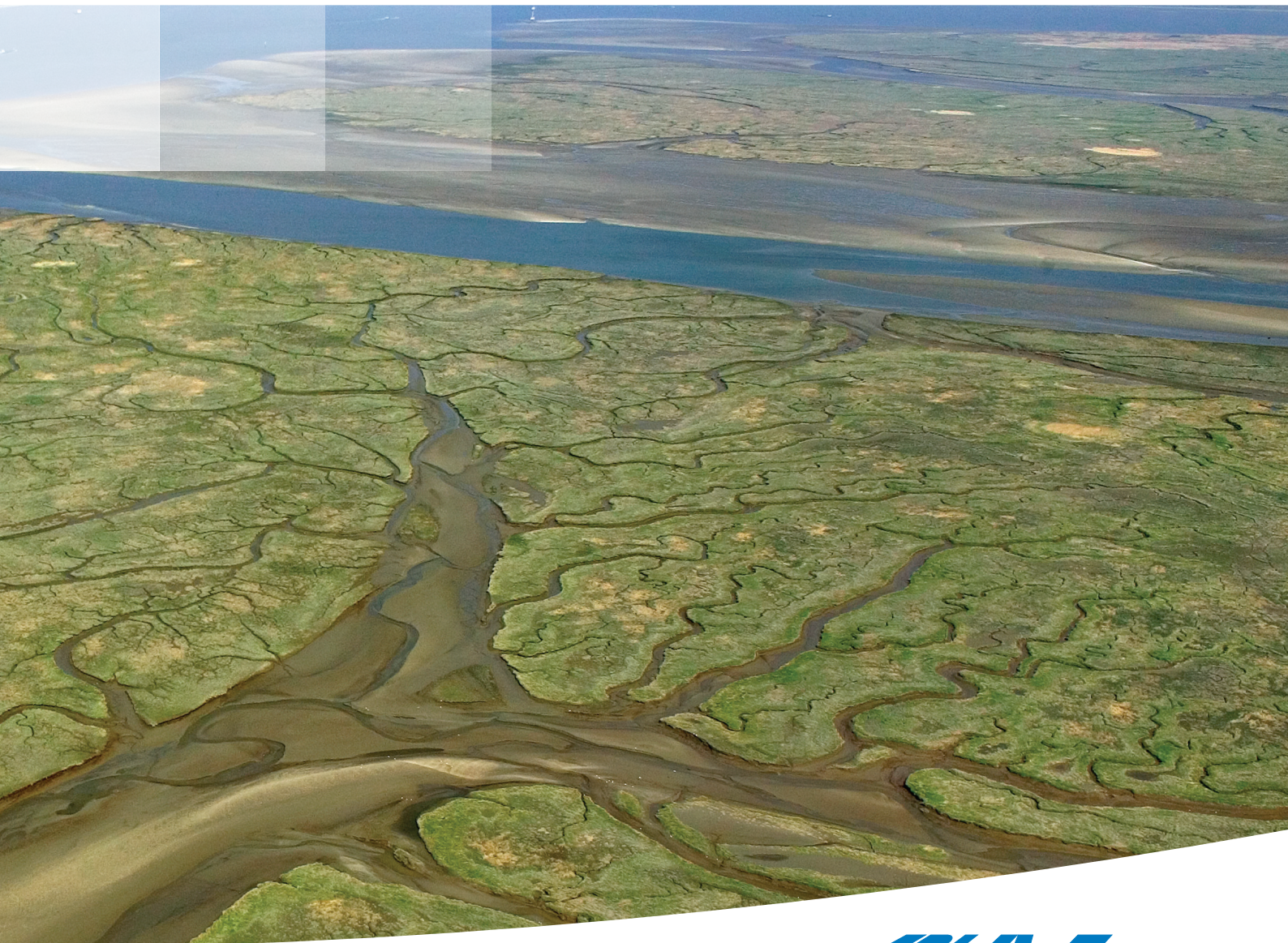


# Zoutlekbeperking Volkeraksluizen

Verdere reductie van de zoutlek middels een zoutvang





## **Zoutlekbeperving Volkeraksluizen**

**Verdere reductie van de zoutlek middels een zoutvang**

O.M. Weiler  
R.E. Uittenbogaard  
G.H. Keetels  
A.C. Bijlsma  
J.M. Cornelisse

In samenwerking met DHV  
A. van de Kerk

1204948-000



**Titel**  
Zoutlekbeperving Volkeraksluizen

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat, Waterdienst	1204948-000	1204948-000-ZKS-0013	91

**Trefwoorden**  
sluis, zoutindringing, zoutlek, zoutvang, dichtheidsstroming, menging, entrainment, scheepvaart

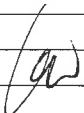
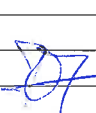

**Samenvatting**  
In de voorgaande studie "Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen", Projectnummer 1201226 is gebleken dat met een combinatie van maatregelen de zoutlek naar het Hollandsch Diep beperkt kan worden tot ca. 35 - 40 kg/s. Om de bijgestelde eis van 20 kg/s te halen is als additionele maatregel een zoutvang voorgesteld aan de kant van het Hollandsch Diep. Deze maatregel is in de huidige studie onderzocht en uitgewerkt.

Het blijkt dat een open, onbeschermd zoutvang maar een zeer geringe bijdrage levert aan het reduceren van de zoutlek. Dit is het gevolg van de geringe dichtheid van het uit de kolk stromende zoute water (die het resultaat is van de grote effectiviteit van de overige zoutlekbepervende maatregelen) waardoor er een grote mate van 'entrainment' te verwachten is en veel menging door scheepvaart.

Als alternatieve benadering wordt een beschermd zoutvang voorgesteld, waarbij het uit de kolk stromende zoute water aan de bodem van de sluishoofden wordt afgezogen. Dit kan effectief gebeuren gedurende de perioden dat er geen schepen door het sluishoofd varen. Op basis van de geschatte tijdsduur daarvan binnen de totale deur-open-tijden is een reductie van de zoutlek geschat. De combinatie van deze oplossing met de door RWS geselecteerde maatregelen voor de beroepssluizen en de jachtensluis leidt tot een berekende c.q. verwachte daggemiddelde zoutlek die met enige marge onder de eis van 20 kg/s uit komt.

Echter, om voldoende zekerheid te hebben dat ook in de praktijk deze eis gehaald zal worden moeten een aantal aspecten nader moeten worden onderzocht en zullen additionele maatregelen moeten worden uitgewerkt. Hiertoe zijn een aantal aanbevelingen geformuleerd.

**Referenties**  
offerteaanvraag van RWS, 22 juli 2011, zaaknummer 31030032.0003  
initiële offerte, 15 augustus 2011, 1204948-000-ZKS-0002  
bijgestelde offerte 17 augustus 2011, 1204948-000-ZKS-0004  
opdracht door RWS op 22 augustus 2011

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	23 nov, '11	O.M. Weiler e.a.		R.J. de Jong		T. Schilperoort	
2	2 dec. '11	O.M. Weiler e.a.		R.J. de Jong		T. Schilperoort	
3	5 mrt '12	O.M. Weiler e.a.		R.J. de Jong		T. Schilperoort	
4	27 mrt '12	O.M. Weiler e.a.		R.J. de Jong		T. Schilperoort	

**Status**  
definitief



## Inhoud

Samenvatting	1
<b>1 Inleiding</b>	<b>3</b>
1.1 De voorgeschiedenis	3
1.2 De opdracht	3
1.3 Het projectteam	4
<b>2 Geselecteerde maatregelen aan de sluishoofden</b>	<b>5</b>
2.1 Maatregelen en resterende zoutlek bij de Jachtensluis	5
2.2 Maatregelen en resterende zoutlek bij de beroepssluisen	6
<b>3 Conceptueel ontwerp van de zoutvang</b>	<b>9</b>
3.1 Schematisatie van de hydrodynamica	9
3.2 Afzuiging uit de zoutvang	10
3.3 Voorlopige dimensionering en inpassing in de voorhaven	10
3.4 Uitwerking van de open zoutvang door DHV	12
<b>4 Hydraulische aspecten van een open zoutvang</b>	<b>13</b>
4.1 Afstroming van zout water uit de kolken	13
4.2 Menging door wind en scheepvaart	13
4.3 Vergelijking met de zoutvang bij Terneuzen	14
<b>5 Alternatieve benadering: een beschermde zoutvang</b>	<b>17</b>
5.1 Concept en inrichting van een beschermde zoutvang	17
5.2 Uitwerking van de beschermde zoutvang door DHV	19
5.3 Verwachting van de zoutlek bij een beschermde zoutvang	20
5.4 Beoordeling van het resultaat	21
5.5 Effect op vismigratie	23
<b>6 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>25</b>
Referenties	29
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Uitbreiding van het zoutlekmodel met een zoutvang</b>	<b>A-1</b>
A.1 Doel van deze appendix	A-1
A.2 Werking zoutvang in zoutlekmodel	A-1
A.3 De wiskundige balans van debieten en zoutfluxen voor de zoutvang	A-2
A.4 Variaties werking zoutvang met zoutlekmodel	A-5
A.4.1 Variatie entrainment	A-5
A.4.2 Variatie menging door scheepvaart	A-7
A.5 Voorlopige conclusies uit deze verkennende berekeningen	A-8
<b>B Hydraulisch aspecten van een zoutvang</b>	<b>B-1</b>
B.1 Selectieve afzuiging van water uit de zoutvang	B-1
B.2 Afstroming van water uit de kolken naar de zoutvang	B-3

B.3	Analyse van metingen bij gemaal Helsdeur te Den Helder	B-9
<b>C</b>	<b>Menging door wind, golven en scheepvaart</b>	<b>C-1</b>
C.1	Beschrijving van experimenten Kato en Philips	C-1
C.2	Toepassing van de theorie op menging door wind uit een zoutvang	C-3
C.3	Toetsing aan metingen aan een zoutput in het Haringvliet	C-5
C.4	Menging door scheepvaart	C-9
<b>D</b>	<b>Analyse van metingen Terneuzen</b>	<b>D-1</b>
D.1	Samenvatting en conclusies	D-1
D.2	Beschrijving van de situatie	D-2
D.2.1	De locatie	D-2
D.2.2	Het spuidebieten en de saliniteit op het kanaal	D-2
D.2.3	De Zoutvang en de riolen	D-5
D.2.4	Aanloopkanaal Middensluis en Oostsluis	D-8
D.2.5	De luchtbellenschermen	D-9
D.2.6	De scheepvaart	D-10
D.3	Uitwerking van de metingen uit 2000	D-10
D.3.1	Uitwisseling tussen sluiskolk en voorhaven (kanaal-zijde)	D-10
D.3.2	Zoutprofielen in de zouttong uit de Westsluis	D-12
D.3.3	Zoutprofiel in de zoutvang	D-13
D.3.4	Aanloopkanaal	D-15
D.3.5	Afvoer-, nivellerings- en uitwisselingsdebieten	D-16
D.4	Voorlopige conclusie	D-17
<b>E</b>	<b>Door DHV: uitwerking open zoutvang in voorhaven HD-zijde</b>	<b>E-1</b>
<b>F</b>	<b>Door DHV: uitwerking beschermde zoutvang</b>	<b>F-1</b>
<b>G</b>	<b>Memo "Aanvullende berekeningen voor de verspreiding van 20 kg/s zoutlek door de Volkeraksluizen"</b>	<b>G-1</b>



## Samenvatting

De opdracht luidt te onderzoeken of het mogelijk is om met behulp van een zoutvang de zoutlek naar het Hollandsch Diep verder te beperken. De maximale zoutlek door de Volkeraksluizen, de drie beroepskolken samen met de jachtensluis, mag niet meer bedragen dan 20 kg/s (dag-gemiddeld) bij een watergebruik van 25 m<sup>3</sup>/s.

De eis van een maximale zoutlek van 20 kg/s is afgeleid uit eerdere berekeningen [1 en 6] van de verspreiding van zout bij een zoutlek van 60 kg/s en 40 kg/s. Uit aanvullende berekeningen (Bijlage G) is gebleken dat bij een zoutlek van 20 kg/s de te verwachten chlorideverhoging voor een droog jaar als 2003 beperkt blijft tot 50 - 60 mg Cl/l, waarmee aan de eis wordt voldaan.

