

Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen

Evaluatie maatregelen Volkeraksluizen

dr. ir. R.E. Uittenbogaard
ir. J.M. Cornelisse
dr. ir. G.H. Keetels
ir. D.R. Mastbergen

1201226-006

Titel

Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen
Evaluatie maatregelen Volkeraksluizen

| | | | |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|------------------------|
| Opdrachtgever RWS Waterdienst | Project 1201226-006 | Kenmerk 1201226-006-ZKS-0003 | Pagina's 134 |
| Classificatie vertrouwelijk tot juni 2011 | | | |

Trefwoorden





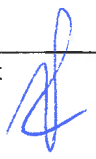
Volkeraksluizen, zoutlek, zoutlekbepervende maatregelen, luchtbellenscherm

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de mogelijkheden om in de toekomst de zoutlek door de Volkeraksluizen naar het Hollandsch Diep te beperken door toepassing van een combinatie van zoutlekbepervende maatregelen. Op basis van proeven en analyses wordt aangetoond dat er diverse mogelijkheden (varianten) zijn om de zoutlek tot 60 kg/s te beperken, in combinatie met maximum 25 m³/s watergebruik (als bovengrens) ook rekening houdend met minimale invloed op de scheepvaart.

De onderbouwing is gebaseerd op laboratoriumproeven, gedetailleerde computerberekeningen en de resultaten van een praktijkproef in de Stevinsluis die is uitgevoerd in de periode april-mei 2010. Deze studies zijn alle onderdeel van het huidige project. Het Zoutlekmodel is gebruikt om de zoutlek te berekenen met verschillende combinaties van luchtbellenschermen, waterschermen, hogere drempels en de methode van lekkende ebdeuren. Ook de effectiviteit van een zoutvang in de Hollandsch Diep voorhaven is berekend.

De combinatie van optimaal werkende, innovatieve luchtbellenschermen mét zowel de methode van lekkende ebdeuren als mét circa 1 m hogere drempels vormt een goede mogelijkheid om de zoutlek onder de 60 kg/s te houden met minder dan 25 m³/s watergebruik. Tevens heeft deze mogelijkheid nog voldoende speelruimte in het watergebruik om de zoutlek verder te beperken.

| Versie | Datum | Auteur | Paraaf | Review | Paraaf | Goedkeuring | Paraaf |
|--------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | dec. 2010 | dr. ir. R.E. Uittenbogaard ir. J.M. Cornelisse dr. ir. G.H. Keetels ir. D.R. Mastbergen |  | ir. R. de Jong |  | ir. T. Schilperoort | |
| 2 | april 2011 | dr. ir. R.E. Uittenbogaard ir. J.M. Cornelisse dr. ir. G.H. Keetels ir. D.R. Mastbergen |  | ir. R. de Jong |  | ir. T. Schilperoort |  |

