Deltares

Enabling Delta Life

Evaluatie bellenschermen Noordersluis IJmuiden

Noodmaatregel tijdens de droogte van 2018



Deltares

Evaluatie bellenschermen Noordersluis IJmuiden

Noodmaatregel tijdens de droogte van 2018

Otto Weiler
Arnout Bijlsma

© Deltares, 2019

Deltares

Titel
Evaluatie bellenschermen Noordersluis IJmuiden

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat	11203735-006	11203735-006-ZWS-0004	27

Trefwoorden
Zoutindringing, schutsluis, IJmuiden, Noordzeekanaal, droogte

Samenvatting
Tijdens de droge periode van 2018 heeft Rijkswaterstaat een aantal maatregelen genomen om de verzilting van het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal te beperken. Het betreft onder andere het aanbrengen van (nood-)bellenschermen op de Noordersluis te IJmuiden en het instellen van schutbeperkingen. Dit rapport bevat een evaluatie van de effectiviteit van die maatregelen, gebruik makend van tijdens die periode verzamelde gegevens, waaronder metingen van zoutgehalten in en buiten de sluiskolk van de Noordersluis.

Op basis van deze gegevens, en gebruik makend van de opgebouwde kennis op het gebied van zoutindringing door schutsluizen, wordt geconcludeerd dat de bellenschermen weinig effectief waren. De reden hiervoor is dat het bellenscherm, in zijn constructieve uitwerking, niet in staat was een voldoende groot luchtdebiet te produceren bij een aanvaardbare druk aan de compressor. Over de effectiviteit van de operationele maatregelen, het beperken van het aantal schuttingen en het zoveel mogelijk gesloten houden van de sluisdeuren, kan geen uitspraak worden gedaan, omdat er onvoldoende gegevens beschikbaar waren omtrent de uitvoering van de schutoperatie met en zonder de operationele maatregelen.

Referenties
"Plan van Aanpak KPP 2019 project WR02 2019 - Waterverdeling en Verzilting", versie 2.0, projectnummer 11203735

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	Mei 2019	Arnout Bijlsma Otto Weiler					
1.0	Nov. 2019	Otto Weiler en Arnout Bijlsma		Meinard Tiessen		Bas van Vossen	
1.2	Nov. 2019	Otto Weiler en Arnout Bijlsma		Meinard Tiessen		Bas van Vossen	
2.0	Dec. 2019	Otto Weiler en Arnout Bijlsma		Meinard Tiessen		Bas van Vossen	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Achtergrond 1
1.2 Vraagstelling 1
1.3 Aanpak 1

2 Procesbeschrijving **3**
2.1 Zouttransport door nivelleren 3
2.2 Zouttransport door kolkuitwisseling 3
2.3 Beperking zoutindringing: operatie, deur-opentijden 4
2.4 Beperking zoutindringing: operatie, leeg-omschutten 5
2.5 Beperking zoutindringing: bellenschermen 6

3 Genomen maatregelen bij de sluizen **9**
3.1 De schutoperatie in de betreffende periode 9
3.2 De bellenschermen op de Noordersluis 9
3.3 Het te verwachten effect op de zoutindringing 11

4 Analyse metingen **13**
4.1 Beschrijving metingen en initiële analyse 13
4.2 Analyse van de metingen naar variatie van het zoutgehalte 15
4.3 De gemeten zoutgehalten net buiten de kolk 16
4.4 Onderscheid tussen effect bellenschermen en variatie in de operatie 16
4.5 De bruikbaarheid van de meetopstelling 17

5 Discussie **19**
5.1 Algemeen 19
5.2 Een effectieve inzet van bellenschermen en operationele maatregelen 19
5.3 Aandachtspunten voor een meetopstelling 21

6 Conclusies en aanbevelingen **23**
6.1 Conclusies t.a.v. de in 2018 getroffen maatregelen 23
6.2 Aanbevelingen omtrent dezelfde maatregelen in een toekomstige droge periode 23
6.3 Algemene aanbevelingen omtrent maatregelen ter beperking van de zoutindringing 24

7 Referenties **27**

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Om het hoofd te beiden aan de verzilting van het hoofdwatersysteem is tijdens de droogte van 2018 een aantal maatregelen ingezet. Dat heeft tot een aantal vragen geleid, die, met het oog op een eventuele inzet van die maatregelen in de toekomst, een nadere evaluatie behoeven. Voor het Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal (ARK/NZK) betreft dat onder andere de werking van de bellenschermen op de Noordersluis, zie [1]. Van 3 september tot 14 december 2018 is er geëxperimenteerd met deze bellenschermen die tot doel hadden om de zout-zoetuitwisseling bij geopende sluisdeuren te verminderen. Citaat uit [1]: “In hun huidige vorm leken deze schermen minder effectief dan verwacht, maar er zijn verschillende optimalisaties mogelijk en denkbaar. Dit vereist nader onderzoek, mede op basis van beschikbare kennis zoals onderzocht in het kader van de innovatieve bellen-schermen voor Krammersluizen. Met het oog op vismigratie zijn de schermen vanaf 1 november in de donkere uren uitgezet.”

Vanaf 3 september 2018[1] is er bij IJmuiden bovendien geprobeerd optimaal te schutten, onder meer door deur-opentijden van de Noordersluis te verkorten, zie [1]. Deze manier van schutten had eveneens tot doel om de instroom van zout water te beperken. De effectiviteit is tevoren ingeschat door Deltares in een spoedadvies [2].

1.2 Vraagstelling

In een e-mail van 20 maart 2019 heeft RWS-WVL de vraag als volgt geformuleerd:

> *Een eerste analyse naar het effect van de bellenschermen met meetdata uit de Noordersluis, ingewonnen tijdens de operationele periode van het bellenscherm, is gedaan door RWS-WNN. Deltares wordt gevraagd deze analyse te checken en uit te breiden door gebruik van meer meetdata dan tot nu toe (….), door analyse van dag-nacht gedrag (als de bellenschermen ‘s nachts uitgeschakeld zijn), en door te verifiëren of het beeld klopt met eerder opgebouwde kennis over bellenschermen in schutsluizen. De hypothese is dat de bellenschermen weinig effectief zijn geweest. Bij een bevestiging van de hypothese is vervolgens van belang waarom dat het geval was, zodat bellenschermen in een toekomstige droogteperiode effectiever kunnen worden ingezet.*

1.3 Aanpak

Om deze vragen te beantwoorden is de volgend aanpak gevolgd.

- Eerst wordt het proces van zoutindringing door schutten beschreven. Hierbij wordt onder andere ingegaan op de fluctuaties van het zoutgehalte in de kolk die daarbij optreden, en hoe het zoutgehalte en de fluctuaties daarvan veranderen door het inzetten van bellenschermen: dit is waar de metingen informatie over kunnen geven.
- Omdat de schutoperatie van grote invloed is op de zoutindringing wordt hier ook aandacht aan besteed: de invloed hiervan moet worden onderscheiden van de invloed van de bellenschermen,

[1] *In Par 3.1 wordt 26 juli 2018 als datum genoemd, gerapporteerd in [2].*

- Vervolgens worden de geïnstalleerde bellenschermen beschreven, en wat van die bellenschermen verwacht kan worden. Hierbij wordt onder andere ingegaan op de locatie van de bellenschermen en het luchtdebiet. Ook wordt kort ingegaan op de wijziging in de operatie die in de zomer is opgelegd.
- Daarna worden de metingen en de initiële, door RWS uitgevoerde analyse besproken en vervolgens wordt een aanvullende analyse gepresenteerd.
- Het memo wordt dan afgesloten met een discussie van de bevindingen en de conclusies en aanbevelingen voor de komende periode.

De verwachting van de effectiviteit van de bellenschermen wordt gebaseerd op de kennis die in de afgelopen jaren is opgebouwd. Dit betreft kennis opgedaan in de studies naar een zout Volkerak-Zoommeer en de dan noodzakelijke maatregelen op de Volkeraksluizen, en de kennis uit de projecten in voorbereiding op de inzet van de Innovatieve Zout-Zoetscheiding op de Krammersluizen.

2 Procesbeschrijving

Zoutindringing door schutsluizen is (in hoofdzaak) het gevolg van twee processen: het nivelleren en de kolkuitwisseling, waarbij in IJmuiden de tweede, de kolkuitwisseling, veruit de belangrijkste is. Naast deze twee processen speelt ook het volume van de schepen dat de sluis passeert een rol, maar deze is veel kleiner, omdat het volume van de schepen in de kolk in het algemeen maar een beperkt percentage is van het volume van de kolk. Dit wordt in dit memo verder buiten beschouwing gelaten.

2.1 Zouttransport door nivelleren

Het nivelleren leidt tot een transport van water van de kant met een hogere waterstand naar de kant met een lagere waterstand. Bij een waterstand op het kanaal van ca. NAP -0,40 m en een gemiddeld zeeniveau van 0,04 m NAP zal het nivelleerdebiet gemiddeld meer naar binnen gericht zijn dan naar buiten. Bovendien heeft het nivelleerdebiet van buiten naar binnen een hoger zoutgehalte dan dat de andere kant op, en dus zal er door het nivelleren een netto zouttransport naar binnen ontstaan.

Het dagelijkse zouttransport naar binnen is in orde van grootte gelijk aan het product van het volume van de schutschijf, het zoutgehalte aan de buitenkant en het aantal schuttingen per etmaal.

Het gemiddelde volume van de schutschijf is 400*50*(0,04 + 0,40) = 8,8 10^3 m^3. Met 13,9 schuttingen per dag uit het scenario ‘Autonome Ontwikkeling’ (Noordersluis, ladingstroom 95 MTPA) uit [3] levert dit een gemiddeld nivelleerdebiet op van 1,4 m^3/s.

2.2 Zouttransport door kolkuitwisseling

Omdat het zoute water aan de buitenkant een hogere dichtheid heeft dan het relatief zoete water aan de binnenkant, zal er bij het openen van sluisdeuren steeds een dichtheidsstroming ontstaan: het zoutere water zakt uit, en stroomt in de richting van de zoete kant, en het zoetere water stroomt daarover heen richting de zoutere kant. Als de deuren lang genoeg open staan kan praktische de hele kolkinhoud worden uitgewisseld. Aangezien de sluisdeuren afwisselend naar de ene en naar de andere kant openstaan, waarbij aan beide zijde de kolkuitwisseling optreedt, zal er per schutcyclus een volume in de orde van grootte van het volume van de kolk uitwisselen: zoutwater naar binnen en zoetwater naar buiten.