Het watergebruik bestaat uit zowel het schutverlies als het watergebruik door de zoutremmende maatregelen, bestaande uit de waterschermen en de 'lekkende ebdeuren'.

Op basis van de resultaten van de voorgaande studie [1] heeft Rijkswaterstaat voor de Volkeraksluizen de volgende maatregelen geselecteerd:

- voor de jachtensluis: aan beide sluishoofden de nieuwe  $\Delta$ -luchtbellenschermen in combinatie met drempels tot een hoogte van NAP -3,0 m
- voor de beroepssluis: aan beide sluishoofden de nieuwe  $\Delta$ -luchtbellenschermen in combinatie met: aan de kant van het Volkerak-Zoommeer een waterscherm en aan de kant van het Hollandsch Diep een drempel tot een hoogte van NAP -4,95 m.

Deze selectie vormde het uitgangspunt voor het onderzoek naar de additionele bijdrage van een zoutvang. De resultaten en conclusies zijn als volgt:

1. Voor de jachtensluis wordt met de geselecteerde maatregelen (zonder zoutvang) een zoutlek berekend van 4 kg/s bij een watergebruik van 2 m<sup>3</sup>/s. Op basis van deze uitkomsten wordt de opgave voor de beroepssluis: een zoutlek van maximaal 16 kg/s bij een watergebruik van maximaal 23 m<sup>3</sup>/s.
2. Met de door Rijkswaterstaat gekozen maatregelen in de beroepssluis (ook zonder een zoutvang) wordt een dag-gemiddelde zoutlek berekend van 18 kg/s bij het maximale watergebruik. Hiermee blijft het resultaat van de berekening net boven de eis. Vanwege onzekerheden en beperkingen van de gebruikte methode is het echter nodig om de eis met enige marge te halen.
3. Bij de Volkeraksluizen blijkt een open zoutvang, mede vanwege de reeds gedefinieerde zoutlekbeperkende maatregelen, slechts in geringe mate bij te dragen aan het verder reduceren van de zoutlek; dit vanwege de menging door 'entrainment' en door passerende scheepvaart.
4. Als alternatief voor een open zoutvang wordt voorgesteld het zoute water dat uit de sluisen komt direct aan het sluishoofd af te zuigen. Op basis van een ruwe beschouwing van de scheepvaartbewegingen tijdens het open staan van een sluishoofd kan worden ingeschat dat een dergelijke installatie de zoutlek met ca. 40%

zou kunnen reduceren ten opzichte van de waarden berekend met het zoutlekmodel voor de situatie zonder zoutvang (zie punt 2).

5. Hieruit volgt een schatting voor het totale complex (beroepssluisen en jachtensluis): bij het maximale watergebruik van  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ , een daggemiddelde zoutlek van ca.  $15 \text{ kg/s}$  (dus als verwachte uitkomst van een dag-gemiddelde berekeningen).
6. Aan deze uitkomst kleven nog een aantal rekenkundige onzekerheden, zeker wat betreft de laatste stap die een reductie van 40% beargumenteert. Verder vraagt de praktische uitvoering om enige marge tussen het rekenkundige resultaat en de geformuleerde eis. Tenslotte is de verwachting dat de dag-gemiddelde resultaten van de berekeningen een optimistisch beeld geven van de werkelijkheid, waarin allerlei variaties zullen optreden.
7. Al met al is naar onze inschatting de nu berekende marge tussen, enerzijds, de deels berekende, deels geschatte, dag-gemiddelde waarde en, anderzijds, de gestelde eisen klein te noemen is. Zo klein, dat zonder aanvullende maatregelen, het risico groot is dat de eis in de praktijk zal worden overschreden, en dan met name in een aanhoudende droge periode, als het er op aan komt.
8. Hierbij speelt een belangrijke rol de overweging dat de maatregelen zoals benoemd in de voorgaande studie [1] nu praktisch allemaal zijn ingezet; er zijn geen extra opties meer achter de hand.
9. Om het risico op het overschreden van de eis te reduceren worden een aantal aanbevelingen gedaan. Deze betreffen een reductie van de onzekerheden, een optimalisatie van de maatregelen en het uitwerken van het operationeel beheer. Dit laatste zal o.a. inhouden dat, in tijden van aanhoudende droogte, het management van het scheepvaartverkeer ook gericht zal moeten zijn op het reduceren van de zoutlek.
10. Andere mogelijkheden om de situatie te verbeteren zijn een tijdelijke verlaging van het peil in het Volkerak-Zoommeer en/of het tijdelijk toestaan van een zoetwatergebruik groter dan  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ , welke waarde in deze studie als randvoorwaarde is gehanteerd.
11. Door DHV is de oplossing met het afzuigen van zout water aan de sluishoofden in een aantal varianten uitgewerkt op het niveau van een verkenning. Hieruit concludeert DHV, met de daarbij genoemde onzekerheden, dat de benodigde voorzieningen waarschijnlijk kunnen worden ingepast op een van de sluiselanden. Dit betreft met name de aanleg van een hoog en een laag bufferbekken. Wel dient nog te worden nagegaan wat e.e.a. betekent voor de daar aanwezige leidingen en overige infrastructuur.
12. Omdat de waterschermen en de voeding vanuit het Hollandsch Diep al onderdeel uitmaken van het reeds gedefinieerde pakket aan maatregelen, concludeert DHV dat de meerkosten voor de zoutvang beperkt zijn tot minder dan 1 mln € op een totaal van ca. 12 mln.

# 1 Inleiding

## 1.1 De voorgeschiedenis

Het startpunt van de huidige studie wordt gevormd door de resultaten van de voorgaande studie "Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen", Projectnummer 1201226 [1]. De studie gaat in op de zoutindringing door de Volkeraksluizen die het gevolg is van het schutten van schepen door de sluizen in combinatie met de van nature optredende uitwisseling van water tussen kolk en voorhaven als gevolg van het dichtheidsverschil tussen zoet en zout water. In deze studie is een zoutlekmodel opgezet waarmee zoutlekbeperring maatregelen kunnen worden beoordeeld op hun effectiviteit. Dit model is geverifieerd op basis van veldmetingen bij de Stevinsluizen.

Op basis van berekeningen met dit zoutlekmodel is in de voorgaande studie het volgende geconcludeerd:

1. Zonder maatregelen zal er sprake zijn van een zoutindringing via de Volkeraksluizen, ook aangeduid als zoutlek, van 480 kg/s.
2. Met de in de voorgaande studie [1] onderzochte maatregelen zou het mogelijk zijn om deze zoutlek te beperken tot ca. 35 – 40 kg/s. De in te zetten maatregelen zouden bestaan uit een combinatie van zogenaamde  $\Delta$ -luchtbellenschermen (een sterk verbeterde versie van een oud concept), waterschermen, drempels en het toepassen van de methode van 'lekkende ebdeuren'. Daarmee kon voldaan worden aan de initieel gestelde eis van 60 kg/s.

Echter, uit aanvullende modellering van de verspreiding van zout naar de zoetwaterinnamepunten aan het Haringvliet bleek dat de eis moest worden bijgesteld naar 20 kg/s. Dit is in eerste instantie geconcludeerd uit berekeningen [1 en 6] van de verspreiding van zout bij een zoutlek van 60 kg/s en 40 kg/s. Uit aanvullende berekeningen (Bijlage G) is gebleken dat bij een zoutlek van 20 kg/s de te verwachten chlorideverhoging voor een droog jaar als 2003 beperkt blijft tot 50 - 60 mg Cl/l, waarmee aan de eis wordt voldaan.

Een verdere reductie van de zoutlek was dus geboden. De eis van maximale zoutlek wordt gecombineerd met een eis van een maximaal gebruik van zoetwater van 25 m<sup>3</sup>/s (schutverlies plus watergebruik in zoutremmende maatregelen); dit omdat zoet water een schaars goed is in tijden van lage rivierafvoer.

Vervolgens heeft Deltares aangegeven dat voor een verdere reductie van de zoutlek, de mogelijkheid van een zoutvang overwogen zou kunnen worden. Een zoutvang is een 'kuil' (een zoutput) aan de zoete zijde van de sluizen waarin het zwaardere zoute water afkomstig uit de kolken zou kunnen worden opgevangen en van daar uit teruggevoerd naar de zoute zijde.

## 1.2 De opdracht

Op basis van de resultaten uit deze studie(-s) en op basis van overwegingen inzake techniek, kosten en functionele eisen, heeft RWS een keuze gemaakt uit de verschillende mogelijkheden om de zoutlek te beperken, en heeft zij aan DHV opgedragen om deze gekozen maatregelen verder uit te werken.

Daarnaast heeft zij aan Deltares en DHV gevraagd om, in onderling overleg, uit te zoeken hoe een zoutvang, waarmee aan de gestelde eis van 20 kg/s zou kunnen worden voldaan, er uit zou kunnen zien. De rapportage van de werkzaamheden door DHV is opgenomen in dit rapport (Bijlagen E en F).

De offerteaanvraag van RWS is gedateerd op 22 juli 2011 met zaaknummer 31030032.0003. De initiële offerte van Deltares is gedateerd op 15 augustus 2011 met referentie 1204948-000-ZKS-0002. Een bijgestelde offerte is gedateerd op 17 augustus (1204948-000-ZKS-0004), waarop RWS opdracht heeft verleend op 22 augustus 2011.

### 1.3 Het projectteam

Het projectteam van dit project heeft, aan de kant van Deltares, bestaan uit deskundigen die ook in de eerdere studie inzake de Volkeraksluizen een hoofdrol hebben gespeeld: Rob Uittenbogaard, John Cornelisse en Geert Keetels. Daarnaast zijn bijdragen geleverd door Arnout Bijlsma (analyse zoutmetingen Haringvliet) en Dick Mastbergen (2DV-simulaties inzake entrainment). Projectleiding en rapportage (hoofdrapport) was in handen van Otto Weiler. De review is uitgevoerd door Rob de Jong.

Van de kant van DHV waren betrokken Arend Jan van de Kerk en Peter Bos.

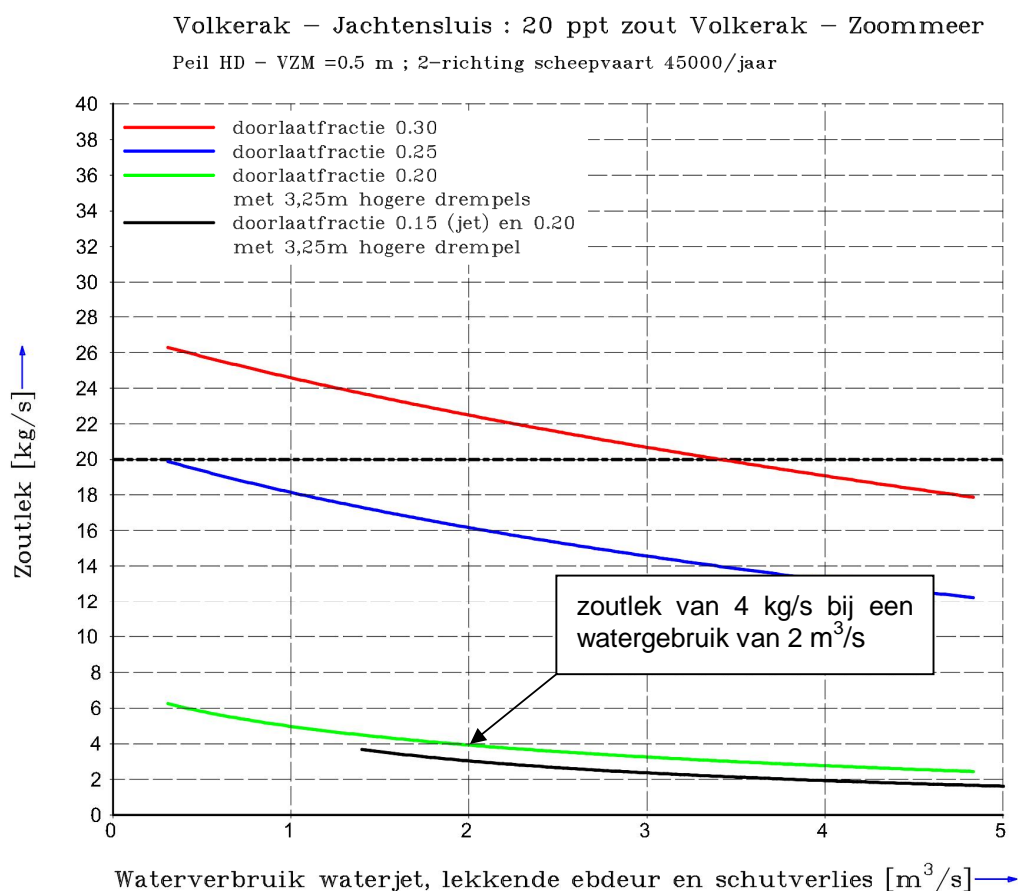
De opdrachtgever, het Ministerie I&M, DG Water, Wilbert van Zeventer, werd vertegenwoordigd door Hans van Pagee (RWS-WD) en René Boeters (RWS-ZL) met begeleiding van Herman Haas (RWS-WD), Leen Dekker (RWS-ZL), Vincent Beijck (RWS-ZH) en Wim Kortlever (RWS-DI).

