bodemprofiel bepalend. Variatie in de precieze *verdeling van het doorstroomoppervlak over de verschillende sluizen* (sluisconfiguratie) heeft naar verwachting alleen invloed op het stromingspatroon vlakbij de sluizen. Verder van de sluizen af is het bodemprofiel bepalender voor de variaties in stroomsnelheden. Een andere sluisconfiguratie kan wel zorgen voor een ander zoetspoeldebiet: een doorstroomopening verdeeld over meerdere sluisopeningen zorgt namelijk voor een grotere weerstandswaarde en daarmee voor een kleiner debiet.
- 3 Bepalend voor de ruimtelijke variatie in de effectiviteit van zoetspoelen zijn de lokale stroomsnelheden (en het al dan niet ontstaan van turbulentie), die worden beïnvloed door **het bodemprofiel van het Haringvliet**.
- o De ebstroom volgt voor een belangrijk deel de geulen. Dat zijn de aaneengesloten lage delen van het Haringvliet (in de stromingsrichting) waar de stroomsnelheden in de diepere lagen naar verwachting groter zijn dan in de putten. Zo een geul loopt langs de zuidrand. Het zout zal daar naar verwachting echter ook verder zijn binnengedrongen. In de putten is pas bij hogere stroomsnelheden (turbulentie op het zoet-zout grensvlak) effect merkbaar (hypothese 2). De verwachting is dat in de diepe delen van putten altijd zout achterblijft, totdat een grote afvoergolf van de Rijn optreedt.

Datum
31 juli 2019

Pagina
43 van 45

- 4 Mede bepalend voor de effectiviteit van zoetspoelen is (tot op zekere hoogte) **de duur waarmee wordt gespuid**.
- Bij lage zoetspoeldebieten, waarbij nog geen verticale opmenging ontstaat, maar de spronglaag alleen wordt verlaagd door langzame ‘afschaving’ (*shear stress*), is er een directe relatie tussen de tijd waarmee dit debiet wordt ingezet en de verlaging van de hoeveelheid zout in het Haringvliet. Op een gegeven moment zal een langere duur zoetspoelen naar verwachting steeds minder opleveren.
 - NB. Op basis van Sobek berekeningen is een inschatting gegeven van een benodigde zoetspoelvolumen van 180 Mm³, gespuid over 6 getijperiodes. Mogelijk wordt de effectiviteit van zoetspoelen door het model overschat, omdat stratificatie niet wordt meegenomen en in het model meer zout met de bovenlaag wordt weggespoeld dan in de praktijk wordt verwacht.
- 5 Mede bepalend voor de effectiviteit van zoetspoelen bij lage spuidebieten is **de windkracht en -richting**.
- Sterke wind kan zorgen voor verticale opmenging van de chlorideconcentraties. Daardoor komt het zout van grotere waterdiepte omhoog en kan advectief worden weggespoeld. Naar verwachting is ten minste windkracht 6-7 nodig om voldoende turbulentie te krijgen rondom een spronglaag.
 - o NB. Wanneer een sterke westenwind zorgt voor opstuwing van de buitenwaterstand en afwaaiing van de binnenwaterstand, wordt het verval over de kering kleiner, en daarmee ook het potentiële spuidebiet. Dit effect is echter in de meeste situaties te corrigeren met een grotere spuioopening.