Het dagelijkse zouttransport naar binnen is daarmee in orde van grootte gelijk aan het product van het volume van de kolk, het verschil in zoutgehalte tussen buitenkant en binnenkant en het aantal schuttingen per etmaal.

Het gemiddelde volume van de kolk is 400*50*15 = 3 10^5 m^3. Met 13,9 schuttingen per dag lever dit bij volledige kolkuitwisseling een uitwisselingsdebiet op van 48,3 m^3/s.

Aangezien het volume van de kolk aanzienlijk groter is dan het volume van de schutschijf, speelt de kolkuitwisseling een dominante rol in de zoutindringing.

Zowel voor de volumes als voor de uitwisselingsdebieten is de verhouding ongeveer een factor 35. Ook als deze factor daalt door gedeeltelijke uitwisseling, blijft de conclusie gelden.

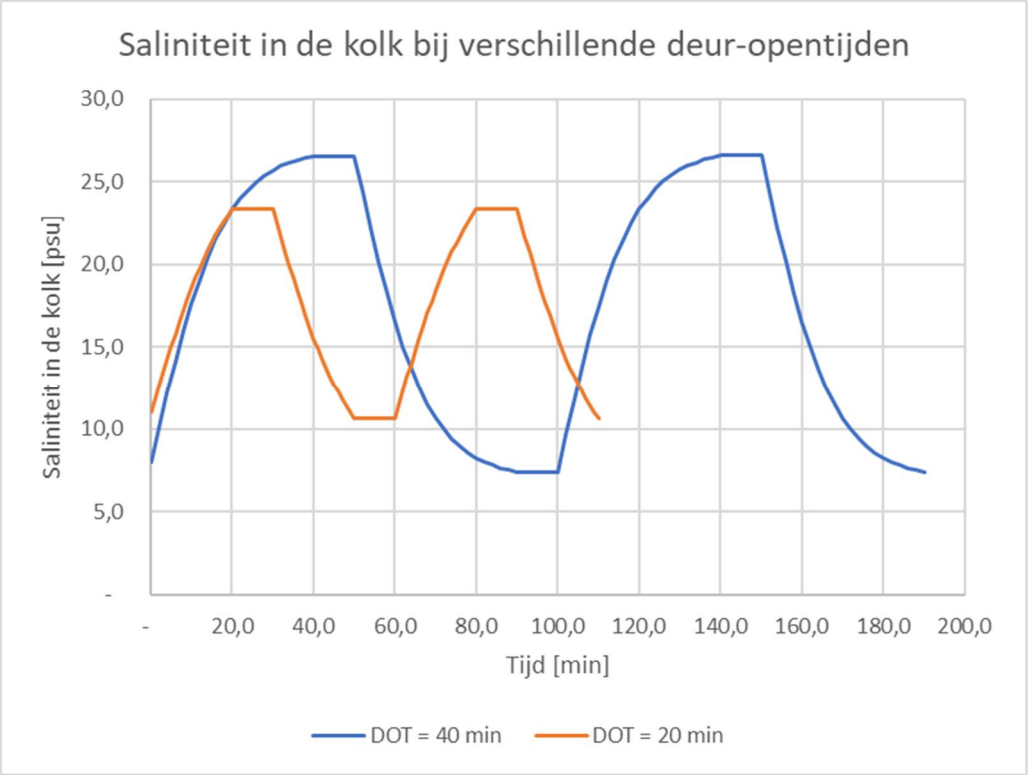
2.3 Beperking zoutindringing: operatie, deur-opentijden

Uit het bovenstaande volgt ook welke mogelijkheden er zijn om de zoutindringing te beperken:

- beperking van het aantal schuttingen;
- beperken van de tijd dat de sluisdeuren open staan, waardoor de kolk kan uitwisselen;
- beperken van de snelheid van de kolkuitwisseling door de inzet van bellenschermen.

Het is daarbij van belang op te merken dat de eerste twee aspecten in zekere zin met elkaar in tegenspraak zijn: als er wordt gekozen voor het beperken van het aantal schuttingen, zal dat er in de praktijk in eerste instantie toe leiden dat de deuren langer open staan, waardoor de kolk voor een groter deel kan uitwisselen, waardoor het zouttransport per schutting groter is. Deze relatie is in augustus van 2018 uitgewerkt en gepresenteerd in een bespreking inzake mogelijke maatregelen in IJmuiden [2].

In onderstaande figuur is aangegeven hoe het gemiddelde zoutgehalte in de kolk verloopt als gevolg van het afwisselend openen van de beide deuren. (Het effect van nivelleren is hierbij niet meegenomen.) Dit verloop heeft het kenmerk van een tangens hyperbolicus (zie o.a. [5]). De deur-opentijd is hierbij de tijd dat de deur aan een kant open staat. Rekening houdend met het proces van het openen en het sluiten van de deur wordt de deur-opentijd meestal gedefinieerd als de periode vanaf halverwege het openen van de deur tot halverwege het sluiten van de deur.



Figuur 2.1 Gemiddeld zoutgehalte (psu) in de kolk van de Noordersluis berekend voor deur-opentijden (DOT) van 40 en 20 minuten bij een zoutgehalte van 27 psu aan de zeezijde en 7 psu aan de kanaalzijde.

In deze figuur is de Noordersluis beschouwd (L=400m, B= 50m, H=15m), met aan de buitenkant een zoutgehalte van 27 psu en aan de binnenkant een zoutgehalte van 7 psu. (De

aangenomen waarden van 27 en 7 psu zijn representatief voor die locatie, maar dienen hier slechts als uitgangspunt om de relevante processen mee te illustreren.)

De beide lijnen geven aan hoe de kolk eerst zouter wordt als de deur aan de buitenkant open staat en vervolgens weer zoeter wordt als de deur naar de binnenkant open staat. Bij de blauwe lijn staat de deur steeds 40 minuten open en nadert de saliniteit in de kolk de waarde buiten de kolk (resp. 27 en 7 psu): het zoutgehalte in de kolk varieert tussen 26,6 psu en 7,4 psu: een range van 19,2 psu. Als de deur-opentijd slechts 20 minuten bedraagt kan de kolk slechts gedeeltelijk uitwisselen: het zoutgehalte in de kolk varieert nu tussen 23,3 psu en 10,7 psu: een range van 12,6 psu, ca. 2/3^{e} van de range bij een deur-opentijd van 40 minuten.

De variatie van het zoutgehalte in de kolk is een maat voor het zouttransport per cyclus: de kolk wordt zouter als de deur open staat naar buiten toe, en dat zout wordt weer los gelaten aan de binnenkant als de deur open staat naar de binnenkant. Het zouttransport per cyclus is gelijk aan het volume van de kolk maal de range in de saliniteit. Door de deur-opentijd beperkt te houden wordt de range van variatie van het zoutgehalte beperkt gehouden, en daarmee het zouttransport per cyclus.

Een kortere deur-opentijd leidt, in principe, tot een kortere duur van de hele schutcyclus, en zou dus ook kunnen leiden tot een groter aantal cycli per etmaal, waarmee de totale zoutindringing weer zou toenemen. Deze afweging speelt ook in de praktijk: is het beter om te wachten (met de deur open) tot er meer schepen in de sluis zijn, of is het beter om een enkel schip maar vast te schutten en dus vaker heen en weer te gaan met kortere deur-opentijden? Deze afweging is uitgewerkt in [2]. Daaruit bleek dat het beperken van het aantal cycli, dus schutten met vollere kolken, een (licht) positief effect zou kunnen hebben (zie ook Paragraaf 3.1).

Minstens zo belangrijk echter is om, wanneer het variërende aanbod aan schepen dat toestaat, de open staande deur te sluiten na het uitvaren van een schip, en deze niet open te laten staan in afwachting van een volgend schip. Ook dit zou in de afgelopen zomer geprobeerd zijn, maar daarover zijn geen data beschikbaar.

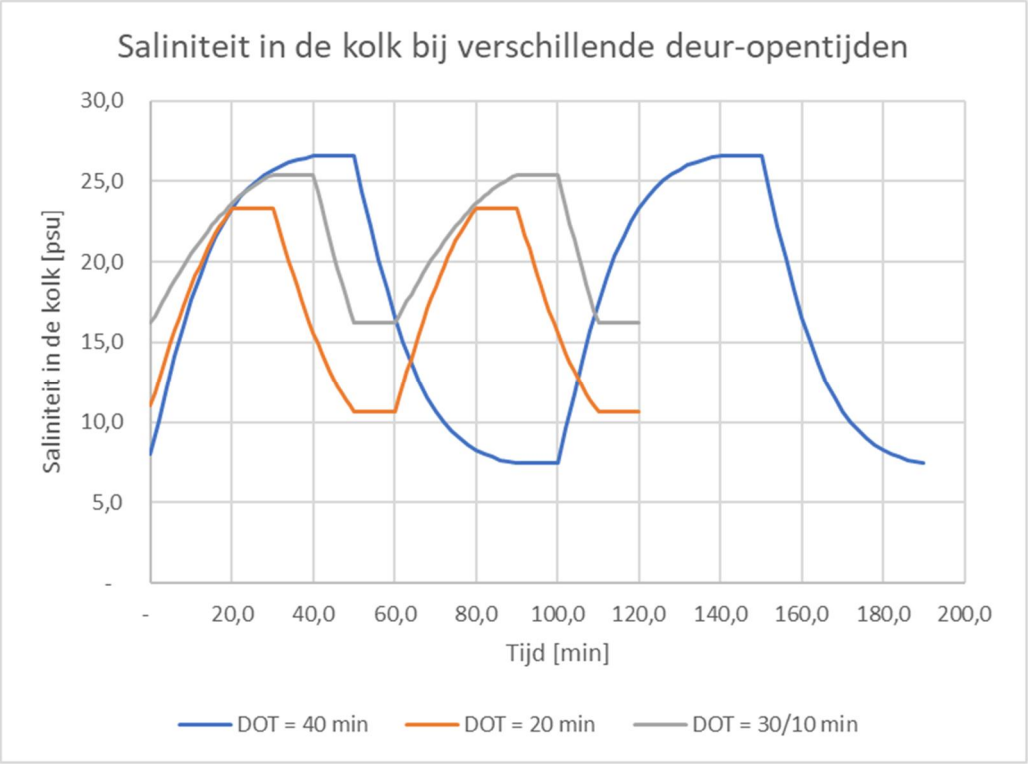
Ter illustratie geven we het volgende getallenvoorbeeld. De zoutinhoud van de kolk[2] varieert van ~8 10^6 kg zout bij 26,6 psu tot ~2 10^6 kg zout bij 7,4 psu, of een zouttransport van ~6 10^6 kg zout per schutting in geval van een deur-opentijd van 40 minuten. Voor de deur-opentijd van 20 minuten is dit ~7 10^6 kg zout bij 23,3 psu tot ~3 10^6 kg zout bij 10,7 psu, of een zouttransport van ~4 10^6 kg zout per schutting. Gecombineerd met het aantal schuttingen per dag levert dit het zouttransport op voor de Noordersluis. Voor bijv. 13,9 schuttingen per dag is dit 644 of 965 kg zout/s bij deur-opentijden van respectievelijk 20 en 40 minuten. Qua orde van grootte sluit dit goed aan bij een eerdere schatting van het optredende zouttransport van 600 à 750 kg zout/s voor het hele sluizencomplex, waarin de bijdrage van de Noordersluis verre weg het grootst is [3].