## 2 Geselecteerde maatregelen aan de sluishoofden

In de loop van de studie zijn de details van de door RWS gekozen maatregelen voor de Volkeraksluizen duidelijk geworden, zowel wat betreft de sluisen voor de beroepsvaart, als die voor de jachtensluis. Voor deze maatregelen (dus vóór de toevoeging van een zoutvang) is met het zoutlekmodel de te verwachten zoutlek uitgerekend.

### 2.1 Maatregelen en resterende zoutlek bij de Jachtensluis

Voor de jachtensluis heeft RWS uitgesproken wel  $\Delta$ -luchtbellenschermen te willen plaatsen (aan beide sluishoofden), maar geen waterschermen en geen zoutvang. Hogere drempels zijn wel te overwegen. Berekeningen met drempels aan beide sluishoofden met een hoogte van 3,0 m onder NAP (= 3,25 m boven de huidige drempel op 6,25 m onder NAP), Figuur 2.1 hieronder, laten zien dat dit leidt tot een redelijk gunstige, lage zoutlek van ca. 4 kg/s bij een watergebruik van 2 m<sup>3</sup>/s (de groene lijn in onderstaande grafiek). De hoge drempels blijken zo effectief dat een waterscherm (de zwarte lijn in de grafiek) of het (sterker) toepassen van 'lekkende ebdeuren' (verder naar rechts langs de groene lijn) daar weinig aan toevoegen.



Figuur 2.1 Zoutlek door de Jachtensluis als functie van het watergebruik

Opmerkingen:

1. Het drempelniveau van 3,0 m onder NAP, 3,25 m hoger dan de huidige drempel op 6,25 m onder NAP, geeft een vaardiepte van ruim 3,0 m aan de HD-zijde, en minimaal 2,75 m aan de VZM-zijde. Inmiddels heeft RWS aangegeven dat de vaardiepte aan beide zijden 3,0 m moet bedragen.
2. De huidige berekening is gebaseerd op 20 schuttingen per dag en een deur-open-tijd van 25 minuten, getallen die ook in de eerdere studies zijn aangehouden, en tevens gehanteerd worden voor de beroepssluizen.

## 2.2 Maatregelen en resterende zoutlek bij de beroepssluizen

De zoutlek en het watergebruik door de jachtensluis komen in mindering op de 'ruimte' voor de beroepskolken. Deze mogen nu maximaal  $(20 - 4 =) 16$  kg/s doorlaten bij een maximaal watergebruik van  $(25 - 2 =) 23$  m<sup>3</sup>/s.

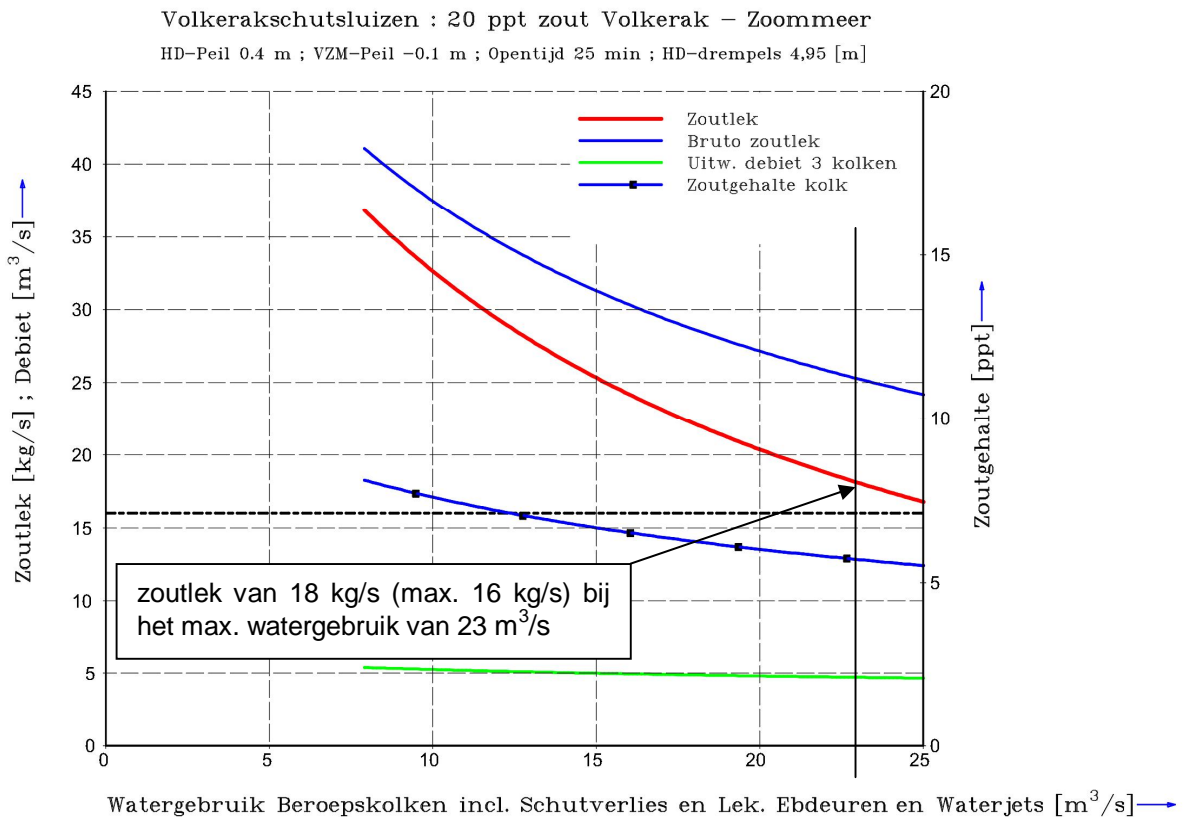
Voor alle drie de beroepssluizen heeft RWS gekozen voor de volgende maatregelen:

- aan de VZM-zijde:  $\Delta$ -luchtbellenschermen ondersteund met waterschermen
- aan de HD-zijde:  $\Delta$ -luchtbellenschermen ondersteund met een drempel tot een hoogte van NAP – 4,95 m; hiermee kunnen, bij een minimaal schutpeil van -0,25 m op het Hollandsch Diep (treedt gemiddeld eens per jaar op) schepen met een diepgang van 4,0 m passeren met een kielspeling van 0,70 m, conform de vigerende richtlijnen.<sup>1</sup>

Met het zoutlekmodel is deze combinatie van maatregelen voor de beroepssluizen doorgerekend, zie Figuur 2.2 hieronder.

---

1. De hier genoemde drempeldiepte houdt dus rekening met schepen met een diepgang tot 4,0 m. Uit andere bronnen blijkt dat er in de huidige praktijk schepen met een diepgang tot 4,75 m de Volkeraksluizen passeren. Voor deze schepen zou de drempel, afhankelijk van de waterstand, moeten worden neergelaten om voldoende kielspeling te hebben voor het passeren van de sluis. Bij een nominaal peil van NAP +0,4 m en bij geheven drempel is er bij een scheepsdiepgang van 4,75 m nog een kielspeling van 0,6 m beschikbaar, terwijl in de Richtlijnen Vaarwegen voor de schepen van de grootste categorie (een diepgang van 4,0 m) een kielspeling van 0,7 m wordt voorgeschreven.



Figuur 2.2 Zoutlek door de Beroepssluizen als functie van het watergebruik

De lijnen hebben de volgende betekenis:

rood: de daggemiddelde zoutlek t.p.v. de ingang van de Voorhaven;

blauw: de daggemiddelde bruto zoutlek, d.w.z. de hoeveelheid zout geproduceerd door de sluis; een deel van deze kilo's zout gaat met het debiet voor nivelleren, waterschermen en met 'lekkende ebdeuren' weer terug;

groen: het daggemiddelde debiet aan water geproduceerd door de drie beroepskolken als de sluisdeuren open staan;

blauw met blokjes: het zoutgehalte van het water in de kolken, dus ook het zoutgehalte dat met het debiet uit de sluisen stroomt (de groene lijn).

Het plaatje laat zien dat met de gekozen combinatie van maatregelen de eis van 16 kg/s bij een watergebruik van 23 m<sup>3</sup>/s bijna gehaald wordt. Dit is een verrassend positief resultaat. Voor een belangrijk deel mag dit toegeschreven worden aan de lage zoutlek van de jachtensluis, samenhangend met de hoge drempels (vergelijk daarvoor de zoutlek van de jachtensluis volgens de groene lijn met de waarden van de blauwe en rode lijnen in dezelfde figuur). Daarnaast is ook voor de beroepssluizen een compleet en effectief pakket aan maatregelen gekozen.

Toch is er een aantal redenen waarom deze uitkomst niet zomaar als voldoende kan worden gekenmerkt:

- Zoals ook gedaan in de eerdere studies moeten ook voor deze berekeningen de onzekerheden in de uitkomsten nog worden uitgewerkt.

- De gepresenteerde getallen zijn geldig voor optimaal werkende bellenschermen en waterschermen; in welke mate dit in de praktijk en over een lange gebruiksduur ook haalbaar zal zijn moet nog blijken.
- De gepresenteerde getallen zijn gebaseerd op daggemiddelde waarden; de werkelijkheid zal echter fluctuaties laten zien, en als gevolg daarvan kan het gemiddelde hoger uitpakken.

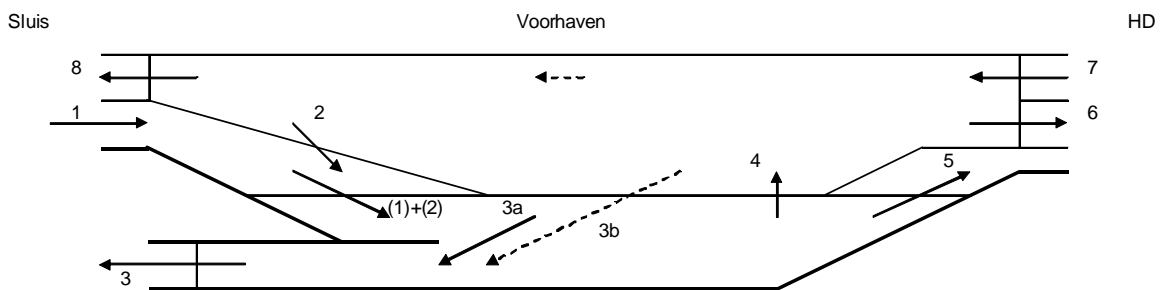
Deze en andere punten worden in paragraaf 5.4 nader uitgewerkt. Vanwege dergelijke overwegingen zal de eis met enige marge gehaald moeten worden om tot een positieve conclusie te komen. Daarom is het toch van waarde te onderzoeken welke winst gehaald kan worden met een zoutvang bij de beroepssluizen.



