

Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen

**Eindrapport van het onderzoek naar mogelijkheden voor de
zoutlekbeperving door de Volkeraksluizen na verzilting van
het Volkerak-Zoommeer**

M.T. Villars M.Sc
dr. ir. R.E. Uittenbogaard
ir. J.M. Cornelisse
drs. A.J. Nolte

1201226-015

Titel

Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen
Eindrapport van het onderzoek naar mogelijkheden voor de zoutlekbeperving door de
Volkeraksluizen na verzilting van het Volkerak-Zoommeer

Opdrachtgever Rijkswaterstaat Waterdienst	Project 1201226-015	Kenmerk 1201226-015-ZKS-0002	Pagina's 64
Classificatie vertrouwelijk tot juni 2011			

Trefwoorden

Volkeraksluizen, zoutlek, zoutlekbeperkende middelen, luchtbellenscherm, waterscherm

Samenvatting

Bij verzilting van het Volkerak-Zoommeer ontstaat een zout-zoet grens met het Hollandsch Diep. Door de Volkeraksluizen die de scheepvaartverbinding tussen beide deltawateren vormen, zal zout lekken. Als randvoorwaarde voor verzilting van het Volkerak-Zoommeer is (onder andere) gesteld dat behoud of verbetering van de zoetwatervoorziening gerealiseerd kan worden. Daartoe moet de zoutlek door de Volkeraksluizen beperkt worden.

Het hoofddoel van de Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen is om tot haalbare ontwerpopties te komen voor maatregelen die in de Volkeraksluizen kunnen worden geïmplementeerd om de zoutlek vanuit het Volkerak-Zoommeer naar het Hollandsch Diep te beperken. Ontwerpopties zijn haalbaar als ze aan drie uitgangspunten voldoen: 1) De resterende zoutlek is niet meer dan 60 kg/s; 2) Het waterverbruik uit het Hollandsch Diep is niet meer dan 25 m³/s; en 3) De scheepvaart mag niet onacceptabel gehinderd worden.

Dit rapport is het eindrapport waarin alle (deel)onderzoeken voor de geïnteresseerde, maar niet noodzakelijkerwijs (vak)deskundige lezer worden samengevat.

Het voornaamste onderdeel van de studie was een praktijkproef op ware schaal in de Stevinsluis bij Den Oever in de Afsluitdijk. Gedurende twee maanden is in een operationele sluis de zoutlek bepaald. Diverse (combinaties van) zoutlekbeperkende middelen zijn beproefd, waaronder de aanwezige 'traditionele' luchtbellenschermen, innovatieve door Deltares ontwikkelde Δ -luchtbellenschermen, een waterscherm en een verhoogde drempel. Daarnaast zijn laboratoriumproeven en gedetailleerde computerberekeningen uitgevoerd.

Geconcludeerd wordt dat het mogelijk is om de zoutlek te beperken tot 60 kg/s binnen de gestelde uitgangspunten. Er is altijd een combinatie van zoutlekbeperkende middelen nodig, waarbij in alle gevallen Δ -luchtbellenschermen nodig zijn. Er zijn meerdere combinaties mogelijk. Met maximale inzet van zoutlekbeperkende middelen kan de zoutlek ook tot minder dan 60 kg/s beperkt worden.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	Feb 2011	M.T. Villars M.Sc ir. J.M. Cornelisse dr. ir. R.E. Uittenbogaard drs. A.J. Nolte		ir. R.J. de Jong dr. M. Marchand		ir. T. Schilperoort	
2.0	Apr 2011	M.T. Villars M.Sc ir. J.M. Cornelisse dr. ir. R.E. Uittenbogaard drs. A.J. Nolte	<i>AW</i>	ir. R.J. de Jong dr. M. Marchand	<i>MM</i>	ir. T. Schilperoort	<i>T.S.</i>

Status

definitief

Inhoud

0 Samenvatting en conclusies: Hoeveel zoutlekbeperking is mogelijk?	1
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding	7
1.2 Vraagstelling	8
1.3 Aanpak	8
1.4 Leeswijzer voor dit rapport	9
1.5 Introductie van enkele begrippen	10
1.6 Verantwoording	10
2 Vraagstelling en achtergrond	11
2.1 Het Volkerak-Zoommeer en de Volkeraksluizen	11
2.1.1 Besluitvorming voor een zout Volkerak-Zoommeer	11
2.1.2 Hoe zout wordt het Volkerak-Zoommeer?	12
2.1.3 De Volkeraksluizen	13
2.2 Waarom lekt er zout door een sluis: theoretisch kader	14
2.2.1 Verschil in zoutgehalte	14
2.2.2 Gedrag van zout water in een sluis	15
2.2.3 Hoe kan de zoutlek beperkt worden: zoutlekbeperkende middelen in de sluis	18
2.2.4 Variatie van zout in de sluiskolk tijdens de schutcyclus	22
3 Vaststellen effectiviteit zoutlekbeperkende middelen	25
3.1 Hoe bepalen we de zoutlek door de Volkeraksluizen: Van theorie naar praktijk	25
3.2 Voorbereidende verkenning met computer- en schaalmodel	26
3.2.1 Laboratoriumproeven	26
3.2.2 Gedetailleerde computerberekeningen	28
3.2.3 Lessen uit de labproeven en gedetailleerde computerberekeningen	31
3.3 Grootschalige praktijkproef in de Stevinsluis	32
3.3.1 Inleiding	32
3.3.2 Het meten van de zoutvariatie in de sluiskolk: de meetopstelling	35
3.3.3 Zoutlekbeperkende middelen: Innovatieve Δ -luchtbellenscherm, waterscherm en drempel	36
3.3.4 Resultaten van de praktijkproef: Effectiviteit van zoutlekbeperkende middelen	38
3.4 Het Zoutlekmodel	41
4 Mogelijkheden zoutlekbeperking Volkeraksluizen	43
4.1 Inleiding	43
4.2 Basisresultaat: Mogelijkheden zoutlekbeperking in de Volkeraksluizen	47
4.3 Onderzoek speelruimte	48
4.3.1 Minder waterverbruik of aangepaste drempelhoogte	48
4.3.2 Minimalisatie zoutlek	49
4.3.3 Gevoeligheid voor doorlaatfractie	50
4.3.4 Gevoeligheid voor zoutverschil en deuropentijd	50
4.4 Samenvattende conclusie	51

5 Overige onderzoeken	53
5.1 Effect Δ -luchtbellenscherm op scheepvaart	53
5.2 Operationeel beheer van de Volkeraksluizen	55
5.3 Duurproef Δ -luchtbellenschermen	56
5.4 Effect op vismigratie	58
5.5 Verspreiding zout in Hollandsch Diep: Innamepunten	60
5.6 Bijdrage aan kenniseconomie en aan innovatie	61
6 Referenties	63
6.1 Rapporten deze studie	63
6.2 Overige referenties	64

0 Samenvatting en conclusies: Hoeveel zoutlekbeperving is mogelijk?

Inleiding

Deltares heeft in de periode november 2009 - april 2011 de "Ontwerpstudie en Praktijkproef zoutlekbeperving Volkeraksluizen" uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat Waterdienst.

De context van deze studie is het in het Nationaal Waterplan 2009-2015 opgenomen voornemen om het Volkerak-Zoommeer te verzilten om onder andere het blauwalgenprobleem op te lossen en de basis te leggen voor een duurzaam en gezond ecologisch systeem. Een randvoorwaarde voor deze verzilting is het realiseren van maatregelen voor het behoud of de verbetering van de zoetwatervoorziening rondom het Volkerak-Zoommeer en in het Noordelijk Deltabekken. In het Hollandsch Diep, Haringvliet en Spui bevinden zich meerdere waterinnamepunten voor de drink- en industriewatervoorziening, en voor de watervoorziening ten behoeve van land- en tuinbouw. Verkennend onderzoek heeft aangegeven dat indien de zoutlek door de Volkeraksluizen beperkt blijft tot 60 kg/s, de chlorideconcentratie bij deze waterinnamepunten voldoende laag blijft. Zonder enige maatregelen zou de zoutlek door de Volkeraksluizen na verzilting van het Volkerak-Zoommeer ongeveer 480 kg/s zijn.

De vraag aan Deltares

De kernvraag van deze studie is of het mogelijk is om de zoutlek door de Volkeraksluizen te beperken tot maximaal 60 kg/s, bij inzet van (een combinatie van) haalbare maatregelen. Maatregelen die in aanmerking komen zijn een luchtbellenscherm, een waterscherm, een drempel en lekkende ebdeuren ("lekdebiet"). Belangrijke randvoorwaarden hierbij zijn dat niet meer dan 25 m³/s water aan het Hollandsch Diep onttrokken mag worden en dat de scheepvaart niet (of minimaal) gehinderd mag worden. Er wordt uitgegaan van de prognose van scheepsaanbod in 2020.

Indien het wel mogelijk is om de zoutlek te beperken, zijn de belangrijkste aanvullende vragen:

- Welke (combinaties van) maatregelen zijn hiervoor nodig? *en*
- Tot welke hoeveelheid (kg/s) kan de zoutlek worden beperkt?

Conclusies

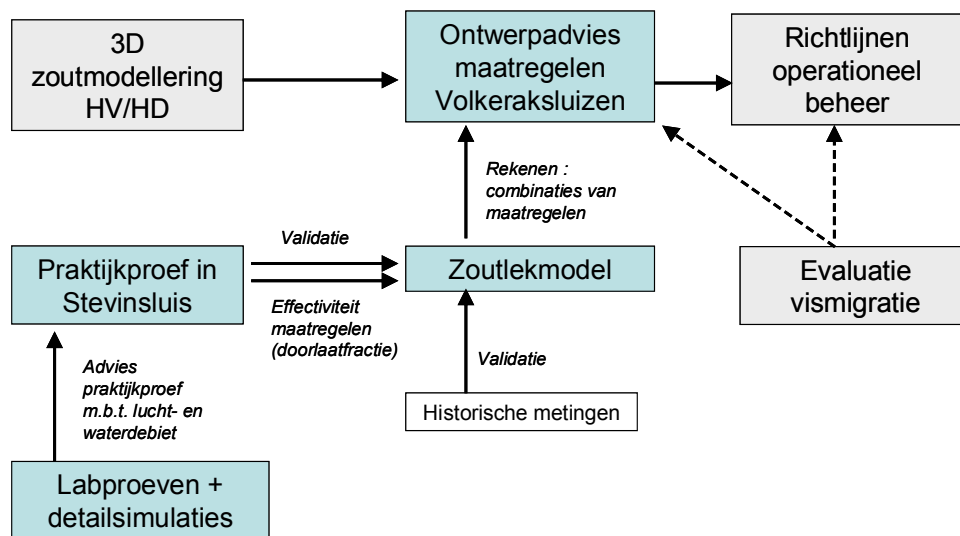
Op basis van de uitgevoerde studies kunnen we concluderen dat:

- I. Het is mogelijk om de zoutlek te beperken tot maximaal 60 kg/s.
- II. De beperking tot maximaal 60 kg/s vraagt om een combinatie van zoutlekbepervende middelen, omdat géén van de afzonderlijke maatregelen op zichzelf voldoende zoutlekbeperving oplevert.
- III. Er zijn meerdere combinaties van zoutlekbepervende middelen mogelijk. Dit geeft dus keuzevrijheid voor implementatie in de Volkeraksluizen. Het Δ -luchtbellenschermen op alle kolkeinden in de Volkeraksluizen is echter een onderdeel van alle varianten.
- IV. Een veelbelovende combinatie van zoutlekbepervende middelen bestaat uit Δ -luchtbellenschermen aan alle kolkeinden, een verhoogde drempel aan Hollandsch Diep zijde en het toepassen van de methode van 'lekkende ebdeuren'.
- V. Met een combinatie van Δ -luchtbellenschermen en drempels aan beide zijden en met 'lekkende ebdeuren' waarbij maximaal gebruik van water wordt gemaakt, is het mogelijk om de zoutlek te beperken tot circa 30 kg/s.

- VI. Verdere beperking van de zoutlek tot onder 30 kg/s is waarschijnlijk mogelijk met de bouw van een zoutvang (een diepe put of geul waarin het zoutere water opgevangen wordt) in de voorhaven van de Volkeraksluizen aan de Hollandsch Diep zijde. Deze maatregel is niet onderdeel geweest van de praktijkproef en zou verder onderzocht moeten worden. Implementatie van deze maatregel is ook veel ingrijpender dan die van de andere voorgestelde maatregelen, en kan het best gekoppeld worden aan de (eventuele) bouw van een vierde kolk (vanwege de aanleg van watertunnels die de zoutvang met het Volkerak-Zoommeer moeten verbinden).

Hoe zijn we tot die conclusies gekomen?

Om tot bovenstaande conclusies te komen, is een serie van gerelateerde deelstudies uitgevoerd, inclusief labproeven, gedetailleerde computersimulaties van zoet-zout uitwisselingen, een praktijkproef en uitgebreide analyses met een model om de zoutlek door schutsluizen te bepalen (het 'Zoutlek' model). Figuur 1 geeft een overzicht van en de samenhang tussen de verschillende onderdelen. De (vier) blauw gekleurde blokjes geven de hoofdlijn van de studie aan, namelijk het onderzoek naar de mogelijkheden om de zoutlek door de Volkeraksluizen te beperken. De (drie) grijs gekleurde blokjes geven de aanvullende deelstudies aan. Alle deelstudies zijn samengevat in het onderstaande schema.



Figuur 1 Overzicht van deelstudies en hun samenhang in de "Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperking Volkeraksluizen". De (vier) blauw gekleurde blokjes geven de hoofdlijn van de studie aan, namelijk het onderzoek naar de mogelijkheden om de zoutlek door de Volkeraksluizen te beperken. Het Zoutlekmodel staat centraal in de evaluatie van zoutlekbeperkende maatregelen. De effectiviteit van verschillende maatregelen is gemeten tijdens een praktijkproef uitgevoerd in de Stevinsluis (in de Afsluitdijk, bij Den Oever). Vooraf aan de praktijkproef hebben laboratoriumproeven en gedetailleerde simulaties van zoet-zout uitwisselingen de nodige informatie geleverd voor een optimale dimensionering van het luchtbellenscherm en het waterscherm en een effectieve meetopstelling voor de praktijkproef.

Het Zoutlekmodel

Het Zoutlekmodel staat centraal in de evaluatie van mogelijke zoutlekbeperkende maatregelen voor de Volkeraksluizen. Het model berekent de netto zoutlek door een schutsluis gemiddeld over veel schutcycli. Alle belangrijke factoren die de zoutlek beïnvloeden, zoals de dimensies van de schutsluis, het aantal schuttingen per dag, de tijd dat de sluisdeuren openstaan, waterverplaatsing door scheepvaart, het zoutgehalte in de schutsluis en in de voorhavens en de inzet van verschillende maatregelen worden meegenomen in het model.

Met het model is de zoutlek door de Volkeraksluizen berekend voor verschillende (combinaties van) zoutlekbeperkende maatregelen, inclusief luchtbellenscherm, waterscherm, drempel, en lekkende ebdeuren ("lekdebiet"). De cruciale invoerparameter voor de modelberekeningen is de effectiviteit van de verschillende maatregelen. Een groot deel van de andere studieonderdelen was dus gericht op het meten met de effectiviteit van de maatregelen en het valideren van de resultaten van het model. Ook historische metingen van de zoutlek door de Volkeraksluizen in de periode 1969-1980 zijn gebruikt om het Zoutlekmodel te valideren.

De praktijkproef

Ter validatie van het Zoutlekmodel en om de effectiviteit van de maatregelen te meten in een werkende schutsluis, is een praktijkproef op ware schaal uitgevoerd. Praktijkproeven in de Volkeraksluizen waren niet mogelijk, omdat er in de huidige situatie geen zoutverschil is tussen Volkerak-Zoommeer en Hollandsch Diep. Om de complexe processen toch in de praktijk te kunnen meten is de Stevinsluis in de Afsluitdijk geselecteerd.

In de Stevinsluis worden al 'traditionele luchtbellenschermen' (geperforeerde buizen) gebruikt. Voor de praktijkproef is een innovatief luchtbellenscherm ontworpen (Δ -luchtbellenscherm) waarbij de innovatie bestaat uit gebruik van speciale diffusers en luchtventielen die altijd een gelijkmatige luchtverdeling over de gehele kolkbreedte garanderen. Een dubbele rij is gebruikt met onderling versprongen diffusers die het luchtbellenscherm zo ondoordringbaar mogelijk tegen zout maken. Een extra innovatie is de combinatie van een luchtbellenscherm met een waterscherm waarbij het waterscherm direct parallel aan het Δ -luchtbellenscherm is geplaatst

Gedurende twee maanden (april-mei 2010) is de zoutlek gemeten in de werkende schutsluis op basis van 35 zoutmeters verspreid in de kolk (25) en in de voorhavens (5 aan de Waddenzee-zijde en 5 aan de IJsselmeer-zijde). In totaal zijn 844 schuttingen en 22 (combinaties van) zoutlekbeperkende middelen bemeaten. Het belangrijkste resultaat van al deze metingen is een goed onderbouwde waarde voor de effectiviteit van de verschillende maatregelen, zoals samengevat in Tabel 1. De Δ -luchtbellenschermen zijn effectiever dan traditionele luchtbellenschermen doordat een beter gesloten scherm gevormd worden en er dus minder tot geen kieren zijn waardoor alsnog zout kan glippen. De combinatie van een Δ -luchtbellenscherm met andere zoutlekbeperkende middelen verlaagt de doorlaatfractie nog verder. De laagste doorlaatfractie wordt bereikt door een combinatie van het Δ -luchtbellenscherm met een waterscherm.

Tabel 1 Effectiviteit en doorlaatfractie* van zoutlekbeperkende middelen als deze aan één zijde van een schutsluis ingezet worden. De waarden zijn afgeleid van de praktijkproef in de Stevinsluis. Deze waarden zijn daarna toegepast in het Zoutlekmodel om de zoutlek door de Volkeraksluizen te berekenen voor verschillende combinaties van maatregelen.

Zoutlekbeperkend middel (combinatie van) ingezet bij een kant van een schutsluis	Doorlaatfractie (%)	Effectiviteit (%)
geen	100%	0%
traditioneel luchtbellenscherm (geperforeerde buis)	40%	60%
Innovatief (Δ -) luchtbellenscherm	25%	75%
waterscherm	40%	60%
Δ -luchtbellenscherm + waterscherm	15%	85%
Δ -luchtbellenscherm + drempel	20%	80%
Δ -luchtbellenscherm + lekkende ebdeuren	Afhankelijk van debiet	

* De effectiviteit van een maatregel (hoeveel zout wordt tegengehouden) wordt ook weergegeven als 'doorlaatfractie' (hoeveel zout wordt doorgelaten, ten opzicht van een situatie zonder maatregelen). Een maatregel, bijvoorbeeld een traditioneel luchtbellenscherm, die 60% effectief is (60% van het zout wordt tegengehouden) heeft een doorlaatfractie van 40% (40% van het zout wordt doorgelaten).

Laboratoriumproeven en gedetailleerde computersimulaties

Laboratoriumproeven en gedetailleerde computersimulaties van zout-zoet uitwisseling hebben inzicht geven in de werking van een luchtbellenscherm en een waterscherm (afzonderlijk en in combinatie) als zoutlekbeperkende middel(len). Ook werd hiermee inzicht verkregen in de stroming die wordt veroorzaakt in een schutsluis door deze maatregelen. Deze studies hebben een eerste schatting van de effectiviteit van deze middelen gegeven voor verschillende lucht- en waterdebieten, en daarmee is de dimensionering van het luchtbellenscherm en waterscherm voor de praktijkproef afgeleid.

Additionele deelstudies

In aanvulling op de analyse van de zoutlek door de Volkeraksluizen is een drietal gerelateerde deelstudies uitgevoerd:

- (1) Driedimensionale zoutmodellering in het gebied Haringvliet en Hollandsch Diep;
- (2) Evaluatie van het effect zoutlekbeperkende middelen op vismigratie door de Volkeraksluizen en
- (3) Richtlijnen voor operationeel beheer van de Volkeraksluizen met zoutlekbeperkende middelen

Deze deelstudies zijn hieronder samengevat.

3D zoutmodellering in het Haringvliet en Hollandsch Diep

Met een 3-dimensionaal detailmodel van het Haringvliet, Spui en Hollandsch Diep zijn de modelresultaten verkregen die goed overeenkwamen met de inzichten die uit metingen uit 1986 konden worden afgeleid. Deze metingen geven aan dat er in het Haringvliet een substantiële zoutstratificatie ontstaat als zout door de Volkeraksluizen lekt. De toename die wordt vermeld betreft de maximale toename aan het eind van de droge periode. Met het detailmodel is berekend dat aan het eind van een droge periode zoals in 2003 de maximale verhoging van de chlorideconcentratie in het Haringvliet en Spui 130 mg/l (Hitsertse Kade), 160 mg/l (Koert) en 150 mg/l (Bernisse) bedraagt als gevolg van 60 kg/s zoutlek. Bij een zoutlek van 40 kg/s is de verhoging van het zoutgehalte evenredig lager (dus -33%).

Evaluatie Vismigratie

Er is een beknopte literatuurinventarisatie uitgevoerd om de mogelijke invloed van de zoutlekbeperkende middelen in de Volkeraksluizen op vismigratie in kaart te brengen. De volgende conclusies zijn hieruit getrokken:

- Bellenschermen leiden mogelijk tot een (hooguit) geringe beperking van de vismigratie;
- Lekkende ebdeuren versterken een zoete lokstroom en hebben een positief effect op vismigratie;
- Bodemdrempels hebben, enigszins afhankelijk van de uitvoering, waarschijnlijk geen effect op vismigratie;
- Voor het effect van waterjets zijn geen literatuurverwijzingen gevonden;
- Het passeren van de Volkeraksluizen is niet de zwakste schakel voor de vismigratie in de Rijn-Maasmonding. Een eventueel gering effect van zoutlekbeperkende maatregelen in de Volkeraksluizen zal daarom weinig invloed hebben op de migratie van diadrome vissoorten (soorten die migreren tussen zout en zoet wateren, of vice versa, tijdens hun levenscyclus) in de Zuidwestelijke Delta.

Richtlijnen Operationeel beheer

In deze deelstudie zijn de voorgestelde zoutlekbeperkende middelen voor de Volkeraksluizen voorzien van pragmatische adviezen voor toepassing. De belangrijkste conclusie hierbij is dat de wijze van omgaan met de maatregelen afhankelijk is van de op dat moment geldende omstandigheden in en rondom de Volkeraksluizen, zoals het zoutgehalte in de voorhaven aan de Volkerak-zijde van de sluizen, het scheepvaartaanbod en/of het rivierdebiet door Hollandsch Diep en Haringvliet. De gewenste luchtdebieten en lekdebieten zijn situatieafhankelijk en om optimaal lucht- en waterdebieten in te kunnen stellen is detailinformatie nodig. Hierbij is ook een keuze voor een minimum aan zoutlek óf een minimum aan waterverbruik óf een minimum energiegebruik een onderdeel van de 'optimale' inzet van de maatregelen. Ook punctueel sluisbeheer is een belangrijk aspect voor zoutlekbeperving. Dat vergt een aangescherpte verkeersbegeleiding die er op gericht is de schutkolken zo kort mogelijk open te laten staan voor uit- en invaren van schepen en anderzijds toch zoveel mogelijk met schepen te vullen om niet onnodig veel schuttingen op een dag te moeten verrichten. Om de sluismeesters niet te belasten met veel aanvullende taken wordt aanbevolen dit proces zoveel mogelijk te automatiseren. Hiervoor zal een Beslis-Ondersteunende Systeem (BOS) ontwikkeld moeten worden. De inzet van het in dit project ontwikkelde Zoutlekmiddel en meetresultaten van het zoutgehalte in voorhavens en kolken zullen daarbij nodig zijn.

Tenslotte zijn de mogelijkheden om de onderzochte zoutlekbeperkende maatregelen bij andere Nederlandse schutsluizen waar zout/zoet-overgangen aanwezig zijn aangegeven. Hiervoor is gebruik gemaakt van een in 2010 verricht WINN project. Veel van de maatregelen kunnen bij meerdere schutsluizen worden toegepast.

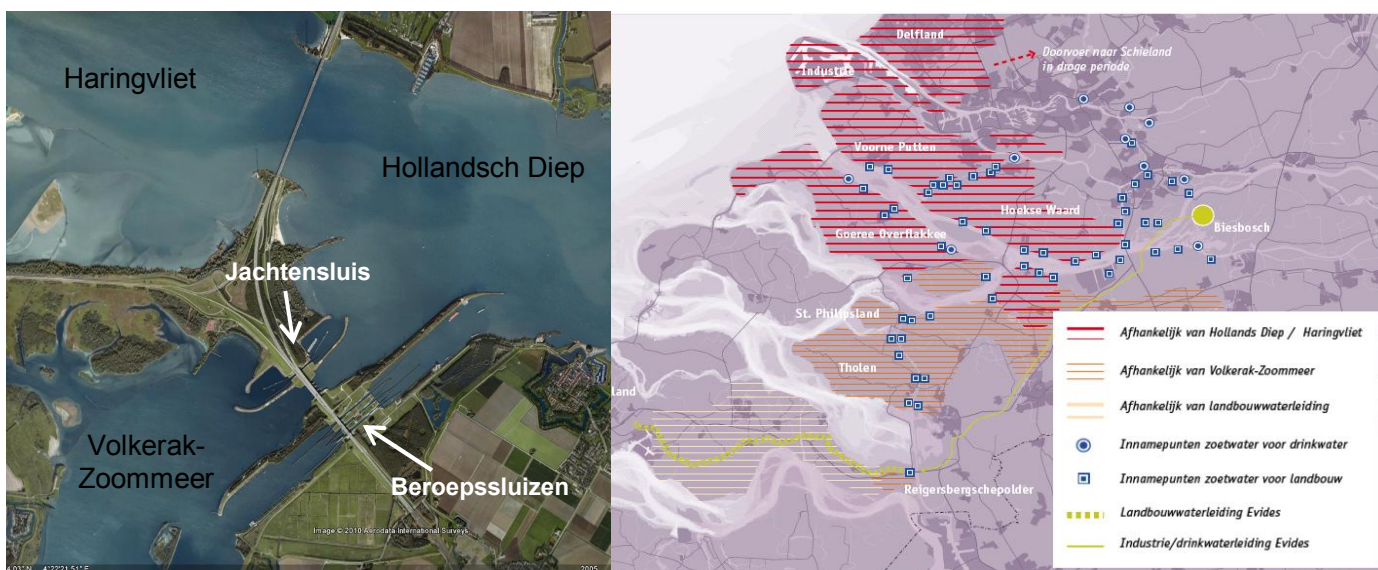
1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Voor het oplossen van het blauwalgenprobleem in het Volkerak-Zoommeer concludeert de planstudie/MER dat het zoute alternatief de enige effectieve maatregel is, waarbij dit alternatief tevens de basis legt voor een duurzaam en gezond ecologisch systeem. Het kabinet heeft in het Nationaal Waterplan 2009-2015¹ het (voorwaardelijk) besluit genomen om uiterlijk in 2015 zout toe te laten tot het Volkerak-Zoommeer².

Aan de uitvoering van dit zoute alternatief is (onder andere) de randvoorwaarde verbonden dat behoud of verbetering van de zoetwatervoorziening gerealiseerd kan worden. Voor het gebied ten noorden van de Volkeraksluizen moet daarvoor de hoeveelheid zout die tijdens het schutten naar het Hollandsch Diep lekt, beperkt worden tot maximaal 60 kg/s. Eerder onderzoek heeft aangegeven dat in dat geval de chlorideconcentratie bij waterinnamepunten in Hollandsch Diep, Haringvliet en Spui dan voldoende laag blijft.

De Waterdienst van Rijkswaterstaat heeft op 3 november 2009 opdracht gegeven aan Deltares voor de uitvoering van de Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperking Volkeraksluizen.