2.4 Beperking zoutindringing: operatie, leeg-omschutten

Een bijzonder aspect van de operatie in de praktijk met een variabel aanbod aan schepen is het zogenaamde leeg-omschutten: na het uitvaren van een schip is er geen schip dat mee ‘terug’ wil, maar wel een schip dat het eerdere schip achterna wil. De sluis gaat dan leeg terug naar de andere kant op dat schip ‘op te halen’. De figuur hieronder brengt het effect hiervan in

*[2] Zoutinhoud kolk (kg zout) = gemiddeld zoutgehalte in de kolk (psu) * kolkvolume (3 10^5 m^3)*

beeld: de deur-opentijd aan de ene kant is nu 30 minuten en aan de andere kant slechts 10 minuten.



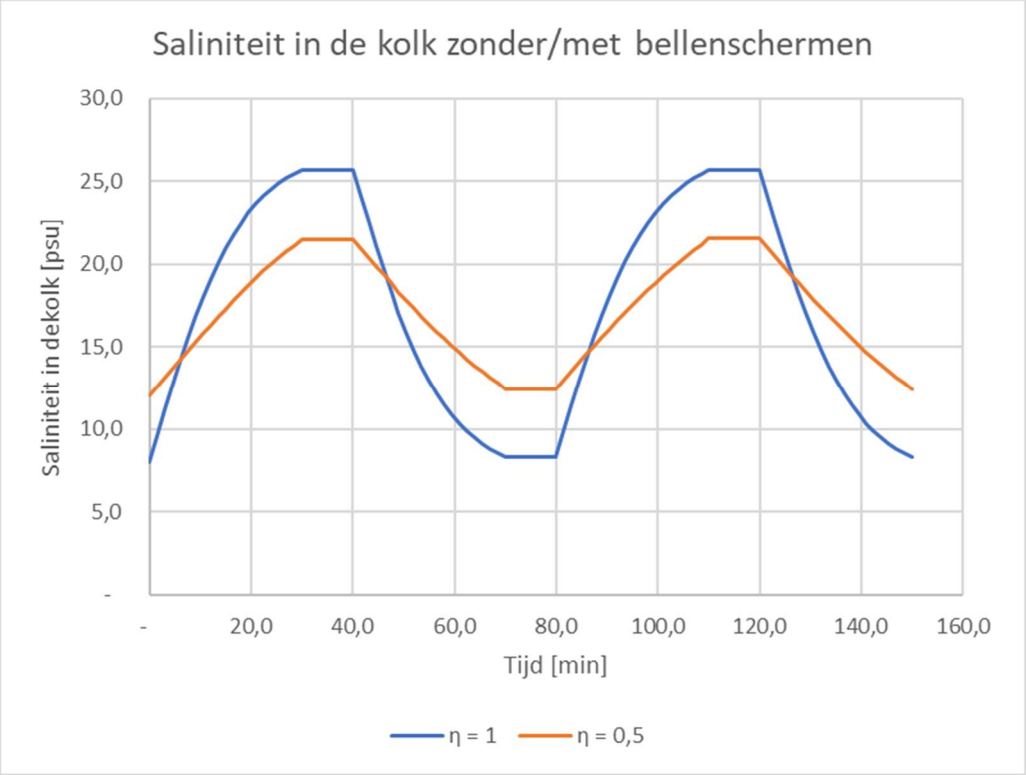
Figuur 2.2 Gemiddeld zoutgehalte (psu) in de kolk van de Noordersluis berekend voor leeg-omschutten met ongelijke DOT van 30 en 10 minuten, vergeleken met deur-opentijden van 40 en 20 minuten.

De figuur laat zien dat de variatie in het zoutgehalte in de kolk nu kleiner is dan wanneer de kolk aan beide kanten even lang open staat: het zoutgehalte in de kolk varieert nu tussen 25,4 psu en 16,2 psu: een range van 9,2 psu. Dit is weer significant lager dan de range van 12,6 psu bij deur-opentijden van 20 minuten aan beide kanten. De verklaring hiervoor is dat tijdens de korte deur-opentijd, hier aan de zoete kant, de kolk maar beperkt de kans krijgt om uit te wisselen, waardoor het zoutgehalte in de kolk vrij hoog blijft. Als de kolk dan weer aan de zoute kant open gaat is het verschil in zoutgehalte tussen de kolk en de zoute voorhaven beperkt, waardoor de kolkuitwisseling minder snel verloopt; dit is zichtbaar aan de minder steile helling van de grijze lijn.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het beperken van leeg-omschutten niet op voorhand bijdraagt aan het beperken van de zoutindringing.

2.5 Beperking zoutindringing: bellenschermen

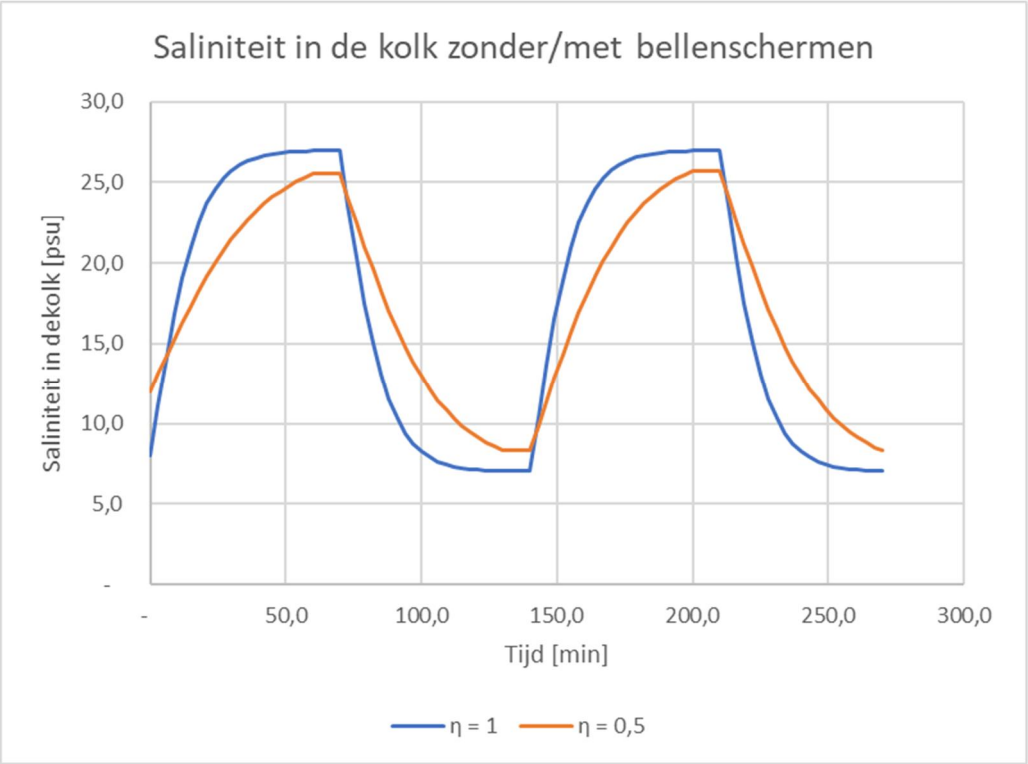
Het toepassen van bellenschermen beperkt de snelheid van de kolkuitwisseling. Dit is op een vergelijkbare manier weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 2.3 Gemiddeld zoutgehalte (psu) in de kolk van de Noordersluis berekend voor de situatie zonder bellenschermen (doorlaatfractie η = 1) en bellenschermen (η = 0,5) met deur-opentijden van 30 minuten.

De beide lijnen zijn bepaald voor een deur-opentijd van 30 minuten. De blauwe lijn geeft de situatie aan zonder bellenschermen (η = 1, waarbij η de doorlaatfractie is). De saliniteit in de kolk varieert nu tussen 25,7 en 8,3 psu, een range van 17,4 psu. De oranje lijn geeft de situatie aan met bellenschermen die de snelheid van de kolkuitwisseling halveren (η = 0,5). De saliniteit in de kolk varieert nu tussen 21,5 en 12,5 psu, een range van 9,0 psu, bijna de helft van de range zonder bellenschermen.

Het beperken van de snelheid van de kolkuitwisseling heeft alleen zin als de deur-opentijden beperkt blijven. Ter illustratie is in onderstaande figuur aangegeven wat het effect van het bellenscherm is als de deuren aan beide zijden steeds 60 minuten open staan. Zoals is te zien is het effect van het bellenscherm dan nog maar beperkt. Het inzetten van een bellenscherm moet dus gepaard gaan met het beperkt houden van de deur-opentijden.



Figuur 2.4 Gemiddeld zoutgehalte (psu) in de kolk van de Noordersluis berekend voor de situatie zonder bellenschermen (doorlaatfractie η = 1) en bellenschermen (η = 0,5) met deur-opentijden van 60 minuten.

3 Genomen maatregelen bij de sluizen

In het kader van verziltingsbeheersing heeft RWS tijdens de droogte van 2018 verschillende maatregelen genomen bij de sluizen van IJmuiden, waaronder het plaatsen van bellenschermen bij de Noordersluis, en het optimaliseren van de schutoperatie. Omdat deze maatregelen elkaar in de tijd overlappen en elkaar beïnvloeden worden deze beide maatregelen, voor zover ons bekend, hieronder besproken.