### 3 Conceptueel ontwerp van de zoutvang

#### 3.1 Schematisatie van de hydrodynamica

Voor het onderzoeken van de werking van een zoutvang is het op de eerste plaats nodig dat we de verschillende stromingen van zouter en zoeter water in de voorhaven, tussen de sluisen en het Hollandsch Diep, in kaart brengen. Dit is ook de eerste stap voor het kunnen opzetten van berekeningen van de bijdrage van een zoutvang aan het reduceren van de zoutlek. Hiertoe is de waterbeweging geschematiseerd als hieronder is aangegeven.



Figuur 3.1 Schematisatie van de waterbeweging rondom de zoutvang in de voorhaven

De pijlen in deze figuur duiden de verschillende stromen van zouter en zoeter water aan:

1. instroom in de zoutvang van zout water uit de sluis, zoals berekend met het zoutlekmodel (hierboven)
2. de stroom zout water uit de kolk op weg naar de zoutvang raakt door opmenging verdund door het meesleuren van zoet water uit de voorhaven (entrainment)
3. afzuiging uit de zoutvang (3a), en onbedoeld deels uit de voorhaven (3b)
4. verlies van zout water uit de zoutvang door menging onder invloed van wind, golven en vooral scheepvaart
5. interne golven op het grensvlak tussen de zoutvang en de erboven gelegen voorhaven kunnen door 'overslag' zorgen voor transport van zout water naar het Hollandsch Diep
6. uitwisseling door dichtheidsstroming Voorhaven – Hollandsch Diep
7. = 5 + 6 + 8 + 3a + 3b - 1
8. = 1 + debiet voor nivelleren en lekkende ebdeuren

In de huidige studie is met name onderzocht hoe '2' (verdunding van de zoute uitstroom uit de kolk op weg naar de zoutvang) en '4' (met name de menging door scheepvaart) kunnen worden gekwantificeerd. Verder is gekeken naar de dimensionering van de constructie voor '3': het afzuigen van het zoute water onder in de zoutvang, met minimaal meenemen van zoeter water uit de bovenlaag.

Bovenstaande presentatie is gehanteerd in de communicatie tijdens het project. Bij de implementatie hiervan in het zoutlekmodel zijn de processen soms iets anders gedefinieerd. Zie voor deze uitwerking Appendix A.

### 3.2 Afzuiging uit de zoutvang

Een punt van zorg is het afzuigen van het zoute water uit de zoutvang. De werking van de overige zoutlekbepurende maatregelen leidt ertoe dat het water dat uit de kolk komt een relatief geringe dichtheid heeft. De dichtheid kan nog verder afnemen door menging tijdens het afstromen van dat water van de sluis naar de zoutvang en door menging door o.a. scheepvaart. De lage dichtheid maakt het moeilijker om het zoute water af te zuigen, zonder ook zoeter water mee te nemen. Er zal met een kleine snelheid moeten worden afgezogen, en daarvoor zal er een grote constructie nodig zijn.

Een voorlopige dimensionering van de afzuig-constructie is bepaald op basis van schaalmodel onderzoek uit 1973, [3] en [4], ten behoeve van de stroomsluis Noordland; een geplande sluis in de Oosterscheldekering uit de tijd dat er nog een gesloten kering onderzocht werd. Een van de functies van de sluis zou zijn het afvoeren van zout water uit de Oosterschelde richting zee, zodat op den duur de Oosterschelde zoet kon worden ten behoeve van de landbouw. Dit onderzoek geeft informatie over het maximaal te onttrekken debiet als functie van de afmetingen en dichtheidsverschillen.

Op basis van dit onderzoek is de voorlopig inschatting gemaakt dat de onttrekking uit de zoutvang met een debiet van orde  $10 - 15 \text{ m}^3/\text{s}$  (het initieel geschatte momentane debiet uit de schutkolken; later bleek dat dit debiet daggemiddeld rond de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  zal liggen, afgezien van entrainment en menging) een constructie zou vragen die afzuigt over een lengte van  $25 - 50 \text{ m}$  en een afzuighoogte van  $2 \text{ m}$ . De minimale hoogte van het zoute water buiten de constructie is daarbij  $3 \text{ m}$ .

### 3.3 Voorlopige dimensionering en inpassing in de voorhavens

Een volgende stap die nodig is om de verschillende processen te onderzoeken is dat er een voorlopig beeld is van de afmetingen en de locatie van de zoutvang. De afmetingen worden voor een groot deel bepaald door het te bergen volume. Voor de bepaling daarvan is in eerste instantie gekeken naar het volume van de kolken. Afhankelijk van de diepte van de zoutvang volgt hieruit een schatting voor het bergend oppervlak benodigd om het hele volume van de kolken te bergen (dus groot genoeg om een volledige uitwisseling hierin op te vangen):

- Volume van de drie Beroepskolken:  $161.460 \text{ m}^3$
- Volume Jachtensluis:  $15.450 \text{ m}^3$
- Totaal Volume kolken:  $176.910 \text{ m}^3$
- Bergend Oppervlak (  $5 \text{ m}$  diepte):  $188 * 188 \text{ m}^2$
- Bergend Oppervlak (  $10 \text{ m}$  diepte):  $133 * 133 \text{ m}^2$

Als we niet uitgaan van een volledige uitwisseling, maar slechts van een gedeeltelijke uitwisseling (afhankelijk dus van de werking van de zoutlekbepurende middelen en van de deur-open-tijd) kan ook een kleiner volume worden gekozen:

- Per 25 minuten brak water levering:  $42.900 \text{ m}^3$  (24% van het totale kolkvolume; zie opmerking hieronder)
- Bergend Oppervlak (  $5 \text{ m}$  diepte):  $93 * 93 \text{ m}^2$
- Bergend Oppervlak (  $10 \text{ m}$  diepte):  $66 * 66 \text{ m}^2$

N.B.: Het percentage van 24% was een voorlopige keuze gebaseerd op de resultaten uit de voorgaande studie; het was op het moment van die voorlopige keuze nog niet duidelijk welke maatregelen RWS specifiek voor ogen had.

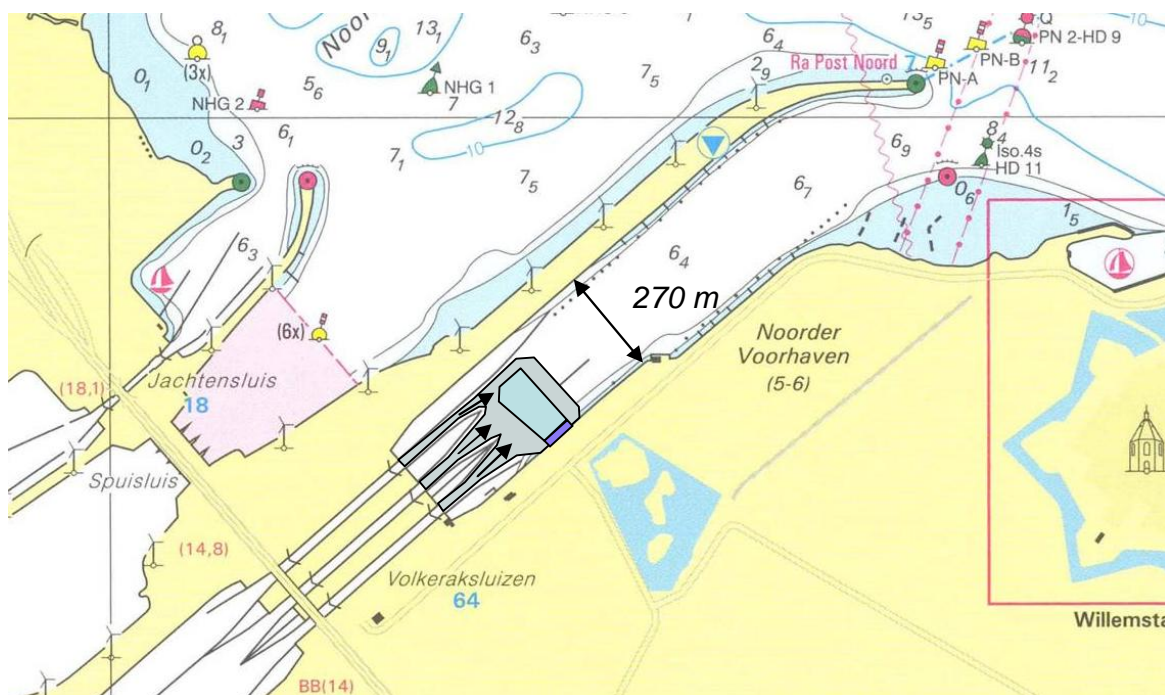
Op basis van deze schatting is in de verdere verkenningen uitgegaan van een benodigd oppervlak van 100 x 100 m en een diepte van 5 m.

Wat betreft de diepteligging van de zoutvang zijn de volgende waarden als voorlopige keuze gehanteerd:

- Uiteraard moet de zoutvang onder het vereiste niveau voor de scheepvaart liggen; dit niveau wordt o.a. gedefinieerd door de sluishoofden, maar ook door de voorhaven. Als startpunt kiezen we de ingang van de voorhaven:
  - > drempel invaart voorhaven op ca. NAP -7 m
- Vervolgens moet er een marge zijn om overslag door interne golven te beperken: voorlopige keuze ca. 2 m:
  - > hoogste niveau grensvlak op ca. NAP -9 m
- Onder dit vlak moet het bergend volume worden gerealiseerd; met de vulling van de zoutvang varieert het bovenste begrenzing van het zoute water over de hoogte van het bergend volume: ca. 5 m:
  - > laagste stand grensvlak: ca. NAP -14 m
- Tot aan de onderste begrenzing van het bergend volume moet de afzuiging efficiënt werken om niet te veel zoet water mee te nemen. Zoals afgeleid in de voorgaande paragraaf kiezen we voorlopig een minimale hoogte van het grensvlak boven de bodem van 3 m:
  - > bodemniveau bij de afzuiging: ca. NAP -17 m

Al met al komt de bodem dus aanzienlijk dieper te liggen dan de huidige bodem van de zoutvang. Een zoutvang op deze diepte kan niet worden aangelegd op korte afstand van de sluishoofden: ten eerste vanwege de geotechnische stabiliteit van de sluizen, ten tweede vanwege de menging die zou optreden als de zoute tong komend uit de sluizen over een te steile helling zou lopen, en ten derde vanwege de hoge kosten verbonden aan het aanpassen van de fuikwanden c.q. remmingwerken.

Vanwege de menging van het zoute water komend uit de sluis zou een helling van ca. 1:20 moeten worden overwogen. De overgang van de sluishoofden (drempels op NAP -6,25 m, einde sluishoofd op NAP -7,5 m) naar de diepte van de zoutvang op ca. NAP -17 m geeft bij deze helling een afstand van 200 m. Daarmee komt de zoutvang voorbij de fuikwanden. De inpassing van de zoutvang in de voorhaven zou er daarmee als volgt uit kunnen zien:



Figuur 3.2 Voorlopige inpassing van de zoutvang in de voorhaven HD-zijde

In deze schets is de afzuiging van de zoutvang gepositioneerd langs de zuidoostelijke oever.

### 3.4 Uitwerking van de open zoutvang door DHV

Op basis van dit concept is DHV verder gegaan de zoutvang verder vorm te geven. Deze uitwerking is opgenomen als Appendix E. Hierin worden een tweetal varianten ontwikkeld en worden de kosten geraamd.

Het blijkt dat, om de remmingwerken te sparen en daarmee een grote kostenpost te voorkomen, de 'hellingbaan' langer moet worden, met op plaatsen een aanzienlijk flauwere helling tot ca. 1:75. Hierdoor wordt het diepe gedeelte van de zoutvang pas later bereikt, en is het water dus over een grotere afstand onderweg van de kolk naar de zoutvang. In het volgende hoofdstuk is hiermee geen rekening gehouden; de werkzaamheden zijn parallel in de tijd uitgevoerd.