Figuur 1.1 Overzicht van Volkeraksluizen (links, Bron achtergrondfoto: Google Earth) en zoetwaterinnamepunten in en rondom het Volkerak-Zoommeer (rechts, Bron: Zoet Water Zuidwestelijke Delta, juni 2009)

1. Na aanbieding aan de Tweede Kamer in december 2009 is het Nationaal Waterplan 2009-2015 controversieel verklaard tijdens de demissionaire status van het kabinet Balkenende 4. Ten tijde van het schrijven van dit rapport had er nog geen (integrale) behandeling in de Kamer plaatsgevonden.
2. Nationaal Waterplan 2009-2015, blz. 179

1.2 Vraagstelling

Het hoofddoel van de Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen is om tot haalbare ontwerpopties te komen voor maatregelen die in de Volkeraksluizen kunnen worden geïmplementeerd om de zoutlek vanuit het Volkerak-Zoommeer naar het Hollandsch Diep te beperken. Ontwerpopties zijn haalbaar als ze aan drie uitgangspunten voldoen:

- 1 De resterende zoutlek is niet meer dan 60 kg/s.
- 2 Het waterverbruik uit het Hollandsch Diep is niet meer dan 25 m³/s.
- 3 De scheepvaart mag niet onacceptabel gehinderd worden.
 - Hiervoor zijn geen kwantitatieve criteria gegeven. Een langere wachttijd en kleinere doorvaardiepte worden als onwenselijk beschouwd.
 - Uitgegaan wordt van het verwachte scheepsaanbod (vertaald in aantal schuttingen) in 2020.

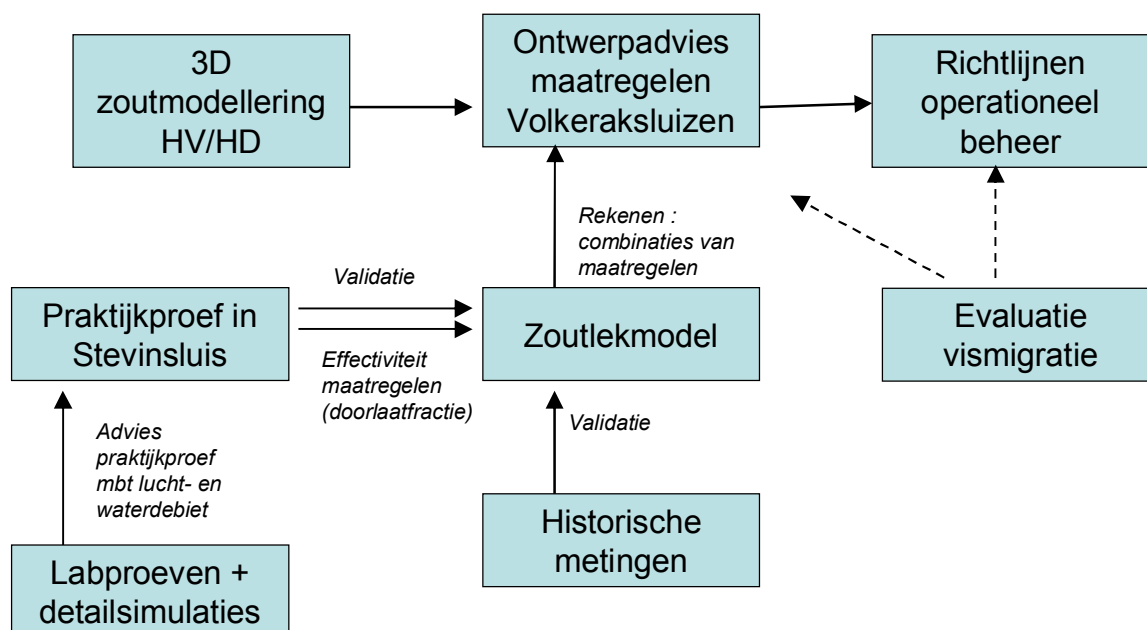
Naast zoutlekbeperving, waterverbruik en scheepvaartafhandeling kunnen andere overwegingen een rol spelen voor het al dan niet haalbaar en acceptabel zijn van ontwerpopties. Energieverbruik, civiel-technische aspecten en kosten voor aanleg en onderhoud zijn in dit onderzoek niet betrokken en zullen in een later implementatiebesluit door Rijkswaterstaat meegewogen moeten worden.

De specifieke vragen waarop deze ontwerpstudie en praktijkproef een antwoord dient te geven, zijn:

- I. Tot welke hoeveelheid (kg/s) kan de zoutlek worden beperkt?
- II. Welke (combinaties van) maatregelen zijn hiervoor nodig?
- III. Hoeveel zoetwater wordt door deze maatregelen onttrokken aan het Hollandsch Diep?
- IV. Wat betekenen deze maatregelen voor het operationeel beheer van de sluis?
- V. Wat betekenen deze maatregelen voor vismigratie door de Volkeraksluizen?

1.3 Aanpak

Voor de voorspelling van de zoutlek door de Volkeraksluizen wordt gebruik gemaakt van een computermodel: het Zoutlekmodel. Rekening houdend met alle relevante factoren zoals afmetingen van de sluis, zoutgehaltes en het aantal schuttingen berekent het Zoutlekmodel hoeveel zout er naar het Hollandsch Diep lekt, al dan niet beperkt door zoutlekbepervende middelen zoals luchtbellenschermen. Hoeveel zout wordt doorgelaten door zoutlekbepervende middelen (ook wel efficiëntie genoemd), is cruciale informatie. De grootte van deze zogeheten doorlaatfractie is onderzocht met een serie praktijkproeven in de Stevinluis op ware schaal, met laboratoriumproeven op kleine schaal en met gedetailleerde computersimulaties. Het resultaat hiervan is vervolgens gebruikt in het Zoutlekmodel dat tevens rekening houdt met de specifieke eigenschappen van de sluis. Door deze eigenschappen aan te passen aan de Volkeraksluizen is het model in staat om de op de Stevinluis waargenomen zoutlekreducties te vertalen naar de Volkeraksluizen. Daarmee kan het Zoutlekmodel met voldoende zekerheid worden ingezet voor voorspellingen voor de Volkeraksluizen. Figuur 1.2 geeft een overzicht van onderdelen en samenhang van deelonderzoeken die zijn uitgevoerd.



Figuur 1.2 Overzicht van onderdelen en samenhang in de Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen

1.4 Leeswijzer voor dit rapport

Dit rapport bevat de uitgebreide beantwoording van de hoofdvraag of en zo ja, hoe de zoutlek door de Volkeraksluizen beperkt kan worden (Hoofdstuk 4). Dit hoofdstuk kan op zichzelf staand gelezen worden. Het rapport beschrijft tevens alle deelonderzoeken die daarvoor zijn uitgevoerd in het kader van de 'Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen'.

Het rapport is geschreven voor de geïnteresseerde, maar niet noodzakelijkerwijs deskundige lezer. Een nadere introductie wordt gegeven in de achtergrond van de vraagstelling en in de basisprincipes van zoutlek en transport van zout door een scheepvaartsluis (Hoofdstuk 2). Omdat het Volkerak-Zoommeer nu niet zout is en er in de huidige situatie dus geen zoutlek door de Volkeraksluizen plaatsvindt, wordt de toekomstige zoutlek geschat op basis van modelberekeningen. Om deze berekeningen betrouwbaar te laten zijn, is een uitgebreide praktijkproef uitgevoerd in de Stevinsluis in de Afsluitdijk ondersteund met gedetailleerde numerieke berekeningen, laboratoriumproeven en op historische metingen gebaseerde kennis. Hiervan wordt verslag gedaan in Hoofdstuk 3, waarna in Hoofdstuk 4 de mogelijkheden tot zoutlekbeperring door de Volkeraksluizen gepresenteerd worden. Tenslotte worden in Hoofdstuk 5 enkele bijkomende vragen beantwoord zoals gevolgen voor operationeel beheer van de sluis, effecten voor vismigratie en voor zoutverspreiding in het Hollandsch Diep en Haringvliet. Tevens wordt aandacht besteed aan het belang van de ontwerpstudie en praktijkproef aan de kenniseconomie en aan innovaties in watertechnologie.

Voor de (vak)deskundige of dieper geïnteresseerde lezer zijn onderliggende rapporten beschikbaar, waarin in meer detail de deelonderzoeken en hun resultaten en conclusies zijn vastgelegd. Een overzicht van onderliggende rapporten is te vinden in de literatuurlijst op bladzijde 63.

1.5 Introductie van enkele begrippen

In dit rapport worden vaktermen zoveel mogelijke vermeden. Helemaal te voorkomen is dat niet. Enkele regelmatig voorkomende begrippen worden hier geïntroduceerd.

De zoutlek of <i>het</i> zoutlek?	Beide zijn goed. Met <i>de</i> zoutlek wordt de hoeveelheid zout die naar de zoete kant wordt getransporteerd, bedoeld; in dit rapport dus in kg/s aangeduid. Met <i>het</i> zoutlek wordt het fysische proces bedoeld, waarmee zout en zoet water in een sluis interacteren.
Eenheid van zoutlek	De zoutlek wordt weergegeven in totaal zout. Met 'zout' bij de innamepunten wordt meestal de chlorideconcentratie bedoeld. 60 kg/s zoutlek komt overeen met ongeveer 33 kg/s chloridelek.
Zout, saliniteit, chloride	Zout, saliniteit en chloride zijn alle termen die gebruikt worden als maat voor de hoeveelheid opgeloste stoffen in het water. Saliniteit (eenheid ppt (parts per thousand) ofwel g/kg) wordt gebruikt wanneer sprake is van (een overgang naar) zeewater en komt overeen met het totaal aan opgeloste stoffen. Chloride is het grootste bestanddeel van de opgeloste stoffen in zeewater (circa 55% gewicht) en heeft de eenheid g/l of mg/l. In rivierwater is de verhouding saliniteit:chloride overigens anders. Zout wordt in de spreektaal gebruikt voor beide, zodat uit de context gehaald moet worden of saliniteit of chloride wordt bedoeld.
Zout, brak, zilt, zoet water	In dit rapport wordt het Volkerak-Zoommeer consequent als zout aangeduid, hoewel het zoutgehalte lager is dan in zeewater (20 ppt versus 35 ppt). Het Hollandsch Diep wordt als zoet aangeduid. In de voorhavens en de schutkolken vindt de interactie tussen zout en zoet water plaats. Termen als brak en zilt worden zoveel mogelijk vermeden. In plaats daarvan wordt indien relevant het verwachte zoutgehalte getalsmatig genoemd.
Froude-lucht getal	Het Froude-lucht getal is de verhouding tussen de verticale watersnelheid in een luchtbellenscherm en de horizontale snelheid van de zouttong. Dit dimensieloze getal maakt het mogelijk om metingen en maatregelen in sluizen onderling, maar ook met labproeven te vergelijken. Verschillen zoals afmetingen en zoutgehalte worden ondervangen.
Δ -luchtbellenschermen	In de praktijkproef zijn nieuwe, door Deltares conceptueel uitgedachte luchtbellenschermen beproefd. Deze Δ -luchtbellenschermen zorgen voor een gesloten luchtbellengordijn vanaf de bodem en over de volle breedte van een schutkolk.
Eenheid voor luchtdebiet (Nl/s)	Als eenheid voor luchtdebiet wordt het volume lucht per tijdseenheid dat een compressor onder normale atmosferische druk en temperatuur aanzuigt. Hiervoor wordt het symbool "N" gebruikt en aangegeven als Nl/s.

1.6 Verantwoording

Het Deltares onderzoek is ondersteund door een begeleidingsgroep welke is samengesteld uit vertegenwoordigers van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, DG Water en de betrokken diensten van Rijkswaterstaat (Waterdienst, Dienst Infrastructuur, Dienst Zeeland, Dienst Zuid-Holland, en Dienst IJsselmeergebied), het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en PWN drinkwaterleidingbedrijf Noord-Holland.

2 Vraagstelling en achtergrond

Leeswijzer voor dit hoofdstuk

Dit hoofdstuk beschrijft als eerste de oorsprong van de vraagstelling: Wat is de achtergrond van de vraag over zoutlekbeperving in de Volkeraksluizen? Na een schets van het Volkerak-Zoommeer en de Volkeraksluizen wordt uitgelegd waarom en hoe zout door een sluis lekt en hoe zoutlekbepervende middelen daarop kunnen ingrijpen. De variatie van het zoutgehalte in de sluis wordt geïntroduceerd als methode om de zoutlek te meten in de Stevinsluis en te modelleren voor de Volkeraksluizen. Dit hoofdstuk geeft zo het denkkader waarin de ontwerpstudie en praktijkproef zijn uitgevoerd. Indien dit bij de lezer bekend is, kan dit hoofdstuk overgeslagen worden. Hoofdstuk 4, waarin ingegaan wordt op de mogelijkheden voor zoutlekbeperving in de Volkeraksluizen, kan op zichzelf staand gelezen worden.

2.1 Het Volkerak-Zoommeer en de Volkeraksluizen

2.1.1 Besluitvorming voor een zout Volkerak-Zoommeer

Omdat verzouten als enige oplossing voor de blauwalgenproblematiek wordt gezien, heeft het kabinet in het Nationaal Waterplan 2009-2015 het (voorwaardelijk) besluit genomen om uiterlijk in 2015 zout toe te laten tot het Volkerak-Zoommeer³.

Door het zout maken van het Volkerak-Zoommeer zal het niet meer mogelijk zijn om zoet water uit het meer te onttrekken voor landbouw, drinkwatervoorziening en/of industrie. Tevens zal zout lekken door de Volkeraksluizen naar het Hollandsch Diep en Haringvliet, waar zich ook innamepunten van zoet water bevinden. Het kabinet heeft toegezegd dat in het definitieve uitvoeringsbesluit dat medio 2012 genomen zal worden, zal worden opgenomen 'dat zout water pas daadwerkelijk wordt toegelaten als de alternatieven voor de huidige beschikbaarheid van zoet water voor de landbouw, de drinkwatervoorziening en de industrie zijn gerealiseerd⁴.

Eerder onderzoek heeft laten zien dat inname van zoet water bij de innamepunten in het Hollandsch Diep en Haringvliet mogelijk blijft, als de zoutlek niet groter is dan 60 kg/s (Stuurgroep Zuidwestelijke Delta, 2009). Aangezien zonder maatregelen een zoutlek van circa 480 kg/s optreedt (Deltares, 2010a), zal een aanzienlijke reductie (87,5%) van de zoutlek bereikt moeten worden door gebruik te maken van zoutlekbepervende middelen.

Ter voorbereiding van het uitvoeringsbesluit heeft het kabinet onder andere een praktijkproef toegezegd 'om na te gaan hoe het lekverlies van zout water over de Volkeraksluizen kan worden beperkt⁵'. Deze 'Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen' is door Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat Waterdienst uitgevoerd van november 2009 tot april 2011. Dit rapport bevat de samenvatting en conclusies van deze praktijkproef en alle activiteiten die in het kader van de studie zijn uitgevoerd.

Naast de effectiviteit van zoutlekbepervende middelen in de Volkeraksluizen besteden we aandacht aan de mogelijke gevolgen van deze maatregelen op het sluisbeheer en op vismigratie. Tenslotte is modelonderzoek uitgevoerd om de verspreiding van zout in het

3. *Nationaal Waterplan 2009-2015, blz. 179*

4. *Nationaal Waterplan 2009-2015, blz. 180*

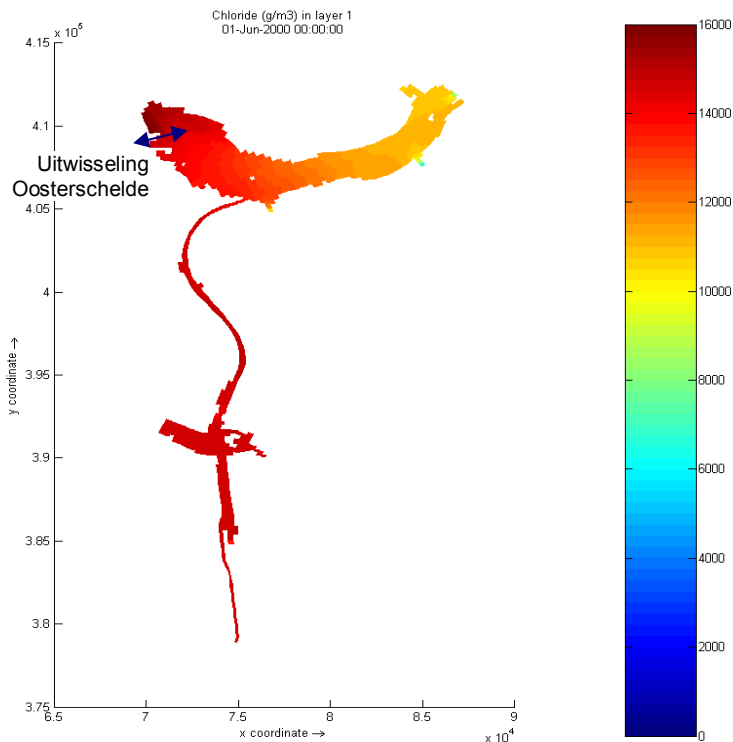
Hollandsch Diep en Haringvliet en de mogelijke verhoging van de zoutconcentratie bij innamepunten beter te onderbouwen.

2.1.2 Hoe zout wordt het Volkerak-Zoommeer?

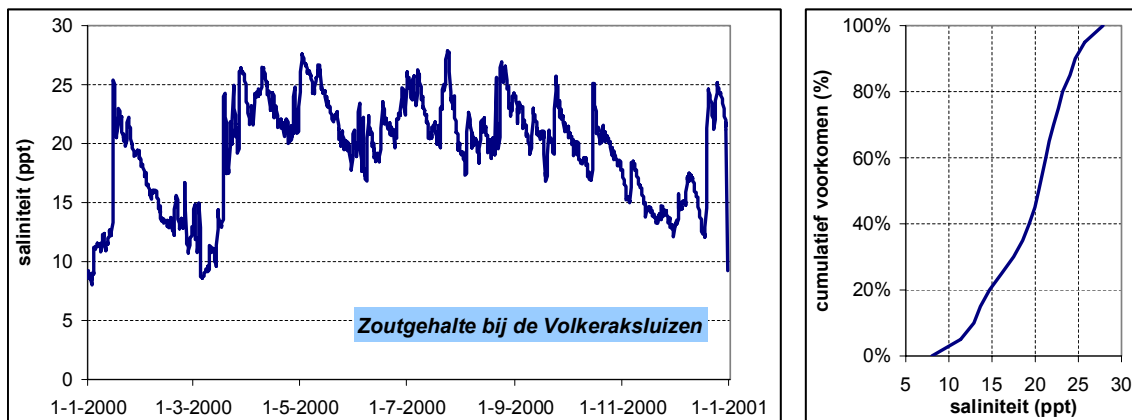
Door een verbinding met de Oosterschelde zal het Volkerak-Zoommeer zout worden. Het zoutgehalte is niet constant. De aanvoer van zoet water vanuit Noord-Brabantse rivieren Dintel en Vliet en de aanvoer vanuit het Hollandsch Diep door de spui- en/of schutsluizen resulteert in een ruimtelijke gradiënt (Figuur 2.1). Ter hoogte van de aanvoerpunten in het oosten van het Volkerak is het zoutgehalte het laagst.

Ook in de tijd varieert het zoutgehalte (Figuur 2.2) omdat in tegenstelling tot de aanvoer vanuit het Hollandsch Diep de afvoer van de Dintel en de Vliet niet constant is. De Dintel en de Vliet zijn zogenaamde regenrivieren, waar de afvoer in een regenperiode hoog is en ten tijde van droogte laag. Tijdens lage rivierafvoer is het zoutgehalte in het Volkerak-Zoommeer hoger.

Bij een aanvoer van ongeveer $15 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit het Hollandsch Diep zal het zoutgehalte bij de Volkeraksluizen naar verwachting variëren tussen 8 en 28 ppt rondom een gemiddelde van 20 ppt (Figuur 2.2). Bij een hogere aanvoer wordt het zoutgehalte lager, bij een lagere aanvoer hoger. Dit zoutgehalte is een van de variabelen waarvan de grootte van de zoutlek naar Hollandsch Diep afhankelijk is.



Figuur 2.1 Gemiddelde chlorideconcentratie (in mg/l, bij het wateroppervlak) in het Volkerak-Zoommeer voor het P300-alternatief voor zoutwateruitwisseling met de Oosterschelde (in het model gemiddeld $270 \text{ m}^3/\text{s}$, waarvan $65 \text{ m}^3/\text{s}$ via de Bathse spuisluis voor doorspoeling wordt gebruikt), $5 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit het Hollandsch Diep en $10 \text{ m}^3/\text{s}$ extra doorspoeling van de Brabantse rivieren. De berekening is uitgevoerd voor de meteorologische en hydrologische condities van het jaar 2000 (dat wil zeggen $18,5 \text{ m}^3/\text{s}$ zoetwateraanvoer vanuit de Brabantse rivieren; WL | Delft Hydraulics, 2006)



Figuur 2.2 Tijdserie en cumulatieve verdeling van voorkomen van zoutgehalte (in ppt) bij de Volkeraksluizen voor het P300-alternatief voor zoutwateruitwisseling met de Oosterschelde (in het model gemiddeld $270 \text{ m}^3/\text{s}$, waarvan $65 \text{ m}^3/\text{s}$ via de Bathse spuisluis voor doorspoeling wordt gebruikt), $5 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit het Hollandsch Diep en $10 \text{ m}^3/\text{s}$ extra doorspoeling van de Brabantse rivieren. De berekening is uitgevoerd voor de meteorologische en hydrologische condities van het jaar 2000 (dat wil zeggen $18,5 \text{ m}^3/\text{s}$ zoetwateraanvoer vanuit de Brabantse rivieren; WL | Delft Hydraulics, 2006)

2.1.3 De Volkeraksluizen

Figuur 2.3 biedt een overzicht van de Volkeraksluizen en de verbinding met het Hollandsch Diep.



Figuur 2.3 Het Volkeraksluizencomplex (anno 2010) dat het Volkerak-Zoommeer voor scheepvaart verbindt met het Hollandsch Diep via drie beroepssluisen en een jachtensluis, alle met voorhavens, en daartussen de spuisluis.

De huidige Volkeraksluizen bestaan uit drie sluisen voor de beroepsvaart en een jachtensluis voor de recreatieve vaart. Tussen de drie beroepssluisen en de jachtensluis ligt de spuisluis. Bij stremming in een van de beroepssluisen wordt de jachtensluis ook voor de kleinere beroepsvaart gebruikt. Tabel 2.1 vat de meest relevante gegevens van de Volkeraksluizen samen.

Tabel 2.1 Relevante gegevens Volkeraksluizen – aan scheepvaart gerelateerde kentallen zijn gebaseerd op de Rijkswaterstaat prognose scheepvaart 2020

	Beroepssluisen	Jachtensluis
Aantal	3	1
Lengte	345 m	154,5 m
Breedte	24 m	16 m
Diepte kolkvloer	7,5 m	6,75 m
Diepte drempel	6,25 m [#]	6,25 m
Drempelhoogte	1 m	0,5 m
Oppervlak per kolk	8.280 m ²	2.472 m ²
Volume kolk boven drempel	53.820 m ³	15.450 m ³
Gemiddeld aantal schepen per kolk	2,6	-
Gemiddelde waterverplaatsing schepen per kolk	4.568 m ³	-
Gemiddelde waterverplaatsing / kolkoppervlak	0,55 m	-
Aantal schutcycli per dag, per kolk	20	-

[#] Pas tijdens de afronding van het onderzoek werd duidelijk dat de drempelhoogte 6,25 m was in plaats van de eerder opgegeven 6,5 m. De informatie kon niet meer verwerkt worden in de berekeningen voor de zoutlek door de Volkeraksluizen. De berekende zoutlek is daarmee een kleine overschatting (circa 5%), hetgeen binnen de te verwachten nauwkeurigheid als een relatief klein verschil wordt gezien. Bovendien is de berekening een overschatting en geen onderschatting.

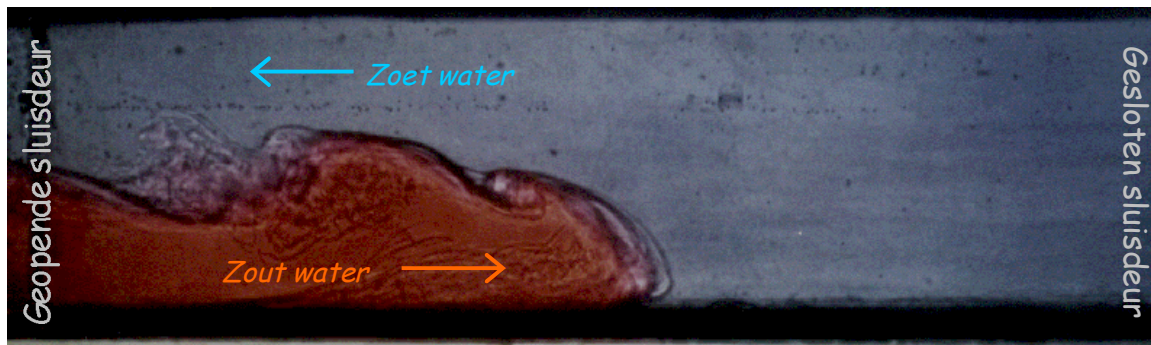
2.2 Waarom lekt er zout door een sluis: theoretisch kader

2.2.1 Verschil in zoutgehalte

Voor een zoutlek moet er vanzelfsprekend sprake zijn van een verschil in zoutgehalte tussen beide kanten van een sluis(deur). Als dat het geval is zal met het schutten van schepen onvermijdelijk ook zoutwater meegevoerd worden van de zoutere naar de zoetere kant, tenzij ingrijpende technische oplossingen toegepast worden zoals in de Krammersluizen. Daar wordt het zoute water uit de sluis eerst volledig teruggepompt naar de zoute kant (Oosterschelde) en geheel vervangen door zoet water, waardoor er (vrijwel) geen zoutlek naar de zoete kant (Volkerak-Zoommeer) optreedt. Hoewel technisch mogelijk, wordt de schuttijd daardoor significant langer. De techniek blijkt wel gevoelig voor storingen en de kosten voor anleg en beheer zijn hoog. Bij de Volkeraksluizen is deze techniek mede daarom niet mogelijk en is een zoutlek niet te voorkomen. Te beperken is de zoutlek wel, zoals is aangetoond in deze studie.

Het verschil in zoutgehalte heeft een verschil in dichtheid tot gevolg. Bij 20 ppt saliniteit weegt 1 m³ water ongeveer 15 kg meer dan zoetwater (bij 15 °C). Na het openen van een sluisdeur duikt het zwaardere zoute water onder het lichtere zoete water. Figuur 2.4 toont een foto van een kolk in het laboratorium waarin het zoute water van links (rood gekleurd) onder het zoete water de kolk in beweegt. Het zoete water stroomt bovenlangs de kolk uit.

Dit stromingsproces – ook wel dichtheidsstroming genoemd – veroorzaakt een sterke zout-zoet uitwisseling en is veelvuldig beschreven in de wetenschappelijke literatuur en wordt goed begrepen. Experimenteel en theoretisch blijkt dat de zogeheten zouttong een snelheid heeft die evenredig is met de wortel van de waterdiepte en ook evenredig is met de wortel van het dichtheidsverschil tussen zout en zoet water. Er zijn wel geringe invloeden door wrijving en menging van de zouttong. De snelheid van de zouttong verdubbelt dus bij viermaal dieper water of bij viermaal groter zoutgehalte in het zoute water. De combinatie van tweemaal dieper water en tweemaal groter verschil in zoutgehalte verdubbelt eveneens de snelheid van de zouttong.



Figuur 2.4 Voortplanting van de (rode) zouttong naar rechts over een bodem, niet zichtbaar is de retourstroming van lichter water naar links en boven de zouttong

In de volgende paragrafen wordt in meer detail het gedrag van zout in een sluisdeur beschreven en wordt besproken hoe met zoutlekbepurende middelen daarop ingegrepen kan worden.