3.1 De schutoperatie in de betreffende periode

Om de zoutindringing te beperken heeft RWS per 26 juli een schutbeperking ingevoerd. Deze is beschreven in [2]:

> *Vanwege de droogte en de lage afvoer is met ingang van 26 juli 2018 een schutbeperking ingevoerd, die inhoudt dat er zoveel mogelijk wordt geschut met 'volle kolken', dat wil zeggen dat er met schutten gewacht wordt als er daardoor meerdere schepen in dezelfde schutting mee kunnen naar de andere kant. Ook wordt het leeg-omschutten (leeg naar de andere kant om een van die kant naderend schip 'op te halen') zoveel mogelijk vermeden. Om de hinder voor de scheepvaart, en daarmee de economische schade, te beperken is een maximale wachttijd van 1,5 uur afgesproken.*

Uit data van het Havenbedrijf Amsterdam is geanalyseerd dat het aantal schuttingen kleiner werd, waardoor ook het percentage leeg-omschuttingen kleiner werd. Het gemiddeld aantal schepen per schutting ging daarbij omhoog. [2] Op basis van benaderende berekeningen werd ingeschat (zie [2]) dat de reductie in het aantal schutcycli van ca. 12,2 naar ca. 10 per etmaal een beperking van de zoutvracht zou kunnen opleveren van ca. 12%. Daarin is niet apart rekening gehouden met het kleine positieve of negatieve effect van het reduceren van de leeg-omschuttingen. Zoals blijkt uit Paragraaf 2.4 leveren die, bij een beperkte deur-opentijd aan een kant, een beperkte bijdrage aan de zoutindringing. Wat uiteindelijk het effect is van de ingevoerde schutbeperking is niet bekend.

In hetzelfde memo [2] wordt geadviseerd om de deur-opentijden beperkt te houden door, wanneer mogelijk, de deur te sluiten na het uitvaren van een schip als er geen schip is dat aansluitend wil invaren, en vervolgens, als er een schip nadert, de deur niet eerder te openen dan strikt noodzakelijk. Omdat de betrouwbaarheid van de beweging van de deur beperkt is, is er permanent een storingsmonteur aanwezig geweest op de sluis, zodat bij een eventuele storing direct kon worden ingegrepen. In welke mate de operatie daadwerkelijk is aangepast en wat dat heeft opgeleverd is niet bekend.

3.2 De bellenschermen op de Noordersluis

In hetzelfde memo is ook een inschatting gegeven van wat er verwacht zou mogen worden van het inzetten van bellenschermen, waarbij is uitgegaan van een doorlaatfractie van $\eta = 0{,}5$. In aansluiting op dat memo heeft RWS besloten om 'tijdelijke' bellenschermen te installeren op de Noordersluis. Vanuit Deltares is daarbij (per e-mail van 27 augustus 2018) geadviseerd over het luchtdebiet, en het aantal gaatjes dat nodig is om dat debiet bij een beperkte, maar wel voldoende drukval te kunnen leveren. Het luchtdebiet is daarbij in eerste instantie afgeleid van het ontwerp van de bellenschermen die lang geleden op de Noordersluis hebben gewerkt [4]. Dit systeem bestond uit een ronde buis van harde kunststof met, naar beneden gericht, een

groot aantal kleine gaatjes. Op elk sluishoofd was daarbij een luchtdebiet nodig van 150 Nm^3/min^3.

Onder andere om de hinder voor de scheepvaart te beperken is ervoor gekozen om de bellenschermen op enige afstand buiten de sluiskolk te plaatsen. Op de gekozen locatie was de afstand tussen de wanden wat groter, 60 m i.p.v. 50 m, en daarom is het benodigde debiet verhoogd tot 180 Nm^3/min. De constructieve uitwerking van het tijdelijke bellenscherm werd door RWS-WNN met de aannemer gebaseerd op een rubberen slang met daarin een groot aantal kleine gaatjes. Deze slang werd in secties van 10 m gevoed vanuit een aanvoerleiding met een grotere diameter; dit om de drukval over de slang, die een beperkte diameter had, beperkt te houden. Dit ontwerp week daarmee sterk af van het systeem dat eerder op de Noordersluis operationeel is geweest.

Het plaatsen van de bellenschermen bij de Noordersluis ging met enige publiciteit gepaard van RWS en Altas Copco, zie Foto 3.1 en Foto 3.2.



Foto 3.1 Rijkswaterstaat plaatst bellenschermen bij de Noordersluis (1-9-2018 nieuwsbladijmuiden.nl)



Foto 3.2 Bellenscherm in detail (links; RWS op twitter) en Bellenscherm in werking (rechts; www.atlascopco.com

Atlas Copco Rental leverde de compressoren aan Rijkswaterstaat, in opdracht van Van Doorn Geldermalsen BV, zie [4]. De website van Atlas Copco beschrijft de lay-out van de bellenschermen en de compressoren. Er zijn 2 PTS 1600 diesel aangedreven 100% olievrije

[3] *N refereert naar normale atmosferische druk en temperatuur (1 bar, 20°C)*

luchtcompressoren ingezet, één per sluishoofd, met elk een maximaal luchtdebiet van ca. 45 Nm^3/min, zie ook het filmpje op YouTube. Voor de PTS1600 geeft Altas Copco de volgende specificaties:

- Drukbereik: 10 tot 150 psi - 0,5 tot 10,3 bar,
- Debietbereik: 1300 tot 1600 cfm - 37,4 - 45,7 m^3/min,
- Vermogen bij maximum belasting: 399 kW,
- Brandstofverbruik bij maximum belasting: 84 l/uur.

De bellenschermen zijn ook vanaf een schip goed zichtbaar, zie bijvoorbeeld Foto 3.3. Op de kade staan aanvankelijk 4 compressoren, zie de foto's: één compressor voorziet het bellenscherm van perslucht, één compressor staat stand-by, de overige twee zouden later worden weggehaald.

De bellenschermen stonden continu aan. Dit heeft ermee te maken dat het automatisch schakelen van de compressoren c.q. het luchtdebiet naar het relevante sluishoofd in relatie tot de schutoperatie niet op korte termijn te realiseren was.



Foto 3.3 Noordersluis, sluisdeur en bellenscherm aan zeezijde gezien vanaf een schip in de kolk (Foto Olaf Panneck op Google Earth)

3.3 Het te verwachten effect op de zoutindringing

Uit communicatie per e-mail (12 september 2018) bleek dat het luchtdebiet per sluishoofd uiteindelijk beperkt was tot ca. 36 Nm^3/min, bij een druk aan de compressor van 5 bar. Dit debiet was dus aanzienlijk kleiner dan de gevraagde 180 Nm^3/min, namelijk slechts 20% daarvan. Kennelijk was de weerstand in het systeem (de drukval over de leidingen en appendages) zodanig groot dat bij een druk aan de compressor van 5 bar er niet meer debiet doorheen kon.

Op basis van de beschikbare kennis (zie [5] voor een overzicht van de projecten op dit onderwerp in de afgelopen jaren) is geprobeerd een schatting te maken van het effect op de zoutindringing. Met dat doel zijn een aantal berekeningen opgezet. Startpunt van deze

berekeningen was de situatie met de oude bellenschermen in de sluishoofden met een luchtdebiet van 150Nm^3/s [4]. Hiermee kiezen we ter referentie dus voor een bellenscherm dicht bij de deuren, en niet op enige afstand zoals in 2018 toegepast. Hiermee laten we het effect van de afstand tussen de deuren en de bellenschermen buiten beschouwing.

Bij een deur-opentijd van 30 minuten, en een verschil in zoutgehalte over de sluis van 20 psu (buiten 30 psu, binnen 10 psu ofwel ca. 5500 mg/l) blijkt met 150 Nm^3/s een doorlaatfractie te realiseren van $\eta = 0,5$. Bij 10 schutcycli per dag zou dit bellenscherm de zoutvracht door de Noordersluis (daggemiddeld, exclusief het effect van nivelleren) reduceren van 540 kg/s naar ca. 280 kg/s.

Als we in dezelfde berekeningen een luchtdebiet van 20% daarvan hanteren, 30 Nm^3/s, dan blijken de gebruikte formules niet meer bruikbaar: het luchtdebiet is zo klein dat de formules buiten hun geldigheidsrange vallen. (De formules berekenen een doorlaatfractie groter dan 1, iets wat niet te verwachten is.) Bij een luchtdebiet dat twee keer zo groot is, ca. 60 Nm^3/s, vallen de formules in de geldigheidsrange en daarbij wordt een doorlaatfractie berekend van $\eta = 0,93$, waarmee de daggemiddelde zoutvracht gereduceerd zou worden van 540 kg/s naar 513 kg/s: een reductie met ca. 5%.

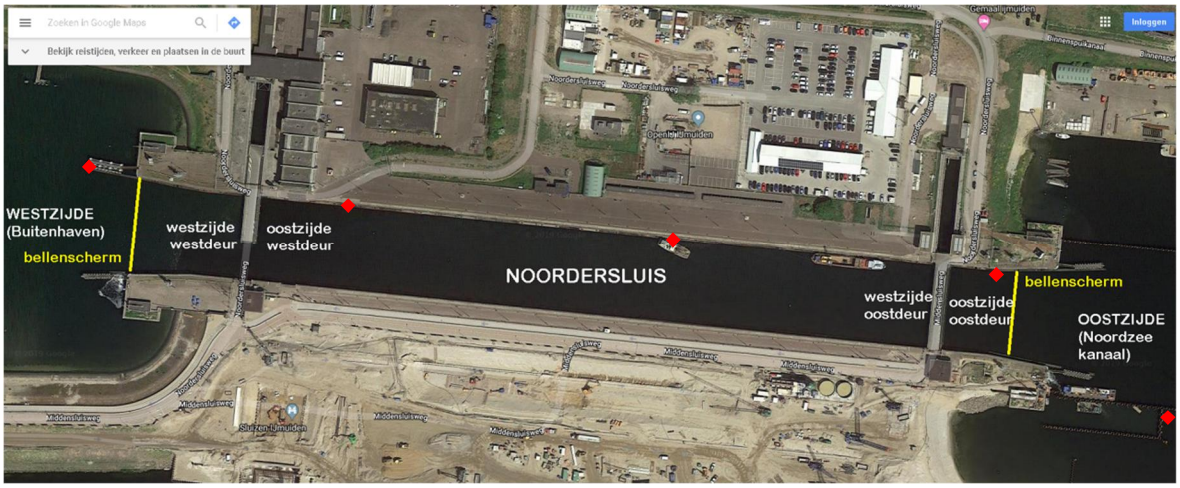
Op basis van de beschikbare kennis moeten we dus concluderen dat er van de tijdelijke bellenschermen met een luchtdebiet van 36 Nm^3/s eigenlijk geen enkel effect mag worden verwacht. (Dit staat nog los van het feit dat de afstand tussen de bellenschermen en de sluisdeuren negatief werkt op de effectiviteit van het bellenscherm.)