De zoutvang met afzuiging is een aanvulling op het systeem voor het voeden van de waterschermen, waarvoor ook water onttrokken zal worden aan de voorhaven aan de HD-zijde. De meerkosten voor het aanleggen van een zoutvang bedragen ca. € 2,5 mln (directe bouwkosten). De optie waarbij de zoutvang dichterbij de kolken ligt is ca. € 2,5 mln duurder door de noodzakelijke aanpassing van de remmingwerken.

## 4 Hydraulische aspecten van een open zoutvang

### 4.1 Afstroming van zout water uit de kolken

De uitstroming van het zoute water uit de kolk en de opmenging met zoeter water boven deze zoute tong (zogenaamde entrainment) is onderzocht op basis van numerieke simulaties voor een helling van 1:20. Met deze helling zou, over de afstand van ca. 200 m, de lengte van de remmingwerken tussen de sluishoofden, de benodigde diepte van ca. NAP -17,0 m worden bereikt. De simulaties en de behaalde resultaten worden beschreven in Appendix B.

Uit de simulaties blijkt dat over deze helling de zoute uitstroom zou worden opgemengd met ca. 60% water uit de voorhaven, waardoor de dichtheid van het zoute water ook kleiner wordt. Dit levert twee problemen op:

1. Om al het zoute water af te zuigen moet nu een 60% groter debiet worden afgezogen dan het geval zou zijn zonder deze opmenging. Dit grotere debiet vraagt niet alleen om grotere constructies, maar legt ook beslag op een groter deel van het toegelaten zoetwatergebruik.
2. De dichtheid van het zoute water wordt lager, waardoor het moeilijker is dit water af te zuigen, en bovendien de kwetsbaarheid van de zoutvang voor menging door scheepvaart groter wordt.

Verder is het zo dat een steilere helling de opmenging (entrainment) groter maakt. Een optimaal resultaat wordt verkregen met een (niet realistische) helling van 1:75, dan blijft de opmenging beperkt tot ca. 20%. Een dergelijke helling is niet realistisch omdat een dergelijk flauw talud onder water slechts met grote moeite aangelegd en onderhouden zou kunnen worden. Oneffenheden in dat talud zouden daarbij een groot effect hebben op de entrainment.

Dat deze mate van opmenging reëel is, blijkt uit metingen uit 1974 [2] nabij het gemaal Helsdeur bij Den Helder. Hier wordt zoutwater afkomstig uit de schutsluizen via taluds naar een gemaal geleid. Bij het afstromen over de taluds (en tegelijkertijd het verbreden van die stroom en het nemen van bochten naar het gemaal) wordt de scherpe overgang tussen zout en zoet water, zoals die gemeten wordt direct achter de sluis, in verticale richting 'opgerekt' tot een vele meters hoge geleidelijke overgang in dichtheid. Deze metingen bevestigen de algemene trend van opmenging zoals geconstateerd uit de numerieke simulaties. Een meer uitgebreide beschrijving van deze metingen is opgenomen in Appendix B.

### 4.2 Menging door wind en scheepvaart

De menging door wind en scheepvaart is uitgewerkt in Appendix C. De theoretische basis voor menging is ontleend aan Kato en Philips (1969) die middels een experiment een verband legden tussen de schuifspanning aan het oppervlak en de menging daaronder. Deze benadering kan goed worden toegepast op de menging als gevolg van wind. Uit deze theoretische benadering kan worden afgeleid dat gemiddeld over de tijd, de zoutlek door wind kleiner zal zijn dan 1 kg/s. Daarmee zal menging door wind niet doorslaggevend zijn voor het functioneren van de zoutvang.

Het meest moeilijk te kwantificeren aspect is de mate waarin het zoute water in de zoutvang, of op weg daarnaar toe zal worden opgemengd door de schepen die de sluis uit- en invaren. Hiervoor zijn verschillende benaderingen verkend, zoals is beschreven in Appendix C. De best bruikbare bron van informatie wordt gevormd door een beschrijving van praktijkproeven uitgevoerd door Moser en Bakker [5], 1989. Deze kunnen beschouwd worden als een soort modelproeven op een grote schaal: in een sluiskolk (een van de beroepskolken van de Volkerak sluizen) is een gelaagde toestand aangelegd (zoeter water bovenop zouter water) en daar wordt met een 13 m lange werkboot meerdere keren overheen gevaren. Voor en na de vaarten wordt de dichtheidsverdeling in de verticaal opgemeten.

Op basis van de metingen wordt een parameter afgeleid die beschrijft welk deel van het schroefvermogen wordt gebruikt voor het opmengen van zout en zoet water, in feite voor het omhoog brengen van het zout uit de onderlaag naar de bovenlaag, hetgeen te beschouwen is als een verhoging van de potentiële energie. Het blijkt dat in de orde van 5% van het vermogen aan de schroef wordt gebruikt voor het verhogen van de potentiële energie in het water, dus het opmengen van het zoute en het zoete water.

Deze beschouwing kan ook worden losgelaten op de nu voorliggende vraag voor de Volkerak-sluizen. Hieruit blijkt dat het scheepsvermogen, benodigd om tijdgemiddeld ca. 15 kg/s zout naar boven te transporteren bij een zoutvang van 100 m lengte (of een blootgesteld deel van de zoutvang van die lengte, of van de route daarnaar toe) slechts ca. 70 kW bedraagt. Dit is voor de schepen die de Volkerak passeren een zeer lage waarde; het gebruikte vermogen ligt een factor 10 tot 20 hoger. Bovendien is de blootgestelde lengte eerder het dubbele, namelijk 200 m i.p.v. 100 m. (Zie voor een verder uitwerking hiervan Bijlage C, paragraaf C.4.)

Er kan dus verwacht worden dat, in de situatie van de Volkeraksluizen, de scheepvaart een zó grote menging veroorzaakt dat het functioneren van de zoutvang voor een groot deel teniet gedaan zal worden.

De menging van zout en zoet water door passerende schepen kan ook worden teruggevonden in metingen bij Terneuzen, namelijk in het kanaal dat de kleinere Middensluis en Oostsluis verbindt met het kanaal van Gent naar Terneuzen. Deze twee sluizen met het kanaal lijken in veel opzichten op de configuratie bij de Volkeraksluizen: er wordt op de dag van de metingen niet door deze sluizen gespuid (er is wel sprake van schutverlies) en de waterdiepte is vergelijkbaar. De passerende scheepvaart (niet genoteerd, maar gemiddeld passeren er 4 - 6 motorschepen met een geïnstalleerd vermogen van 4000 – 6000 kW), leidt in de metingen tot een aanzienlijke opmenging over de verticaal. Verwacht kan worden dat de scheepvaart bij de Volkeraksluizen intensiever is en dat dit zal leiden tot een volledige menging over de verticaal, over een relatief korte afstand.

#### 4.3 Vergelijking met de zoutvang bij Terneuzen

We moeten dus concluderen dat een 'open zoutvang' zoals die voor ogen stond aan het begin van de studie niet het gewenste effect gaat opleveren. Dan rijst de vraag: hoe zit het dan in bijvoorbeeld Terneuzen? Het belangrijkste verschil blijkt niet zo zeer te liggen in hoe de zoutvang precies functioneert (zie daarvoor Appendix D), als wel in hoe we de zoutindringing op het Kanaal van Gent naar Terneuzen (KGT) vergelijken met de zoutlek bij de Volkerak.

In het KGT kan zich een zouttong instellen, die in evenwicht wordt gehouden door enerzijds de zoutlek uit de sluizen en anderzijds het spuidebiet. Zelden of nooit bereikt de zouttong de kwetsbare inlaatpunten (richting Gent) omdat het KGT nu eenmaal een lang en smal kanaal blijft, met een, voor dat kanaal, redelijke afvoer van zoet water. De zouttong in het KGT heeft kennelijk lengte/ruimte genoeg om in positie te variëren voordat zijn zoutgehalte als hinderlijk, lees zoutlek, wordt ervaren.

Daarentegen is de zoutlek die de monding van de voorhavens van Volkerak passeert ook de werkelijke zoutlek: er is geen mogelijkheid meer om die terug te dringen met een spuidebiet (zoals in KGT) naar de Volkeraksluizen. In het KGT lijkt een zoutgehalte van 1 - 2 ppt veel voor te komen; dit zoutgehalte zou voor het Hollandsch Diep onacceptabel zijn.

De conclusie die we hieruit mogen trekken is dat, enerzijds, aan de zoutvang in Terneuzen veel lagere eisen worden gesteld dan hier het geval is wat betreft het zoutgehalte bovenstrooms van de sluis, terwijl anderzijds er een veel grotere afvoer van zoet water beschikbaar is om een te veel aan zout te voorkomen. De situaties zijn dus niet vergelijkbaar.



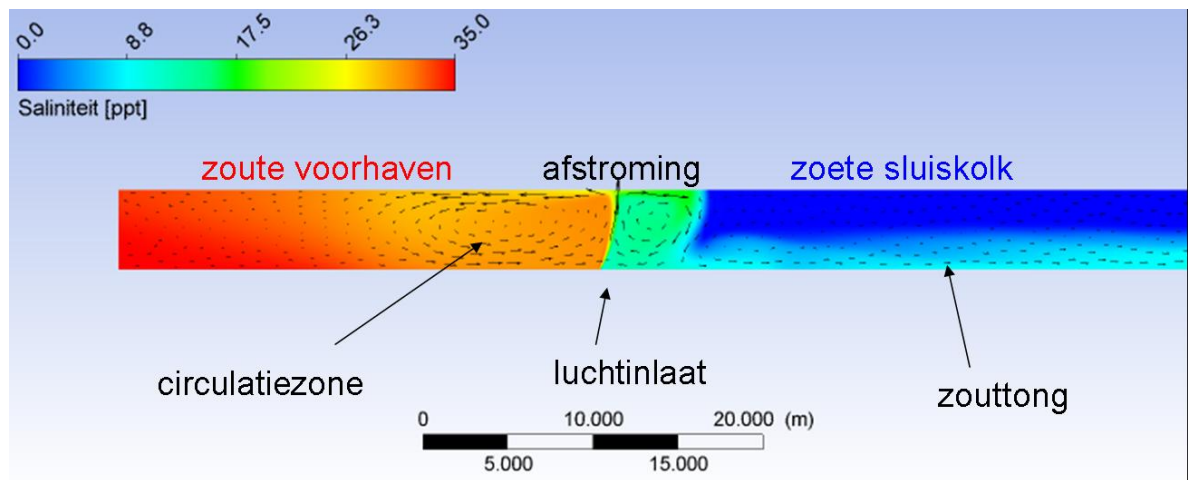


## 5 Alternatieve benadering: een beschermd zoutvang

### 5.1 Concept en inrichting van een beschermd zoutvang

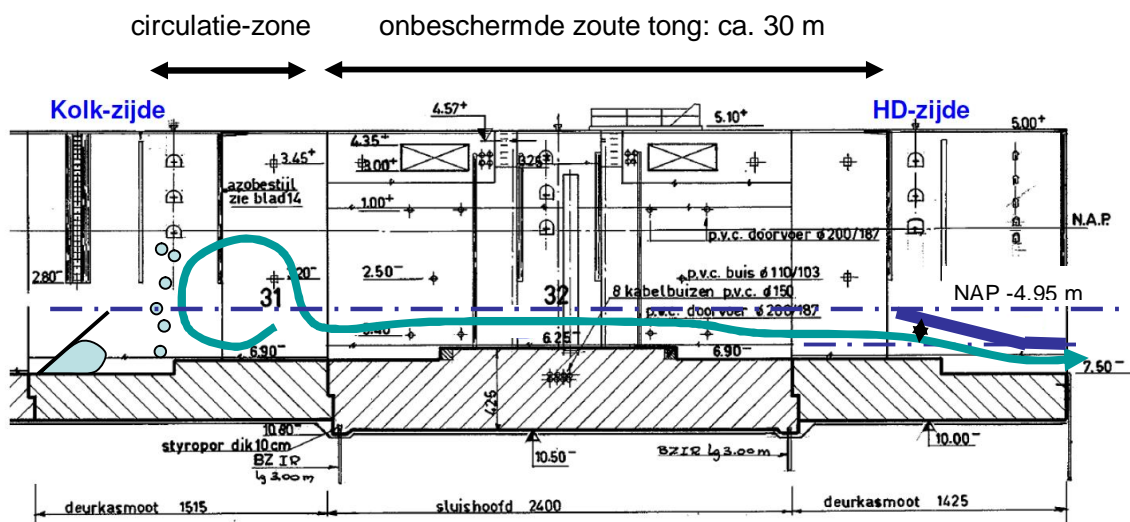
Op basis van het voorgaande moet geconcludeerd worden, dat het concept van een zoutvang zoals ons voor ogen stond (een diepe put in de voorhaven aan de HD-zijde, verbonden met de sluiskolken middels een flauwe helling) niet of nauwelijks een bijdrage gaat leveren aan het reduceren van de zoutlek door de sluisen. Dit houdt zowel verband met de route van de kolk naar de zoutvang, als met de menging door scheepvaart.