Status

definitief

Inhoud

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Introductie | 1 |
| 1.1 | Algemeen | 1 |
| 1.2 | Beknopt overzicht van het project | 1 |
| 1.3 | Activiteiten en deeltaken | 4 |
| 1.4 | Overzicht van producten van het project | 5 |
| 1.5 | Dit rapport | 6 |
| 2 | De Volkeraksluizen: toen, nu en in de toekomst | 7 |
| 2.1 | Inleiding | 7 |
| 2.2 | Begrippenkader | 10 |
| 2.3 | Historie en toekomst | 14 |
| 2.3.1 | De historie | 14 |
| 2.3.2 | Toekomst | 17 |
| 2.3.3 | De eerste indruk en een blik vooruit | 18 |
| 3 | Oorzaken van zoutlek en Zoutlekmodel | 21 |
| 3.1 | Inleiding: zout-zoet uitwisseling van een kolk | 21 |
| 3.2 | Invloedsfactoren op de zoutlek | 26 |
| 3.2.1 | Invloed drempels op zoutlek | 26 |
| 3.2.2 | Invloed scheepvaart op zoutlek | 27 |
| 3.3 | Reductie van de zoutlek: zoutlekbepurende middelen | 28 |
| 3.3.1 | Inleiding | 28 |
| 3.3.2 | Luchtbellenschermen en waterschermen | 29 |
| 3.3.3 | Lekkende ebdeuren | 35 |
| 3.4 | De hartslag van een schutsluis: methode van analyse | 36 |
| 3.5 | Het Zoutlekmodel | 40 |
| 3.5.1 | Het nut van het Zoutlekmodel | 40 |
| 3.5.2 | De basis van het Zoutlekmodel | 40 |
| 3.5.3 | Een illustratie van zouttransport door de Volkeraksluizen | 43 |
| 3.6 | Samenvatting en conclusies | 47 |
| 4 | Toetsing van de bouwstenen van het Zoutlekmodel | 49 |
| 4.1 | Inleiding | 49 |
| 4.1.1 | Eenheid van luchtdebiet Nl/s of Nm^3/s | 49 |
| 4.1.2 | Laboratoriumproeven | 50 |
| 4.1.3 | Computersimulaties | 50 |
| 4.1.4 | Praktijkproef Stevinsluis | 51 |
| 4.1.5 | Zoutlekmodel | 51 |
| 4.1.6 | Betrouwbaarheid door een samenhangend beeld | 52 |
| 4.2 | Laboratoriumproeven | 52 |
| 4.3 | Gedetailleerde computerberekeningen | 58 |
| 4.4 | Wat hebben we tot nu toe geleerd? | 64 |
| 4.5 | Praktijkproef in de Stevinsluis | 65 |
| 4.5.1 | Motivatie | 65 |
| 4.5.2 | Opstelling en instrumentatie van de praktijkproef in de Stevinsluis | 71 |
| 4.5.3 | Luchtbellenscherm, waterscherm en extra drempel: de resultaten | 74 |
| 4.5.4 | Optimaal bereik in Froude-lucht getal van luchtbellenschermen | 80 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5.5 | Methode van lekkende ebdeuren in de praktijkproef | 83 |
| 4.5.6 | Scheepvaart tijdens de praktijkproef en zoutlek | 86 |
| 4.6 | Het Zoutlekmodel: wat weten we zeker, wat kunnen we zeker? | 88 |
| 5 | Beperken van toekomstige zoutlek van de Volkeraksluizen | 91 |
| 5.1 | Inleiding | 91 |
| 5.2 | Onderbouwing van de uitspraken | 93 |
| 5.2.1 | Energieverbruik luchtbellenschermen | 111 |
| 5.2.2 | Energieverbruik waterschermen | 112 |
| 5.3 | De robuustheid van de onderzochte methoden. | 117 |
| 5.3.1 | Inleiding | 117 |
| 5.3.2 | Schatten van onzekerheidsmarges | 117 |
| 5.3.3 | Gewenste overcapaciteit en begrenzingen | 119 |
| 5.4 | Stappenplan | 121 |
| 6 | Samenvatting, conclusies en aanbevelingen | 123 |
| 6.1 | Samenvatting | 123 |
| 6.2 | Conclusies | 124 |
| 6.3 | Aanbevolen Stappenplan | 127 |
| 6.4 | Aanbevelingen voor verdere optimalisatie, geringere zoutlek en constructie | 128 |
| 6.5 | Voorbeelden van optimalisatie van zoutlekbeperkende middelen | 129 |
| 7 | Referenties | 133 |

Samenvatting

De hoeveelheid zout die via de Volkeraksluizen doordringt naar het Hollandsch Diep en het Haringvliet is van belang bij de definitieve besluitvorming over het verzouten van het Volkerak-Zoommeer. Daarbij geldt o.a. de eis dat de zoutdoordringing, hierna zoutlek genoemd, daggemiddeld niet meer dan 60 kg/s (5200 ton/dag) zal bedragen. Een tweede eis is dat voor het begrenzen van deze zoutlek ten hoogste 25 m³/s water uit het Hollandsch Diep mag worden gebruikt als een tegenstroom naar het Volkerak-Zoommeer. Hierna noemen we dit gebruik van water uit het Hollandsch Diep het watergebruik.