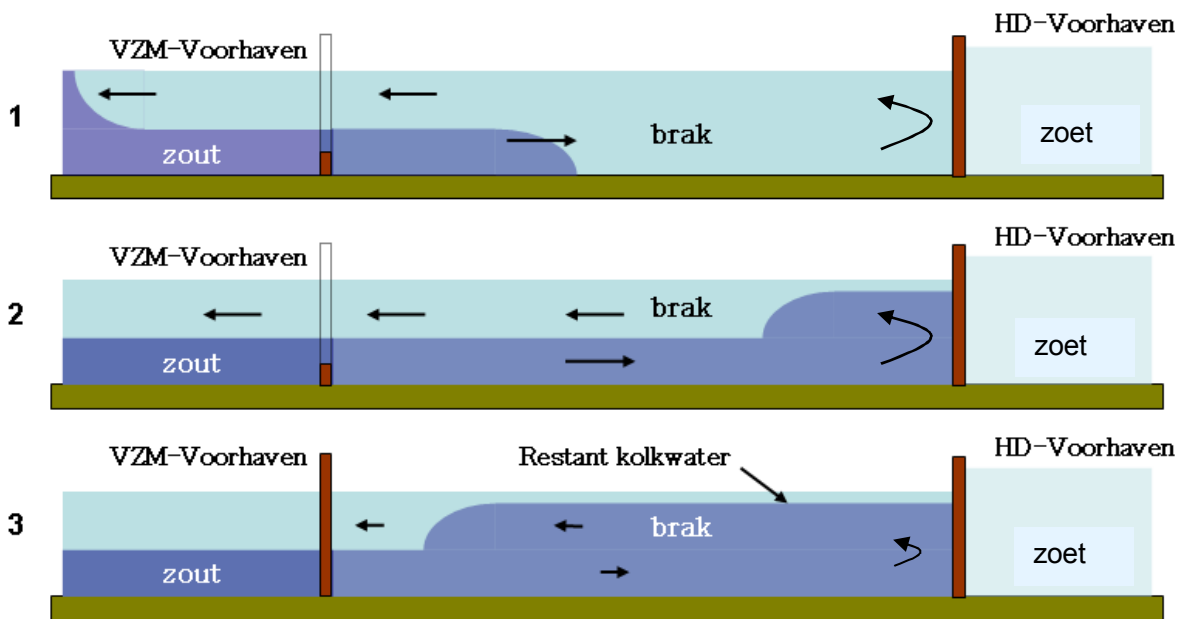
2.2.2 Gedrag van zout water in een sluis

Kijkend naar het lekken van zout valt een schutting uiteen in vier fasen:

- 1 De sluisdeur aan de zoute kant staat open; eerst varen de schepen uit en daarna varen andere schepen de sluis weer in
- 2 De sluisdeuren zijn gesloten en het waterpeil wordt genivelleerd naar het peil van de zoete kant
- 3 De sluisdeur aan de zoete kant staat open; de schepen varen uit en daarna varen andere schepen de sluis weer in
- 4 De sluisdeuren zijn gesloten en het waterpeil wordt genivelleerd naar het peil van de zoute kant

Figuur 2.5 toont het gedrag van zout als de sluisdeur aan de (zoute) Volkerak-Zoommeer-kant is geopend (fase 1). In de sluisdeur is nog een restant zout achtergebleven van de vorige schutting. Wanneer de zouttong aan het andere kolkeinde de gesloten sluisdeuren bereikt klimt de zouttong naar het wateroppervlak en begint aan de weg terug richting de geopende sluisdeuren. Aan het wateroppervlak stroomt voortdurend zoet water de kolk uit.

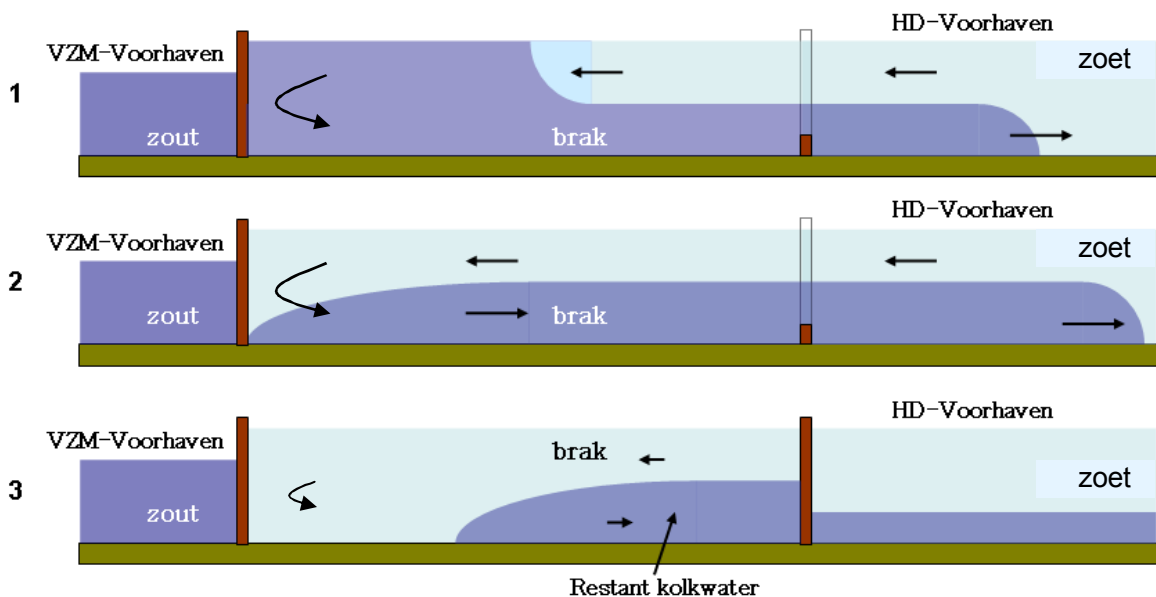
Aan het einde van de reis van de zouttong door de kolk blijkt aan het wateroppervlak nog een restant oorspronkelijk kolkwater achter te blijven. Dit restant blijkt circa 10% van het kolkvolume boven de drempel te zijn. Dit restant stroomt de kolk zo traag uit dat zelfs bij lange openingstijd van de sluisdeuren het restant grotendeels in de kolk achterblijft. Om twee redenen stopt de zout-zoet uitwisseling: of de kolk is (voor circa 90%) met zout water uitgewisseld of de sluisdeuren worden gesloten.



Figuur 2.5 Verschillende stadia verplaatsing zouttong; sluisdeur open aan zoute Volkerak-Zoommeer-zijde; Stadium 1: zouttong van water uit Volkerak-Zoommeer-voorhaven dringt de kolk in en verdringt zoet water de kolk uit; Stadium 2: na reflectie tegen de gesloten sluisdeuren reist de zouttong terug naar de Volkerak-Zoommeer-voorhaven; Stadium 3: de aandrijving van de zouttong stopt na het sluiten van de sluisdeuren. De kolk is nu zouter dan voor het openen van de sluisdeuren. Een restant zoeter kolkwater blijft achter in de toplaag.

Omdat het waterpeil in het Hollandsch Diep – behalve bij uitzonderingssituaties – hoger is dan het waterpeil in het Volkerak-Zoommeer, wordt voor het nivelleren naar Hollandsch Diep waterpeil (fase 2) altijd zoet water vanuit het Hollandsch Diep in de kolk gelaten. Bij nivelleren naar Volkerak-Zoommeer peil (fase 4) wordt brak kolkwater naar het Volkerak-Zoommeer afgelaten. Er is dus nooit zoutlek naar het Hollandsch Diep tijdens het nivelleren.

Tenslotte toont Figuur 2.6 het uittreden van de zouttong als de sluisdeuren aan de zoete Hollandsch Diep zijde openstaan (fase 3). Op dit moment treedt de zoutlek naar de Hollandsch Diep voorhaven op: er wordt zout naar de zoete zijde gebracht.



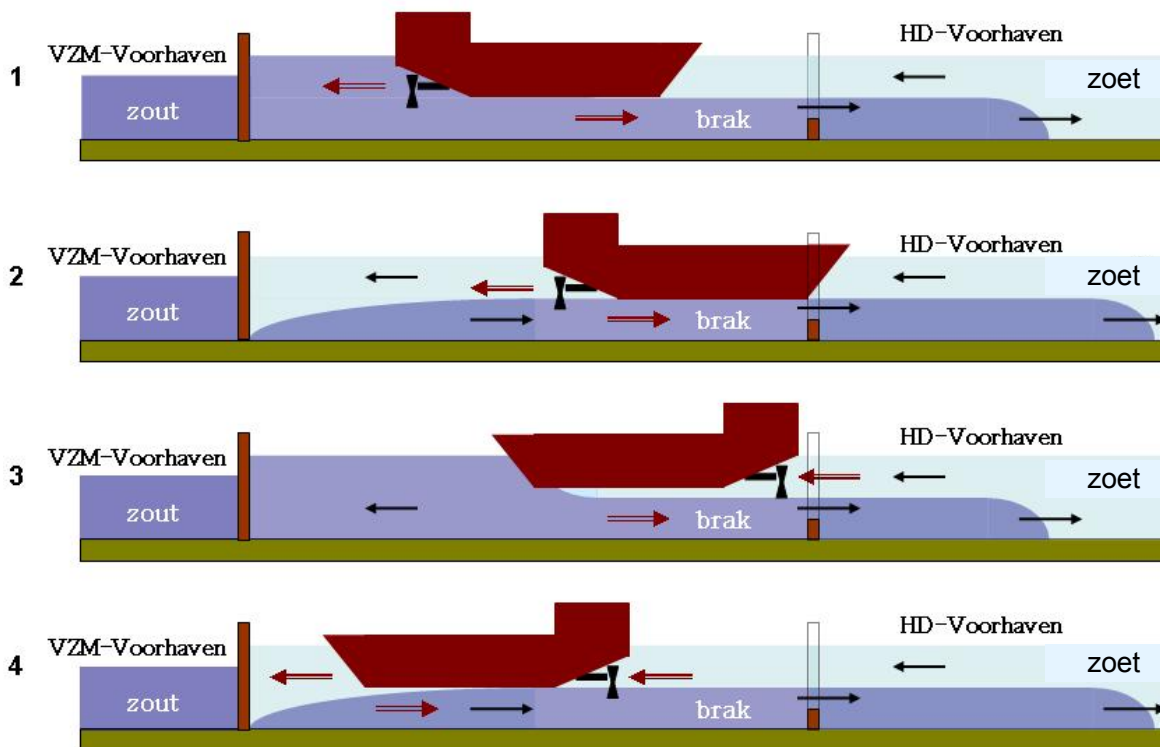
Figuur 2.6 Verschillende stadia verplaatsing zouttong; sluisdeur open aan Hollandsch Diep-zijde:

Stadium 1: zouttong van brak kolkwater beweegt naar de Hollandsch Diep-voorhaven terwijl verzilt water uit de Hollandsch Diep-voorhaven de kolk in stroomt;

Stadium 2: de voorraad brak kolkwater raakt op waarmee de aandrijving van de zouttong verdwijnt;

Stadium 3: bij tijdig sluiten van de sluisdeuren zakt de zouttong (getekend) uit en vormt een restant zouter kolkwater op de kolkvloer; de kolk is nu zoeter dan voor het openen van de sluisdeuren.

Hoewel we het hebben over schutsluizen, is het effect van de schepen zelf nog niet aan bod gekomen. Dit effect is zeer complex. De invloed van schepen op de zoutlek bestaat uit twee componenten (Figuur 2.7). De eerste is de statische, volumetrische waterverplaatsing van het schip. Een schip neemt een zeker watervolume in en als het schip de sluis in vaart, stroomt een evenredig volume water de sluis uit. De tweede component betreft het water dat wordt verplaatst door de waterstroming die wordt opgewekt door de beweging van het schip zelf en door zijn schroef. Dit wordt dynamische waterverplaatsing genoemd. Statische en dynamische waterverplaatsing werken in tegengestelde richting. In de Volkeraksluizen zorgt statische, volumetrische waterverplaatsing voor gemiddeld 8% uitwisseling van water tussen de sluis en de voorhaven en is dynamische waterverplaatsing verantwoordelijk voor 8% tot 16% wateruitwisseling in tegengestelde richting. Deze vorm van zoutlek is alleen te beperken door een zo laag mogelijk zoutgehalte in de sluis.



Figuur 2.7 Schematische weergave van waterverplaatsing door in- en uitvarende schepen. De rode pijlen geven mogelijke circulatiepatronen weer door de schroefstraal van een uitvarend, vaart meerderend (1 en 2) of invarend, vaart afremmend (3 en 4) schip; met name situatie 2 geeft veel menging. Het bewegend schip verdringt water door zijn waterverplaatsing. De korte bruine verticale balk is een drempel welke bij passage de stroming rond het schip lokaal vergroot.

2.2.3 Hoe kan de zoutlek beperkt worden: zoutlekbepurende middelen in de sluis

Uit de vorige paragrafen kunnen we de factoren afleiden die de grootte van de zoutlek door een sluis kolk bepalen. Daaruit volgt direct hoe de zoutlek te beperken is. Zoutlekbepurende middelen grijpen op een of meer van deze factoren aan.

Tabel 2.2 Overzicht van factoren die de zoutlek bepalen en zoutlekbepurende middelen

	Factor	Zoutlek neemt af als	Zoutlekbepurende maatregel
1.	Verschil in zoutgehalte tussen kolk en Hollandsch Diep voorhaven	... kleiner wordt	<ul style="list-style-type: none"> • Luchtbellenscherm • Waterscherm • Lekkende ebdeuren
2.	Waterdiepte (drempelhoogte)	... ondieper wordt	<ul style="list-style-type: none"> • Drempel
3.	Openingstijd sluisdeuren	... korter wordt #	<ul style="list-style-type: none"> • Operationeel beheer

Aan de deuropentijd zit een bovengrens, namelijk als 90% van het water in de kolk is uitgewisseld heeft een langere deuropentijd geen verdere invloed op de zout-zoet uitwisseling.

We splitsen de zoutlekbepurende middelen op in twee categorieën, te weten middelen *zonder* waterverbruik en middelen *met* waterverbruik, waarbij de randvoorwaarde is dat niet meer dan 25 m³/s zoetwater uit het Hollandsch Diep beschikbaar is. Een luchtbellenscherm en drempelverhoging behoren tot de eerste categorie en een waterscherm en lekkende ebdeuren tot de tweede categorie.

Het operationeel sluis- en scheepvaartbeheer valt buiten deze indeling en hierop wordt pas later nader ingegaan (paragraaf 5.2). Ook zoutlekbeperkende middelen die niet direct op aanpassingen van de sluiskolk betrekking hebben, komen later aan de orde. Het gaat hierbij om een extra spuidebiet via de spuisluisen vanuit het Hollandsch Diep of het gebruik van een zoutvang⁵.

2.2.3.1 Luchtbellenschermen

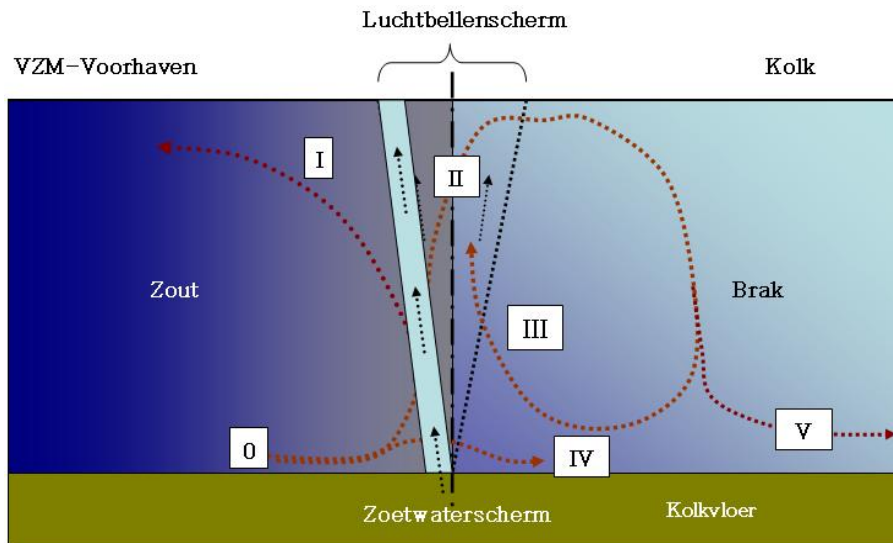
Luchtbellenschermen kennen verschillende toepassingen als beluchters en mixers in de watervoorziening en voor onderdrukking van de algenbloei in diepe meren. Het is daarom bijzonder dat luchtbellenschermen ook als horizontale scheider van zout-zoet kunnen werken. De verklaring daarvoor is schematisch weergegeven in Figuur 2.8.

De opstijgende luchtbellen van een bellenscherm sleuren vanaf de bodem al snel veel omgevingswater mee. Dit omgevingswater wordt vanuit de voorhaven en vanuit de kolk aangezogen en ter plekke van het luchtbellenscherm ontstaat intensieve menging. Het zoute omgevingswater (zoutpad 0) zou anders de zouttong voeden. Zowel aan de zoute zijde (zoutpad I in Figuur 2.8) als aan de zoete zijde (zoutpad III) ontstaat een circulatiepatroon. Een deel van het meegesleurde zoute water mengt naar de kolk (zoutpad II) en een deel van het meegesleurde zoete(re) water mengt richting de zoute kant (zoutpad niet aangegeven). Aan de zoete kant van het bellenscherm ontstaat een gemengde waterkolom met een lager zoutgehalte dan de waterkolom in de voorhaven. De zout-zoet uitwisseling gaat nu vanaf dit punt ingesteld worden (zoutpad V). Omdat het zoutverschil echter (veel) lager is, loopt de zouttong aanzienlijk trager de kolk in en is dus de zout-zoet uitwisseling beperkt.

Extra aandacht moeten we nog besteden aan de teen van het luchtbellenscherm (dat wil zeggen bij de bodem van de kolkvloer). Daar is het luchtbellenscherm nog relatief zwak en de druk van het zoutverschil het grootst. De teen zal meestal zout water doorlaten (zoutpad IV in Figuur 2.8). Deze zoutdoorlaat drijft ook de zouttong aan en beperking van het lekken door de teen draagt bij aan de zoutlekbepanking.

Door het toepassen van luchtbellenschermen aan beide kanten van een sluiskolk zal de zoutlek verder reduceren, dan bij toepassing aan slechts een kant.

5. Een zoutvang is een diepe put of geul aan de zoete zijde buiten de kolk. Zout(er) water dat door de sluis is gestroomd, zakt door de grotere dichtheid in deze put of geul en wordt daar dus verzameld. Het zoute(re) water wordt dus tijdelijk opgeslagen, totdat de put of geul overstroomt of totdat het water wordt teruggepompt naar de zoute kant van de sluis.



Figuur 2.8 Zoutlekbeperkende werking luchtbellenscherm ondersteund met een waterscherm (lichtblauwe band) op zout-zoet overgang (geopende sluisdeur) in verticale langsdoorsnede van een kolk. (0) Toestromend zout aangedreven door horizontale verschillen in zoutgehalten (I) Opwaarts transport van zout en retourstroming naar de zoute zijde. (II) Menging van zout water met kolkwater in het luchtbellenscherm waardoor transport van zout naar de kolk. (III) Recirculatie van inkomend zout en aangedreven door het luchtbellenscherm. (IV) Zout dat door de teen van het luchtbellenscherm dringt. (V) De vorming van een zwak aangedreven zouttong door de beperkte levering van zout water en de menging met het zoetere kolkwater.

Het tempo waarin alsnog zout via een luchtbellenscherm wordt doorgelaten blijkt een deel te zijn van wat een ongeremde zouttong aan kg/s zout zou leveren. We noemen dit deel voortaan de *doorlaatfractie*. De techniek van zout-zoet scheiding met luchtbellenschermen is inmiddels klassiek en gebaseerd op het toonaangevende werk van dr. ir. G. Abraham van het Waterloopkundig Laboratorium en ir. P. van den Burgh van Rijkswaterstaat. Zij beproefden deze techniek zowel in het laboratorium als in diverse sluiscolken met kolkdiepten van 5 m tot 15 m maar niet in een werkende schutsluis; dat wil zeggen zonder scheepvaart en zonder eventuele invloeden door het nivelleren van de kolken. Abraham & V.d. Burgh (1962) bereikten doorlaatfracties tot zelfs circa 0,15 hetgeen betekent dat slechts circa 15% van de ongeremde zouttong werd doorgelaten.

2.2.3.2 Waterschermen

Innovatief is het idee dat de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm nog lager kan worden door een waterscherm naast het luchtbellenscherm aan te brengen. Figuur 2.8 toont het concept achter dit idee. Naast het zoute omgevingswater dat door het bellenscherm aangezogen wordt, biedt het waterscherm ook water aan. In zoutpad II (Figuur 2.8) wordt het luchtbellenscherm nu primair gevoed met zoet water uit het waterscherm in plaats van met zout water uit de Volkarek-Zoommeer-voorhaven. Van belang is wel de juiste mengverhouding te vinden tussen de debieten van lucht en van zoet water.

Een waterscherm kan ook afzonderlijk – dus zonder luchtbellenscherm – worden toegepast, hoewel dit voor zover bekend nog nergens als zelfstandige zoutlekbeperkende methode is gebeurd.

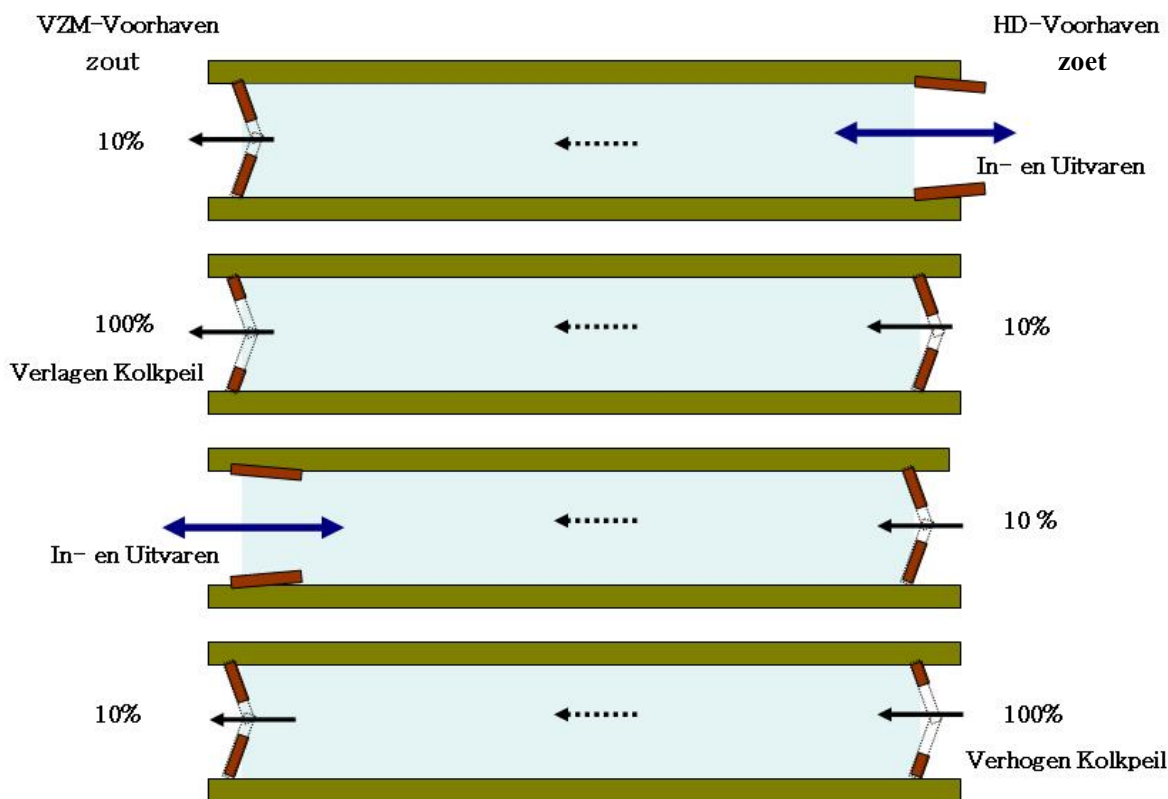
2.2.3.3 Drempel

Een voldoende hoge drempel naast een luchtbellenscherm zou de beschermende functie van een waterscherm bij de teen kunnen vervangen, zonder waterverbruik. De menging van zout en zoet volgens pad II blijft dan wel intact. Hierdoor zou een luchtbellenscherm ondersteund met een drempel minder effectief zijn dan een luchtbellenscherm ondersteund met een waterscherm.

2.2.3.4 Lekkende ebdeuren

De 'lekkende ebdeuren' methode komt erop neer dat een continue doorstroming tegenstroom van zoet water door de sluiscolk wordt opgewekt, die effectief het aanwezige zoute water terugdringt en vervangt. Hiervoor worden de rinketschuiven in de sluisdeuren, die in het reguliere schutproces alleen gebruikt worden voor het nivelleren van de kolk, op een slimme manier benut. Hoewel de 'lekkende ebdeuren' in principe in iedere fase van een schutcyclus kunnen worden ingezet, is het een afweging en optimalisatie of dat ook daadwerkelijk gebeurt. Het inzetten van lekkende ebdeuren tijdens nivellering verlengt bijvoorbeeld (in beperkte mate) de tijd die een schutting duurt.

De rinketschuiven kunnen geheel geopend worden, maar ook op een kierstand gezet worden. De grootte van de kier bepaalt samen met het waterstandsverschil hoeveel water er door de rinketschuifopening stroomt. Omdat het waterpeil in het Hollandsch Diep – behalve bij uitzonderingssituaties – hoger is dan het peil in het Volkerak-Zoommeer, zal er door een rinketschuifopening altijd water richting Volkerak-Zoommeer stromen. Van deze stroomrichting kan gebruik gemaakt worden om zout terug te brengen naar het Volkerak-Zoommeer, de kolk zoeter te maken én de Volkerak-Zoommeer voorhaven te verzoeten. Figuur 2.9 toont ons concept voor de methode van 'lekkende ebdeuren'. In de Volkeraksluizen is destijds ook een vergelijkbare, maar niet gelijke methode van lekkende ebdeuren toegepast (Roelfzema, 1977).



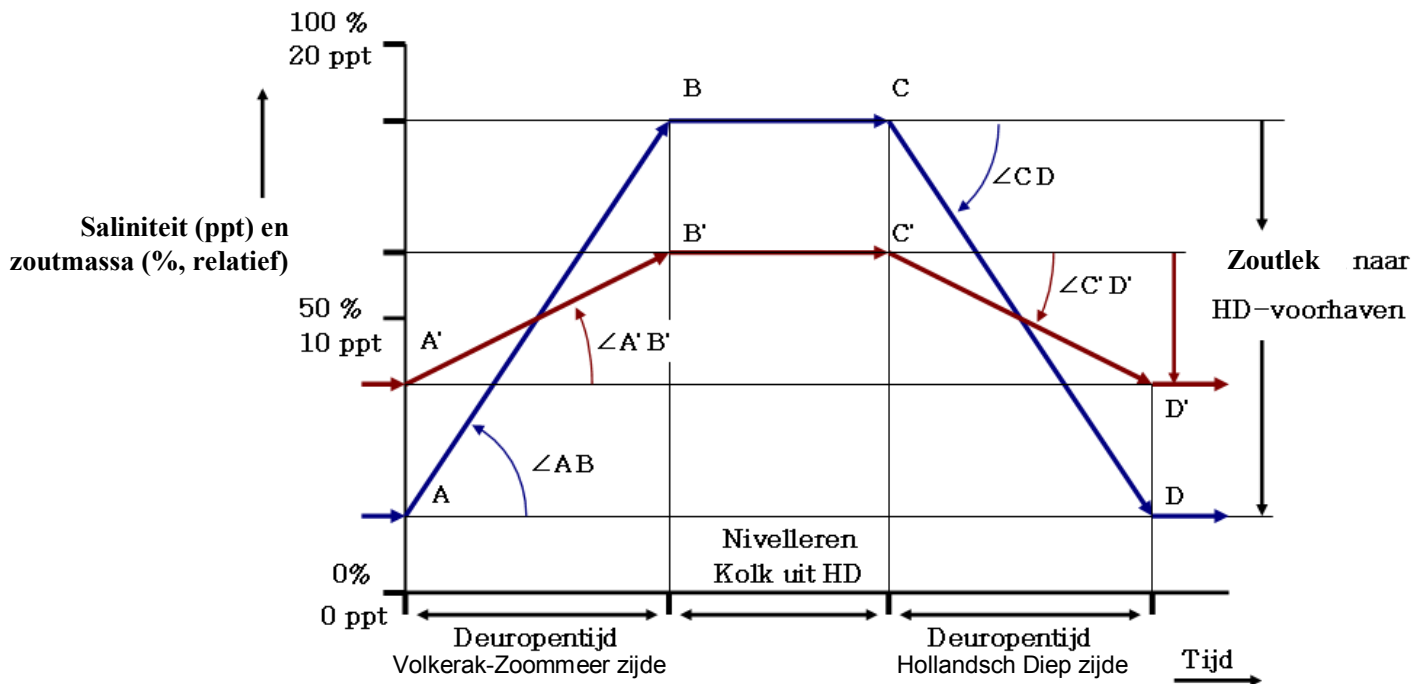
Figuur 2.9 Schematische voorstelling van 'lekkende ebdeuren'. In dit voorbeeld worden de lekkende ebdeuren in iedere fase van de shutcyclus ingezet: Er is altijd een stroming van het Hollandsch Diep door de kolken (gestippelde pijlen) naar het Volkerak-Zoommeer. Dit waterverbruik brengt zout uit de kolken terug naar het Volkerak-Zoommeer. De percentages zijn de fractie van opening (kierstand) van de rinketschuiven.