4 Analyse metingen

4.1 Beschrijving metingen en initiële analyse

Op 9 april 2019 heeft Deltares van RWS (email A. Kikkert) data van de zoutmetingen bij de Noordersluis ontvangen. De metingen starten op 1 september 2018, nog voor het westelijke bellenscherm operationeel is. Op 18 september 2018 zijn beide bellenschermen (oost en west) operationeel. Tot 14 november 2018 zijn er zoutmetingen uitgevoerd. Aanvankelijk zijn er regelmatig metingen uitgevoerd waarbij CTD profielen zijn gemeten op wisselende posities, o.a. in de sluiskolk. Daarnaast zijn metingen uitgevoerd met 'Divers' die continu meten op vaste posities in en bij de Noordersluis. De laatste set betreft zulke Diver metingen in de periode van 8 – 14 november 2018. Doordat in deze periode de bellenschermen overdag werken en 's nachts zijn uitgezet voor vismigratie is er gedurende bijna een volledige week vergelijkbare meetinformatie van beide condities, zodat de werking van de bellenschermen in principe kan worden geanalyseerd.

De opstelling van de meetinstrumenten in de periode van 8 – 14 november 2018 wordt geïllustreerd door Figuur 4.1 en Tabel 4.1 (bron: RWS, file *logboek Noordersluis.xlsx*). De opstelling is zodanig dat in principe het gedrag van het zout in de kolk van de Noordersluis, en aan weerszijden van de bellenschermen kan worden gevolgd.



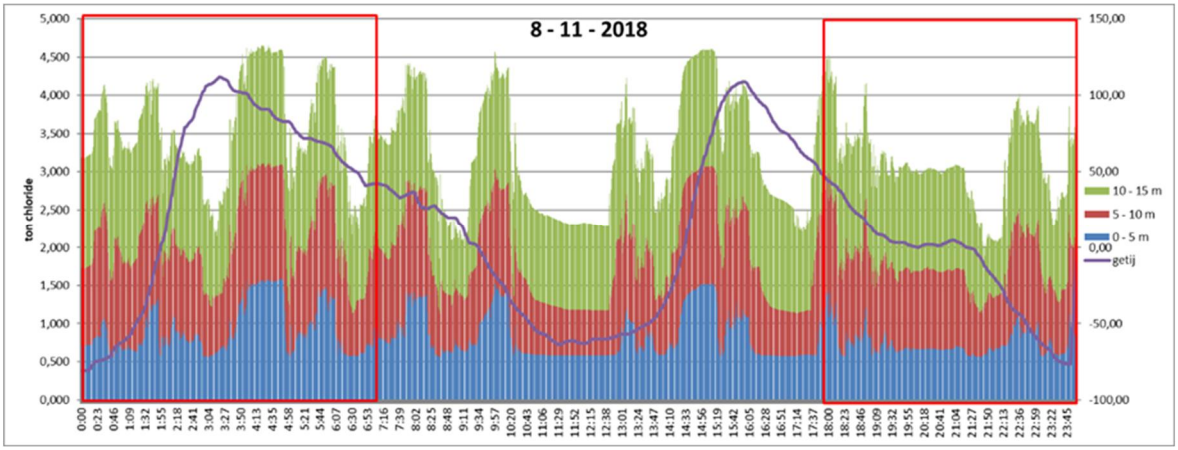
Figuur 4.1 Posities bellenschermen (geel) en meetpunten (rood) bij Noordersluis van 8 – 14 november 2018.

Tabel 4.1 Positionering van de 15 Divers bij de metingen op de Noordersluis van 8 – 14 november 2018

	Divers buiten-haven	Bellen-scherm west	Deur west	Divers kolk west	Divers kolk midden	Deur oost	Divers oost	Bellen-scherm oost	Divers kanaal zijde
Toplaag	13	b	d	1	4	d	7	b	10
Midden	14	b	d	2	8	d	5	b	11
Bodem	15	b	d	3	9	d	6	b	12

Uiteindelijk bleken de bevestigingstouwen van de Divers kolk west en Divers oost te zijn gebroken. De Divers 7,5,6 en 1 zijn later opgedoken. Divers 2 en 3 zijn verloren gegaan. Voor de metingen in de kolk resteren de Divers 4, 8, en 9, centraal in de kolk. Van deze metingen is de geleidbaarheid omgezet in chlorideconcentratie. Hiermee is door RWS een schatting gemaakt van de chloride inhoud van de kolk, onder aanname dat elke meetwaarde

representatief was voor een schijf van 5 m dikte. Het resultaat hiervan, het verloop van de chloride inhoud van de kolk in de tijd, is weergegeven in Figuur 4.2. De eenheid is 10^6 kg Cl^- (NB. Hierbij is een correctie toegepast op de oorspronkelijke waarden, met een factor 1000).



Figuur 4.2 Voorbeeld van het verloop in de tijd van de geschatte hoeveelheid chloride in de kolk (10^6 kg Cl^-) van de Noordersluis (8 november 2018) in de vorm van gestapelde kolommen. De rode vakken markeren de periodes met bellenschermen uit (Bron: RWS, file DIVER004.xlsx).

In het tijdsverloop van de chloride inhoud van de kolk zou het gedrag beschreven in Hoofdstuk 2 herkenbaar moeten zijn. Voor het tangens hyperbolische verloop van het zoutgehalte in de kolk lijkt dat inderdaad het geval, zie bijv. Figuur 4.2 van ca. 10:20 – 13:00 en van 14:30 – 15:00. De top van de gestapelde kolommen geeft een benadering van de hoeveelheid zout in de kolk op basis van de drie sensoren. Voor het verloop in de tijd van de kolkuitwisseling is deze schatting echter aan de grove kant. Voor de sensor boven in de waterkolom (in blauw) zien we bijvoorbeeld steeds een scherpe overgang van een hoog zoutgehalte naar een laag zoutgehalte: dat zijn de momenten dat, tijdens de kolk-uitwisseling, het zoetere kanaal water dat de kolk instroomt de sensor passeert. Dit gebeurt vrij vroeg in het proces van kolkuitwisseling, maar de kolkuitwisseling is dan al even gaande: het zoete water heeft dan al de halve kolklengte afgelegd. De overgang naar de zoutere waarde, van dezelfde sensor, verloopt veel meer geleidelijke omdat er dan, veel later in het proces van kolkuitwisseling, al veel meer menging gaande is, en het bovendien lang duurt voordat het laatste zoete water de kolk verlaat. Dit trage proces verklaart het asymptotisch verloop van de tangens hyperbolicus. Maar ook als de bovenste sensor al helemaal ‘zout’ is, is er nog een dunne laag zoeter water aanwezig boven de sensor. Deze metingen geven daarom onvoldoende houvast om nauwkeurig de snelheid van de kolkuitwisseling te bepalen om daarmee een verschil te vinden voor de situatie met en zonder bellenschermen.

De effecten van variatie in deur-opentijden en leeg-omschutten zouden eveneens zichtbaar moeten zijn door kenmerkende verschillen in de verandering van de chloride inhoud bij de corresponderende schuttingen. Aangezien de exacte deur-opentijden van de schuttingen niet bekend zijn[4], is het lastig om dit puur uit het verloop van de chloride inhoud van de kolk te halen. Een effect van bellenschermen die overdag aan staan, is niet zichtbaar. Dan zouden de

[4] *De in het bestand DIVER004.xlsx opgenomen schutinformatie is niet compleet. De gegeven tijden duiden waarschijnlijk een schutronde aan. Informatie over leeg-omschutten ontbreekt. De precieze deur-opentijden (per deur) zijn niet beschikbaar. RWS-WNN heeft de daarvoor opgevraagde SCADA gegevens van de Noordersluis niet op tijd ontvangen om mee te kunnen nemen in deze analyse.*

verschillen tussen de extreme waarden bij de betreffende schuttingen merkbaar gereduceerd moeten zijn ten opzichte van de nachtelijke, wat niet het geval is.

RWS heeft geprobeerd het effect van de bellenschermen te kwantificeren door de gemiddelde hoeveelheid chloride in de kolk te bepalen daarbij onderscheid makend tussen bellenschermen 'aan' (overdag) en bellenschermen 'uit' ('s nachts), per dag en over de gehele periode van 8 – 14 november 2018, zie Tabel 4.2. Op zondag was er een compressorstoring, waardoor een van de bellenschermen niet heeft gewerkt. In de schatting is daarom onderscheid gemaakt tussen op zondag wel of geen bellenschermen. Het resultaat is, dat over de gehele periode gezien, de chloride inhoud van de kolk met bellenscherm 'aan' 2,5 a 3 % lager is dan zonder bellenschermen. We vermoeden dat dergelijke verschillen binnen de nauwkeurigheid van de schatting van de chloride inhoud van de kolk vallen.

Tabel 4.2 Schatting door RWS van de gemiddelde hoeveelheid chloride in de kolk (10^6 kg Cl^-) van 8 – 14 november 2018, met onderscheid bellenscherm aan (overdag) en bellenscherm uit (18:00 – 7:00 h)

	gemiddeld aantal ton per minuut		
	bellenscher	bellenscherm	
	uit	aan	
do	3,533	3,235	
vrij	3,210	3,324	
za	3,528	3,188	
zo	3,320	3,402	zondag compessor storing
ma	3,431	3,277	
do	3,399	3,319	
wo	3,228	3,316	
gemiddeld	3,381	3,276	als zondag geen bellenscherm
	verschil:	3,1 %	
gemiddeld	3,378	3,294	
	verschil:	2,5 %	als zondag ook bellenscherm

De gemiddelde chloride inhoud van de kolk kan met een factor 1,8 vertaald worden naar een gemiddelde zoutinhoud van de kolk op basis van de relatie psu = 1,80655 Cl^- (g/l). Voor de gemiddelde zoutinhoud van de kolk volgt dan een waarde van ~6 10^6 kg zout. Dit stemt redelijk overeen met de gemiddelde zoutinhoud van de kolk op basis van de zoutgehaltes uit Hoofdstuk 2 van ~5 10^6 kg zout (gem. ca. 17 psu maal het kolkvolume 3 10^5 m^3).