Gegeven de bovengrens van 25 m³/s watergebruik onderbouwt voorliggende studie diverse mogelijkheden om de zoutlek via de Volkeraksluizen tot 60 kg/s te beperken.

De onderbouwing is gebaseerd op laboratoriumproeven, gedetailleerde computerberekeningen en de praktijkproef in de Stevinsluis, allen onderdeel van het huidige project. Dit alles voorafgegaan en mede gebaseerd op een voorstudie en eerdere studies van het Waterloopkundig Laboratorium.

In de voorstudie is het Zoutlekmodel ontwikkeld voor de schatting van de zoutlek. Dit Zoutlekmodel werd getoetst aan metingen van zoutlek via de Volkeraksluizen vanaf 1969 tot 1979/1980 en nauwkeuriger getoetst aan de veldmetingen tijdens de praktijkproef in de werkende Stevinsluis in de Afsluitdijk nabij Den Oever.

Gegeven de RWS prognose van scheepvaart in 2020 verkenden we met het Zoutlekmodel de mogelijkheden om voor de Volkeraksluizen de zoutlek zover kan worden teruggebracht dat aan de gestelde eisen wordt voldaan. Deze mogelijkheden bleken o.i. reëel.

Naast luchtbellenschermen, waterschermen en hogere drempels onderzochten we ook de klassieke methode van lekkende ebdeuren. Bij deze methode stroomt onder vrij verval water vanuit het Hollandsch Diep door de kolken naar het 0,5 m lager gelegen Volkerak-Zoommeer. Daartoe worden bestaande (rinket-)schuiven in de sluisdeuren op een kleine kierstand geopend. Deze waterstroming noemen we ebdebiet. Het gehanteerde ebdebiet geeft een geringe stroming door de kolken welke de scheepvaart niet zal hinderen.

De krachtige luchtbellenschermen zullen de beroepsvaart niet hinderen maar mogelijk wel de recreatievaart naar gelang de ervaring van de recreanten. De luchtbellenschermen moeten actief worden ingesteld op de heersende zoutgehalten in voorhavens en in elke sluiscolk. Het innovatieve ontwerp van luchtbellenschermen bestaat uit twee versprongen rijen van diffusers en luchtventielen. Dit innovatieve luchtbellenscherm houdt 50% meer zout tegen dan de traditionele luchtbellenschermen gebaseerd op geperforeerde buizen.

De combinatie van aldus optimaal werkende luchtbellenschermen mét de methode van lekkende ebdeuren en mét ca. 1 m hogere drempels vormt o.i. de goede mogelijkheid om de zoutlek onder 60 kg/s te houden met minder dan 25 m³/s watergebruik. Tevens heeft deze mogelijkheid nog voldoende speelruimte in het watergebruik om storingen bij de operationele inzet van zoutlekbeperkende maatregelen te kunnen opvangen.

Nader onderzoek naar de optimale instelling en sturing van de luchtbellenschermen wordt aanbevolen. Luchtbellenschermen laten minder zout door als deze verder beschermd worden door voldoende hoge drempels. We kennen niet de toelaatbare toleranties in hoogte en afstand drempel - luchtbellenschermen voor of achter en mogelijk zelfs boven drempels.

De zoutlek kan verder worden beperkt door het opvangen en terugvoeren van het door de sluisen geleverde brakke water. Het door de sluisen geleverde brakke water kan in een verdiept gedeelte van de voorhaven aan de zijde van het Hollandsch Diep worden opgevangen. Het verdiepte deel van deze voorhaven noemen we zoutvang. De aanleg van een zoutvang is kostbaar. Het brakke kolkwater opgevangen in de zoutvang kan naar de zijde van het Volkerak-Zoommeer van de schutsluisen worden getransporteerd. Hierbij is theoretisch een forse extra reductie van de zoutlek mogelijk. Thans is de werking van en de menging vanuit een zoutvang alleen met laboratoriumproeven onderzocht. We vernamen dat er wel ervaring is met een zoutvang bij de schutsluisen te Terneuzen.