2.2.4 Variatie van zout in de sluis kolk tijdens de shutcyclus

Tot nu toe beschreven we het zouttransport in diverse stadia van schutten al dan niet gehinderd door diverse zoutlekbeperkende middelen. In deze paragraaf introduceren we de theorie van onze analysemethode om de werking van zoutlekbeperkende middelen vast te stellen.

We leiden veel af uit de registratie van de zogenaamde "harts slag" van de shutsluis. Zoals we gezien hebben, varieert naast het waterpeil ook het zoutgehalte in de sluis kolk. Net zoals het volume water in de sluis (m^3) kunnen we ook de totale hoeveelheid zout in de sluis bepalen. We noemen dit de zoutmassa (g of ton). De zoutmassa gedeeld door het volume is gelijk aan het gemiddelde zoutgehalte (ppt of g/m^3) in de sluis.

Figuur 2.10 is een vereenvoudigd voorbeeld van hoe de zoutmassa verandert tijdens een schutting. Als de sluisdeur aan de zoute Volkerak-Zoommeer zijde open staat, neemt door zout-zoet uitwisseling de zoutmassa toe (van A naar B, zonder zoutlekbeperkende middelen). Bij gegeven kolkafmetingen hangt de toename van de zoutmassa in de kolk af van het initiële zoutverschil tussen kolk en Volkerak-Zoommeer-voorhaven en van de deuropentijd. De hellingshoek $\angle AB$ is een maat voor de (snelheid van) zout-zoet uitwisseling.



Figuur 2.10 Variatie van gemiddelde saliniteit in de sluis en daaruit afgeleide zoutlek. Schuttingen zonder (blauwe lijn) en met zoutlekbeperkende middelen (bruine lijn) aan beide kolkeinden. Met zoutlekbeperkende middelen verloopt de toename en afname van de zoutmassa in de kolk trager en is de variatie in zoutmassa in de kolk kleiner: de zoutlek naar de Hollandsch Diep-voorhaven is kleiner. Het effect van schepen is verwaarloosd.

Tijdens nivelleren (periode B-C) wordt water uit de Hollandsch Diep-voorhaven ingelaten: de zoutmassa in de kolk verandert niet of nauwelijks, vanwege het lage zoutgehalte van het Hollandsch Diep water. Het volume verandert wel iets, zodat het sluis gemiddelde zoutgehalte lager wordt.

Als de sluisdeur naar de zoete Hollandsch Diep zijde open staat, neemt de zoutmassa in de kolk af door de zout-zoet uitwisseling. Zonder zoutlekbeperkende middelen loopt de afname van de zoutmassa in de kolk symmetrisch (C-D). Het verschil tussen de zoutmassa bij C en bij D is de massa zout die naar het Hollandsch Diep is gestroomd: de zoutlek.

Diverse zoutlekbeperkende middelen zoals luchtbellenschermen, waterschermen en/of drempels vertragen of beperken de zout-zoet uitwisseling en dus de toename en/of de afname van de zoutmassa in de kolk. In Figuur 2.10 verkleinen deze middelen de hellingshoek $\angle AB$ naar $\angle A'B'$ en/of de hellingshoek $\angle CD$ naar $\angle C'D'$. Bij dezelfde deuropentijd zal hierdoor het zoutgehalte in de kolk dichterbij het gemiddelde zoutgehalte (10 ppt) van het Volkerak-Zoommeer en het Hollandsch Diep fluctueren. Bij kortere deuropentijden, en gelijk aan beide kolkeinden, worden de fluctuaties rond 10 ppt kleiner.

Het kleinere zoutverschil tussen kolk en voorhaven levert een geringere aandrijvende kracht op voor de zout-zoet uitwisseling op, zodat deze uitwisseling nog trager verloopt. Na vele schuttingen met gelijke zoutlekbeperkende middelen aan beide kolkeinden ontstaat het patroon A'B'C'D'. Door dit patroon levert de kolk tijdens schutten naar de Hollandsch Diep-voorhaven minder zoutmassa dan zonder zoutlekbeperkende middelen.

Wat vertelt de variatie van zoutgehalte in de sluis?

De variatie van zoutgehalte in de sluis bevat een schat aan informatie over zout-zoet uitwisseling en de effectiviteit van zoutlekbeperkende middelen. In het volgende hoofdstuk leggen we uit hoe we de variatie van zoutgehalte in de Stevinsluis daadwerkelijk gemeten hebben. We beperken ons hier tot een getalsmatig voorbeeld.

In de best-case situatie, met zeer goed werkende zoutlekbeperkende middelen, varieert het zoutgehalte in de kolk maar een klein beetje rondom 10, zeg tussen 9 en 11 ppt. Het zoutverschil met de zoete en zoute voorhavens is dan altijd ongeveer 10 ppt⁶. De zoutlek is dan minimaal. De ideale situatie is te benaderen met goed werkende zoutlekbeperkende middelen zoals luchtbellenschermen, waterschermen en/of drempels. Het zoutverschil drijft de zout-zoet uitwisseling aan.

In het worst-case uiterste is de kolk of volledig zoet (0 ppt) of volledig zout (20 ppt). In deze maximale zoutleksituatie is tijdens schutten het verschil in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven 20 ppt, dus bijna tweemaal zo groot als in de ideale situatie.

De best-case situatie wordt benaderd door het zouttransport tijdens zout-zoet uitwisseling sterk te beperken. De doorlaatfractie van een luchtbellenscherm is gebaseerd op verandering van de zoutmassa onder omstandigheden die het luchtbellenscherm in de loop van vele schuttingen zelf in de kolk creëert. Er is dus sprake van het volgende meekoppeleffect:

1. de luchtbellenschermen aan beide kolkeinden verminderen het zoutgehalte tussen kolk en voorhaven doordat er minder zout wordt door gelaten; en
2. onder deze geringere verschillen in zoutgehalten laten de luchtbellenschermen dan nog een fractie van het geschatte zouttransport door.

Lekkende ebdeuren hebben op een andere wijze effect dan zoals beschreven in deze paragraaf. Hierop wordt in het kader van deze vereenvoudigde uitleg niet ingegaan.

6. Om precies te zijn altijd 11 ppt. Bij deuropening aan de Volkerak-Zoommeer zijde is het gemiddelde zoutgehalte in de kolk 9 ppt. Met 20 ppt zoutgehalte in het Volkerak-Zoommeer is het zoutverschil dus 11 ppt. Bij deuropening aan de Hollandsch Diep zijde is het gemiddelde zoutgehalte in de kolk 11 ppt. Met 0 ppt zoutgehalte in het Hollandsch Diep is het zoutverschil dus weer 11 ppt.

3 Vaststellen effectiviteit zoutlekbeperkende middelen

Leeswijzer voor dit hoofdstuk

In het vorige hoofdstuk is het fysische principe van zoutlek door de Volkeraksluizen beschreven en is de doorlaatfractie geïntroduceerd als karakteristieke parameter van een (combinatie van) zoutlekbeperkende middel(en). In dit hoofdstuk wordt de doorlaatfractie van een aantal (combinaties van) zoutlekbeperkende middelen afgeleid uit metingen in de Stevinsluis in de Afsluitdijk. Hoofdstuk 4, waarin de aldus afgeleide doorlaatfractie cruciale invoer is bij het bepalen van de mogelijkheden voor zoutlekbeperving in de Volkeraksluizen, kan op zichzelf staand gelezen worden.

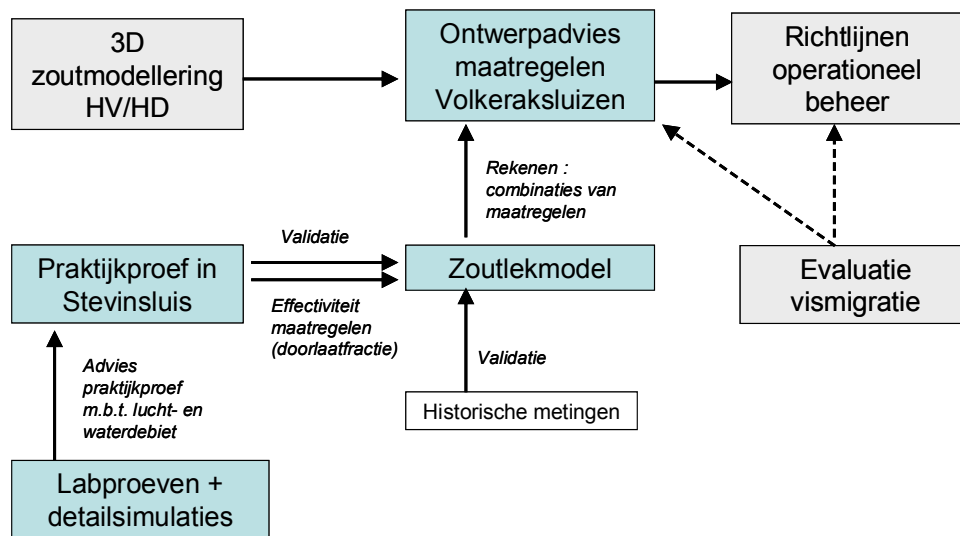
3.1 Hoe bepalen we de zoutlek door de Volkeraksluizen: Van theorie naar praktijk

Het vorige hoofdstuk bevatte het theoretische kader van zout-zoet uitwisseling in een sluiskolk en de wijze waarop zoutlekbeperkende middelen dat beïnvloeden. Tevens hebben we de variatie van zoutgehalte in de sluis geïntroduceerd (paragraaf 2.2.4), wat de basis is voor het kwantificeren en vergelijken van de effectiviteit van zoutlekbeperkende middelen.

Hoewel het principe van de zout-zoet uitwisseling en de variatie van zoutgehalte in een schutsluis relatief eenvoudig lijkt, is de combinatie met luchtbellenscherm, waterscherm, drempel, nivelleren, scheepvaart, voorhavens, eventuele zoutvang en de methode van lekkende ebdeuren zeer complex. Om al deze invloedsfactoren voor de schatting van de zoutlek door de Volkeraksluizen mee te nemen is het Zoutlekmodel ontworpen. Het Zoutlekmodel staat centraal in de evaluatie van mogelijke zoutlekbeperkende middelen in de Volkeraksluizen (Hoofdstuk 4). Gekalibreerde en gevalideerde modeluitkomsten zijn dus van groot belang en een groot deel van het onderzoek is er dan ook op gericht geweest dit te onderbouwen.

Ter validatie van het Zoutlekmodel en om enkele cruciale invoergrootheden te achterhalen, is een praktijkproef op ware schaal uitgevoerd. Praktijkproeven in de Volkeraksluizen waren niet mogelijk, omdat er in de huidige situatie geen zoutverschil is tussen Volkerak-Zoommeer en Hollandsch Diep. Om deze complexiteit toch in de praktijk te kunnen bemeten is de Stevinsluis in de Afsluitdijk geselecteerd als geschikte locatie. Daarnaast zijn op kleine schaal in het laboratorium en in gedetailleerde computersimulaties verkennende en inzicht gevende deelonderzoeken uitgevoerd. Figuur 3.1 geeft de samenhang tussen de verschillende onderdelen weer.

Het doel is om op basis van verschillende onderzoeksmethoden van laboratorium, computer en praktijk een samenhangend beeld te verkrijgen van de processen die bepalend zijn voor de van zoutlek van de Volkeraksluizen leiden. Anderzijds tonen de overigens beperkte onderlinge variaties in de uitkomsten en het inzicht in hun oorzaken de mate van onzekerheid waarmee in ons advies rekening gehouden dient te worden.



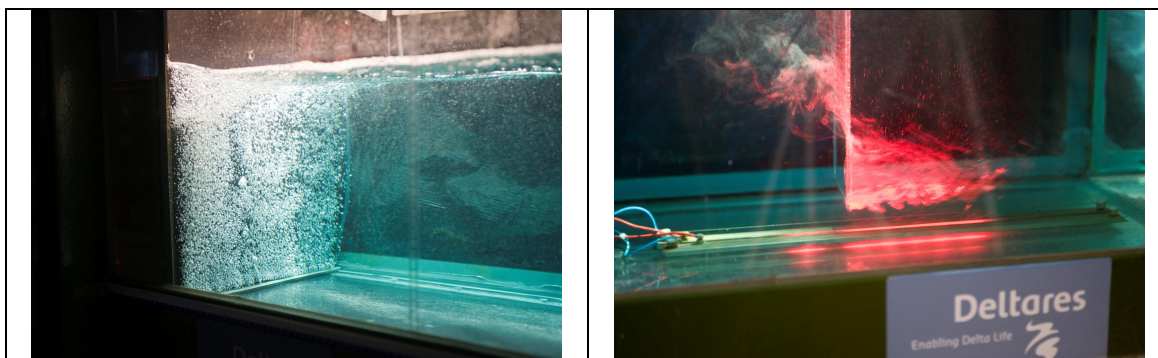
Figuur 3.1 Overzicht van deelstudies en hun samenhang in de "Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperking Volkeraksluizen". De (vier) blauw gekleurde blokjes geven de hoofdlijn van de studie aan, namelijk het onderzoek naar de mogelijkheden om de zoutlek door de Volkeraksluizen te beperken.

3.2 Voorbereidende verkenning met computer- en schaalmodel

3.2.1 Laboratoriumproeven

De laboratoriumproeven worden uitgebreid beschreven in Deltares (2010c) en uitgebreid samengevat in Deltares (2010f). In dit eindrapport wordt een korte samenvatting hiervan gegeven.

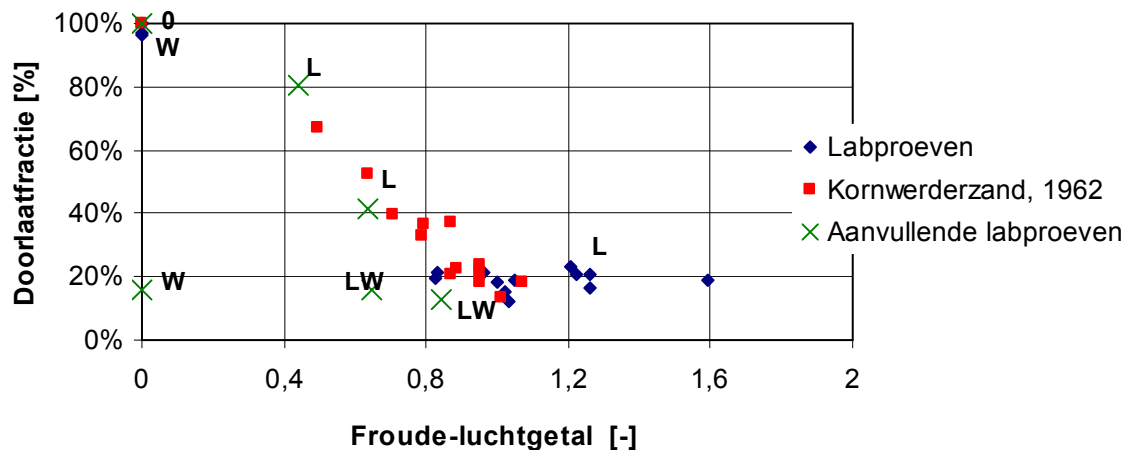
Een geïdealiseerde zout-zoet uitwisseling wordt gecreëerd door in een lang laboratoriumkanaal een schuif omhoog te trekken dat aanvankelijk zout water van zoet water scheidde. Op de bodem bij de schuif en over de kanaalbreedte ligt een platte poreuze strip dat aangesloten op een persluchtleiding het luchtbellenscherm maakt (Figuur 3.2). Over de kanaalbreedte en naast de poreuze strip komt water uit een 3 mm smalle sleuf dat een waterscherm creëert. Diverse variaties zijn beproefd met zoet kolkwater en 20 of 35 ppt zout water in de fictieve voorhaven. Uit de verschillende experimenten met vaste deuropentijd en wel/niet luchtbellenschermen en/of waterschermen volgt hun doorlaattractie als het verhoudingsgetal tussen toename in zoutmassa met en zonder zoutlekbeperkende middelen.



Figuur 3.2 Twee beelden uit de labproeven. Links: Luchtbellenscherm uit een poreuze strip op de bodem van het laboratoriumkanaal; Rechts: Horizontale snelheidsverdeling tijdens de zout-zoet uitwisseling zichtbaar gemaakt door zeer fijne waterstofgasbelletjes ingebracht die met een rode spleetvormige laser worden aangelicht

Figuur 3.3 vat de meeste laboratoriumproeven samen en toont meteen de goede overeenkomst en samenhang met de geïdealiseerde metingen (uit 1962!) in de 5 m diepe Lorentzschutsluis gelegen aan het oostelijke einde van de Afsluitdijk bij Kornwerderzand. De laagste doorlaatfracties van circa 0,15 worden bereikt met een combinatie van een realiseerbaar waterscherm en luchtbellenscherm. Deze combinatie is nooit eerder beproefd. Omdat ook met relatief grotere luchtdebieten is gewerkt, is bovendien zichtbaar dat de dalende trend van de doorlaatfractie zich niet voortzet bij toenemende luchtdebieten. Boven een bepaalde waarde is het dus niet meer zinvol het luchtdebiet nog verder te verhogen.

Metingen met alleen een waterscherm geven aan dat pas bij in de praktijk onrealistisch hoge waterdebieten vergelijkbare lage doorlaatfracties worden bereikt. Ook deze bevindingen stroken met laboratoriumproeven in (Bruyn, 1963); door de hoge waterdebieten zijn voor dit doel waterschermen niet in de praktijk beproefd, laat staan toegepast.



Figuur 3.3 De doorlaatfractie als functie van het Froude-lucht getal voor onze laboratoriumproeven met luchtbellens- en waterschermen. De resultaten komen goed overeen met historische veldmetingen met alleen luchtbellenschermen in de 5 m diepe Lorentzsluis (Kornwerderzand):
 0 - referentieproef zonder scherm; L - met alleen luchtbellenscherm;
 W - met alleen waterscherm; LW - combinatie luchtbellens- en waterscherm

De resultaten van onze laboratoriumexperimenten tonen opnieuw dat een luchtbellenscherm de zout-zoet uitwisseling aanmerkelijk onderdrukt. De positie van het luchtbellenscherm naast de drempel van de sluisdeuren of binnen een afstand van de waterdiepte van de drempel bleek niet van belang.

Onze laboratoriumproeven voegen een vrijheidsgraad toe aan het ontwerp van zoutlekbepurende middelen met luchtbellens- en waterschermen. Het lijkt mogelijk een optimale mengverhouding water-lucht te kiezen waarbij met het minste energieverbruik de laagste doorlaatfractie bereikt wordt. De proeven met lager lucht- en hoger waterdebiet laten duidelijk zien dat in combinatie met een waterscherm de doorlaatfractie nog aanzienlijk verlaagd kan worden ten opzichte van alleen een luchtscherm.

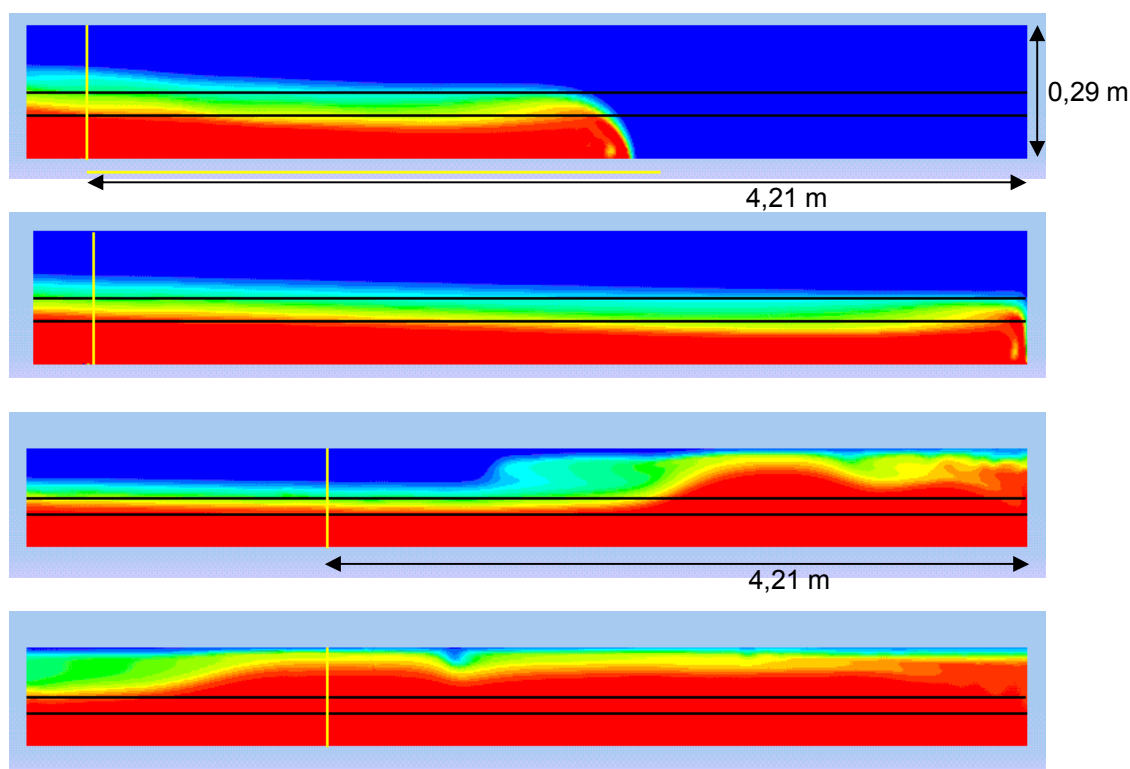
Computerberekeningen bieden meer gedetailleerd ruimtelijke inzicht. De gehanteerde rekenmethoden zijn niet op schaalregels gebaseerd maar hebben anderzijds hun onzekerheden in de nauwkeurigheid van weergave van turbulente processen, luchtbellenschermen en waterschermen. In het volgende onderdeel presenteren we de gedetailleerde computerberekeningen en hun toetsing aan onze laboratoriumproeven.

3.2.2 Gedetailleerde computerberekeningen

De resultaten van de gedetailleerde computerberekeningen zijn uitgebreid beschreven in Deltares (2010b) en uitgebreid samengevat in Deltares (2010f). In dit eindrapport wordt een korte samenvatting gegeven.

Het computerprogramma ANSYS-CFX (kortweg CFX) is toegepast dat is ontwikkeld voor industriële stromingen met meerdere fasen van deeltjes, vloeistof en gasbellen. CFX wordt rekentechnisch te zwaar met een bewegend wateroppervlak maar in dit geval kunnen we het wateroppervlak wrijvingsloos, constant en horizontaal houden. Verder pasten we CFX alleen toe in het verticale symmetrievlak van de kolk zonder snelheidsverdeling over de kolkbreedte door zijwanden, dat bespaart veel rekentijd. CFX is gevalideerd voor de goed bekende voortplanting van de zouttong. De uitkomsten bleken uitstekend met de theorie en de laboratoriumproeven overeen te komen. Deze paragraaf geeft een aantal resultaten ter illustratie van de berekeningen aan.

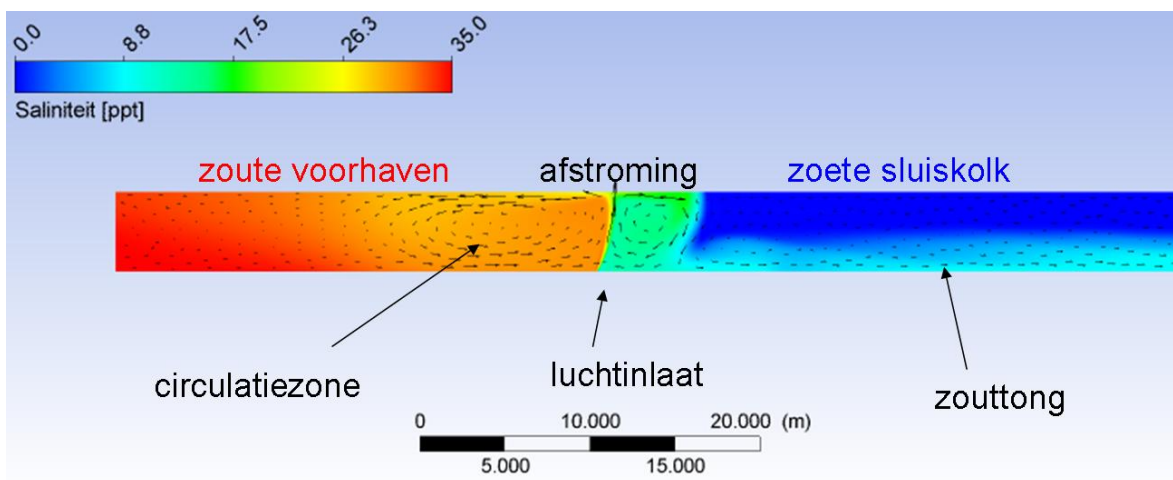
Figuur 3.4 geeft diverse stadia van de berekende zout-zoet uitwisseling (vergelijk met Figuur 2.5).



Figuur 3.4 Berekening met CFX van zout-zoet uitwisseling op laboratoriumschaal. Van boven naar onderen stadia 20, 35, 60 en 90 seconden na verwijderen zout-zoet scheiding (bij verticale gele lijn). Het zoete water is blauw en het 35 ppt zoute water is rood gekleurd. Kenmerkend is het opbollende front van de zouttong. Merk op het restant zoeter kolkwater dat in de toplaag achter blijft nadat de zouttong de kolk heeft verlaten (onderste figuurdeel). De zwarte lijnen refereren naar twee uitersten van de dikte van de zouttong in de theoretische oplossing (Shin e.a., 2004) die geldig is totdat de zouttong het gesloten kolkeinde bereikt.

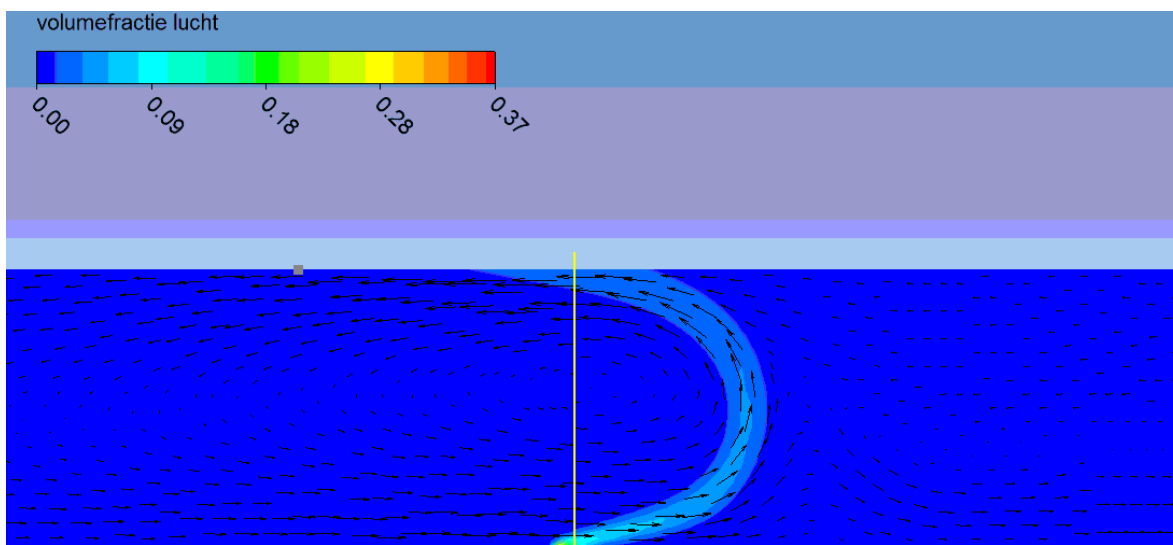
Gesterkt door de goede overeenkomsten tussen berekening en laboratoriummeting van zowel de zout-zoet uitwisseling als van het luchtbellenscherm in zoet water worden hierna beide mechanismen gecombineerd voor afmetingen van schutkolken.