Uit de beschrijving in Hoofdstuk 2 blijkt echter dat de gemiddelde zoutinhoud of chloride inhoud van de kolk niet echt anders hoeft te liggen in de situatie met en zonder bellenschermen: de bellenschermen zouden moeten leiden tot een reductie van de variatie van het zoutgehalte (zie Figuur 2.3). Dat betekent dat de in Tabel 4.2 gepresenteerde vergelijking van de gemiddelde chloride inhoud van de kolk voor de situatie met en zonder bellenschermen geen representatieve maat is voor de werking van de bellenschermen.

4.2 Analyse van de metingen naar variatie van het zoutgehalte

Op basis van de beschrijving in Hoofdstuk 2 verwachten we de werking van de bellenschermen met name terug te zien in een geringere variatie in de tijd van de hoeveelheid zout in de kolk. Een eenvoudige manier om te kijken of een dergelijke invloed aanwezig is in de metingen, is om de standaard deviatie van de hoeveelheid zout in de kolk te bepalen voor de gehele periode, met onderscheid naar tijden met bellenscherm aan en bellenscherm uit. Het resultaat is weergegeven in Tabel 4.3. Conform de analyse van RWS is er ook nog rekening gehouden

met de mogelijkheid dat een bellenscherm (of de bellenschermen) op zondag niet aan stond(en).

Tabel 4.3 Schatting gemiddelde en standaardafwijking van de hoeveelheid chloride in de klok van donderdag 8 – woensdag 14 november 2018, met onderscheid bellenscherm aan (overdag) en bellenscherm uit (18:00 – 7:00 h), rekening houdend met de duur van de deelperioden.

do 8 nov 2014 0:00	Bellenscherm uit, 18:00-6:59			Bellenscherm aan 7:00-17:59			Opmerkingen
tot	gemiddeld	stdev	duur	gemiddeld	stdev	duur	
wo 14 nov 2018 10:21	(10^6kg Cl^-)	(10^6kg Cl^-)	(min.)	(10^6kg Cl^-)	(10^6kg Cl^-)	(min.)	
gemiddeld	3,37	0,57	5100	3,27	0,62	4162	als zondag geen bellenscherm
verschil:				-3,0 %	9,2 %		
gemiddeld	3,37	0,55		3,29	0,63		als zondag ook bellenscherm
verschil:				-2,2 %	14,1 %		

De gemiddelde waarden komen goed overeen met de waarden gegeven door RWS in Tabel 4.2 inclusief de 2 à 3% lagere chloride inhoud van de kolk als de bellenschermen aan staan. Nieuw is de informatie over de standaardafwijking. Op basis van Par. 2.5 is de verwachting dat een succesvolle werking van de bellenschermen zou moeten resulteren in een gereduceerde variatie van het zoutgehalte in de kolk. Dit blijkt echter geenszins het geval: de standaardafwijking blijkt voor de periode met bellenschermen ‘aan’ zelfs te zijn toegenomen met ongeveer 10% (9 à 14%). Dit kan samenhangen de schutoperatie: als door een andere schutfrequentie, andere deur-opentijden of meer of minder leeg-omschuttingen, het zoutgehalte vaker een waarde heeft die ver van het gemiddelde af ligt, dan neemt de standaard deviatie toe, maar dit zegt dan nog niets over het transport van zout door de sluis. Dit is niet verder onderzocht, omdat goede informatie over de schutoperatie ontbreekt.

4.3 De gemeten zoutgehalten net buiten de kolk

Daarnaast is er gekeken naar de metingen in de buitenhaven (Divers 13, 14 en 15) en aan de kanaalzijde (Divers 10, 11 en 12). De geleidbaarheid (mS/cm) is aan beide zijden van de sluis op 3 niveaus gemeten, maar niet uitgewerkt naar chlorideconcentratie (mg/l). Bij de Divers aan de buitenzijde wordt een sterke onrealistische drift in de geleidbaarheid waargenomen in de eerste 2½ dag. Diver 15, aan de bodem waar het hoogste zoutgehalte verwacht wordt, geeft het meest stabiele signaal. Daaruit leiden we af dat het zoutgehalte aan de zeezijde van de Noordersluis bij de bodem gemiddeld 29,6 psu bedraagt, en de gemiddelde temperatuur 11,6 °C. Aan de kanaalzijde wordt het zoetste water aan het oppervlak gevonden. Het zoutgehalte is gemiddeld 11,1 psu en de temperatuur gemiddeld 13,0 °C over de periode van 8 - 14 november 2018 (Diver 10). Deze waarden komen redelijk overeen met de getallen gehanteerd in Hoofdstuk 2 en 3.

4.4 Onderscheid tussen effect bellenschermen en variatie in de operatie

Om het effect van de bellenschermen te onderscheiden van effecten van eventuele variatie in deur-opentijden (incl. ev. verschillen tussen dag en nacht; leeg-omschutten) is meer gedetailleerde informatie over de deurbewegingen nodig. Zoals eerder vermeld, heeft RWS-WNN de daarvoor opgevraagde SCADA gegevens van de Noordersluis niet op tijd ontvangen. Uit de schutregistratie opgenomen in de datafile (DIVER004.xlsx) is afgeleid dat 27% van de schuttingen leeg-om is. Daarmee komt de gemiddelde schutfrequentie op 11,0 schuttingen per dag. Dit is ruim 20% lager dan de 13,9 schuttingen per dag in één richting in het PMSS Scenario voor Autonome Ontwikkeling (Noordersluis, ladingstroom 95 MTPA), en ongeveer 10% lager dan de 12,2 schuttingen per dag genoemd in Par. 3.1. Een kanttekening hierbij is wel dat het

verloop van het zoutgehalte in de kolk de indruk wekt dat er soms schuttingen ontbreken in het beschikbare overzicht.

Zonder degelijke gegevens over de sluisoperatie is een verdere, meer gedetailleerde analyse van het effect van de bellenschermen niet mogelijk. Anderzijds: met dergelijke metingen is misschien wel meer mogelijk, maar dat zou ook veel werk zijn, waarvan de meerwaarde voor deze evaluatie betwijfeld kan worden: het veranderd niets aan de constatering dat van het kleine luchtdebiet geen significant effect verwacht kan worden.

4.5 De bruikbaarheid van de meetopstelling

Positief resultaat van de exercitie uit 2018 is dat de monitoringopzet gebaseerd op het meten van de zoutinhoud van de kolk, ook met een beperkt aantal opnemers, in principe bruikbaar lijkt om de effecten van maatregelen bij de kolk te evalueren. Ter vergelijking: bij de veldproef in de Stevinsluis [8] zijn 25 opnemers gebruikt in de kolk (5 verticalen met elk 5 opnemers) en bij de Pilot op de Krammerjachtensluis 18 opnemers (3 verticalen met elk 6 opnemers). Voorwaarde is wel dat de analyse wordt uitgebreid naar de variatie van de zoutinhoud afhankelijk van de schuttingen. Dit is er op gebaseerd dat het kenmerkend gedrag uit Hoofdstuk 2 is terug te zien in het verloop van de zoutinhoud (vergelijk Figuur 4.2). Wel is het wenselijk wat meer inzicht te krijgen in de nauwkeurigheid waarmee de zoutinhoud van de kolk kan worden geschat. De voortplanting van de dichtheidsstromen en eventuele effecten van schepen in de kolk op de meting (bijv. bij afmeren langs de instrumenten) kunnen daarbij een rol spelen.

5 Discussie

5.1 Algemeen

Het belangrijkste mechanisme voor zoutindringing door de sluizen in IJmuiden is de kolkuitwisseling onder invloed van dichtheidsstroming ten gevolge van de verschillen in zoutgehalte over de sluisdeuren (Hoofdstuk 2). De bijdrage van het nivelleringsdebiet is kleiner, en ook de bijdrage van de waterverplaatsing door de schepen zal naar verwachting gering zijn. Het beperken van de tijd dat de deuren openstaan, eventueel gecombineerd met bellenschermen kan een effectieve maatregel zijn om de zoutindringing te beperken, bijvoorbeeld in perioden wanneer er onvoldoende zoetwater is om zoutproblemen te beteugelen (Hoofdstuk 2).

Het vermoeden dat de bellenschermen bij de Noordersluis in 2018 weinig effectief zijn geweest om de zoutindringing te beperken, wordt bevestigd door de schatting op basis van de beschikbare kennis (Par. 3.3) en door de analyse van de metingen in de Noordersluis (Par. 4.2). De voornaamste reden hiervoor is dat het toegepaste luchtdebiet van 36 Nm^3/min slechts 20% bedroeg van het geadviseerde luchtdebiet (180 Nm^3/min), zie Par. 3.3. Dat het debiet niet groter was wordt toegeschreven aan de weerstand in het systeem (de drukval over leidingen en appendages) waardoor de druk aan de compressor de limiterende factor werd.

De bellenschermen bij de Noordersluis werden in 2018 gecombineerd met een zekere optimalisatie van de schutoperatie. Hoe groot het effect van de afzonderlijke maatregelen is, is moeilijk vast te stellen bij gebrek aan een bruikbare registratie van de schutoperatie, waaronder de deur-opentijden.

5.2 Een effectieve inzet van bellenschermen en operationele maatregelen

Om bellenschermen bij de Noordersluis in een toekomstige droogteperiode effectiever te kunnen inzetten spelen, afgezien van het luchtdebiet, nog andere aspecten een rol. Deze worden in het onderstaande kort beschreven. Dit betreft o.a. de eisen die aan een goed bellenscherm gesteld kunnen worden, de operationele kosten (energiegebruik) en de impact op de scheepvaart.

Bij het begrip effectiviteit wordt gedacht aan de reductie van de zoutindringing versus de daarvoor te maken kosten en de impact op de operatie. De beperking van de zoutindringing zou vervolgens weer door vertaald kunnen worden naar een beperking van de hoeveelheid zoetwater die nodig is om het zoutgehalte in het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal te beperken, maar daarbij speelt ook de verspreiding van het zout (over het kanaal en in de tijd) een rol. Die verspreiding bepaalt het zoutgehalte op specifieke locaties waar bepaalde waarden niet mogen worden overschreden. Uiteindelijk gaat het dus over het beheer van het watersysteem op zoutgehalte, waarbij in tijden van droogte andere doelen en maatregelen in beeld zijn, dan in tijden dat er voldoende zoetwater beschikbaar is. Een dergelijke complete beschouwing van de effectiviteit valt uiteraard buiten de scope van dit project. Dit rapport draagt echter wel een aantal bouwstenen aan. In een vervolg op deze studie kunnen deze worden uitgewerkt, onder andere tot een schetsontwerp van een installatie, inclusief een indicatie van de kosten, om daarmee bij te dragen aan keuzes ten behoeve van het beheer op zoutgehalte in tijden van droogte.