1 Introductie

1.1 Algemeen

De Waterdienst van Rijkswaterstaat heeft op 3 november 2009 opdracht gegeven aan Deltares voor de uitvoering van de Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen (zaaknummer 31030032). Deze studie wordt uitgevoerd onder de voorwaarden van de raamovereenkomst met nummer WD-4924 betreffende “Specialistische adviezen van de Stichting Deltares t.b.v. het Ministerie van Verkeer en Waterstaat”.

Het (Deltares) onderzoek is ondersteund door een begeleidingsgroep welke is samengesteld uit vertegenwoordigers van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 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.

1.2 Beknopt overzicht van het project

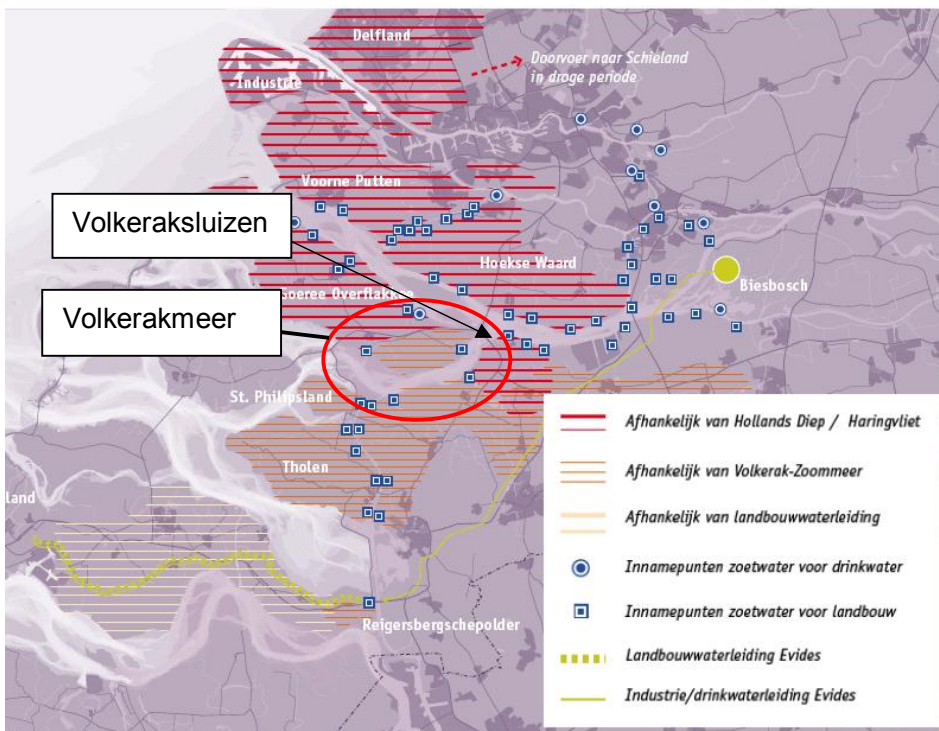
Voor het oplossen van het blauwalgenprobleem in het Volkerak-Zoommeer concludeert de planstudie/MER voor dit gebied dat het zoute alternatief de enige effectieve maatregel is, waarbij dit alternatief tevens de basis legt voor een duurzaam en gezond ecologisch systeem. Het toelaten van zout water uit de Oosterschelde in het Volkerak-Zoommeer sluit aan op het advies van de Commissie Veerman en de beleidsvoornemens zoals opgenomen in het Nationaal Waterplan. Een randvoorwaarde betreft het realiseren van maatregelen voor het behoud of de verbetering van de zoetwatervoorziening rondom het Volkerak-Zoommeer en in het Noordelijk Deltabekken. Uit de planstudie/MER komt naar voren dat voor de gebieden die direct grenzen aan het Volkerak-Zoommeer, goede oplossingen aanwezig zijn voor een duurzame zoetwatervoorziening.