Figuur 3.5 toont een dwarsdoorsnede kort na verwijderen van de zout-zoet scheiding terwijl het luchtbellenscherm circulaties in het verticale symmetrievlak van de kolk aandrijft. Het water in de groene zone rechts van het luchtbellenscherm in de kolk is brak en volgt het circulatiepatroon zoals in Figuur 2.8 met zoutpad III aangegeven. De horizontale afmeting van de groene zone is ruwweg eenmaal de waterdiepte. Links van het luchtbellenscherm in Figuur 3.5 bevindt zich op dit moment water dat via het luchtbellenscherm de kolk verlaat en naar het wateroppervlak is gebracht. Uit de groene circulatiezone in de kolk en naast het luchtbellenscherm zakt het brakke water uit. Dit water kwam uit de voorhaven en drong door het luchtbellenscherm naar de kolkzijde. Het brakke water zakt in de kolk uit en vormt een veel zwakkere zouttong (bij de bodem licht-blauw gekleurd) dan zonder.



Figuur 3.5 Stadium in de berekening van de zout-zoet uitwisseling in de Stevinsluis met 35 ppt zoute voorhaven en zoete kolk gehinderd door een luchtbellenscherm van 700 Nl/s na openen van de sluisdeuren (Froude-lucht getal 0,76). Zoet water is blauw en het zoute water in de voorhaven is rood gekleurd. Uit de circulatiezone aan de kolkzijde van het luchtbellenscherm ontsnapt een sterk verdunde en vertraagde zouttong. Op één maal de waterdiepte vanaf het hart van het luchtbellenscherm is de oppervlaktesnelheid 0,6 m/s in de voorhaven en 1,2 m/s in de kolk. Horizontale en verticale schalen zijn gelijk.

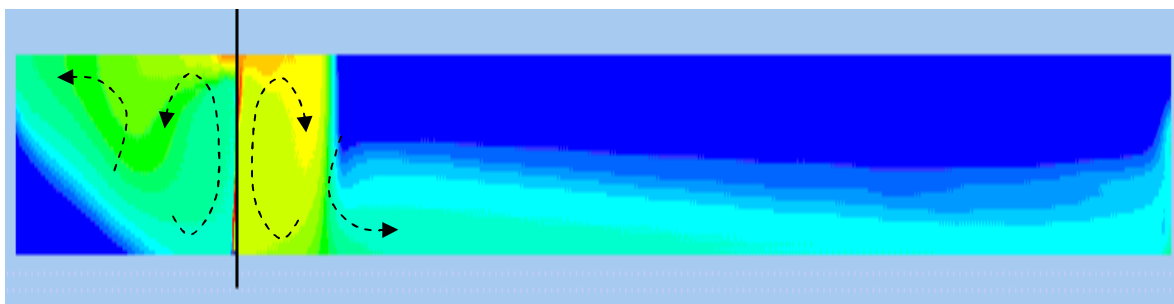
Figuur 3.6 biedt een bijzonder inzicht in de vervorming van het luchtbellenscherm onder druk van de zout-zoet uitwisselingsstroom. Wanneer het luchtdebiet onvoldoende krachtig is zal het scherm direct na het openen van de sluisdeuren bij de bodem met de zouttong meebuigen en ijler worden en meer zout doorlaten. Een drempel naast het luchtbellenscherm zal dit afbuigen tot hoger boven de kolkvloer uitstellen terwijl inmiddels meer water verticaal is meegesleurd dat moeilijker is om te buigen dan alleen de luchtstroom.



Figuur 3.6 De snelheidsverdeling en de mengverhouding lucht-water door een luchtbellenscherm van 400 Nl/s tijdens de zout-zoet uitwisseling tussen 35 ppt zoute voorhaven en zoete kolk op afmetingen van de Stevinsluis. De verticale gele lijn markeert de positie van de oorspronkelijke zout-zoet scheiding (lees: sluisdeuren). Op één maal de waterdiepte tot het scherm is de oppervlaktesnelheid maximaal en 0,8 m/s aan de zoute zijde (voorhaven) en ca. 0,2 m/s in de kolk.

De laboratoriumproeven toonden dat de ondersteuning van een luchtbellenscherm met een waterscherm een lagere doorlaatfractie geeft dan zonder waterscherm. Nu kunnen we aan de berekening ontleen op welke wijze het waterscherm deze verlaging van de doorlaatfractie veroorzaakt. Figuur 3.7 toont de mengverhouding van water uit het waterscherm met omgevingswater. Ten eerste zien we aan het rechte pad van de mengverhouding dat de combinatie waterscherm - luchtbellenscherm veel minder met de zouttong meebuigt dan zonder waterscherm (Figuur 3.6). De verticale impuls van het water uit het waterscherm zorgt ervoor dat het waterscherm veel minder afbuigt dan de luchtballen zonder waterscherm.

Verder zien we in Figuur 3.7 dat het water van het waterscherm meer de kolk in wordt gemengd dan naar de zoute voorhaven. Wanneer we het gehele volume rechts van de zwarte lijn (sluisdeuren) als kolk opvatten kan de kolk zelfs verzoeten. Overigens, een dergelijk verzoeten van de kolk gebeurt pas bij een waterdebiet hoger dan redelijkerwijs toepasbaar in een schutkolk.



Figuur 3.7 Waterscherm van $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ naast luchtbellenscherm van 1400 Nl/s in zoete kolk (rechts van zwarte lijn) en 35 ppt zoute voorhaven (links van zwarte lijn) voor afmetingen van de Stevinsluis. De kleuren tonen de mengverhouding van water uit het waterscherm met omgevingswater: rood 30% en blauw 0%.

3.2.3 Lessen uit de labproeven en gedetailleerde computerberekeningen

Voor dezelfde condities van de luchtbellenschermen zijn geen opvallende verschillen gevonden tussen de huidige laboratoriummetingen en laboratorium- en veldmetingen in de jaren 1960-1970. Een luchtbellenscherm alleen geeft een minimale doorlaatfractie van 0,2, maar bij minder goede instelling van het luchtdebiet neemt de doorlaatfractie toe.

De toevoeging van een waterscherm aan een luchtbellenscherm is niet eerder onderzocht en bij optimale mengverhouding luchtdebiet – waterdebiet blijkt deze combinatie in het laboratorium de laagste doorlaatfractie te geven van 0,10-0,15.

De gedetailleerde computerberekeningen van zout-zoet uitwisseling met luchtbellenscherm en waterscherm komen goed overeen met de geïdealiseerde laboratoriumexperimenten en bieden meer ruimtelijk inzicht in circulatiepatronen rondom de schermen op ware schaal. De berekende doorlaatfracties komen goed overeen met de laboratoriumexperimenten. De verkregen ruimtelijke inzichten worden betrouwbaar geacht omdat de berekeningen kloppen met meetbare uitkomsten van onze laboratoriumproeven en onze laboratoriumproeven stemmen overeen met eerdere metingen van Waterloopkundig Laboratorium in 1960-1970.

De inzichten zijn gebruikt in de keuzes en compromissen voor de opstelling van de schermen in de Stevinsluis voor de praktijkproef. Een voorbeeld is dat de schermen niet noodzakelijkerwijs tussen de vloed- en ebdeuren geplaatst hoeven te worden maar mogelijk beter aan de zoute zijde van de sluisdeuren. Een tweede voorbeeld is het grondiger bewijs

dat de teen van een luchtbellenscherm de zwakke plek is. En bekend is nu waarom een waterscherm deze zwakke plek kan beschermen tegen het doordringen van zout. De computercode CFX en de laboratoriumproeven zijn ook geschikt om de beschermende werking van de drempel op een luchtbellenscherm na te gaan, hoewel dat nog niet is onderzocht.

De laboratoriumproeven en de gedetailleerde computerberekeningen komen overeen en vullen elkaar aan. Ze bieden inzicht in de circulatiepatronen in het verticale symmetrievlak van de kolk en aangedreven door de luchtballen- en waterschermen.

Het inzicht in de invloed van scheepvaart op de zout-zoet uitwisseling is niet verdiept: berekeningen van varende schepen met werkend schroef tijdens en over een zout-zoet uitwisseling blijken nog te complex (dat wil zeggen niet standaard uitvoerbaar) voor numerieke berekeningen (Groeneboom, 2010). Verwacht wordt dat laboratoriumproeven op schaal ook complex zullen zijn, zowel in de uitvoering als in hun interpretatie met verschillende schaalwetten. En metingen in de Stevinsluis onder invloed van vooral getij en wisselende zoutgehalten lijken niet voldoende nauwkeurig met/zonder schip herhaald te kunnen worden.

3.3 Grootschalige praktijkproef in de Stevinsluis

3.3.1 Inleiding

De belangrijkste toetsing van de bouwstenen van het Zoutlekmodel vond plaats met de praktijkproef in de werkende schutsluis van de Stevinsluis (Figuur 3.8) met scheepvaart en met nivelleren. De toetsing richtte zich op de volgende essentiële vragen:

- Verloopt de zout-zoet uitwisseling zonder zoutlekbeperkende middelen in de Volkeraksluizen zoals de theorie deze beschrijft en met welke parameters dient deze theorie toegepast te worden?
- Wat zijn in de praktijk de doorlaatfracties van diverse zoutlekbeperkende middelen met de invloed van scheepvaart en met effecten van voorafgaande schuttingen?

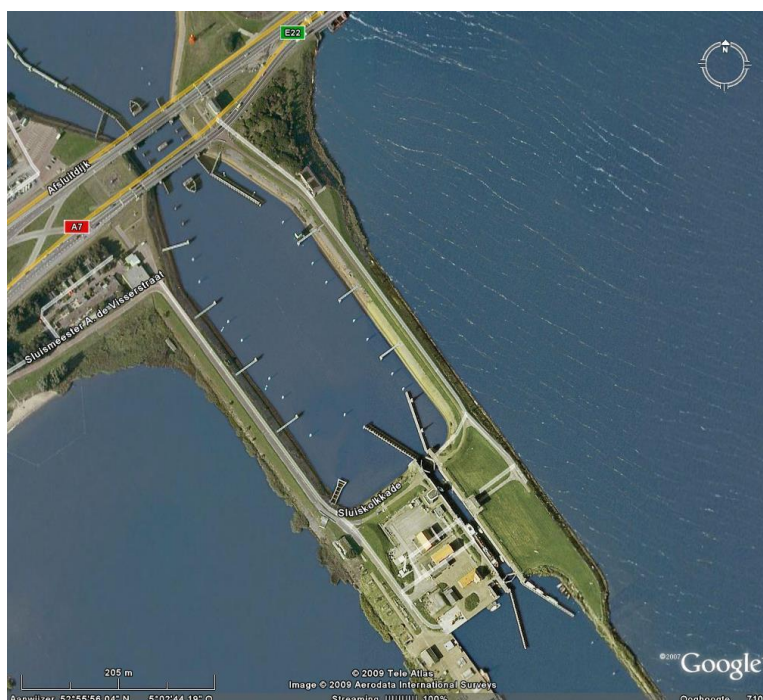
Net als in de Volkeraksluizen vindt nivellering in de Stevinsluis plaats door rinketschuiven. Dit is een zeer belangrijke voorwaarde voor de vertaalbaarheid van resultaten. Er zijn ook verschillen:

- Het zoutverschil varieert van 15 tot 25 ppt.
- De afmetingen van de sluis zijn kleiner. Dit vertaalt zich naar een deuropentijd van 15 minuten voor de Stevinsluis (in plaats van 25 minuten voor de Volkeraksluizen) voor een vergelijkbaar resultaat.
- De getijslag is groter en er zijn ook hogere waterstanden aan de zoute Waddenzee zijde dan in het IJsselmeer. Hoewel niet direct vergelijkbaar, leverde dit wel een uitgebreidere dataset ter toetsing van het Zoutlekmodel.
- Er is minder scheepvaart, maar wel voldoende om informatie af te kunnen leiden over de invloed van scheepvaart op zout-zoet uitwisseling.
- Er zijn traditionele zoutlekbeperkende luchtbellenschermen (dat wil zeggen geperforeerde buizen), waardoor we een vergelijking kunnen maken met de nieuwe luchtbellenschermen.

Bovenstaande verschillen vormen geen bezwaar voor vertaling van de resultaten naar de Volkeraksluizen. Veelal betreft het de definitie van de lokale omstandigheden (afmetingen, zoutgehalte) die sowieso te specificeren invoer voor het Zoutlekmodel zijn. De 'fysica' in het model neemt de verschillen mee in de berekening van de zoutlek. Daarnaast is de praktijkproef afgeleide doorlaatfractie zo gedefinieerd dat zij onafhankelijk is van lokale omstandigheden. De doorlaatfractie bepaald in de praktijkproef in de Stevinsluis kan dus rechtstreeks in de berekeningen voor de Volkeraksluizen worden toegepast.

Een impressie van de praktijkproef wordt gegeven in Figuur 3.9.

In het verleden zijn praktijkproeven in meerdere sluiscolken uitgevoerd met luchtbellenschermen uit geperforeerde buizen. Het bijzondere van de huidige praktijkproef in de Stevinsluis is de nauwkeurige methode van de bepaling van de zoutmassa in de kolk in een werkende schutsluis met scheepvaart en nivelleren. Tevens is de praktijkproef bijzonder door de inzet van de nieuw ontwikkelde Δ -luchtbellenschermen, gecombineerd met een waterscherm of met een extra, verhoogde drempel en met de methode van lekkende ebdeuren. De invloed van scheepvaart op de zout-zoet uitwisseling is in deze praktijkproef impliciet gemeten, omdat de scheepvaart niet is stilgelegd voor de praktijkproef.



Figuur 3.8 Overzichtsfoto Stevinsluis met zijn voorhavens naar Waddenzee en IJsselmeer (Bron: Google Earth)



Figuur 3.9 Foto's van de Praktijkproef, Stevinssluis:

Linksboven: één van de vijf boeien (blauw) met per boei drie zoutmeters die met de waterstand mee bewegen, daarachter het gebouw met onze werkplaats en kantoren.

Rechtsboven: links en rechts van de kolk in het gras twee bruine waterleidingen van de waterpompen aan meerzijde-voorhaven naar waterscherm voor de sluisdeuren naar zeezijde-voorhaven, links op de kolkkade de grijze persluchtleiding naar onze luchtbellenschermen bij de kolkeinden. In de kolk aan linkerzijde (westzijde) fenders ter bescherming van de zoutmeters.

Midden links: PC's afgeschermd tegen druiptvocht in de ruimte voor de aandrijving van de deuren.

Midden centraal: één van de twee waterpompen met zijn diesलगenerator.

Midden rechts: de gele compressor voor onze luchtbellenschermen.

Linksonder: een voorbeeld van kenmerkende tankers door de Stevinssluis: 9-10m breed, 80-85m lang en tot 3m diepgang.

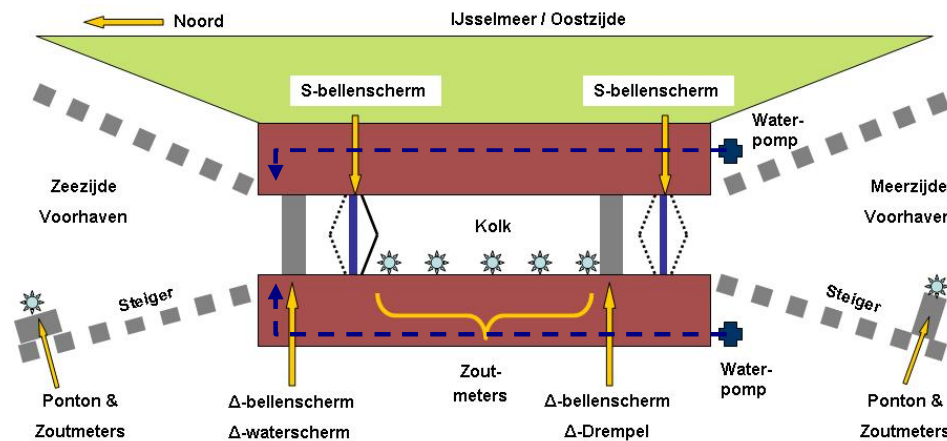
Onder centraal: het U-vormige frame voor de luchtbellens- en waterschermen (horizontaal) en toevoerleidingen (verticale kokers) daaronder op de kolkkade de grijze persluchtleiding voor onze luchtbellenschermen.

Rechtsonder: de kraan die het frame met de toevoerleidingen in de schotbalkspanningen laat zakken en op de kolkvloer plaatst.

3.3.2 Het meten van de zoutvariatie in de sluisolk: de meetopstelling

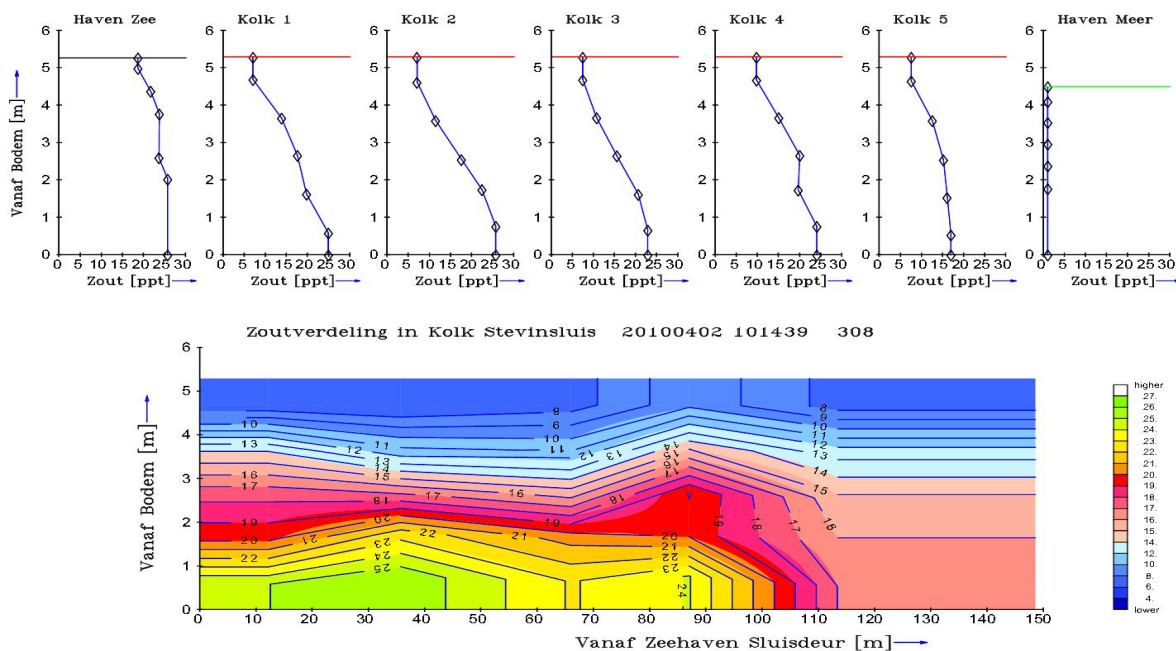
De kern van de praktijkproef was het continu opnemen van (de variatie van) het zoutgehalte in de Stevinsluis. De meetopstelling bestond uit (Figuur 3.10):

- Saliniteit in de sluisolk: Vijf verticale profielen van vijf sensoren (in totaal dus 25 sensoren)
- Saliniteit in de Waddenzee voorhaven: Een verticaal profiel van vijf sensoren
- Saliniteit in de IJsselmeer voorhaven: Een verticaal profiel van vijf sensoren
- Waterstand in de sluis en in beide voorhavens (totaal 3 sensoren)
- Stand van de sluisdeuren, open of dicht
- Stand van de rinkschuiven
- Luchtdebiet van het Δ -luchtbellenscherm
- Waterdebiet van het waterscherm
- Periode van werkende compressoren van het S-luchtbellenscherm
- Scheepvaartverkeer (handmatig bijgehouden, video, officiële registratie)



Figuur 3.10 Schematisch overzicht van de meetopstelling in de Stevinsluis met posities van zoutlekbeperkende middelen, meetpunten en benaming; met drukmeters werden de waterstanden in kolk en voorhavens gemeten. De frames met de Δ -luchtbellenschermen etc. liggen op ca. 10m aan zeezijde van de sluisdeuren.

Deze uitgekende meetopstelling stelde ons in staat om het gedrag van zout in de sluis nauwkeurig te volgen. De vijf verticalen in de sluis tonen niet alleen de positie en grootte van de zouttong, zoals in Figuur 3.11 als voorbeeld getoond, maar geven geïntegreerd over het watervolume van de kolk de zoutmassa. Uit het verloop van de zoutmassa in de tijd is de zoutlek af te leiden (zie ook Figuur 2.10). En door schuttingen met en zonder zoutbeperkende middelen is tenslotte de effectiviteit van zoutbeperkende middelen te achterhalen.



Figuur 3.11 Reis van zouttong in de Stevinsluis tijdens open sluisdeuren naar de Waddenzeezijde; 5 minuten na opening van sluisdeuren naar zeezijde om 10:09:39 uur op 2 april 2010.

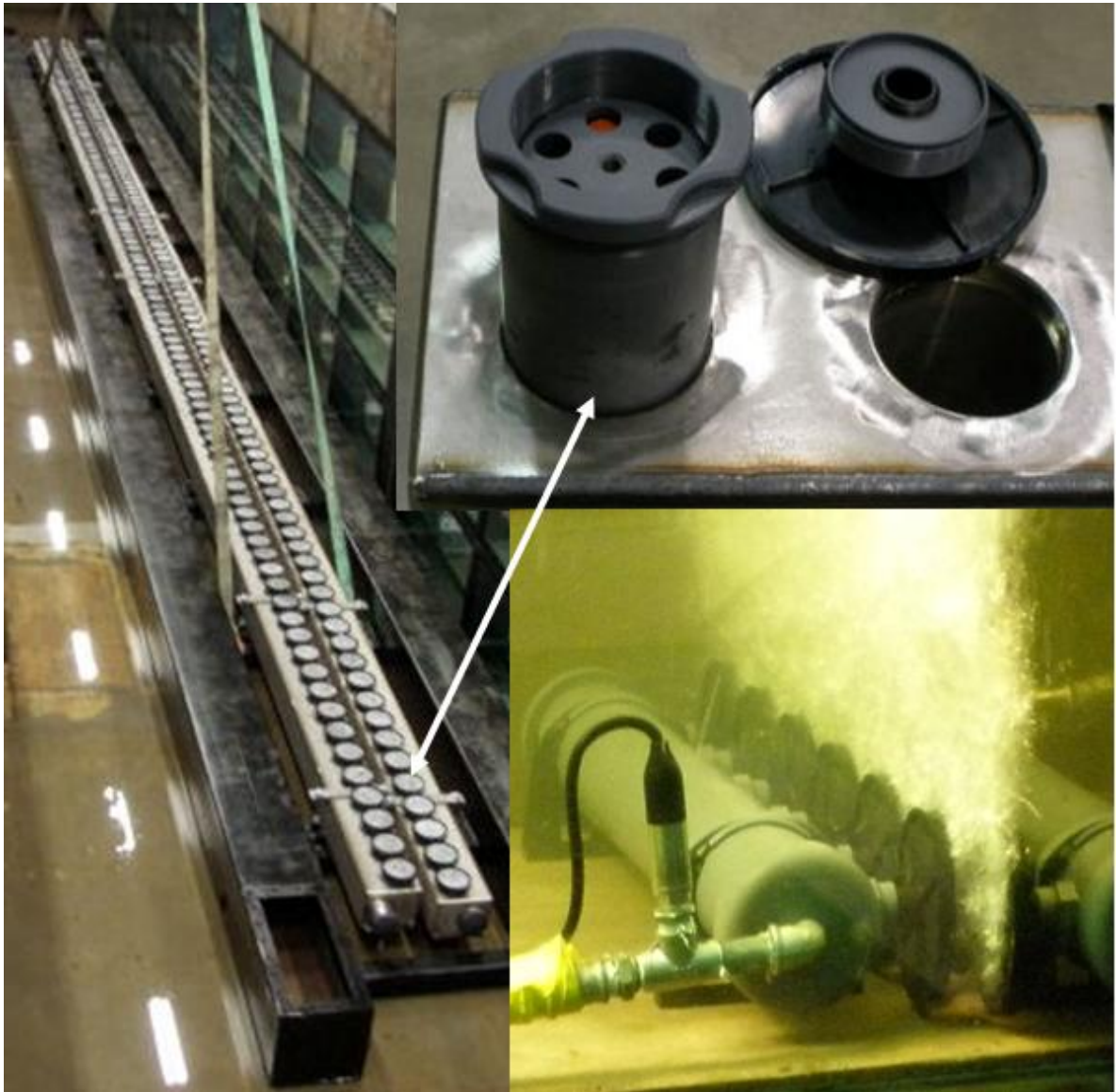
3.3.3 Zoutlekbepurende middelen: Innovatieve Δ -luchtscherm, waterscherm en drempel

De proefopstelling bestond uit (zie ook Figuur 3.10):

- De bestaande S-luchtschermen gepositioneerd tussen de sluisdeuren aan zowel de Waddenzeezijde als de IJsselmeerzijde. Het S-luchtscherm halverwege de Stevinsluis is niet gebruikt in de praktijkproef.
- De nieuwe Δ -luchtschermen gepositioneerd circa 10 m aan de zeezijde van de sluisdeuren aan zowel de Waddenzeezijde als de IJsselmeerzijde.
- Het waterscherm gepositioneerd bij het Δ -luchtscherm aan de Waddenzeezijde en 2 zijdig gevoed door twee waterpompen in het IJsselmeer.
- Een drempel.

Uit diverse mondelinge berichten en visuele waarnemingen blijkt dat de traditionele S-luchtschermen uit geperforeerde buizen de kolk niet gelijkmatig over de gehele breedte afdichten. Zodoende ontstaan er gaten of zwakke plekken in de schermen die meer zout doorlaten dan beoogd. Met deze ervaringen zijn de Δ -luchtschermen ontworpen, zie Figuur 3.12, gebaseerd op diffusers en luchtventielen die altijd een gelijkmatige luchtverdeling over de gehele kolkbreedte garanderen. Een dubbele rij is gebruikt met onderling versprongen diffusers die het luchtscherm en in het bijzonder de teen zo ondoordringbaar mogelijk tegen zout maken.

Behalve dit verbeterde ontwerp is in de labproeven en gedetailleerde computerberekeningen aangetoond dat de doorlaatfractie van een luchtscherm nog lager kan worden door een waterscherm naast het luchtscherm aan te brengen. Het water dat anders door het bellenscherm aangezogen moet worden wordt nu via het waterscherm en aan de zoute zijde van het luchtscherm aangeboden. De snelle uitstroming van het waterscherm voorkomt dat de luchtbelenstroom bij de teen met de zouttong meebuigt en het luchtscherm ijler wordt en meer zout doorlaat.



Figuur 3.12 Het Δ -luchtbellenscherm bestaande uit twee luchtkokers (grijs) met diffusers ("douchekoppen") op houders met luchtventielen (zie detailfoto rechtsboven). Kantelen van de balken zodat de diffusers horizontaal tegen elkaar in blazen (rechtsonder, proefopstelling in het een laboratoriumgoot) geeft het meest ondoordringbare luchtbellenscherm.