Effectiviteit en luchtdebiet:

- Een bellenscherm moet stabiel zijn: dat wil zeggen dat de opstijgende lucht een stabiele waterbeweging opwekt die een stabiele scheiding vormt tussen kolk en voorhaven. Dit is nodig voor een effectieve reductie van de kolkuitwisseling, maar ook om het scherm veilig door te kunnen varen.
- Voor een stabiel scherm is een doorlaatfractie van 0,5 (bovengrens) een vereiste; uit deze doorlaatfractie is het minimaal benodigde luchtdebiet te berekenen: voor de tijdelijke bellenschermen op de Noordersluis is daarvoor een waarde van 180 Nm^3/min bepaald.
- Een lagere doorlaatfractie (een sterkere scheiding tussen kolk en voorhaven) is ook stabiel, maar dat zal een steeds groter luchtdebiet vragen en zal een steeds sterkere waterbeweging opwekken met mogelijk negatieve implicaties voor het veilig manoeuvreren.

De installatie:

- Het vereiste luchtdebiet is zodanig groot dat het gepaard zal gaan met een groot energiegebruik; het is voor dat energiegebruik niet gunstig om de bellenschermen op beide sluishoofden continu aan te hebben staan; dit betekent dat de bellenschermen uit- en weer aangezet zouden moeten worden als onderdeel van de schutoperatie.
- Om deze schakeling automatisch te laten plaatsvinden is een verbinding nodig met de bediening / besturing van de sluis.
- De installatie moet zodanig zijn dat, bij het inschakelen, het bellenscherm op het zelfde moment over de hele breedte opstart, zodat de waterbeweging uniform is over de breedte van het sluishoofd; dit is van belang voor zowel de effectiviteit als het manoeuvreren; (het bellenscherm moet dus niet beginnen aan de kant van de luchtaanvoer en zich dan langzaam uitspreiden richting de andere kant).
  - Deze en andere vereisten vormen de kern van de specificatie van de bellenschermen voor de Krammersluizen, zoals gebaseerd op uitgebreid onderzoek (o.a. [8] en [9]); (de uitvraag aan de markt is in voorbereiding).
  - Echter, ook een eenvoudiger installatie, vergelijkbaar met het systeem dat ooit op de sluis in bedrijf is geweest (zie [4]) zou bij een goed ontwerp van de installatie en een juiste manier van opereren afdoende kunnen zijn.
- Om, gegeven het luchtdebiet, het energiegebruik te beperken moet de drukval over de leidingen en appendages beperkt worden gehouden, waardoor de druk aan de compressor beperkt gehouden kan worden; dit vraagt om een goede dimensionering van het hele systeem.
- Er zijn afwegingen te maken voor een permanente versus een tijdelijke opstelling, en daarbij horen afwegingen voor diesel-gedreven of elektrisch aangedreven compressoren, met implicatie voor o.a. kosten (investering en operatie), geluidsoverlast en luchtkwaliteit.

De schutoperatie

- De inzet van bellenschermen geeft een extra argument om de deur-opentijden te beperken: bellenschermen vertragen de kolk-uitwisseling, maar stoppen die niet, dus om de kolk-uitwisseling te beperken moet de deur-opentijd (nog steeds) worden beperkt; daarnaast zal het beperken van de deur-opentijd leiden tot een lager energiegebruik.
- Omdat de sluis niet 24/7 vol bezet is, en er dus nog enige marge zit in de capaciteit, is er enige speelruimte in de te volgen strategie, bijvoorbeeld: het beperken van het aantal schuttingen (met als consequentie meer schepen per schutting en dus langere deur-opentijden) of het beperken van de deur-opentijden (met als consequentie een groter aantal schuttingen) en eventueel het beperken van de schuttingen ‘leeg-om’. Welke strategie het meeste effect oplevert (beperken zoutindringing) bij een aanvaardbare wachttijd (te definiëren) is niet op voorhand duidelijk. Er is dus ook geen goede uitspraak

te doen in welke mate de afgekondigde maatregel een positief effect gehad heeft op de zoutindringing.
- Een evident positieve maatregel is om, als er geen schepen zijn die geschut willen worden, de deuren van de sluis te sluiten.
- Een goede analyse van het effect van operationele maatregelen vraagt om een gerichte studie, die zou bestaan uit de volgende elementen:
  – beschrijving (kwalitatief) of simulatie (kwantitatief) van de scheepvaart-afhandeling bij verschillende strategieën: hoe verloopt dan de sluisoperatie en wat wordt daarbij de wachttijd; een simulatie uit te voeren met een model als SIVAK[5];
  – de deur-bewegingen van deze simulatie gebruiken als randvoorwaarde voor het berekenen van de zoutindringing.

Een vergelijkbare studie is eerder voorgesteld in het kader van de bouw van de Nieuwe Zeesluis, met name voor de periode dat de nieuwe sluis gereed is en in bedrijf komt, maar de Selectieve Onttrekking nog niet.

- De bellenschermen kunnen impact hebben op het manoeuvreren. Hoe groot die impact zal zijn, voor verschillende afmetingen van schepen, daarover bestaat maar weinig kennis. Bij Terneuzen wordt door de loodsen soms gevraagd om het bellenscherm uit te zetten omdat dit tot onvoorspelbare dwarskrachten zou leiden. Voor welke schepen dit is en of en hoe dit samenhangt met de aard van het bellenscherm en de stabiliteit van de waterbeweging is op dit moment niet te zeggen. Een dergelijke impact zou ertoe kunnen leiden dat ook in IJmuiden voor bepaalde schepen de vraag gesteld zal worden om het bellenscherm uit te zetten voor het invaren van de kolk, met consequenties voor de effectiviteit.

5.3 Aandachtspunten voor een meetopstelling

Aanbevolen wordt om tijdig een meetplan op te stellen om gesteld te staan om de effecten bij toekomstige toepassing bellenschermen en eventuele andere maatregelen te analyseren in het geval van een nieuwe droge periode (Par. 4.2). Door op basis van dit memo goede hypotheses op te stellen, kunnen met gerichte metingen de effecten van maatregelen geëvalueerd worden. Dit kan bijdragen aan een grote besparing op de kosten van de metingen en de inzet van mensen in kritieke omstandigheden.

De volgende aspecten zouden in het meetplan aan de orde kunnen komen:
- Doel van de monitoring of meting.
  – Informatiebehoefte, wie, wat, frequentie? Input voor zoute BOS?
- Aanpak voor monitoren zouttransport door de sluis op basis van een van de twee onderstaande principes (verder uitgewerkt in de alinea's onder deze lijst):
  – het meten van de zoutinhoud van de kolk met vaste zoutmeters,
  – het vastleggen van de sluisoperatie, met parameters als deur-opentijden, schepen, waterstanden, nivelleren, etc. (nader te bepalen hoe deze operationele data dan in te winnen).
- Meetopzet en data-inwinning uitwerken. Posities, processing, QA, etc.
- Analyseren van het zouttransport.
  – Door de geregistreerde deur-opentijden te combineren met de variatie van de zoutinhoud van de kolk kan het zouttransport worden bepaald over een zekere

[5] *Er wordt door RWS gewerkt aan een dergelijk simulatiemodel als opvolger van het model van Rink Groenveld, dat gebruikt is in het kader van de capaciteitsstudies t.b.v. de Nieuwe Zeesluis; zie bv [10], [11], [12], en [13].*

periode. Middeling bijv. op dag- of weekbasis, afhankelijk van informatiebehoefte en nauwkeurigheid.

- Rapporteren van (gemiddeld) zouttransport, maar ook aantal schuttingen, deur-open tijden per deur, bezettingsgraad van de kolk, bellenschermen aan of uit, en eventuele trends hierin.

De meetopzet met vaste zoutmeters op bijv. 3 plaatsen en op 3 niveaus in de kolk is kwetsbaar gebleken. Een dergelijke opzet vergt veel onderhoud en/of back-up systemen omdat het risico bestaat dat de gehele monitoring stopt bij uitval van instrumenten. Als alternatief kan mogelijk het 3D beeld van het zoutgehalte in de kolk gemeten worden met ERT (Electric Resistivity Tomography). Een andere mogelijkheid is het zouttransport in de mond van het Noordzeekanaal te monitoren met behulp van een relatief eenvoudige meetopstelling van drie of meer zoutmeters in de verticaal, gecombineerd met momentane afvoergegevens en kennis over het verticale debietprofiel. Beide alternatieven zijn echter nog in ontwikkeling.

Een geheel andere benadering is gebaseerd op de proceskennis in combinatie met **registratie van de schutoperatie**: deur-opentijden, luchtdebieten van het bellenscherm, zoutgehalten in de voorhavens etc.. Op deze wijze wordt het zouttransport berekend uit de randvoorwaarden en de sluisoperatie. Met deze aanpak zijn waarschijnlijk minder kosten verbonden dan met de aanpak via de zoutinhoud van de kolk, gebaseerd op traditionele zoutmetingen in de kolk. Eventueel zou deze methode ondersteund kunnen worden door een schatting van het zouttransport in de mond van het Noordzeekanaal, zoals hierboven geschetst.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies t.a.v. de in 2018 getroffen maatregelen

De analyse van de gegevens zoals toegeleverd leidt tot de volgende conclusies:

Over de bellenschermen:
- Op basis van het beperkte luchtdebiet dat door de installatie kon worden geleverd mag geen groot effect op de zoutindringing verwacht worden.
- Deze verwachting is bevestigd door de uitgevoerde metingen.

Over de operationele maatregelen:
- Om de zoutindringing te beperken is er een schutbeperking opgelegd die bestond uit het zoveel mogelijk schutten met volle kolken. Daarnaast is geprobeerd om, wanneer mogelijk, de deuren zoveel mogelijk gesloten te houden. Van beide maatregelen mag een positief effect worden verwacht. Echter, over de effectiviteit van de genomen operationele maatregelen is, op basis van de beschikbare gegevens, geen uitspraak te doen: niet op welke manier de operatie werkelijk anders is uitgevoerd, en niet wat het effect daarvan is geweest op de zoutindringing.