Beide negatieve effecten worden effectief bestreden door de lengte waarover het uit de kolk stromende zoute water bloot staat aan menging (door entrainment én door scheepvaart) zo kort mogelijk te maken. Een minimale lengte wordt verkregen door het zoute water direct aan de sluiskolk af te zuigen, onder de hier passerende schepen. Zoals blijkt uit Figuur 5.1 hieronder (Figuur 3.5 uit [1]) moet deze afzuiging dan bij voorkeur plaatsvinden op een afstand van ca. één maal de waterdiepte (6 – 7 m) vanaf het  $\Delta$ -luchtbellenscherm; op deze afstand zakt het zoute water uit de circulatie-zone die door het bellenscherm wordt gegenereerd.



Figuur 5.1 Overgenomen uit [1], Figuur 3.5 Berekening van de waterbeweging bij een luchtbellenscherm tussen zoute en zoete water; de circulatiezone aan de zoete zijde van het bellenscherm strekt zich in horizontale richting uit over een afstand die ongeveer gelijk is aan de waterdiepte.

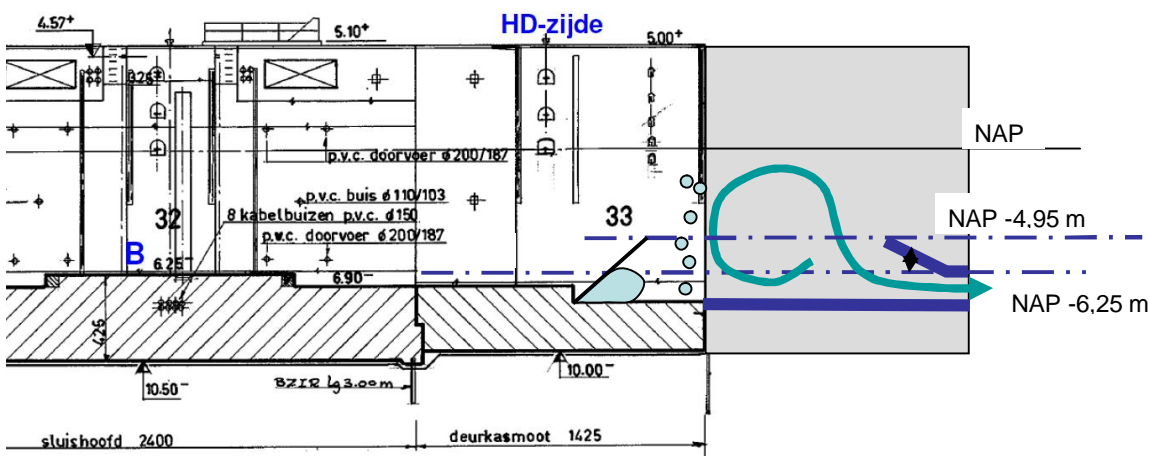
In dwars-doorsnede zou zo'n afzuiging aan het sluishoofd er als volgt uit kunnen zien:



Figuur 5.2 Schematische weergave afzuiging aan het sluishoofd, drempel en bellenscherm aan de binnenzijde

Een eerste variant sluit aan op de door DHV gekozen locatie van het  $\Delta$ -luchtbellenscherm, ondersteund met een beweegbare drempel. De onbeschermd lengte is dan nog steeds ca. 30 m. Over die 30 m vindt dan nog steeds opmenging door schepen plaats. Voor deze kortere lengte zou, conform de eerdere beschouwing, een maximum vermogen kunnen worden afgeleid van ca. 220 kW, nog steeds een erg kleine waarde. We moeten dus proberen de lengte nog verder te reduceren.

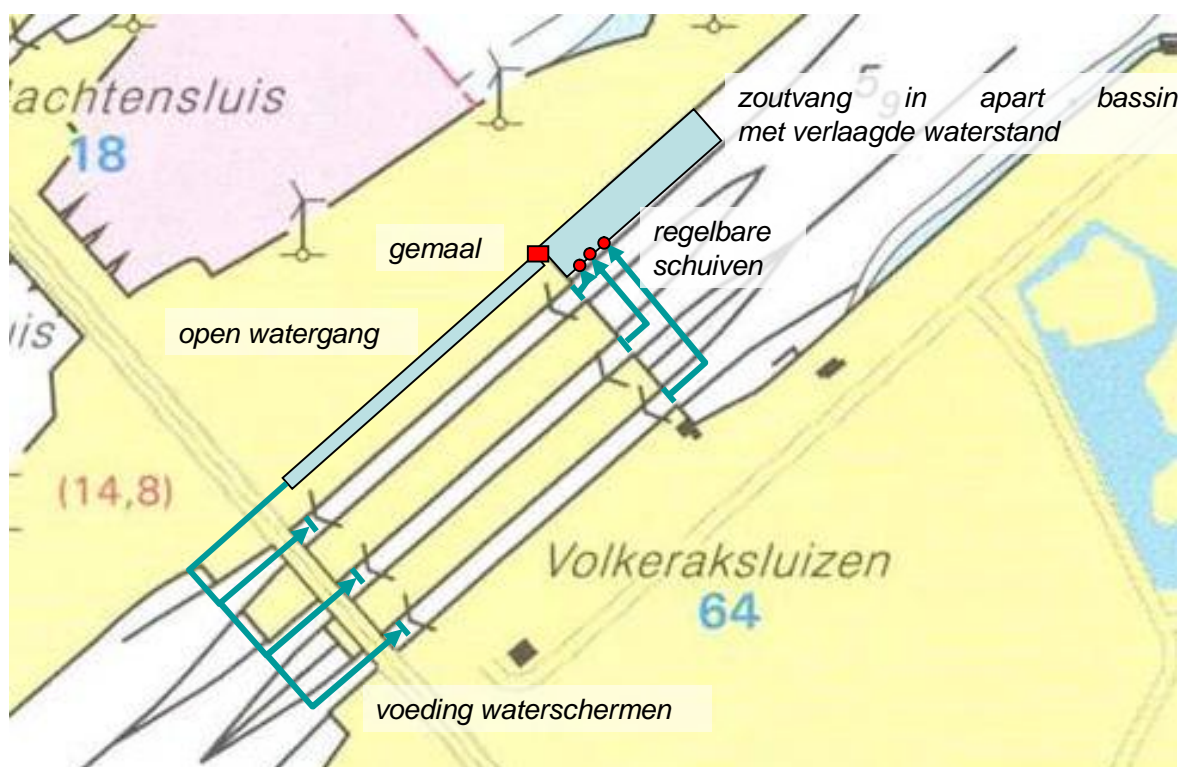
In de tweede variant wordt het bellenscherm verplaatst naar de buitenkant van het sluishoofd, en wordt de afzuiging gerealiseerd in een verlengd sluishoofd. Hiermee is de onbeschermd lengte van de uitstromende zouttong het kortst.



Figuur 5.3 Schematische weergave afzuiging aan het sluishoofd, drempel en bellenscherm aan de buitenzijde

Of de ene of de andere positie voordeliger is wat betreft de effectiviteit van het bellenscherm plus drempel is niet bekend. Bij de praktijkproef bij de Stevinssluisen is er voor gekozen het bellenscherm aan de zoute zijde van de deuren te houden. Een afweging op dit punt zou nog gemaakt moeten worden.

In bovenaanzicht zou de afzuiging, gecombineerd met de voeding van de waterschermen aan de VZM-zijde er als volgt uit kunnen zien:



Figuur 5.4 Schematische weergave van de inrichting bij afzuiging aan het sluishoofd

De zoutvang bestaat in deze layout uit een apart bassin met een verlaagde waterstand. De afzuiging van de sluiscolken wordt aangedreven door dit waterstandsverschil (dit vraagt dus geen extra pompen) en wordt geregeld middels schuiven. Een gemaal pompt continu water naar een hoger gelegen open watergang, van waaruit eveneens middels schuiven of kleppen, de waterschermen worden gevoed. Het pompen gebeurt met een debiet dat voldoende is om de waterschermen te voeden. Het debiet voor de waterschermen (zowel tijdgemiddeld als instantaan) is daarmee bepalend voor het debiet waarmee wordt afgezogen aan de sluishoofden. Omdat de afzuiging aan de sluishoofden aan de HD-zijde en de levering naar de waterschermen aan de VZM-zijde fluctueert in de tijd zal de waterstand in beide bassins iets variëren.

## 5.2 Uitwerking van de beschermde zoutvang door DHV

Ook de optie van de beschermde zoutvang is door DHV verder uitgewerkt, zowel qua inpassing als qua kosten. Deze uitwerking is opgenomen in Appendix F.

Er worden eerst twee opties uitgewerkt die ver uit elkaar liggen: een optie waarin elke kolk zijn eigen systeem heeft (afzuiging, pomp, buffer, waterscherm) en een optie waarin sprake is van een gezamenlijke lage buffer, een gemaal en een hoge buffer (vergelijkbaar met Figuur 5.4). Vervolgens is deze variant enigszins geoptimaliseerd qua inpassing. DHV concludeert dat een inpassing op het 2<sup>e</sup> (noordelijke) sluiseliland kansrijk is. Het al of niet toepassen van een lage buffer lijkt in investeringskosten weinig onderscheidend te zijn. In beheerskosten is het toepassen van een lage buffer goedkoper.

Ook de beschermde zoutvang (afzuiging aan het sluishoofd) is een aanvulling op het systeem voor het voeden van de waterschermen (zie ook paragraaf 3.4). DHV concludeert dat de meerkosten voor deze optie (een beschermde zoutvang) kleiner zullen zijn dan bij een open zoutvang: kleiner dan € 1 mln. Het is bij deze variant goed mogelijk om een eventuele 4<sup>e</sup> kolk in te passen en aan te sluiten.

### 5.3 Verwachting van de zoutlek bij een beschermde zoutvang

Op basis van de bevindingen inzake o.a. de menging door scheepvaart is hierboven een optimale inrichting van een "beschermde zoutvang" geschetst. De vraag of hiermee voldaan gaat worden aan de eis van 20 kg/s bij een watergebruik van 25 m<sup>3</sup>/s is daarmee echter nog niet beantwoord. Wat mogen we van zo'n systeem nu verwachten?

Door het voeden van de waterschermen met het zoutere water dat de kolk uitstroomt, wordt relatief zout water teruggedroefd naar de zoute kant. Het gevolg hiervan zal zijn dat de zoutlek naar de zoete kant kleiner wordt. We mogen dus verwachten dat de zoutlek kleiner wordt dan volgt uit de eerder gepresenteerde berekening (Figuur 2.2 hierboven). De vraag is nu: "Hoeveel kleiner?"

Het huidige zoutlek-model is echter niet in staat om deze vraag te beantwoorden; de manier waarop daarin de processen zijn geschematiseerd maakt het niet mogelijk om deze speciale configuratie met afzuiging aan de sluismond te beschrijven, met inbegrip van de menging door de scheepvaart. We proberen daarom tot een benadering van het antwoord te komen op basis van een beschouwing van de scheepvaartbewegingen door het sluishoofd.