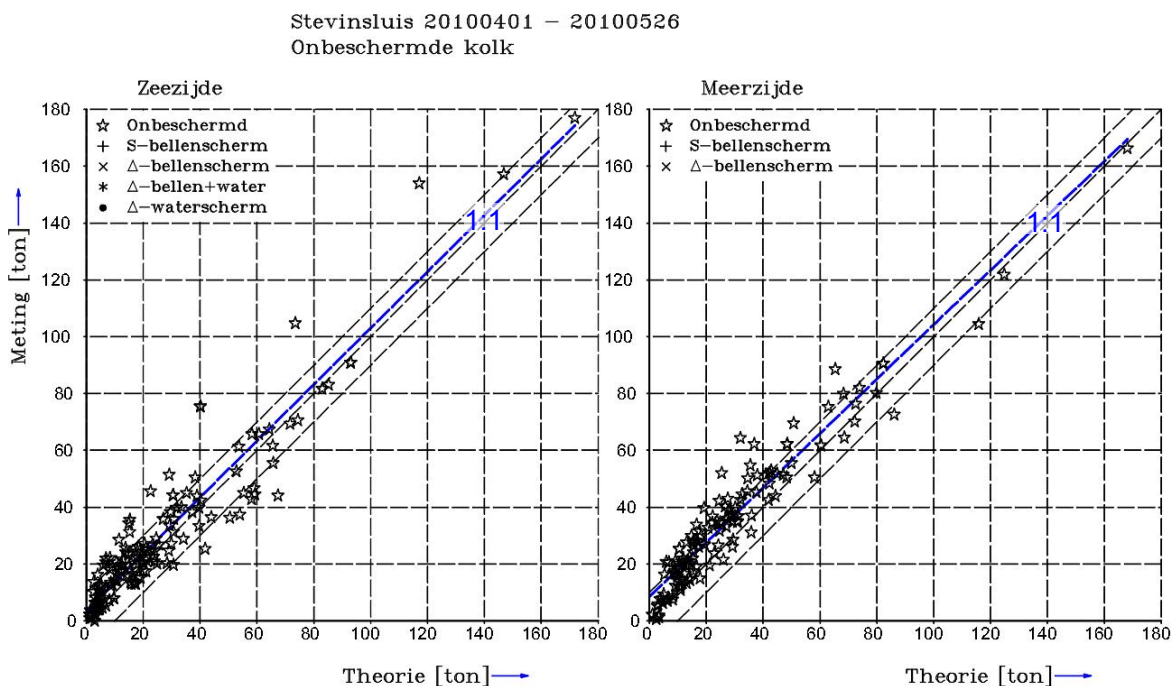
Een voldoende hoge drempel naast een luchtbellenscherm zou de beschermende functie van een waterscherm kunnen vervangen, zonder waterverbruik.

3.3.4 Resultaten van de praktijkproef: Effectiviteit van zoutlekbepurende middelen

Van 31 maart tot 27 mei 2010 zijn in totaal 844 schuttingen bemeten. Tabel 3.1 geeft een overzicht van schuttingen naar respectievelijk de zeezijde en de IJsselmeerzijde. De praktijkproef heeft een grote hoeveelheid gegevens en informatie opgeleverd. In dit rapport worden daarvan slechts de geaggregeerde resultaten voor direct gebruik in het Zoutlekmodel getoond. Per schutting is de zoutlek (in ton) berekend. Voor iedere schutting is daarnaast de theoretische schatting bepaald van wat de zoutlek zou zijn geweest zonder zoutlekbepurende middelen.

De theoretische schatting is eerst getoetst door de gemeten zoutlek bij een onbeschermd kolk (dus zonder zoutlekbepurende middelen) te vergelijken met de theoretische schatting. Voor een goede vergelijking zou dit een 1:1 lijn moeten opleveren. Figuur 3.13 en Tabel 3.1 laten zien dat dit inderdaad het geval is.

Uit de theoretische schatting en de gemeten zoutlek is nu direct de doorlaatfractie te bepalen. Bijvoorbeeld: als de theoretische schatting van een schutting 90 ton zoutlek is en de daadwerkelijk gemeten zoutlek is 45 ton, dan is de doorlaatfractie van de op dat moment ingezette (combinatie van) zoutlekbepurende middelen 0,5.



Figuur 3.13 Vergelijking tussen de theoretische schatting van de verandering van de zoutmassa in een kolk en die afgeleid uit de zoutmetingen. Gebaseerd op 157 schuttingen naar zeezijde en 144 schuttingen naar meerzijde, inclusief scheepvaart.

Van iedere variant met een (combinatie van) zoutlekbepurend(e) middel(en) is een puntenlijst aan gegevens beschikbaar, die in een regressielijn kan worden uitgedrukt. De regressielijn wordt gedefinieerd door hellingshoek, afsnede op de y-as en correlatiecoëfficiënt (r^2). De hellingshoek is een maat voor de doorlaatfractie en dus voor de effectiviteit van een (combinatie van) zoutlekbepurend(e) middel(en). De correlatiecoëfficiënt

is een maat voor de betrouwbaarheid van de gevonden doorlaatfractie. Voor de asafsede is niet direct een fysische betekenis te geven. Tabel 3.1 vat de hellingshoek en correlatiecoëfficiënt samen voor alle onderzochte varianten.

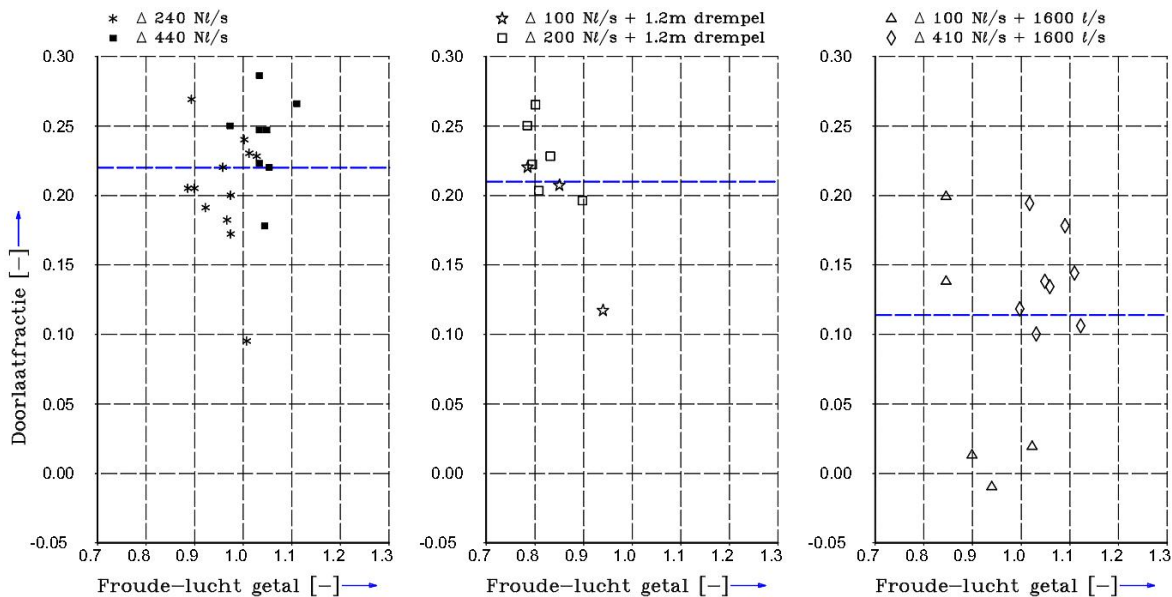
Tabel 3.1 Overzicht en samenvatting van analyse van onderzochte (combinaties van) zoutlekbepurende middelen bij geopende sluisdeuren naar zeezijde (boven) en naar meerzijde (onder) met definitie en naamgeving van de onderzochte varianten. De hellingshoek is een maat voor de doorlaatfractie, de correlatiecoëfficiënt r^2 voor de betrouwbaarheid van de gevonden doorlaatfractie.

Zee-zijde	Omschrijving in tekst	Lucht [Nl/s]	Water [l/s]	Fr_t [-]	Schuttingen	Hellingshoek	r^2
1	Onbeschermd kolk	0	0	0	157	0,99	0,94
2	S-luchtbellenscherm	103	0	0,77	97	0,73	0,74
3	S-luchtbellenscherm	246	0	1,44	76	0,48	0,73
4	Δ -luchtbellenscherm	144	0	0,64	1	-	-
5	Δ -luchtbellenscherm	207	0	1,22	28	0,25	0,77
6	Δ -luchtbellenscherm	431	0	1,67	15	0,23	0,76
7	Δ -luchtbellen- & waterscherm	94	1543	0,83	9	0,46	0,98
8	Δ -luchtbellen- & waterscherm	221	889	0,98	8	0,00	0
9	Δ -luchtbellen- & waterscherm	227	1479	1,14	7	0,57	0,82
10	Δ -luchtbellen- & waterscherm	411	1523	1,13	16	0,07	0,33
11	Δ -waterscherm	0	860	(1,92)	7	0,14	0,31
12	Δ -waterscherm	0	1505	(2,21)	10	0,56	0,77
13	Lekkende ebdeuren & Δ -luchtbellenscherm	123	0	0,58	7	0,13	0,50

Meer-zijde	Omschrijving in tekst	Lucht [Nl/s]	Water [l/s]	Fr_t [-]	Schuttingen	Hellingshoek	r^2
1	Onbeschermd kolk	0	0	0	144	0,96	0,96
2	Verhoogde drempel	0	0	0	64	0,78	0,95
3	S-luchtbellenscherm	103	0	0,67	78	0,60	0,90
4	S-luchtbellenscherm	245	0	1,02	36	0,38	0,89
5	S-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	99	0	0,61	17	0,41	0,77
6	S-luchtbellenscherm & verhoogde drempel	248	0	1,08	51	0,27	0,88
7	Δ -luchtbellenscherm	241	0	1,10	28	0,20	0,72
8	Δ -luchtbellenscherm	439	0	1,23	23	0,21	0,85
9	Δ -luchtbellenscherm & verhoogde drempel	103	0	0,73	8	0,47	0,92
10	Δ -luchtbellenscherm & verhoogde drempel	201	0	0,82	6	0,24	0,91
11	Lekkende ebdeuren & Δ -luchtbellenscherm	187	0	1,06	11	0,07	0,08

De doorlaatfractie speelt een belangrijke rol als invoergrootheid in het Zoutlekmodel. In Figuur 3.14 wordt de doorlaatfractie van de proeven met een Froude-luchtgetal⁷ tussen 0,8 en 1,2 getoond per combinatie van luchtbellenscherm zonder of met drempel of waterscherm. Voor Froude-lucht getallen kleiner dan 0,8 lijkt de zout-zoet scheidende werking van het luchtbellenscherm minder dan haalbaar. Voor Froude-lucht getallen groter dan 1,2 lijkt de mengende werking van de luchtbellenscherm de scheidende werking te benadelen.

7. Het Froude-lucht getal is de verhouding tussen de verticale watersnelheid in een luchtbellenscherm en de horizontale snelheid van de zouttong. Dit dimensieloze getal maakt het mogelijk om metingen en maatregelen in sluzen onderling, maar ook met labproeven te vergelijken. Verschillen zoals afmetingen en zoutgehalte worden ondervangen.



Figuur 3.14 Doorlaatfractie van zoutlekbeperkende middelen. Linkerdeel alleen Δ -luchtbellenschermen, rechterdeel Δ -luchtbellenschermen met waterschermen en centraal Δ -luchtbellenschermen met extra dremmel. De gestippelde blauwe lijnen geven het gemiddelde van de getoonde doorlaatfracties.

De 'lekkende ebdeuren' kon niet op dezelfde wijze worden uitgedrukt in een doorlaatfractie. Uit de zoutvariatie in de sluis is wel goed op te maken dat lekkende ebdeuren zeer effectief de zoutlek kunnen beperken.

De invloed van scheepvaart op de zoutlek was uit de metingen niet te kwantificeren. Het was evenmin mogelijk om onderscheid te maken tussen statische en dynamische waterverplaatsing.

Een verschil tussen de doorlaatfracties behaald in het verleden en de recente metingen is dat onze metingen gebaseerd zijn op een werkende schutsluis en met scheepvaart. Met deze zekerheid over de doorlaatfracties van luchtbellenschermen en met ondersteuning door waterschermen of dremmel zullen we in Hoofdstuk 4 de zoutlek door de Volkeraksluizen bespreken. Aan de hand van Tabel 3.1 en Figuur 3.14 wordt geconcludeerd dat:

1. ... Met optimaal ingestelde Δ -luchtbellenschermen een doorlaatfractie van 0,25 met voldoende zekerheid bereikt kan worden
2. ... Met optimaal ingestelde Δ -luchtbellenschermen ondersteund met een dremmel een doorlaatfractie van 0,20 met voldoende zekerheid bereikt kan worden
3. ... Met optimaal ingestelde Δ -luchtbellenschermen ondersteund met een waterscherm een doorlaatfractie van 0,15 met voldoende zekerheid bereikt kan worden
4. ... Voor een gevoeligheidsanalyse van de robuustheid van het advies gerekend kan worden met een doorlaatfractie die 0,05 hoger liggen dan voornoemde.
5. ... Lekkende ebdeuren een zeer effectieve zoutlekbeperkende maatregel zijn. Een doorlaatfractie is hiervoor niet te geven, maar met het Zoutlekmodel is de zoutlek wel goed te berekenen.

3.4 Het Zoutlekmodel

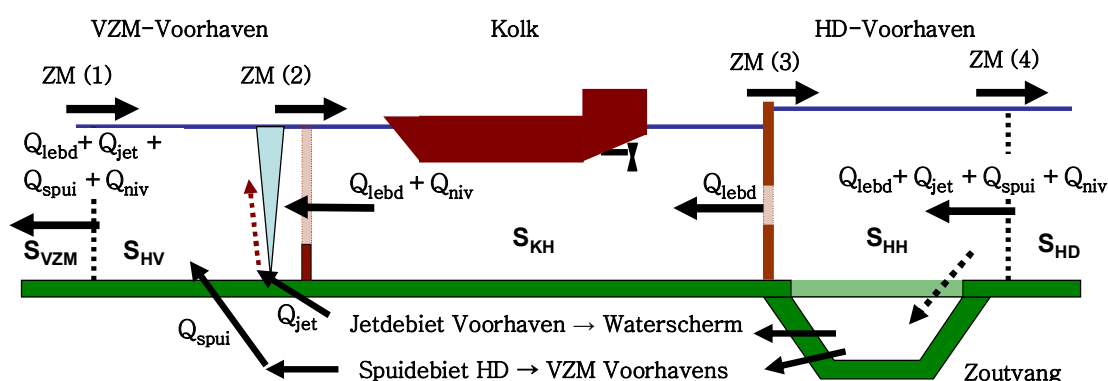
De concepten van het Zoutlekmodel worden hier kort besproken, zie (Deltares, 2010a) voor de details en de wiskundige uitwerking.

Het Zoutlekmodel beschouwt een reeks gelijke en opeenvolgende schuttingen, eerst naar het Volkerak-Zoommeer, de volgende naar het Hollandsch Diep en dan weer terug naar het Volkerak-Zoommeer etc. Uit deze reeks schuttingen berekent het Zoutlekmodel de zoutgehalten in de kolk en in de voorhavens. Uit deze zoutgehalten volgt de gezochte zoutlek als gemiddelde over de lange reeks schuttingen.

Figuur 3.15 toont een van de twee schuttingen waarmee het Zoutlekmodel rekent, hier de schutting naar het Volkerak-Zoommeer. Figuur 3.16 toont de andere schutting naar het Hollandsch Diep. De mondingen van de voorhavens zijn aangegeven met verticale stippellijnen. Bruine verticale balken geven de positie van de sluisdeuren. Een drempel is weergegeven door een korte bruine verticale balk op de kolkvloer. De blauwe driehoek stelt een luchtbellenscherm voor en de bruine stippellijn een waterscherm. Het waterscherm wordt gevoed met daggemiddeld waterdebiet Q_{jet} dat eventueel uit een zoutvang of anders uit de Hollandsch Diep-voorhaven wordt gepompt. Het waterscherm werkt alleen als de sluisdeuren worden geopend.

Het Zoutlekmodel rekent ook met een daggemiddeld spuidebiet Q_{spui} van water uit de zoutvang of uit de Hollandsch Diep-voorhaven. Dit spuidebiet wordt geloosd in de Volkerak-Zoommeer-voorhaven. Dit spuidebiet kan onafhankelijk van de schuttingen worden toegepast.

Verder rekent het Zoutlekmodel met het waterdebiet Q_{lebd} voor de methode van lekkende ebdeuren. Het daggemiddelde schutverlies of waterdebiet voor nivelleren Q_{niv} is in Figuur 3.15 aangegeven. De som van al deze debieten is links en rechts in Figuur 3.15 en Figuur 3.16 opgeteld en vormt het (daggemiddelde) waterverbruik.

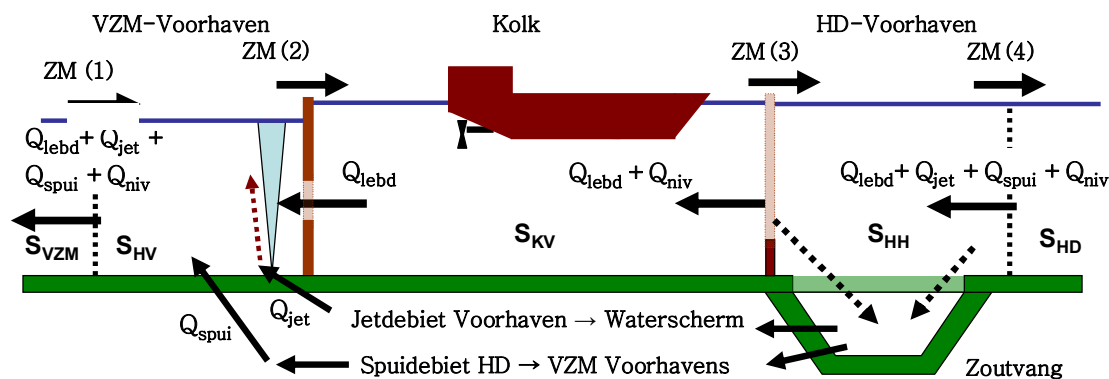


Figuur 3.15 Concepten Zoutlekmodel. Schutting naar Volkerak-Zoommeer-voorhaven, zie hoofdstekst voor uitleg van symbolen en processen.

Het zoutgehalte in het Volkerak-Zoommeer is in Figuur 3.15 afgekort tot S_{VZM} en is bekend; in deze figuren hanteren we hoofdletter S voor saliniteit. Tevens is het zoutgehalte in het Hollandsch Diep bekend en in de figuren afgekort tot S_{HD} . Onbekend zijn de dieptegemiddelden zoutgehalten in de Volkerak-Zoommeer-voorhaven (S_{HV}) en in de Hollandsch

Diep-voorhaven (S_{HH}). Op het moment van schutten naar het Volkerak-Zoommeer heeft de kolk het volume-gemiddelde zoutgehalte S_{KH} dat wordt bepaald door de voorafgaande deuropensituatie met het Hollandsch Diep. Omgekeerd, op het moment van schutten naar het Hollandsch Diep, heeft de kolk het volume-gemiddelde zoutgehalte S_{KV} na de voorafgaande deuropensituatie met het Volkerak-Zoommeer.

De zout-zoet uitwisselingen zoals gegeven in Figuur 2.10 verbinden de deuropensituatie met het Volkerak-Zoommeer (Figuur 3.15) met die met het Hollandsch Diep (Figuur 3.16). Door de mondingen van de voorhavens veronderstellen we ook zout-zoet uitwisselingen. De volumes van de voorhavens zijn zo groot dat de pulserende zoutlek uit de kolken sterk worden gedempt. Daarom nemen we aan dat de zoet-zout uitwisselingen door de mondingen van de voorhavens min of meer continue plaats vinden dat wil zeggen niet alleen tijdens geopende sluisdeuren.



Figuur 3.16 Concepten Zoutlekmodel. Schutting naar Hollandsch Diep-voorhaven, zie hoofdstekst voor uitleg van symbolen en processen.

De debieten water in m^3/s worden onder andere bepaald door de zout-zoet uitwisseling, het nivellieren, de waterverplaatsing door scheepvaart, via lekkende ebdeuren en de tijdelijke opvang van kolkwater in een zoutvang.

De zouttransporten ZM(1) t/m ZM(4) in kg/s zijn de som van de zout-zoet uitwisseling per doorsnede en het zouttransport door nivellieren, scheepvaart, spuien, waterschermen en de methode van lekkende ebdeuren. De zouttransporten ZM(1) t/m ZM(4) kunnen in de onbekende en bekende zoutgehalten en debieten worden uitgedrukt. Door de boekhouding op te stellen van de ingaande en uitgaande debieten van water en van zout en te eisen dat deze boekhouding sluitend is (de wet van behoud van massa) kunnen de onbekende gehalten en debieten worden berekend.

Het Zoutlekmodel berekent tenslotte de zoutmassa per tijdseenheid door de monding van de Hollandsch Diep-voorhaven naar het Hollandsch Diep: Dat is de zoutlek (ZM(4) in de figuren). Hierbij wordt de werking van de jachtensluis met de overige drie beroepssluizen meegewogen.

4 Mogelijkheden zoutlekbeperving Volkeraksluizen

Leeswijzer voor dit hoofdstuk

Dit hoofdstuk kan op zichzelf staand gelezen worden. Informatie uit de vorige hoofdstukken die nodig is, wordt kort herhaald. De vorige hoofdstukken bieden voor de geïnteresseerde lezer een uitgebreider overzicht van context en de uitgevoerde onderzoeken.

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de hoofdvragen van de ontwerpstudie en praktijkproef: Is het mogelijk de zoutlek door de Volkeraksluizen tot 60 kg/s of minder te beperken? En zo ja, welke (combinatie van) zoutlekbepervende middelen moet(en) daarvoor ingezet worden?

Omdat er nu geen zout-zoet gradiënt bij de Volkeraksluizen aanwezig is, is er een model nodig om de zoutlek in de toekomstige situatie te voorspellen. Dit Zoutlekmodel is succesvol gevalideerd op beschikbare historische metingen en op de nieuwe metingen in de Stevinsluis. De praktijkproef in de Stevinsluis heeft ook de voor het Zoutlekmodel zeer belangrijke doorlaatfractie van zoutlekbepervende middelen met een grote mate van zekerheid kunnen vaststellen. Het Zoutlekmodel kan daarom in dit hoofdstuk ingezet worden om met grote betrouwbaarheid een antwoord te geven op de hoofdvragen.

De drie harde randvoorwaarden

Bij een zout Volkerak-Zoommeer zal zout door de Volkeraksluizen naar het Hollandsch Diep lekken. Op basis van voorstudies is gebleken dat als de zoutlek⁸ tot 60 kg/s beperkt wordt, is er geen sprake van onacceptabele beperkingen bij zoetwaterinnamepunten voor landbouw, industrie en drinkwater in het Hollandsch Diep, Haringvliet, Spui en Biesbosch. Aangezien zonder zoutlekbepervende middelen de zoutlek circa 480 kg/s zal zijn, moeten zoutlekbepervende middelen 87,5% effectief zijn.

Voor de zoutlekbeperving is maximaal 25 m³/s water uit het Hollandsch Diep beschikbaar. Omdat voor nivellering tijdens het schutten gemiddeld 3,2 m³/s nodig is, is dus nog maximaal 21,8 m³/s water beschikbaar voor zoutlekbepervende middelen.

De laatste randvoorwaarde is dat de scheepvaart niet of minimaal gehinderd mag worden. In de praktijk komt dit neer op het niet significant toenemen van de schuttijd van de Volkeraksluizen. Er is uitgegaan van de scheepvaartprognose voor 2020. Deze komt neer op 20 schuttingen per dag per sluis en een deuropentijd van 25 minuten per sluisseinde.

De situatie ter plekke

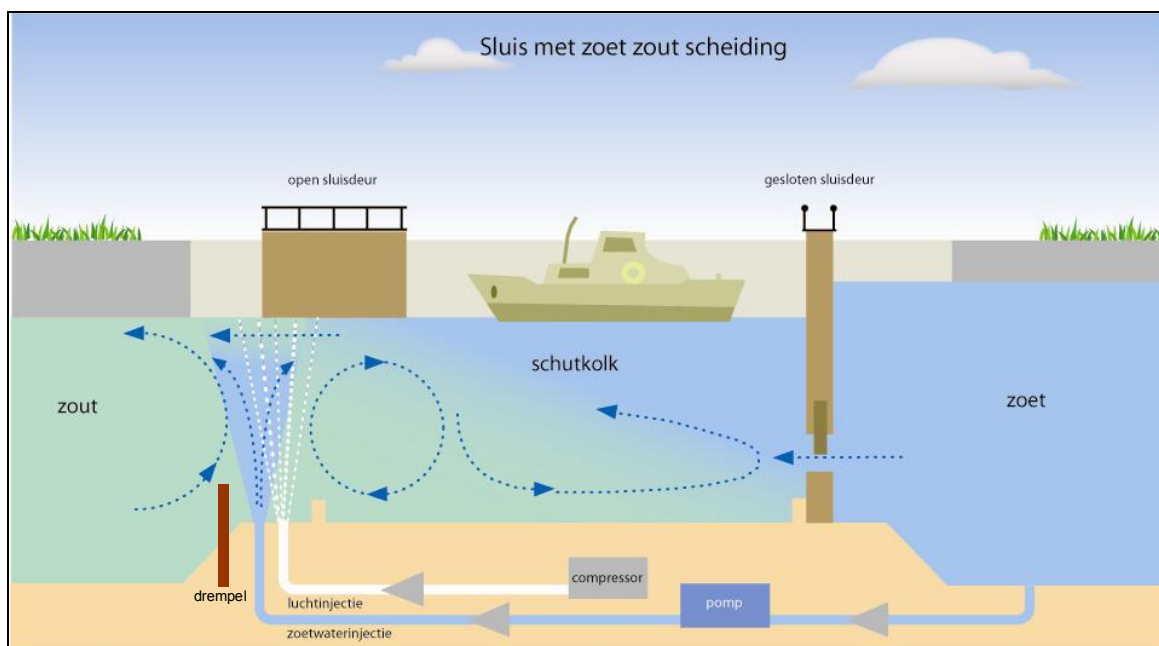
De Volkeraksluizen bestaan uit drie schutsluizen voor de beroepsvaart en een schutsluis voor de recreatievaart. De lengte, breedte en diepte van de sluisen liggen vast (zie ook Tabel 2.1), dat wil zeggen dat in deze ontwerpstudie niet gezocht is naar zoutlekbeperving door aanpassing van de afmetingen van de sluisen of door het toepassen van de middendeuren die de sluislengte halveren.

8. De zoutlek wordt weergegeven in totaal zout. Met 'zout' bij de innamepunten wordt meestal de chlorideconcentratie bedoeld. 60 kg/s zoutlek komt overeen met ongeveer 33 kg/s chloridelek.

Het zoutgehalte aan de Volkerak-Zoommeerzijde van de Volkeraksluizen zal vooral variëren met de zoetwateraanvoer door de Volkeraksluizen en via de Noord-Brabantse rivieren Dintel en Vliet en enigszins met het getij (zie ook Figuur 2.1). Voor het ontwerp van de zoutlekbeperkende middelen is een zoutgehalte van 20 ppt aangehouden.

Het waterstandsverschil tussen Hollandsch Diep en Volkerak-Zoommeer wordt door de Volkeraksluizen overbrugd. In de toekomstige situatie zal de waterstand op het Hollandsch Diep hoger zijn dan op het Volkerak-Zoommeer, sporadisch voorkomende uitzonderingssituaties daargelaten. Dit is gunstig voor de zoutlek om twee redenen: 1) Er is geen zout water nodig voor nivellering hetgeen dus geen bijdrage levert aan de zoutlek, en 2) het verval kan ingezet worden voor zoutlekbepanking zonder dat het extra energie kost. In de ontwerpstudie is aangenomen dat de waterstand op het Hollandsch Diep gemiddeld 0,5 m hoger is dan op het Volkerak-Zoommeer.

Zoutlekbeperkende middelen



Traditioneel bellenscherm	Een 'traditioneel' luchtbellenscherm bestaat uit een geperforeerde buis waardoor lucht geïnjecteerd wordt.
Δ -luchtbellenscherm (zie ook Figuur 3.12)	Het in deze proef ontwikkelde Δ -luchtbellenscherm bestaat uit een rij diffusers ('douchekoppen') ieder gemonteerd boven een of meer luchtventielen die altijd een gelijkmatige luchtverdeling over de gehele kolkbreedte garanderen. Een dubbele rij, onderling versprongen diffusers is gebruikt, zodat het luchtbellenscherm en in het bijzonder de teen zo ondoordringbaar mogelijk tegen zout is.
Waterscherm	Een waterscherm bestaat uit een buis of koker met daarin een smalle sleuf waardoor water geïnjecteerd wordt. Het water dat afkomstig is uit de voorhaven of eventueel uit een zoutvang, kan eventueel onder vrijval of met een pomp naar de zoute kant van de sluis kolk gebracht worden.
Verhoogde drempel	Zoutlek is (onder andere) afhankelijk van de waterdiepte van een sluis. Een drempel verlaagd de effectieve waterdiepte van een sluis, waardoor de zoutlek vermindert. In combinatie

	met een luchtbellenscherm kan de drempel ook de teen bescherming geven.
Lekkende ebdeuren	Bij 'lekkende ebdeuren' staan de rinketschuiven in de <i>gesloten</i> sluisdeur op een kier. Daardoor lekt (zoet) water door de sluisdeur en wordt een netto zoetwaterstroming door de sluis gecreëerd, die het zoutere water verdringt of terug dringt.
Zoutvang (niet getoond in figuur)	Een zoutvang is een diepe put of geul aan de zoete zijde buiten de kolk. Zout(er) water dat door de sluis is gestroomd, zakt door de grotere dichtheid in deze put of geul en wordt daar dus verzameld. Het zoute(re) water wordt dus tijdelijk opgeslagen, totdat de put of geul overstroomt of totdat het water wordt teruggepompt naar de zoute kant van de sluis.