Doelstellingen eerste onderzoeken

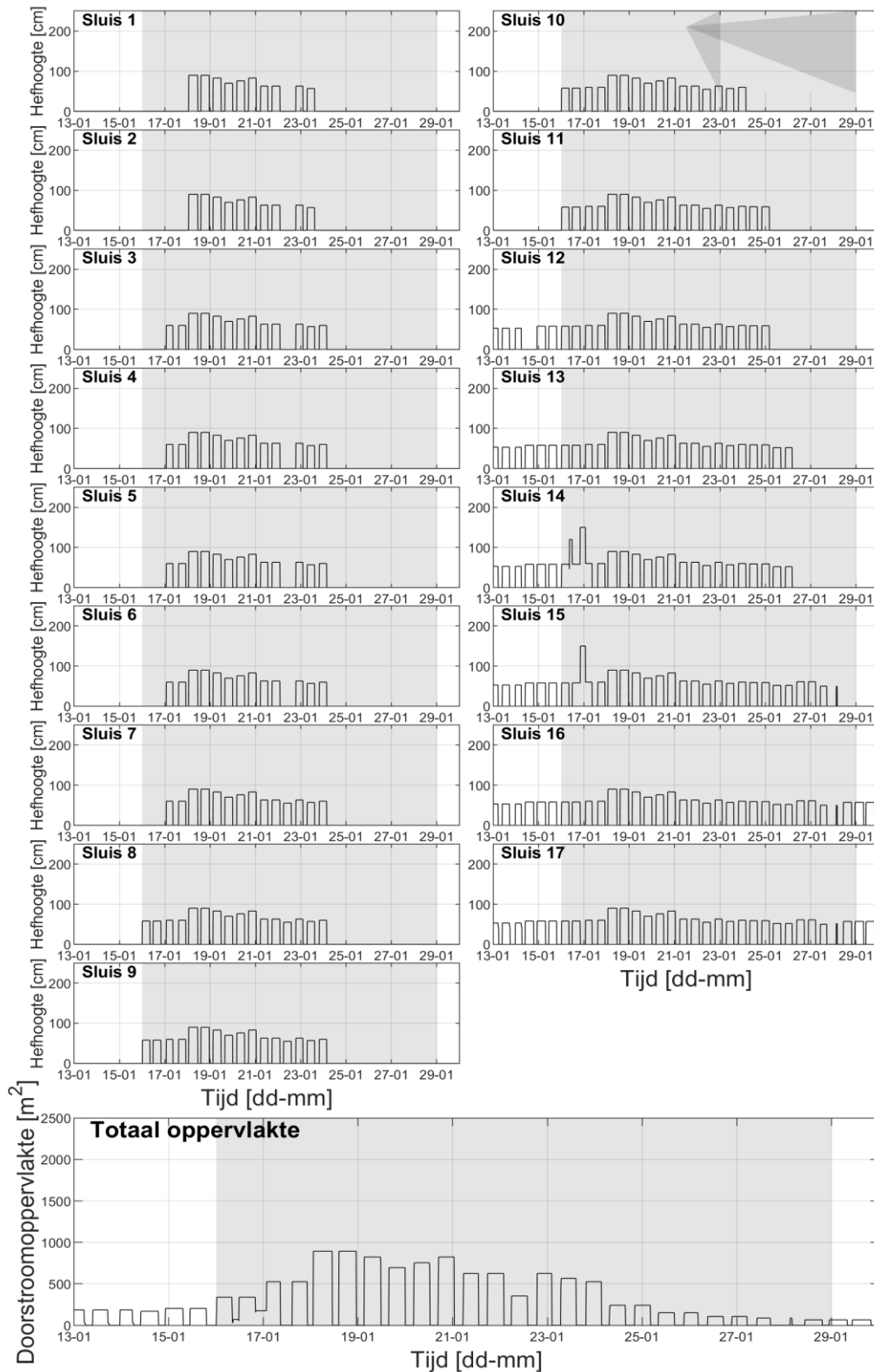
De eerste zoetspoelonderzoeken moeten het inzicht vergroten:

- In de relatie tussen zoetspoeldebet bij de sluizen en lokale stroomsnelheden (in de horizontaal en verticaal) in het Haringvliet.
- In de relatie tussen stroomsnelheden en de diepte van de spronglaag (en daarmee inzicht in het zoetspoelen van de diepe putten).
- In de relatie tussen stroomsnelheden en de zoutconcentraties in de ondiepere delen van de waterkolom.

Datum
31 juli 2019

Pagina
44 van 45

Appendix C: Hefhoogtes en doorstroomoppervlakte Haringvlietsluizen



Datum
31 juli 2019

Pagina
45 van 45

Appendix D: Zoutgehaltes op overige meetlocaties