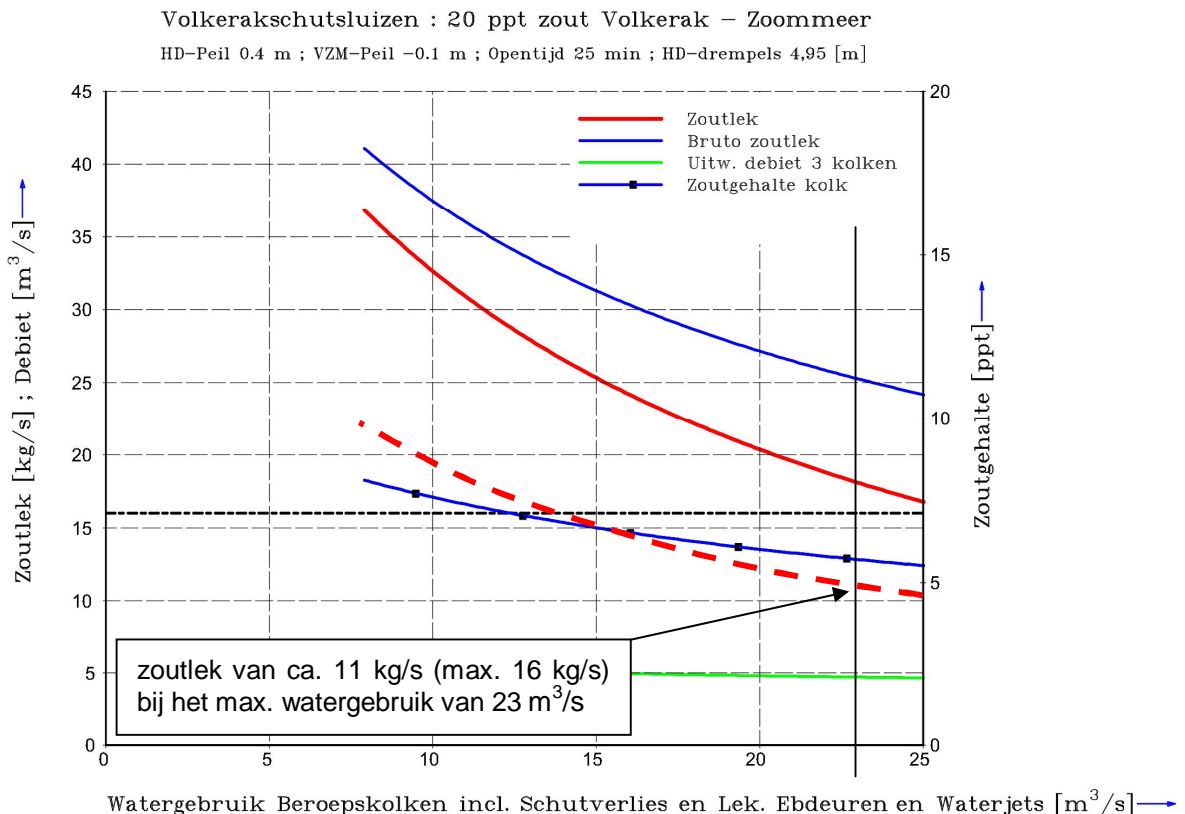
De deur-open-tijd die is aangenomen op 25 minuten kan worden onderverdeeld in een aantal fasen. Hieronder zijn die fasen aangeduid, met een ruwe schatting van de tijdsduur per fase (t.z.t. nader te onderbouwen met b.v. registraties op de sluis).

1. deuren gaan open, wachttijd tot groen licht voor uitgaande schepen: ca. 2 minuten
2. schepen (gemiddeld 2 tot 3) verlaten de sluis: ca. 3 minuten
3. vertrekkende schepen passeren wachtende schepen, wachtende schepen trekken op en naderen de sluis: ca. 8 minuten
4. invarende schepen (gemiddeld 2 tot 3) passeren het sluishoofd; dit duurt relatief lang omdat een voorgaand schip moet zijn vastgemaakt voordat een volgend schip kan aansluiten en ook vastmaken: ca. 10 minuten
5. de deuren sluiten; in het algemeen laten schepen de motor en schroef intussen draaien om daarmee de enkele afmeerlijn op spanning te houden; (met een kleine roerhoek wordt ook een kracht tegen de sluiswand gegenereerd); dit impliceert dat het water achter het schip (in het sluishoofd dus) in beweging wordt gehouden door de schroefwerking: ca. 2 minuten

Totaal: 25 minuten

Bovenstaand overzicht maakt duidelijk dat er twee fasen zijn waarin de waterbeweging in het sluishoofd niet wordt gestoord door passerende schepen, te weten fase 1 en fase 3, samen goed voor ca. 10 van de 25 minuten, dus zo'n 40% van de tijd. In die ongestoorde tijd zou het afzuigen van zout (bijna) perfect kunnen werken; in dat deel van de tijd schatten we de zoutlek optimistisch op 0%. Voor het andere deel van de tijd zouden we pessimistisch kunnen

stellen dat het afzuigen van het zoute water volledig verstoord wordt door de passerende schepen, en dat voor dat deel van de tijd de eerder getoonde berekening geldt (hieronder opnieuw weergegeven). (Let wel: de berekening beoogt de gehele operatie te vangen in gemiddelde waarden. Of deze ook mag worden toegepast op een deel van de cyclus is nog even de vraag.)



Figuur 5.5 (deels gelijk aan Figuur 2.2): Zoutlek door de Beroepssluizen als functie van het watergebruik; de toegevoegde rode stippellijn geeft de reductie van de zoutlek met ca. 40%

We nemen nu dus aan dat 40% van de tijd de zoutlek gelijk aan nul is, en dat 60 % van de tijd een zoutlek optreedt volgens de rode kromme hierboven. De gecombineerde kromme zou dan ca. 40% lager liggen. Deze gereduceerde kromme is in de figuur aangegeven met de rode stippellijn. De grens van 16 kg/s zoutlek wordt volgens die kromme bereikt bij een watergebruik van ca. 14 m<sup>3</sup>/s. Bij een watergebruik van 23 m<sup>3</sup>/s (het maximum voor de beroepssluizen) wordt de zoutlek door de beroepssluizen dan ca. 11 kg/s.

Samen met de Jachtensluis (een zoutlek van 4 kg/s) zou dat leiden dat tot een totale zoutlek van ca. 15 kg/s bij het maximale watergebruik van 25 m<sup>3</sup>/s. Daarmee zou het resultaat zijn dat, op basis van de dag-gemiddelde berekeningen, aangevuld met een ruwe beschouwing over het proces in de tijd, er met enige marge voldaan wordt aan de eis. De vraag is of de marge als voldoende kan worden beschouwd.

#### 5.4 Beoordeling van het resultaat

Zoals eerder in dit rapport gesteld, zijn er nog een aantal punten waar we ons bewust van moeten zijn bij de beoordeling van dit eind-resultaat.

- In de eerdere studies is aandacht geweest voor de onzekerheden in de uitkomsten van de berekeningen met het zoutlek-model en de implicaties daarvan voor de conclusies. Deze onzekerheden spelen nu ook. In de rapportage van de huidige studie zal daaraan nog enige aandacht worden besteed. De onzekerheden zijn door de laatste 'redeneer-stap' zeker groter geworden. Een betere uitwerking hiervan zou wenselijk zijn, maar is het kader van deze studie niet mogelijk.
- We moeten ons realiseren dat we bezig zijn om een ongestoorde zoutlek van 480 kg/s te reduceren tot 20 kg/s, iets meer dan 4% daarvan. Een zoutlek van 5% is al niet meer acceptabel. Deze eis is zo streng dat er nergens een gat mag vallen in de 'verdediging'. Ook komen alle gebruikte parameters onder een vergrootglas te liggen. Bijvoorbeeld: hoe zeker zijn we van de deur-open-tijd van 25 minuten en van 20 schutcycli per dag, zowel voor de jachtensluis als voor de beroepssluisen?
- De gepresenteerde getallen zijn geldig voor optimaal werkende bellenschermen en waterschermen; in welke mate dit in de praktijk en over een lange gebruiksduur ook haalbaar zal zijn moet nog blijken. In de praktijk zal bovendien behoefte zijn aan enige marge om (gepland of niet gepland) delen van de systemen tijdelijk buiten dienst te stellen voor onderhoud.
- De gepresenteerde getallen zijn gebaseerd op daggemiddelde waarden; de werkelijkheid zal echter fluctuaties laten zien:
  - er zal vrij gemakkelijk een (tijdelijk) afwijking naar boven optreden (tijdelijk een grotere zoutlek);
  - er zal ook af en toe een (tijdelijke) afwijking naar beneden optreden, maar gezien de zeer lage gemiddelde waarde zal de afwijking naar beneden in absolute zin kleiner zijn dan de afwijking naar boven;
  - de gemiddelde waarde zal daarom in de praktijk waarschijnlijk hoger gaan liggen dan nu berekend op basis van de gemiddelde parameters: uitgedrukt in een rekenvoorbeeld: als we tijdelijk een verdubbeling hebben van 20 naar 40 kg/s en even lang een halvering van 20 naar 10 kg/s, dan is het gemiddelde daarvan 25 kg/s, niet 20 kg/s.

Dit aspect moet zwaarder tellen dan in de voorgaande studies, omdat we inmiddels zo dicht bij de absolute ondergrens van 'nul' zitten.
- De uiteindelijke zoutlek zal ook afhankelijk zijn van hoe de uitvoering t.z.t. wordt georganiseerd: hoe wordt straks door de sluismeester de balans tussen de belangen van de scheepvaart gewogen tegen het belang van de beperking van de zoutlek? In welke mate zal het mogelijk zijn om de optredende zoutlek te meten, zodat de sluismeester er op kan sturen? Als we slechts meten bij de zoetwaterinnamepunten zijn een groot deel van de de mogelijkheden om te corrigeren al verbruikt.

Alles afwegende komen we tot de conclusie dat de marges tussen het rekenkundig resultaat en de geldende eisen op dit moment onvoldoende zijn om *met zekerheid* te zeggen dat het ook *in de praktijk* mogelijk zal zijn om de zoutlek te beperken tot 20 kg/s bij een watergebruik van niet meer dan 25 m<sup>3</sup>/s; de marges zijn zo klein ten opzichte van de onzekerheden dat het risico dat in de praktijk de eis zal worden overschreden groot tot zeer groot is.

Wat kunnen we dan nog doen om die risico's te reduceren?

Op de eerste plaats zouden de onzekerheden moeten worden gereduceerd. Dit betreft onder andere de operatie van het schutten: het aantal schuttingen per dag, de deur-open-tijden en

de tijdsduur van de verschillende fasen binnen de deur-open-tijd. Ook de effectiviteit van het afzuigen aan het sluishoofd verdient nadere beschouwing.

Ten tweede zouden verdere optimalisaties kunnen worden gezocht, o.a. in de hoogtes van de drempels. Zo zou de drempelhoogte niet gekoppeld hoeven te worden aan het minimum schutpeil aan de HD-zijde. Deze waarde, nu gesteld op NAP -0,25 m, wordt slechts eens per jaar onderschreden. De keuze voor een hoger niveau, bijdragend aan een verhoging van de drempels<sup>2</sup>, kan gunstig zijn voor de zoutlek, ten koste van slechts incidentele en beperkte hinder voor de scheepvaart: als de waterstand toch lager is en de kielspeling niet aan de norm voldoet moet er langzamer worden gevaren, maar er is geen sprake van een stremming. Als de speling te klein wordt moet de drempel worden neergelaten. Ook voor de drempels in de jachtensluis kan een verdere verhoging worden overwogen.

Tenslotte zal het operationeel beheer een grote rol spelen. Het borgen dat de eisen van zoutlek en watergebruik niet worden overschreden eist een systeem dat die twee parameters met voldoende nauwkeurigheid kan meten. Met name het meten van de zeer geringe netto zoutlek kan daarbij nog voor uitdagingen zorgen. Vervolgens moet de sluismeester in staat en gemachtigd zijn om, als dat nodig is, aanpassingen aan te brengen in het schutbedrijf, zodanig dat het aanbod van schepen wordt verwerkt op een manier die ook gunstig is voor het beperken van de zoutlek. Dit kan inhouden dat er meer geschut wordt met goed gevulde kolken, of op een manier die de deur-open-tijd minimaliseert. Dit kan bereikt worden door de schepen slim in te delen lang voordat ze de voorhaven invaren. Verder zal het (preventief) onderhoud moeten worden uitgewerkt zodat gegarandeerd wordt dat de systemen operationeel zijn als dat nodig is.