Berekening van de zoutlek met het Zoutlekmodel:

Het Zoutlekmodel berekent de zoutlek naar het Hollandsch Diep gemiddeld over veel gelijke schuttingen. Voor de berekening zijn de gegevens nodig zoals samengevat in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Vaste invoergegevens voor het Zoutlekmodel: afmetingen sluisen en omgevingsfactoren

Invoerparameter	Beroepssluisen	Jachtensluis
Aantal	3	1
Lengte	345 m	154,5 m
Breedte	24 m	16 m
Diepte kolkvloer	7,5 m	6,75 m
Diepte drempel	6,5 m	6,25 m
Drempelhoogte	1 m	0,5 m
Gemiddeld aantal schepen per kolk (prognose 2020)	2,6	-
Gemiddelde waterverplaatsing schepen per kolk	4.568 m ³	verwaarloosbaar
Aantal schutcycli per dag per kolk	20	
Deuropentijd per kolk per sluseinde	25 min	
Waterstandsverschil Hollandsch Diep - Volkerak-Zoommeer	0,5 m	
Zoetwatergebruik nivellering	3,2 m ³ /s	
Zoutgehalte Volkerak-Zoommeer	20 ppt	

Voor deze vaste gegevens en dus zonder zoutlekbeperkende middelen berekend het Zoutlekmodel een zoutlek van 480 kg/s. Zoutlekbeperkende middelen kunnen aan de Volkerak-Zoommeer zijde, aan de Hollandsch Diep zijde of aan beide zijden worden toegepast. De middelen kunnen verschillen per zijde. Per zijde gaat de berekening wel uit van dezelfde middelen aan alle (vier) sluseinden.

Voor een zoutlekbeperkend middel of een combinatie van zoutlekbeperkende middelen moet voor beide sluseinden in het Zoutlekmodel de doorlaatfractie worden opgegeven. De doorlaatfractie is in deze ontwerpstudie gedefinieerd als de fractie zout die bij de sluis toegang doorgelaten wordt ten opzichte van de hoeveelheid zout die doorgelaten zou worden zonder zoutlekbeperkende middelen en verder gelijke omstandigheden⁹. Als onder bepaalde

9. Voor de experts: Bij normale deuropentijden wordt niet het hele, maar maximaal 80% tot 90% van het sluisvolume uitgewisseld. De laatste 10% tot 20% zou pas bij in de praktijk onrealistisch lage deuropentijden uitgewisseld worden. De in deze ontwerpstudie gedefinieerde en toegepaste doorlaatfractie moet met dit maximale percentage vermenigvuldigd worden om de fractie uitgewisseld sluisvolume te berekenen. In het voorbeeld uit de tekst komt een doorlaatfractie van 0,35 dus neer op een uitwisselfractie van 0,28 tot 0,315 van het sluisvolume.

omstandigheden door een sluisdeur zonder zoutlekbeperkende middelen 100 kg/s zouttransport plaatsvindt en met een zoutlekbeperkend middel 35 kg/s, dan is de doorlaatfractie voor dat zoutlekbeperkend middel 0,35 of als percentage 35%.

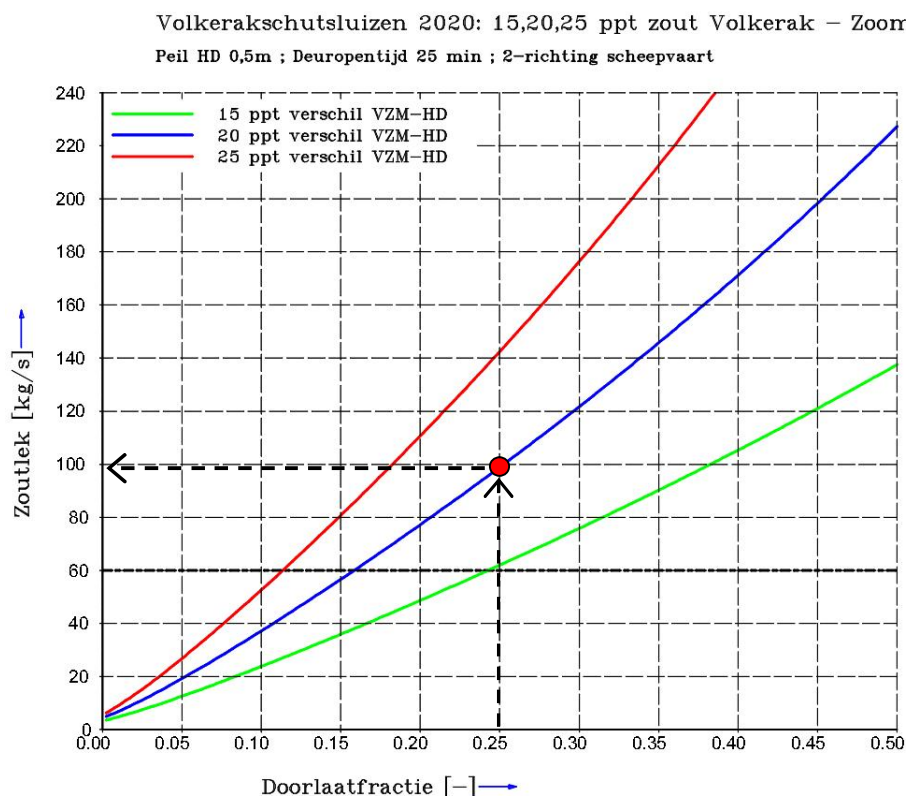
De praktijkproef in de Stevinsluis heeft een goede, betrouwbare onderbouwing gegeven voor de doorlaatfractie van verschillende zelfstandige of combinaties van zoutlekbeperkende middelen (Tabel 4.2). De innovatieve Δ -luchtbellenschermen zijn effectiever dan traditionele luchtbellenschermen doordat een beter gesloten scherm gevormd worden en er dus minder tot geen kieren zijn waardoor alsnog zout kan glijpen. De combinatie van een Δ -luchtbellenscherm met andere zoutlekbeperkende middelen verlaagt de doorlaatfractie nog verder. De laagste doorlaatfractie wordt bereikt door een combinatie van het Δ -luchtbellenscherm met een waterscherm.

Tabel 4.2 Doorlaatfractie en effectiviteit van zoutlekbeperkende middelen toegepast in de voorspelling. De waarden zijn afgeleid van de praktijkproef in de Stevinsluis en worden als realistisch haalbaar gezien.

Zoutlekbeperkend middel (combinatie van)	Doorlaatfractie (%)	Effectiviteit (%)
geen	100%	0%
traditioneel luchtbellenscherm (geperforeerde buis)	40%	60%
Δ -luchtbellenscherm	25%	75%
waterscherm	40%	60%
Δ -luchtbellenscherm + waterscherm	15%	85%
Δ -luchtbellenscherm + drempel	20%	80%
Lekkende ebdeuren	<i>Afhankelijk van debiet</i>	

Uitkomst van het Zoutlekmodel: een voorbeeld

Met de vaste invoergegevens (Tabel 4.1) als basis kan onderzocht worden hoe de zoutlek afhangt van de doorlaatfractie (Tabel 4.2) en/of van het extra waterverbruik. Figuur 4.1 geeft bijvoorbeeld aan hoe de zoutlek afhangt van de doorlaatfractie. Uit de figuur is af te lezen dat bij het gemiddeld zoutgehalte van 20 ppt in het Volkerak-Zoommeer het gebruik van de Δ -luchtbellenschermen (doorlaatfractie 0,25) zal leiden tot een zoutlek van 98 kg/s. Hieruit volgt de conclusie dat het gebruik van Δ -luchtbellenschermen alleen de zoutlek door de Volkeraksluizen onvoldoende beperken. Dit ondanks de enorme verbetering die bereikt wordt ten opzichte van traditionele bellenschermen (doorlaatfractie 0,40). Deze zouden onder de zelfde omstandigheden 170 kg/s zoutlek hebben bereikt.



Figuur 4.1 Zoutlek (in kg/s) door de Volkeraksluizen als functie van de doorlaatfractie (gelijk aan beide sluisseinden) en drie varianten in zoutgehalte Volkerak-Zoommeer. De overige omstandigheden zijn standaard zoals gedefinieerd.

4.2 Basisresultaat: Mogelijkheden zoutlekbepanking in de Volkeraksluizen

Met het Zoutlekmodel is de zoutlek berekend voor een aantal (combinaties van) zoutlekbeperkende middelen (Tabel 4.3). De volgende conclusies kunnen getrokken worden:

- Zelfs als effectiefste alleenstaand zoutlekbeperkend middel resulteren Δ -luchtbellenschermen alleen in onvoldoende zoutlekbepanking. Er is dus altijd een combinatie van zoutlekbeperkende middelen nodig om de zoutlek tot 60 kg/s of minder te beperken.
- Er zijn meerdere combinaties die de zoutlek tot 60 kg/s of minder te beperken:
 - Δ -luchtbellenschermen met een waterscherm ($6 \text{ m}^3/\text{s}$) aan de Volkerak-Zoommeer zijde
 - Δ -luchtbellenschermen met een waterscherm ($6 \text{ m}^3/\text{s}$) aan Volkerak-Zoommeer en aan Hollandsch Diep zijde
 - Δ -luchtbellenschermen met methode lekkende ebdeuren ($21,8 \text{ m}^3/\text{s}$)
 - Δ -luchtbellenschermen met een waterscherm ($6 \text{ m}^3/\text{s}$) aan de Volkerak-Zoommeer zijde en met een 1 m verhoogde drempel aan de Hollandsch Diep zijde
 - Δ -luchtbellenschermen met methode lekkende ebdeuren ($21,8 \text{ m}^3/\text{s}$) en 1 m verhoogde drempels
- De combinatie van Δ -luchtbellenschermen met een 1 m verhoogde drempels resulteert niet in voldoende zoutlekbepanking.

Tabel 4.3 Zoutlek (in kg/s) door de Volkeraksluizen bij toepassing van verschillende zoutlekbeperkende middelen. Groene arcering geeft aan dat aan de randvoorwaarde voor zoutlek (≤ 60 kg/s) of waterverbruik (≤ 25 m³/s) wordt voldaan. Rode arcering geeft aan dat niet wordt voldaan.

ID	Zoutlekbeperkende middelen	Zoutlek (kg/s)	Instelling zoutlekbeperkende middelen				Verhoogde Drempel (m)
			Waterverbruik (m ³ /s)				
			nivelleren	waterscherm	lekkende ebdeuren	totaal	
0	Onbeschermd kolk	480	3.2	0	0	3.2	0
1	Δ -luchtbellenschermen	98	3.2	0	0	3.2	0
2	Δ -luchtbellenschermen en verhoogde drempels	65	3.2	0	0	3.2	1
3	Δ -luchtbellenschermen en waterscherm aan Volkerak-Zoommeer zijde	59	3.2	6	0	9.2	0
4	Δ -luchtbellenschermen en waterschermen aan Volkerak-Zoommeer en Hollandsch Diep zijde	53	3.2	12	0	15.2	0
5	Δ -luchtbellenschermen en methode lekkende ebdeuren	53	3.2	0	21.8	25	0
6	Δ -luchtbellenschermen, waterscherm aan Volkerak-Zoommeer zijde en verhoogde drempel aan Hollandsch Diep zijde	54	3.2	6	0	9.2	1
7	Δ -luchtbellenschermen en methode lekkende ebdeuren en verhoogde drempels	28	3.2	0	21.8	25	1

NB: Δ -luchtbellenschermen en verhoogde drempels aan zowel Volkerak-Zoommeer zijde als Hollandsch Diep zijde, tenzij anders aangegeven

4.3 Onderzoek speelruimte

4.3.1 Minder waterverbruik of aangepaste drempelhoogte

In de vorige paragraaf is gebleken dat er combinaties van zoutlekbeperkende middelen zijn die minder dan 60 kg/s kunnen bereiken. Twee combinaties gebruiken water uit het Hollandsch Diep volgens de lekkende ebdeuren methode. Voor het bereiken van 'precies' 60 kg/s zou met minder zoetwater volstaan kunnen worden. Voor de twee combinaties is onderzocht met welke instelling van waterverbruik de randvoorwaarde van 60 kg/s bereikt wordt (Tabel 4.4). Zonder verhoogde drempels zou zo circa 6 m³/s minder water gebruikt kunnen worden. Met verhoogde drempels bedraagt de mogelijke vermindering zelfs circa 20 m³/s.

Voor de combinatie van Δ -luchtbellenschermen en verhoogde drempels blijkt een verhoging van 1 m niet voldoende. Onderzocht is welke drempelhoogte ingesteld zou moeten worden om wel aan de randvoorwaarde van 60 kg/s of minder zoutlek te voldoen (Tabel 4.4). De drempel zou nog 0,5 m extra verhoogd moeten worden tot in totaal 1,5 m om voldoende zoutlekbeperving te bereiken.

Tenslotte is gekeken welke drempelverhoging nodig is voor de combinatie van Δ -luchtbellenschermen en een waterscherm aan de Volkerak-Zoommeer zijde. Hier blijkt uiteindelijk helemaal geen drempelverhoging nodig, omdat deze variant zonder drempelverhoging overeenkomt met ID 3 in Tabel 4.3. De combinatie Δ -luchtbellenschermen met een waterscherm aan de Volkerak-Zoommeer zijde zonder drempelverhoging bereikt 59 kg/s zoutlek (Tabel 4.3).

Tabel 4.4 Combinaties van zoutlekbeperkende middelen waarbij de zoutlek 60 kg/s is. Arcering als in Tabel 4.3. De blauw omrande waarde is de 'regelknop' waarmee de 60 kg/s zoutlek ingesteld is.

ID	Zoutlekbeperkende middelen	Zoutlek (kg/s)	Instelling zoutlekbeperkende middelen				
			Waterverbruik (m ³ /s)				Verhoogde Drempel (m)
			nivelleren	waterscherm	lekkende ebdeuren	totaal	
2	Δ-luchtbellenschermen en verhoogde drempels	60	3.2	0	0	3.2	1.5
5	Δ-luchtbellenschermen en methode lekkende ebdeuren	60	3.2	0	15.8	19	0
6	Δ-luchtbellenschermen, waterscherm aan Volkerak-Zoommeer zijde en verhoogde drempel aan Hollandsch Diep zijde	59	3.2	6	0	9.2	0
7	Δ-luchtbellenschermen en methode lekkende ebdeuren en verhoogde drempels	60	3.2	0	1.6	4.8	1

NB: Δ-luchtbellenschermen en verhoogde drempels aan zowel Volkerak-Zoommeer zijde als Hollandsch Diep zijde, tenzij anders aangegeven

4.3.2 Minimalisatie zoutlek

Minimale zoutlek kan bereikt worden door maximaal waterverbruik en maximale drempelhoogte. Voor het waterverbruik is de randvoorwaarde bekend: 25 m³/s in totaal waarvan – rekening houdend met gebruik voor nivellering – 21,8 m³/s beschikbaar is voor zoutlekbepanking.

Voor de maximaal toelaatbare drempelhoogte is geen harde randvoorwaarde bekend. Wel kan gezegd worden dat ten behoeve van de scheepvaart verhoging van de drempelhoogte zoveel mogelijk beperkt zou moeten worden. Een beweegbare drempel zou de zoutlek beperken zonder de scheepvaart te hinderen. In deze ontwerpstudie gericht op zoutlekbepanking, wordt uitgegaan van een beweegbare drempel, waardoor geen bovengrens voor de drempelhoogte wordt gehanteerd. Deze zal in een ander kader moeten worden vastgesteld. Ter illustratie wordt een maximale drempelverhoging van 2,5 m gehanteerd.

Tabel 4.5 toont de minimale zoutlek die per combinatie van zoutlekbeperkende middelen bereikt kan worden. Ten eerste wordt weer aangetoond dat er meerdere combinaties mogelijk zijn. Daarnaast laat Tabel 4.5 zien dat de zoutlek aanzienlijk verder beperkt kan worden.

Tabel 4.5 Minimale zoutlek door zoetwaterverbruik of drempelverhoging. Arcering als in Tabel 4.3. De blauw omrande waarde is de 'regelknop' waarmee de minimale zoutlek ingesteld wordt.

ID	Zoutlekbeperkende middelen	Zoutlek (kg/s)	Instelling zoutlekbeperkende middelen				
			Waterverbruik (m ³ /s)				Verhoogde Drempel (m)
			nivelleren	waterscherm	lekkende ebdeuren	totaal	
2	Δ-luchtbellenschermen en verhoogde drempels	47	3.2	0	0	3.2	2.5
5	Δ-luchtbellenschermen en methode lekkende ebdeuren	52	3.2	0	21.8	25	0
6	Δ-luchtbellenschermen, waterscherm aan Volkerak-Zoommeer zijde en verhoogde drempel aan Hollandsch Diep zijde	46	3.2	6	0	9.2	2.5
7	Δ-luchtbellenschermen en methode lekkende ebdeuren en verhoogde drempels	28	3.2	0	21.8	25	1
		19	3.2	0	21.8	25	2.5

NB: Δ-luchtbellenschermen en verhoogde drempels aan zowel Volkerak-Zoommeer zijde als Hollandsch Diep zijde, tenzij anders aangegeven

4.3.3 Gevoeligheid voor doorlaatfractie

Voor de combinaties van zoutlekbeperkende middelen die in de basisinstelling voldoen, is onderzocht hoe robuust de combinaties zijn. De gehanteerde doorlaatfractie is gebaseerd op goede metingen uit de praktijkproef, maar het aantal metingen is beperkt en de vertaling van Stevinsluis naar Volkeraksluizen introduceert onzekerheid. Er is daarom ook gerekend met een extra veiligheidsmarge. De doorlaatfractie is met 0,05 (5%) verhoogd ten opzichte van de realistisch geachte waarden in Tabel 4.2.

Tabel 4.6 geeft het overzicht van hoe deze extra veiligheidsmarge doorwerkt in de zoutlek. Tevens wordt getoond hoe de instelling van de zoutlekbeperkende middelen zou moeten zijn om de zoutlek ook met deze extra veiligheidsmarge tot 60 kg/s of minder te beperken.

Inclusief de extra veiligheidsmarge neemt het aantal succesvolle combinaties van zoutlekbeperkende middelen af. Alleen de combinatie van Δ -luchtbellenschermen met lekkende ebdeuren en een 1 m verhoogde drempel voldoet aan de 60 kg/s zoutlek randvoorwaarde en aan de 25 m³/s zoetwatergebruik randvoorwaarde.

Tabel 4.6 Gevoeligheid van de zoutlek voor de doorlaatfractie. Bovenop de realistisch geachte doorlaatfractie is gerekend met een 0,05 hogere fractie. Arcering zoals in Tabel 4.3. Waar mogelijk is met blauw omrande waarde de instelling voor toegestane zoutlek weergegeven, ofwel voor de realistische schatting ofwel inclusief de extra veiligheidsmarge.

ID	Zoutlekbeperkende middelen	Zoutlek realistische schatting (kg/s)	Zoutlek inclusief extra veiligheidsmarge (kg/s)	Instelling zoutlekbeperkende middelen				Verhoogde Drempel (m)
				Waterverbruik (m3/s)				
				nivelleren	waterscherm	lekkende ebdeuren	totaal	
3	Δ -luchtbellenschermen en waterscherm aan Volkerak-Zoommeer zijde	59	81	3.2	6	0	9.2	0
4	Δ -luchtbellenschermen en waterschermen aan Volkerak-Zoommeer en Hollandsch Diep zijde	53	64	3.2	12	0	15.2	0
5	Δ -luchtbellenschermen en methode lekkende ebdeuren	53	71	3.2	0	21.8	25	0
		60	80	3.2	0	15.8	19	0
		45	60	3.2	0	29.8	33	0
6	Δ -luchtbellenschermen, waterscherm aan Volkerak-Zoommeer zijde en verhoogde drempel aan Hollandsch Diep zijde	54	73	3.2	6	0	9.2	1
		59	81	3.2	6	0	9.2	0
		45	60	3.2	6	0	9.2	2.6
7	Δ -luchtbellenschermen en methode lekkende ebdeuren en verhoogde drempels	28	42	3.2	0	21.8	25	1
		60	75	3.2	0	1.6	4.8	1
		45	60	3.2	0	9.3	12.5	1

NB: Δ -luchtbellenschermen en verhoogde drempels aan zowel Volkerak-Zoommeer zijde als Hollandsch Diep zijde, tenzij anders aangegeven

4.3.4 Gevoeligheid voor zoutverschil en deuropentijd

Alle voorgaande berekeningen zijn uitgevoerd op basis van de standaardinstellingen en de standaard omgevingscondities. Voor het Δ -luchtbellenscherm is onderzocht wat het effect van een langere deuropentijd en van een hoger of lager zoutverschil is op de zoutlek (Tabel 4.7). Voor andere combinaties van zoutlekbeperkende middelen is dit onderzoek niet herhaald, maar los van de precieze zoutlek zal de trend hetzelfde zijn.

Zonder op de exacte getallen in te gaan kan uit Tabel 4.7 geconcludeerd worden dat de zoutlek zeer gevoelig is voor het zoutverschil en voor de deuropentijd. Beide zullen in het operationeel sluisbeheer expliciete aandacht vragen om de effectiviteit van de zoutlekbeperkende middelen optimaal te laten zijn.

Tabel 4.7 Gevoeligheid van zoutlek met Δ -luchtbellenschermen voor zoutverschil en deuropentijd. De blauw omrande waarden geven de afwijkingen van de standaard aan.

ID	Δ -luchtbellenschermen	Zoutlek (kg/s)	Zoutverschil (ppt)	Deuropentijd (min)
1	Referentie	98	20	25
	Gevoeligheid voor zoutverschil	62	15	25
		142	25	25
		60	14	25
	Gevoeligheid voor deuropentijd	125	20	30
		180	20	40

4.4 Samenvattende conclusie

- I. Het is mogelijk om de zoutlek te beperken tot maximaal 60 kg/s.
- II. De beperking tot maximaal 60 kg/s vraagt om een combinatie van zoutlekbeperkende middelen, omdat geen van de afzonderlijke middelen op zichzelf voldoende zoutlekbeperving oplevert.
- III. Er zijn meerdere combinaties van zoutlekbeperkende middelen mogelijk. Dit geeft dus keuzevrijheid voor implementatie in de Volkeraksluizen. Het Δ -luchtbellenscherm op alle kolkeinden in de Volkeraksluizen is echter een onderdeel van alle varianten.
- IV. Een veelbelovende combinatie van zoutlekbeperkende middelen bestaat uit Δ -luchtbellenschermen aan alle kolkeinden, een verhoogde drempel aan Hollandsch Diep zijde en het toepassen van de methode van 'lekkende ebdeuren'.
- V. Met een combinatie van innovatieve luchtbellenschermen, een drempel en 'lekkende ebdeuren' waarbij maximaal gebruik van water uit het Hollandsch Diep wordt gemaakt, is het mogelijk om de zoutlek te beperken tot circa 30 kg/s.
- VI. Verdere beperking van de zoutlek is waarschijnlijk mogelijk met de bouw van een zoutvang in de voorhaven van de Volkeraksluizen aan de Hollandsch Diep zijde. Deze maatregel is niet onderdeel geweest van de praktijkproef en zou verder onderzocht moeten worden. Implementatie van deze maatregel is ook veel ingrijpender dan die van de andere voorgestelde maatregelen, en kan het best gekoppeld worden aan de (eventuele) bouw van een vierde kolk (vanwege de aanleg van watertunnels die de zoutvang met het Volkerak-Zoommeer moeten verbinden).

Niet alle criteria en hun weging die leiden tot de optimale keuze van zoutlekbeperkende middelen, zijn bekend. Hinder voor scheepvaart weegt zwaar en vervolgens de eenmalige kosten en de kosten voor onderhoud en energie van de maatregelen. Deze afweging zal later gemaakt moeten worden.

De uitspraak over de mogelijkheid om de zoutlek tot maximaal 60 kg/s te beperken, wordt zeker geacht. De doorlaatfractie van zoutlekbeperkende middelen is bepaald op meerdere manieren, waarbij vooral de praktijkproef op ware schaal in de Stevinsluis veel informatie heeft geleverd. Zelfs met een extra veiligheidsmarge – en dus minder efficiënte zoutlekbeperkende middelen – is het mogelijk de zoutlek tot minder dan 60 kg/s te beperken.

Desalniettemin is er een aantal overschattingen en onderschattingen in de berekening van de zoutlek. Hoewel de invloed van scheepvaart niet gekwantificeerd kon worden in de praktijkproef en dus wellicht beperkt zal zijn, is in de berekening de volledige statische

waterverplaatsing meegenomen. Dit kan tot een overschatting van circa 5% leiden. Tevens is uitgegaan van maximaal, 24-uurs gebruik van de drie kolken voor de beroepsvaart en van de jachtensluis. Minder aanbod van scheepvaart en dus minder schuttingen op een dag zullen een lagere zoutlek tot gevolg hebben. Tenslotte is niet meegenomen dat het zoutgehalte in het Volkerak-Zoommeer lager kan zijn dan 20 ppt als het maximale debiet uit het Hollandsch Diep wordt ingezet.

Pas tijdens de afronding van het onderzoek werd duidelijk dat de aanwezige drempelhoogte in de Volkeraksluizen 6,25 m was in plaats van de eerder opgegeven 6,5 m (zie ook Tabel 2.1). De informatie kon niet meer verwerkt worden in de berekeningen voor de zoutlek door de Volkeraksluizen. De berekende zoutlek is daarmee een kleine overschatting (circa 5%), hetgeen binnen de te verwachten nauwkeurigheid als een relatief klein verschil wordt gezien. Bovendien is de berekening een overschatting en geen onderschatting.

Mogelijkheden tot onderschatting van de berekende zoutlek zijn er ook. Uitgegaan is van een gemiddeld waterstandsverschil van 0,5 m tussen Hollandsch Diep en Volkerak-Zoommeer. Bij een kleiner waterstandsverschil neemt de zoutlek toe. Equivalent maar tegengesteld aan een mogelijke overschatting kan het zoutgehalte in het Volkerak-Zoommeer hoger kan zijn dan 20 ppt als maar een beperkt of zelfs geen debiet uit het Hollandsch Diep wordt ingezet.

Ondanks mogelijke onder- en overschattingen – die deels tegen elkaar weg kunnen vallen – hebben de berekeningen laten zien dat zoutlekbeperring tot aanzienlijk minder dan 60 kg/s mogelijk is. Dit geeft voldoende marge om met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid te concluderen dat de zoutlek tot maximaal 60 kg/s beperkt kan worden.

5 Overige onderzoeken

Leeswijzer voor dit hoofdstuk

In dit hoofdstuk wordt kort een aantal deelonderzoeken en observaties samengevat die vooral met de werking en de mogelijke effecten van de Δ -luchtbellenschermen te maken hebben:

- Als eerste wordt ingegaan op het effect van de Δ -luchtbellenschermen op de beroeps- en pleziervaart (paragraaf 5.1).
- Paragraaf 5.2 gaat in op de operationele toepassing van de Δ -luchtbellenschermen en andere zoutlekbeperkende middelen en geeft aan welke pragmatische adviezen flexibiliteit bieden in het dagelijks gebruik.
- Na de meting van de zoutlek zijn de Δ -luchtbellenschermen nog acht maanden langer in de Stevinsluis ingezet. Deze duurproef had tot doel te kijken of de nieuwe schermen ook langere tijd zonder onderhoud blijven functioneren (paragraaf 5.3).
- Of de Δ -luchtbellenschermen en andere zoutlekbeperkende middelen positieve of negatieve effecten hebben op de vismigratie door de Volkeraksluizen is samengevat in paragraaf 5.4
- De verspreiding van het zout in het Hollandsch Diep is berekend met een verbeterd 3-dimensionaal model (paragraaf 5.5). De verhoging van de chlorideconcentratie bij waterinnamepunten als gevolg van de zoutlek door de Volkeraksluizen is berekend tijdens lage afvoer van de Rijn en Maas.
- Tenslotte wordt in paragraaf 5.6 de bijdrage en opbrengst van het onderzoek naar zoutlekbeperving in de Volkeraksluizen voor de Nederlandse kenniseconomie en innovatie geschetst.