Over uitgevoerde metingen:
- De aanpak waarbij de variatie van de zoutinhoud in de kolk wordt bepaald met een beperkt aantal opnemers lijkt bruikbaar; wel is er een analyse nodig naar de daarmee te behalen nauwkeurigheid.

6.2 Aanbevelingen omtrent dezelfde maatregelen in een toekomstige droge periode

Aansluitend op deze bevindingen en op basis van de beschikbare kennis, worden de volgende aanbevelingen gedaan voor het voorbereiden en inzetten van dezelfde maatregelen in een toekomstige droge periode (zie ook Hoofdstuk 5):

Over de bellenschermen:
- Om een effectiever bellenscherm te realiseren moet de installatie beter worden ontworpen. Niet alleen voor een groter luchtdebiet, maar ook in de manier van opstarten voor het creëren van een stabiele waterbeweging, die nodig is voor de effectiviteit maar ook voor beperken van de impact op de scheepvaart.
- Dit kan een ‘conventioneel’ type zijn (een buis met gaatjes, goed uitgewerkt conform de installatie die vroeger op de Noordersluis heeft gewerkt), of er kan aansluiting worden gezocht op het bellenscherm zoals gespecificeerd voor de ombouw van de Krammersluizen.
- Er moet rekening mee worden gehouden dat een dergelijke installatie een erg groot vermogen vraagt: grote compressoren en een hoog energiegebruik; om het energie gebruik te beperken moet het systeem ontworpen worden op een beperkte drukval, en moet het systeem op de beide sluishoofden aan en uit worden geschakeld in relatie met het schutproces. Ter bepaling van de orde van grootte: een luchtdebiet van 180 Nm^3/min bij een opvoerdruk aan de compressor van 2,5 bar (alleen haalbaar bij een zorgvuldige dimensionering) vraagt een elektrisch vermogen van ca. 1000 kW, ofwel 1 MW. (De omrekening naar kosten vraagt om keuzes omtrent het uit- en aanschakelen van de bellenschermen en over hoelang (uren per dag) de deuren open staan.

Over de operatie:

- Voordat er een gefundeerde uitspraak te doen is omtrent een effectieve operationele maatregel zou eerst in kaart gebracht moeten worden (kwalitatief of kwantitatief) welke strategieën er mogelijk zijn, hoe de operatie dan zou verlopen, en wat die zouden betekenen voor de wachttijd; dit zou vervolgens doorgerekend kunnen worden naar het effect op de zoutindringing.
- Een evident positieve maatregel is om, als er geen schepen zijn die geschut willen worden, de deuren van de sluis te sluiten.
- Een bellenscherm kan enige impact hebben op het invaren van de sluis, maar hierover is maar weinig kennis beschikbaar. Om de impact te beperken is een stabiele water-beweging nodig, waarvoor een minimum luchtdebiet nodig is overeenkomend met een doorlaatfractie van 0,5 en een installatie die gelijktijdig opstart over de breedte van het sluishoofd. Een groter luchtdebiet zal mogelijk tot grotere impact op de scheepvaart leiden. Om hier mee van te kunnen zeggen is nader onderzoek nodig, te beginnen met het verzamelen van de (beperkte) beschikbare kennis en ervaring.

Over uit te voeren metingen:

- Indien opnieuw de effectiviteit van een verbeterd, al of niet tijdelijk bellenscherm en van ingrepen in de operatie zou moeten worden geanalyseerd, dan zou tijdig een meetplan moeten worden opgesteld.
- Indien de gekozen aanpak gebaseerd zou zijn op het meten van zoutgehalten zouden in het meetplan de volgende aspecten aan de orde moeten komen: de doelstelling, de methodologie, de te gebruiken instrumenten, de meetlocaties, de data-acquisitie en de uitwerking van de meetdata tot aan conclusies omtrent de effectiviteit.
- Ook zal aan de orde moeten komen de vastlegging en ontsluiting van gegevens over de schuttingen. Dit betreft onder andere de tijdstippen van alle deur-bewegingen, ook bij leeg-om schuttingen.
- Een alternatieve benadering voor het bepalen van de effectiviteit is gebaseerd op de proceskennis zoals opgedaan in een reeks van projecten en zoals vastgelegd in software (WANDA-Locks en de Zeesluisformulering) [5]. Hierbij wordt de zoutindringing berekend op basis van o.a. de geregistreerde deur-opentijden, de luchtdebieten bellenscherm en de (te meten) zoutgehalten in de voorhavens.
- Beide aanpakken kunnen ondersteund worden door meting van het momentane c.q. het cumulatieve zouttransport in de monding van het NZK. Dit behelst een meting van een verticaal zoutprofiel in combinatie met het lokale debiet. Dit is uit te werken naar een netto transport van zout richting het kanaal (waardoor het kanaal zouter wordt) of richting de sluizen waarmee het kanaal zoeter wordt).

6.3 Algemene aanbevelingen omtrent maatregelen ter beperking van de zoutindringing

De maatregelen zoals in dit memo besproken kunnen onderdeel uitmaken van een reeks van maatregelen, onderverdeeld in ‘niveaus’ die ingezet kunnen worden afhankelijk van de ernst van de situatie. Dit zou er als volgt uit kunnen zien, maar om tot een vaststelling hiervan te komen is het nodig om diverse belangen af te wegen (zoutindringing, impact op scheepvaart en vismigratie) en te kijken naar kosten en baten.

1 evidente maatregelen, die eigenlijk altijd zouden moeten gelden:
  – gebruik steeds de kleinst mogelijke sluis;

– sluit de deuren na het uitvaren als er geen verkeer is, en open de deuren pas weer bij het naderen van een schip en liefst zo laat mogelijk (dit vraagt een hoge betrouwbaarheid van de deur-beweging);

2 bij beperkte waterbeschikbaarheid: operationele maatregelen met een beperkte impact op wachttijden:
   – beperk het visvriendelijk spuien en -schutten;
   – beperking van het aantal schuttingen ***en*** de deur-opentijden: sluit de deuren na het uitvaren en open deze als er meerdere schepen klaar liggen om in te varen (opsparen van schepen buiten de kolk); hiertoe het aanlopen van deze schepen en de daarbij benodigde sleepboothulp goed op elkaar afstemmen;

3 bij ernstige beperking van de waterbeschikbaarheid: operationele maatregelen met merkbare impact op de wachttijden:
   – verdere beperking (staken) van het visvriendelijk spuien en schutten;
   – verdere beperking van het aantal schuttingen ***en*** de deur-opentijden als hierboven; de mogelijkheden hiertoe en de impact op de wachttijd vooraf nader te bestuderen en door te rekenen, waarbij ook het leeg-omschutten moet worden beschouwd;

4 bij ernstige beperking van de waterbeschikbaarheid: bellenschermen:
   – fabriceren en inzetten van bellenschermen; hiervoor tijdig een ontwerp te maken incl. de inpassing, de beschikbaarheid van materialen, de stroomvoorziening en de besturing in relatie tot het schutproces etc.

Wat betreft de inzet (en de voorbereiding daarvan) van bellenschermen wordt opgemerkt dat deze ook een rol kunnen spelen in de situatie na oplevering van de Nieuwe Zeesluis in de periode tot aan het gereed komen van de Selectieve Onttrekking. De hinder voor scheepvaart verdient daarbij nader onderzoek.

7 Referenties

[1] HydroLogic (2019). Factsheet Beleidstafel Droogte VW02 - versie 4. Project P1049. 27 februari 2019. In opdracht van RWS-WVL.

[2] Deltares (2018). Maatregelen (o.a. bellenschermen) tegen zoutindringing IJmuiden; advies aan RWS WNN, kenmerk 11203093-000-HYE-0002; 12 Aug. 2018. Auteur Otto Weiler.

[3] Bijlsma, A.C. en O.W. Weiler (2016). Zoutindringing IJmuiden - Fase 3: Verdere uitwerking mogelijke bronmaatregelen. Deltares, eindrapport 1220309-000-HYE-0045, oktober 2016. In opdracht van Rijkswaterstaat.

[4] "Zoutbestrijding: Aanleg van luchtschermen in de sluizen te IJmuiden", J.A. Exalto, OTAR, november 1965

[5] "Zoutindringing door schutsluizen, overzicht projecten en aanzet formulering t.b.v. netwerkmodellen, Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2017", Otto Weiler, 11200741-003, Deltares, juni 2018

[6] https://www.atlascopco.com/nl-nl/Rental/news/oil-free-bubble-curtain-to-prevent-salinization-of-the-north-sea-canal-in-the-netherlands. 18 maart 2019.

[7] Bijlsma, A.C. en O.W. Weiler (2017). Selectieve onttrekking IJmuiden - Fase 1: Studie naar hydraulische eisen en verificatie. Deltares, eindrapport 1120215-000-HYE-0020, september 2017. In opdracht van Rijkswaterstaat.

[8] "Ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperking Volkeraksluizen : beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinsluis en evaluatie maatregelen Stevinsluis", R.E. Uittenbogaard en J.M. Cornelisse, 1201226-005, Deltares, april 2011

[9] "Pilot Krammerjachtensluis, Meet- en monitoringprogramma", P.P.D. van der Ven, 1207406-004, Deltares, januari 2015

[10] "Simulatiestudie Capaciteit Zeetoegang Amsterdam-Noordzeekanaalgebied, Modelbeschrijving en resultaten", ir. R. Groenveld, PMSS, januari 2008

[11] "Wijzigingen simulatiemodel voor Planstudie; Modelwijzigingen en simulatieresultaten voor validatie". ir. R. Groenveld, PMSS, april 2009.

[12] "Zeetoegang IJmond, Planstudie Nieuwe zeesluis fase 1, Probleemanalyse & uitgangspunten, Milieutoets & MKBA, Rapport actualisatie vlootsamenstelling en capaciteitsmodel", BA3334-106-105, DHV, maart 2012

[13] "Schuttingen voor zoutbelasting Noordzeekanaal, ir. R. Groenveld, PMSS, januari 2016, Opgenomen in [14] als Appendix A

[14] "Zoutindringing IJmuiden, Fase 3: Verdere uitwerking mogelijke bronmaatregelen, Eindrapport", Arnout Bijlsma, Otto Weiler, 1220309-000, Deltares, oktober 2016