Als aanvullende maatregelen kan overwogen worden om, al of niet tijdelijk, iets meer zoet water te gebruiken; RWS gaf aan dat de eis van 25 m<sup>3</sup>/s mogelijk tijdelijk opgerekt zou kunnen worden tot 30 m<sup>3</sup>/s. Ook zou het tijdelijk verlagen van het peil op het Volkerak-Zoommeer te overwegen zijn; dit zou te realiseren zijn middels het nog te realiseren doorlaatwerk in de Philipsdam. (Dit zou welliswaar tot een groter schutverlies leiden, maar dat is maar een klein deel van het totale waterverbruik.)

## 5.5 Effect op vismigratie

De effecten van de zoutlekbeperkende maatregelen voor vismigratie zijn in de vorige fase bestudeerd [1] en [7]. Gebleken is dat deze effecten gering zijn en dat de extra zoetwaterstroom, samenhangend met de maatregelen, gunstig is als lokstroom voor migrerende vissen.

De aanvullende effecten van de zout(af)vang aan de Hollandsch Diep zijde betreffen voornamelijk het risico dat vis wordt meegezogen in het systeem en via pompen, leidingen en bufferbekkens wordt meegevoerd naar het waterscherm. Bij de inzuigopening zal een rooster moeten voorkomen dat grotere vissen worden ingezogen.

Voor kleine vissen bestaat een beperkt risico dat zij schade oplopen door de pompen (vijzels). Dit effect is overigens ook aanwezig bij het inzetten van een waterscherm zonder koppeling met een zoutvang. Daarom mag worden verwacht dat door de zoutvang geen aanvullende negatieve effecten voor vismigratie zullen optreden.

---

2. Als er ook grotere diepgangen moeten worden beschouwd moet ook daarvoor de drempelhoogte nader worden overwogen..





## 6 Conclusies en aanbevelingen

Deze studie heeft een reeks van inzichten opgeleverd zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken en waarvan een overzicht is gegeven in de Samenvatting.

De belangrijkste conclusie uit deze studie is dat een open zoutvang zoals ons aan het begin van dit project voor ogen stond naar verwachting maar zeer beperkt zal bijdragen aan het reduceren van de zoutlek door de Volkeraksluizen. Dit heeft te maken met gevoeligheid van het uitstromende water voor opmenging tijdens het aflopen naar de zoutvang (entrainment) en de naar verwachting grote mate van menging die zal worden veroorzaakt door de overvarende schepen.

Er is een alternatief ontwikkeld dat naar verwachting tegen geringere kosten een beter resultaat op zal leveren. Dit alternatief, aangeduid als een beschermde zoutvang of 'zoutafvang', is er op gericht de zoute stroming komend uit de sluiskolken af te zuigen direct aan de sluishoofden. De verwachting voor de zoutlek komt uit op een dag-gemiddelde waarde van 15 kg/s. Deze is gebaseerd op een ruwe schatting van de tijdsduur van verschillende fasen van de deur-open-tijd en dit behoeft nadere uitwerking en onderbouwing.

De door RWS geselecteerde maatregelen, in combinatie met een beschermde zoutvang, leidt dus, op basis van de berekeningen en beschouwingen zoals in dit rapport gepresenteerd, tot een verwachte waarde voor de zoutlek van 15 kg/s. Deze blijft met enige marge onder de eis van 20 kg/s. Om voldoende zekerheid te hebben dat ook in de praktijk de eis van 20 kg/s gehaald zal worden wordt aanbevolen om een aantal aspecten nader te onderzoeken en een aantal additionele maatregelen uit te werken.

- 1 Bepaling (registratie) en analyse van de operationele cyclus van de sluizen als functie van de bezetting, zowel beroeps- als jachtensluis; dit betreft de tijdsduur van alle te onderscheiden fasen van de cyclus: begin deuren openen, deur is open, licht op groen, begin uitvaren, einde uitvaren, begin invaren, einde invaren, begin deur sluiten, deur is gesloten, begin nivelleren, einde nivelleren. Dit geeft niet alleen een goed gefundeerd beeld van de belangrijke parameter 'deur-open-tijd', bepalend voor zowel de jachtensluis als de beroepssluis, maar het geeft ook een essentiële basis voor de te verwachten reductie die met het afzuigen aan het sluishoofd kan worden verkegen.
  - 2 Een bepaling van de zoutlek op basis van berekeningen in de tijd, in plaats van op basis van dag-gemiddelde waarden. De invoer voor deze berekening zal onder andere bestaan uit een realistische (evt. geregistreerde) tijdserie van scheepspassages, over dagen c.q. weken met bijbehorende schutcyclus (o.a. variabele deur-open-tijden), aangevuld met starten en stoppen van bellen- en waterschermen en het nivelleren op basis van een verwacht getij. Verwacht wordt de dag-gemiddelde uitkomst van een berekening in de tijd een grotere zoutlek zal weergeven dan de uitkomst van een berekening op basis van dag-gemiddelde invoer, zoals tot nu toe steeds is gedaan.<sup>3</sup>
  - 3 Als vervolg hierop: een verkenning van wat een aangepast verkeersmanagement kan betekenen voor de zoutlek, en welke implicaties (toename van de passagetijd) hierbij te
- 
3. *In deze berekeningen kan ook rekening worden gehouden met het neerlaten van de drempel bij passages van diep stekende schepen, mede onder invloed van variërende waterstand. (Het programma zou hiertoe wel moeten worden uitgebreid.) Op deze manier zouden ook verschillende drempelhoogtes nader kunnen worden onderzocht.*

verwachten is voor de scheepvaart. Hierbij kan overwogen worden om de berekeningen met het zoutlekmodel in de tijd te combineren met simulaties met SIVAK<sup>4</sup> (RWS-DVS).

- 4 De verwachting voor de effectiviteit van de afzuiging aan het sluishoofd is o.a. gebaseerd op een aanname van 100% effectiviteit in de (geschatte) periode dat er geen verstoring plaatsvindt door scheepvaart. Deze aanname vraagt om een eerste uitwerking van de hydraulische vormgeving en de te verwachten effectiviteit van de afzuigconstructie. Deze vormgeving moet worden afgestemd op de te verwachten zoute uitstroming uit de kolk, die niet altijd uniform over de breedte zal zijn: het openen van de deuren begint in het midden. Ook de effectiviteit tijdens het passeren van een schip (eerst de romp, dan de schroef) is daarbij van belang. Afhankelijk van de niet-uniformiteit zal de effectiviteit c.q. het waterverbruik variëren.

Als onderdeel van het groot onderhoud van de Krammersluizen onderzoekt RWS momenteel de mogelijkheid of de huidige zoet-zoutscheiding van dit sluzencomplex kan worden aangepast door gebruik te maken van de innovatieve (combinatie van) zoutlekbepurende maatregelen voor de Volkeraksluizen. Het doel van deze aanpassing is om (1) te besparen op het toekomstig beheer een onderhoud, (2) het verkorten van de schuttijden en tevens (3) operationele ervaring op te doen met de voor de Volkeraksluizen ontworpen maatregelen. In concreto wordt gedacht aan een implementatie pilot op een van de jachtensluizen. Dit zou tevens kansen bieden voor een verdere uitwerking van de volgende aspecten:

- 5 Om investerings- en operationele kosten te beperken is het zinvol om de optimale debieten van lucht en water nader te onderzoeken. Hiervoor was tijdens de praktijkproef bij de Stevinsluizen onvoldoende gelegenheid.
- 6 De pilot op de Krammersluizen zou zeker een impuls kunnen geven aan de ontwikkeling van een zout-zoet-management-systeem: hoeveel zoetwater wordt er gebruikt, hoeveel zout komt er binnen: wat te meten, hoe te presenteren aan de sluismeesters, hoe kan die in de praktijk het verkeersmanagement combineren met het zout-zoet-management. Een goede opzet ervan en de (door-)ontwikkeling ervan in samenspraak met het sluispersoneel is van groot belang voor een succesvolle operationele fase.
- 7 In de huidige studie kon geen goed beeld worden verkregen van de menging door scheepvaart. Door de keuze voor een beschermde zoutvang is deze parameter van minder groot belang geworden. Voor de implementatie op de Krammersluizen, maar ook voor andere locaties in Nederland, kan dit mogelijk wel van belang zijn. In dat geval moet naar mogelijkheden worden gezocht om de menging op realistische schaal te onderzoeken.
- 8 In een latere fase zal voldoende aandacht besteed moeten worden aan de interactie tussen de hydrodynamica en de regeltechniek; dit om te voorkomen dat verstoringen door b.v. passerende schepen doorwerken naar afzuigdebieten, schuifstanden, waterstanden (schommelingen in de lage buffer), pompdebiet, waterstanden en slingeringen in de hoge buffer en voeding naar het waterscherm. Dit dynamisch gedrag zou de effectiviteit van de maatregelen (ernstig) kunnen beïnvloeden. Als afzuiging ook bij de implementatie-pilot Krammersluizen overwogen gaat worden, zal ook dit nader aandacht kunnen krijgen.

---

4. SIVAK is een verkeerssimulatiemodel dat ingezet kan worden bij studies over de verkeersafwikkeling van het scheepvaart- en wegverkeer bij bruggen, sluizen, vernauwingen en vaarwegvakken, gelegen in een netwerk van vaarwegen en onder invloed van verschillende verkeersmanagementmaatregelen.

Tenslotte zijn er een aantal randvoorwaarden die nader overwogen zouden kunnen worden. Dit zijn:

- De maatgevende laagwaterstand op het Hollandsch Diep waaruit de toelaatbare hoogte van de drempels in de beroepskolken is afgeleid.<sup>5</sup>
- De benodigde vaardiepte boven de drempel in de jachtensluis; dit in relatie tot diep stekende jachten (voor zover die met een hoge mast wel onder de vaste brug kunnen passeren) en gebruik van de jachtensluis door beroepsvaart (en de wenselijkheid daarvan met het oog op de zoutlek).
- De mogelijkheden om, in geval van langdurige droogte, het peil op het Volkerak-Zoommeer te reduceren.

Van alle drie deze randvoorwaarden kan het effect op de zoutlek worden bepaald met het zoutlekmodel, liefst rekenend in de tijd (zie punt 2).

Tenslotte wordt aanbevolen om, voor de meest kansrijke variant, de inpassing en begroting van de bepalende onderdelen verder uit te werken tot het niveau van een schetsontwerp.

---

5. *Hierbij ook in beschouwing te nemen de passages door dieper stekende schepen. De kans van voorkomen van lage waterstanden, het aantal passages van diepstekende schepen (beiden zowel nu als in de toekomst) en het effect op zoutlek en operatie van het neerlaten van de drempel zullen tegen elkaar moeten worden afgewogen.*



## Referenties

- [1] “Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen”, projectnummer 1201226, Deltares, April 2011
- [2] “Onderzoek naar de werking van de zoutkom voor het gemaal “De Helsdeur” te Den Helder”, Memo 74.6 (met 5 bijlagen), Rijkswaterstaat Studiedienst Hoorn, Maart 1974
- [3] “Stroomsluis Noordland in de Oosterscheldedam, selectief afzuigen, tweedimensionaal onderzoek, verslag modelonderzoek”, M1204, Waterloopkundig Laboratorium, Juli 1973
- [4] “Stroomsluis Noordland in de Oosterscheldedam, selectief afzuigen, driedimensionaal onderzoek, verslag modelonderzoek”, M1209, Waterloopkundig Laboratorium, December 1973
- [5] “Mixing caused by Shipping Traffic”, G.M. Moser and J.P.G. Bakker, Waterloopkundig Laboratorium, 1989
- [6] “Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen: Scenarioberekeningen zoutverspreiding zoutlek Volkeraksluizen”, projectnummer 1201226, Deltares 2011
- [7] “Evaluatie Vismigratie Volkeraksluizen”, Ziltwater Advies, Z. Jager, 2010