5.1 Effect Δ -luchtbellenscherm op scheepvaart

In sluizen met een zout-zoetwater overgang kunnen door dichtheidsverschillen over de gehele sluislengte stroomsnelheden optreden van circa 0,3 m/s; aan de bodem tegengesteld aan het wateroppervlak. Vaart men de sluis van zoet naar zout in dan heeft men in het algemeen stroom mee en van zout naar zoet in het algemeen stroom tegen.

Een bellenscherm geeft zeer lokaal nabij het wateroppervlak een stroomsnelheid van circa 0,3 m/s, bij invaart in eerste instantie stroom tegen en na passage van het bellenscherm stroom mee. Is men het sluishoofd gepasseerd dan zijn de stroomsnelheden veroorzaakt door het bellenscherm verwaarloosbaar.



Figuur 5.1 Passage luchtbellenscherm door recreatievaart tijdens de Praktijkproef in de Stevinsluis (boven: traditionele bellenscherm; onder: Innovatieve bellenscherm plus waterscherm). Geconcludeerd is dat het passeren van een bellenscherm geen probleem is voor recreatievaart.

In de sluis wordt het manoeuvreren en afmeren (troskrachten) van schepen alleen bepaald door stroomsnelheden ten gevolge van voornoemde dichtheidsverschillen, het nivelleren van de sluis ($<0,1$ m/s) en scheepsbewegingen (schroefwater en retourstromen van eigen en andere schepen; lokaal $>1,0$ m/s).

Beroepsvaart (grote schepen) heeft geen last van de stroomsnelheden veroorzaakt door het bellenscherm qua manoeuvreren en qua troskrachten, met als uitzondering lege motorschepen in combinatie met een harde wind dwars over de sluis. Dit wordt veroorzaakt door het lagere rendement van de schroef tijdens het passeren van het scherm gedurende 3 tot 6 seconden.

Op basis van de passage van circa 1000 beroepsschepen tijdens de Praktijkproef en gevoerde gesprekken met een aantal schippers is geconcludeerd dat de beroepsvaart geen problemen heeft met het passeren van een bellenscherm en/of waterscherm.

Pleziervaart (kleine schepen) met name die van zoet naar zoutwater varen zullen in de sluis circa $0,3$ m/s stroom mee hebben en kortstondig nabij het bellenscherm circa $0,6$ m/s stroom mee krijgen. Tijdens de praktijkproef is hier voortdurend naar gekeken en zijn gesprekken gevoerd met schippers om hun ervaring met het passeren van het bellenscherm te horen.

Een jacht dat met normale snelheid over het bellenscherm vaart, merkt weinig van de extra waterbeweging veroorzaakt door het bellenscherm. Bij het passeren van een bellenscherm vermindert de werking van schroef en roer door de opstijgende luchtballen. Aansluitend is er

een zone van ongeveer 10 meter met een verhoogde stroomsnelheid. Deze combinatie vereist enige stuurmanskunst om goed doorheen te komen. Afmeren in deze zone (bijvoorbeeld noodzakelijk in verband met een groot aanbod aan schepen) is lastiger dan in de rest van de sluis waar de Δ -luchtbellenschermen geen extra stroming veroorzaken.

Tijdens de metingen zijn enige honderden pleziervaartuigen gepasseerd, waarbij slechts twee schepen problemen met het bellenscherm ondervonden. Geconcludeerd is dat bij het in- en uitvaren schippers kunnen anticiperen/rekening kunnen houden met een werkend bellenscherm (Figuur 5.1).

In een aantal gevallen is door schepen verzocht om het bellenscherm uit te doen. Deze schippers verwachtten dat lucht in aan- of afvoerkanalen van water een probleem zou kunnen zijn.

5.2 Operationeel beheer van de Volkeraksluizen

Indit deelonderzoek worden de zoutlekbeperkende middelen voorzien van pragmatische adviezen voor de operationele toepassing in het sluisbeheer. Uitgegaan wordt van een combinatie van luchtbellenschermen, lekkende ebdeuren, drempels en punctueel sluisbeheer. Waterschermen en een zoutvang worden niet meegenomen omdat vooralsnog gedacht wordt dat aanleg van deze middelen een te grote en kostbare ingreep zal zijn.

Punctueel sluisbeheer vergt een aangescherpte verkeersbegeleiding dat er op gericht is de schutkolken zo kort mogelijk open te laten staan voor uit- en invaren van schepen en anderzijds toch zoveel mogelijk met schepen te vullen om niet onnodig veel schuttingen op een dag te moeten verrichten.

In het algemeen kan de situatie als afhankelijk van de rivierafvoer en van het zoutgehalte in het Volkerak-Zoommeer beschouwd worden om vervolgens afhankelijk daarvan randvoorwaarden voor het schutsluisbeheersregime te kiezen. Een belangrijke keuze is hoe vaak men de instellingen voor water- en luchtdebiet wil aanpassen aan de wijzigende omstandigheden. Bij frequente aanpassing zal er gemeten moeten worden (zoutverticalen) in voorhavens en sluisen, omdat op die informatie gestuurd moet worden.

Vervolgens is belangrijk wie welke acties onderneemt om op de schutsluizen de juiste handelingen te (laten) verrichten. Bij geen of een slechts beperkte variatie in instellingen kan veel zelfstandig op de schutsluizen uitgevoerd worden, maar indien regelmatig wijzigingen moeten worden doorgevoerd wordt de rol van de sluisbeheerder groter. In alle gevallen wordt aanbevolen zoveel mogelijk te automatiseren.

De grote lijn die neergezet wordt is als volgt:

- Zoutlekbeperking wordt gerealiseerd door de inzet van luchtbellenschermen, lekdebieten en (beweegbare) drempels, aangevuld met punctueel sluisbeheer waarin deuren relatief korte tijd open staan en kolken goed met schepen gevuld worden;
- optimalisering is mogelijk op de onderwerpen zouttransport, lekdebiet en energiegebruik, waarbij de inzet van het Zoutlekmodel en meetresultaten van het zoutgehalte in voorhavens en kolken onontbeerlijk zijn;
- automatisering van de inzet van de middelen wordt aanbevolen;
- alhoewel duidelijk is wat de randvoorwaarden zijn (met betrekking tot water- en zouttransport), kunnen er extreem natte of droge situaties zijn waarvoor de inzet van middelen kan worden aangepast om beter gebruik te kunnen maken van die omstandigheden of van de middelen voor die omstandigheden.

5.3 Duurproef Δ -luchtbellenschermen

Het platform met het Δ -luchtbellenscherm aan de Waddenzeezijde is op 1 april 2010 geplaatst (Figuur 5.2), op 18 mei geïnspecteerd en op 19 mei herplaatst. Het Δ -luchtbellenscherm heeft aansluitend tot 13 december 2010 in de sluis gestaan en dienst gedaan als vervanger voor het bestaande Stevinsluis bellenscherm.



Figuur 5.2 Δ -luchtbellenscherm in de Stevinsluis (Waddenzeezijde) tijdens uitnemen op 13 december 2010

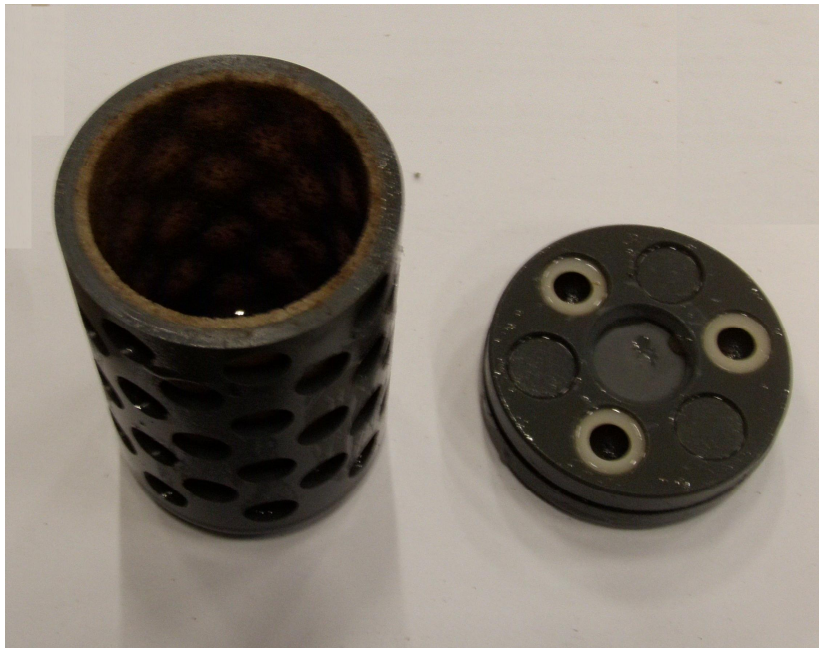
Platform en diffusoren waren uitwendig aangegroeid en het platform was deels bedekt met slib. Beide dwarsliggers van het platform waren bij uitnemen volledig gevuld met slib. Er zijn geen meldingen geweest dat het bellenscherm extra slib in suspensie heeft gebracht. Het platform was mechanisch gezien nog volledig intact. Alle diffusoren waren nog aanwezig en werkten nog naar behoren en produceerden een over de breedte van de sluis gelijkmatig verdeeld bellengordijn.

Het platform is geplaatst na een lange periode van ijs op het IJsselmeer. Ook in de eerste periode van 1,5 maand was de watertemperatuur laag. Over deze periode bestond de aangroei voornamelijk uit zeepokken (Figuur 5.3 links). De zeepokken waren regelmatig verdeeld over alle oppervlakten van het platform en diffusoren, met uitzondering van de buitenste ring waar nauwelijks zeepokken zich hadden gevestigd. Deze 'schone' cirkel is zichtbaar op de foto direct naast de verhoogde buitenrand van de diffusoren.



Figuur 5.3 Detailopname van de diffusoren na 1,5 maand gebruik (links) en aan het eind van de duurproef na 8 maanden gebruik (rechts). Na 1,5 maand bestond de aangroei voornamelijk uit zeepokken. Na 8 maanden hadden zich ook algen en wieren gevestigd.

Uit voorgaand blijkt dat de diffusoren voldoende sterk zijn om de stromingskrachten veroorzaakt door passerende schepen te weerstaan en dat ze een zelfreinigende eigenschap hebben waardoor de gaatjes waaruit de luchtballen ontsnappen voldoende schoon blijven.



Figuur 5.4 Op de foto is links de filterunit en rechts de schijf met 3 luchtdebiet regelaars te zien. Afgezien van enige verkleuring van de filterunit (door waarschijnlijk dode algen) zijn beide onderdelen schoon, hebben ze geen aangroei en werken nog voor de volle 100%.

Door de vele onderdelen waaruit het geheel bestaat zal er altijd enige lekkage optreden en zullen de horizontale liggers vollopen met water, eventuele verontreinigingen in dit lekwater slaan neer in het filter, vandaar de lichte verkleuring (Figuur 5.3). De werking van de filter (tegenhouden van grove delen) is niet afgenomen. Na aanzetten van de compressor zal het water eruit geperst worden en het bellenscherm nagenoeg direct in werking komen. Geconcludeerd kan worden dat afgezien van de lichte verkleuring van de filterunit, er geen inwendig vervuiling is opgetreden van de containers.

Gedurende de 8 maanden van de duurproef heeft het Δ -luchtbellenscherm goed gefunctioneerd en heeft de aangroei van zeepokken, algen en wieren geen invloed gehad op de werking. De juiste werking van het bellenscherm is herkenbaar aan het wateroppervlak en een noodzaak voor onderhoud kan daarmee eenvoudig worden vastgesteld. Met name zeepokken zullen over meerdere jaren onderhoud noodzakelijk maken. Mogelijk dat schutten met lekkende ebdeuren zorgt voor lage zoutgehaltes waardoor, zeker in het voorjaar, mogelijkheden geboden worden om vestiging van zeepokken te beperken en daarmee onderhoud uit te stellen.

5.4 Effect op vismigratie

Er zijn vissoorten die het estuarium gebruiken als doortrekgebied tussen zee en rivier (en ten dele ook als opgroeigebied). Dit zijn de katadrome en anadrome (verzamelterm: diadrome) soorten, afhankelijk of de voortplanting plaatsvindt op zee in zout water of op de rivier in zoet water. Vanwege de Benelux-beschikking (M(2009)1) en KRW-doelstellingen (2015) heeft Nederland een verplichting om trekroutes en onbelemmerde migratie van diadrome vissen in stand te houden. Door middel van een beknopte literatuurinventarisatie is daarom onderzocht of de zoutscheiding bij de Volkeraksluizen een (nieuwe) belemmering zou kunnen opwerpen voor de migratie van diadrome vissoorten (Ziltwater Advies, 2010).

Als eerste is daarvoor gekeken naar het belang van de Volkeraksluizen voor de migratieroute van diadrome vissoorten, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen stroomafwaarts (Hollandsch Diep → Volkerak-Zoommeer) en stroomopwaarts (Volkerak-Zoommeer → Hollandsch Diep):

- Diadrome vissoorten die het Volkerak-Zoommeer als transit gebruiken (zalm, zeeforel, zeeperik, rivierperik, elft)
 - *Stroomafwaarts: Volkeraksluizen zeer gering belang*
Stroomafwaarts migrerende vis kan vrij uittrekken via Haringvliet of Nieuwe Waterweg. Vanwege het geringe debiet van de Volkeraksluizen ten opzichte van de afvoeren via Haringvliet en Nieuwe Waterweg zal hooguit een uiterst kleine fractie van de diverse populaties in het Volkerak-Zoommeer terechtkomen. Wanneer dit eventueel minder goed mogelijk wordt door een bellenscherm dan is dit geen enkel probleem.
 - *Stroomopwaarts: Volkeraksluizen gering belang*
Het kan hierbij gaan om vis die in de Westerschelde niet verder stroomopwaarts migreert, maar de 'verkeerde' afslag neemt bij Bath. De kans hierop wordt met een zouter Zoommeer kleiner dan in de huidige situatie omdat de zoete lokstroom wegvalt. Iets dergelijks geldt voor diadrome vis die via het doorlaatmiddel Philipsdam of de Bergsediepsluis optrekt vanuit de Oosterschelde, die als trekroute voor diadrome vis nu al een zeer geringe rol speelt. De enkele diadrome vis die in het Volkerak-Zoommeer terecht komt is gebaat bij intrek naar het Hollandsch Diep, maar op populatieniveau zal dit een uiterst klein aandeel zijn. Als het Kierbesluit voor de Haringvlietssluisen vervalt, zou de route via Scheldes en Volkerak-Zoommeer in theorie een alternatief (geen vervanging!) voor de vis kunnen vormen.
- Diadrome vissoorten die het Volkerak-Zoommeer als 'transit' en als opgroeigebied gebruiken (paling, driedoornige stekelbaars, spiering, houting, steur)
 - *Stroomafwaarts: Volkeraksluizen wellicht enig belang*
Het is minder logisch dat deze soorten, die vanuit zee komend eerst in het zoete Hollands Diep belanden, in tweede instantie alsnog het zoutere Volkerak zullen verkiezen. Toch zou dit voor driedoornige stekelbaars, spiering, houting en paling een route kunnen zijn om het Volkerak te 'koloniseren'. Of het een veelgebruikte trekroute voor deze diadrome soorten gaat worden is maar zeer de vraag.
 - *Stroomopwaarts: Volkeraksluizen wellicht enig belang*
vooral bij toename van de zoete lokstroom vanuit het Hollandsch Diep. Het voorkomen van driedoornige stekelbaars, spiering en paling in het Volkerak-Zoommeer zal vooral afhangen van de intrekbaarheid vanuit Oosterschelde en Westerschelde (al zal dit bij wegvallen van de zoete lokstroom een minder aantrekkelijke route worden). Voor deze soorten (met uitzondering van houting en steur) is ook de optrek naar de Brabantse beken relevant.

Daarna is gekeken of luchtbellenschermen, waterschermen, drempels en lekkende ebdeuren een belemmering kunnen vormen voor passage van een schutsluis. Op basis van de beknopte literatuurinventarisatie worden door Ziltwater Advies de volgende conclusies getrokken ten aanzien van het effect van zoutlekbeperkende middelen op vismigratie door de Volkeraksluizen:

- Bellenschermen leiden mogelijk tot een hooguit geringe beperking van de vismigratie
- Lekkende ebdeuren versterken een zoete lokstroom en hebben een positief effect op vismigratie
- Bodemdrempels hebben, enigzins afhankelijk van de uitvoering, waarschijnlijk geen effect op vismigratie

- Voor het effect van waterjets zijn geen literatuurverwijzingen gevonden
- Het passeren van de Volkeraksluizen is niet de zwakste schakel voor de vismigratie in de Rijn-Maasmonding. Een eventueel gering effect van zoutlekbepurende middelen in de Volkeraksluizen zal daarom weinig invloed hebben op de migratie van diadrome vissoorten in de Zuidwestelijke Delta.

5.5 Verspreiding zout in Hollandsch Diep: Innamepunten

Deze deelstudie is uitgevoerd om de verspreiding van het gelekte zout in het Hollandsch Diep en Haringvliet in beeld te brengen. De (verhoging van de) chlorideconcentratie bij waterinnamepunten is van belang (zie Figuur 1.1). Tijdens een periode van lage afvoer van Rijn en Maas wanneer de Haringvlietssluisen langdurig dicht staan, wordt de chlorideconcentratie het meest beïnvloed door de zoutlek.

Eerst zijn berekeningen uitgevoerd met het 3-dimensionale Zeedeltamodel van Rijkswaterstaat. Metingen uit 1986 lijken echter aan te geven dat het Zeedeltamodel vooral in het Haringvliet te veel verticale menging berekent, waardoor de berekende verhoging van de chlorideconcentratie hoger dan zou zijn dan in werkelijkheid. Daarom is ook een detailmodel van het Haringvliet/Hollandsch Diep en het Spui opgezet¹⁰. Uit de met dit detailmodel uitgevoerde berekeningen voor droge perioden wordt geconcludeerd dat de resultaten beter overeenkomen, kwalitatief althans, met het beeld dat ontstaat uit de metingen van 1986. De grootste verschillen met de eerder uitgevoerde Zeedeltaberekening treden op in de diepe doorgaande geul noordelijk van Tiengemeten (het Vuile Gat). Waar in de Zeedeltaberekeningen deze geul volledig gemengd is, laat de vaste lagen berekening een sterke stratificatie zien.

Tabel 5.1 vat de berekende verhoging van de chlorideconcentratie op een drietal belangrijke waterinnamepunten samen.

Tabel 5.1 Berekende maximale verhoging van de chlorideconcentratie bij drie waterinnamepunten in het Haringvliet en het Spui

	Zoutlek 60 kg/s		Zoutlek 40 kg/s	
	Droge periode #	Gemiddelde periode #	Droge periode	Gemiddelde periode
Hitsertse Kade Haringvliet, noordelijk van Tiengemeten	+130 mg Cl/l	+100 mg Cl/l	+90 mg Cl/l	+70 mg Cl/l
Koert Haringvliet, tegenover monding Spui bij Middelharnis	+160 mg Cl/l	+75 mg Cl/l	+110 mg Cl/l	+70 mg Cl/l
Bernisse Spui	+150 mg Cl/l	+75 mg Cl/l	+100 mg Cl/l	+50 mg Cl/l

De gehanteerde droge periode loopt van 1 juli tot 1 oktober 2003, tijdens welke er 3 maanden geen afvoer was via de Haringvlietssluisen. De gemiddelde periode is het gemiddelde van de jaren 1988-1990.

10. Het belangrijkste verschil tussen het Zeedeltamodel en het detailmodel is de wijze waarop de verticale laagverdeling is afgehandeld. Het Zeedeltamodel heeft een zogenaamde sigma-lagen-verdeling, waarbij ongeacht de waterdiepte op iedere locatie hetzelfde aantal lagen voorkomt. De laagdikte varieert dus met de diepte. In het detailmodel is de vaste lagen verdeling gehanteerd, waarbij de laagdikte vastligt. Het aantal verticale lagen is dan afhankelijk van de plaatselijke waterdiepte. Vaste lagen zijn in principe beter geschikt voor de semi-stagnante condities die bij lage rivierafvoer in het Hollandsch Diep en Haringvliet voorkomen.

Rijkswaterstaat zal de berekende verhoging van de chlorideconcentratie gebruiken om uitspraken te doen over de gevolgen voor waterinname, zoals de frequentie waarmee de streefwaarde overschreden zal worden. Een dergelijke beschouwing viel buiten de opdracht aan Deltares.

5.6 Bijdrage aan kenniseconomie en aan innovatie

Zoutlekbepanking door sluizen is op zich geen nieuwe wetenschap. Al in de jaren '60 van de vorige eeuw werd vergaande kennis opgebouwd. Omdat de laatste tientallen jaren geen nieuwe sluizen met zoutlekbepanking in Nederland zijn aangelegd, dreigde de kennis verloren te gaan. In het kader van deze ontwerpstudie en praktijkproef zijn zo veel mogelijk historische metingen en rapporten weer verzameld, zodat de toegankelijkheid voor de komende (tientallen?) jaren verbeterd is.

De uitvoering van de praktijkproef was uniek en vernieuwend. Voor zover bekend is voor het eerst gedurende lange tijd in een operationele sluis de zoutlek gemeten. Naast de toepassing in deze studie is er een uitgebreide dataset beschikbaar voor de wetenschappelijke wereld en voor de adviesbureaus. De dataset kan onder andere gebruikt worden om modellen te valideren. De toepasbaarheid en met name de betrouwbaarheid van modellen kan daardoor enorm toenemen. Ook de dataset van de laboratoriumproeven is beschikbaar. Deze is minder uniek – labproeven zijn vaker gedaan – maar desalniettemin nuttig, omdat de omstandigheden in het laboratorium veel gecontroleerder zijn dan in het veld.

Mede op basis van deze datasets zijn er in ieder geval twee modellen die bruikbaar zijn voor zoutlekberekening en een goede voorspellende betrouwbaarheid hebben. Het ontwikkelde Zoutlekmodel (Deltares, 2010a, 2010f) is succesvol toegepast en is vooral door zijn snelheid zeer geschikt om bijvoorbeeld in operationele beheerssystemen toe te passen. Ten tweede heeft deze studie aangetoond dat met CFX betrouwbaar en goed onderzocht kan worden wat de effectiviteit en de onderlinge beïnvloeding van diverse zoutlekbepankende middelen is. Het grote voordeel van CFX ten opzichte van het Zoutlekmodel is dat CFX de effectiviteit op basis van de onderliggende fysica berekent en daarmee veel meer mogelijkheden biedt. Het Zoutlekmodel lumpst de effectiviteit in een doorlaatfractie en is daardoor minder flexibel als een andere, nog niet bekende combinatie doorgerekend moet worden. CFX kan daarvoor dus ingezet worden.

Op het gebied van zoutlekbepankende maatregelen zijn diverse innovaties in gang gezet. Al snel werd duidelijk dat traditionele luchtbellenschermen op basis van geperforeerde buizen onvoldoende zoutlekbepanking zouden opleveren. De conceptueel ontwikkelde Δ -luchtbellenschermen op basis van slimme luchtventielen die altijd een vast luchtdebiet doorlaten, en een dubbele rij diffusoren ('douchekoppen') hebben bewezen dat de effectiviteit van een luchtbellenscherm aanzienlijk verhoogd kan worden. Een bestaande techniek is daarmee verbeterd. De techniek kan nu toegepast op sluizen, waarvoor de effectiviteit voorheen onvoldoende was.

De combinatie met een waterscherm is nieuw. Aangetoond is dat met de combinatie Δ -luchtbellenscherm en waterscherm een hoge effectiviteit bereikt kan worden. Indien energieverbruik niet onoverkomelijk is – bijvoorbeeld als gebruik gemaakt kan worden van vrij verval – is het arsenaal aan zoutlekbepankende middelen daardoor vergroot.

Tijdens dit onderzoek is tevens duidelijk geworden dat het sluisbeheer om meer draait dan scheepvaart. Naast de kerntaak van efficiënte afhandeling van de scheepvaart moet bij de Volkeraksluizen ook gelet worden op de zoutlek, op het waterverbruik en op het energieverbruik. Zelfs voor de passage van vissen zou aandacht moeten zijn. Er is een aanzet gegeven tot een operationeel beheersysteem voor de sluis, waarmee afhankelijk van de omstandigheden het optimum ingesteld kan worden. In droge periodes zou bijvoorbeeld de zoutlek leidend kunnen zijn. In periodes met hoge rivierafvoer, die wellicht een grotere zoutlek zouden kunnen verdragen, zou het energieverbruik geminimaliseerd kunnen worden.

Tenslotte is het vermeldenswaardig dat de Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen meerdere wetenschappelijke publicaties gaat opleveren. Deze zijn in voorbereiding.

6 Referenties

6.1 Rapporten deze studie

- Deltares, 2010a: Voorstudie: Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperking Volkeraksluizen, Model voor Zoutvrachtberekeningen, auteur R.E. Uittenbogaard, rapport 1201226-011.
- Deltares, 2010b: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen: Deeltaak 1: Numerieke simulatie van uitwisselingsstromingen en van uitwisselingsstromingen en van uitwisselingsbeperkende maatregelen, auteurs G.H. Keetels en R.E. Uittenbogaard,
- Deltares, 2010c: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen: Deelproject 2: Verkenning effectiviteit zoutlekbeperkende maatregelen op laboratoriumschaal, auteur D.R. Mastbergen
- Deltares, 2010d: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen: Meetplan en Meetprotocol, auteurs N. Villars, J.M. Cornelisse, R.E. Uittenbogaard
- Deltares, 2010e: Beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinluis, auteurs R.E. Uittenbogaard, J.M. Cornelisse
- Deltares, 2010f: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen: Evaluatie maatregelen Volkeraksluizen; auteurs R.E. Uittenbogaard, J.M. Cornelisse, G.H. Keetels, D.R. Mastbergen
- Deltares, 2010g: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen: Implementatie en operationele beheer zoutbeperkende maatregelen Volkeraksluizen; Mogelijke toepassingen andere sluizen; auteurs R. de Jong en R. Roosjens
- Deltares, 2010h: Zoutindringing in de zuidwestelijke delta – Validatie Zeedeltamodel: TO verziltingsonderzoek drie-dimensionale modellen SPA project zoutlekbeperking Volkeraksluizen, auteurs T. van der Kaaij, E.D. de Goede
- Deltares, 2011: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen: Scenarioberekeningen zoutverspreiding zoutlek Volkeraksluizen, auteur Th. Van der Kaaij
- Groeneboom, 2010: Numerical simulation of intrusion of salt water during gate opening of the Stevin lock gates; interne memo aan Deltares; ESI Group Netherlands, 2009-08-048382, april 2010.
- ZiltWater Advies, 2010: Evaluatie Vismigratie Volkeraksluizen, auteur Z. Jager

6.2 Overige referenties

- Abraham, G. & P. v.d. Burgh 1962 Reduction of salt water intrusion through locks by pneumatic barriers. Rijkswaterstaat service for Water Management & Delft Hydraulics, Delft Hydraulics Publication no. 28, Aug.
- Bruyn, J. 1963 Waterschermen ter bestrijding van zoutbezwaar van schutsluizen aan zee; modelonderzoek. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M0799, okt.
- Roelfzema, A. 1977 Zoutbestrijding Volkerak schutsluizen; vooronderzoek. Verslag modelonderzoek. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M1432, januari 1977.
- Shin J.O, Dalziel S.B. and Linden P.F., Gravity currents produced by lock exchange, J. Fluid. Mech. 521, 2004
- Stuurgroep Zuidwestelijke Delta, 2009: Zoet water zuidwestelijke delta, een voorstel voor een regionale zoetwatervoorziening, juni 2009.
- Uittenbogaard, R.E. 2010 Voorstudie: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen; model voor zoutlekberekeningen. Deltares 1201226-11.
- WL | Delft Hydraulics, 2006: Resultaten scenarioberekeningen met het 2D en 3D-blauwalgenmodel voor het Volkerak, Krammer en Zoommeer : planstudie waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer; auteurs P.M.A Boderie, S. Groot, R.P. Hulsbergen, F.J. Los, E.M. Meijers, Rapport Q4015, 76 p., I.o.v. Bestuurlijk Overleg Krammer-Volkerak, 2006 (dec.)