Wanneer het Volkerak zout wordt, vindt tijdens het schutten in de Volkeraksluizen een beweging van zout water plaats vanuit het Volkerak-Zoommeer naar het Hollandsch Diep, waar het zich vervolgens zal verspreiden naar het Haringvliet en Spui (zie Figuur 1.1 en Figuur 1.2). De stroming van zout van het Volkerak-Zoommeer naar het Hollandsch Diep noemen wij in dit rapport: de zoutlek. In het Hollandsch Diep, Haringvliet en Spui bevinden zich meerdere waterinnamepunten voor de drink- en industriewatervoorziening, voor het peilbeheer en voor de watervoorziening ten behoeve van land- en tuinbouw (zie Figuur 1.2).

Verkennd onderzoek heeft aangegeven dat indien de zoutlek beperkt blijft tot 60 kg/s, het chloridegehalte bij waterinnamepunten voldoende laag blijft, zodat ingrijpende mitigerende maatregelen dan niet hoeven te worden uitgevoerd.

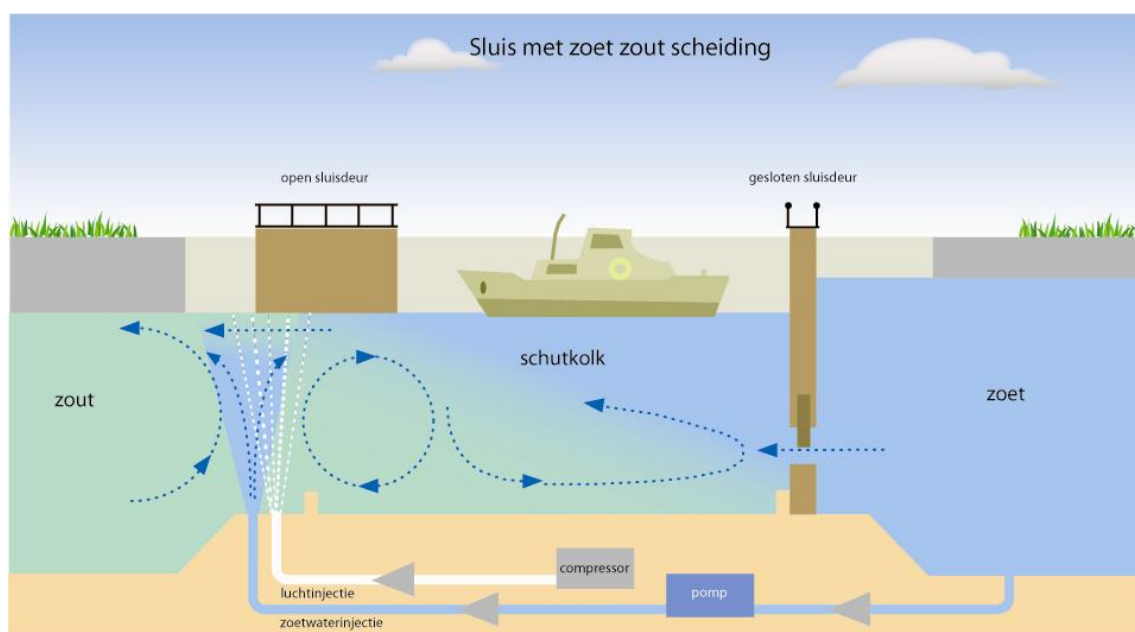


Figuur 1.1 De Volkeraksluizen vormen de verbinding tussen het Volkerak en het Hollandsch Diep. De scheepvaartsluizen bestaan uit 3 beroepsvaartsluizen en 1 jachtensluis. Tussen beide sluizencomplexen bevindt zich een spuisluis (Bron: Google Earth)



Figuur 1.2 Zoetwater innamepunten in en rondom het Volkerak (Bron: Zoet Water Zuidwestelijke Delta, juni 2009)

In de periode 1970-1987 – toen het Volkerak nog in open verbinding stond met de Oosterschelde – werd de zoutlek van de Volkeraksluizen beperkt door diverse maatregelen. Daarbij bleken luchtbellenschermen en het spuien van zoet water door de kolken bij laag water aan Volkerakzijde (lekkende ebdeuren) zeer effectief te zijn. Uit recente studies is gebleken dat nieuwe (innovatieve) methoden beschikbaar zijn voor een efficiënte beperking van de zoutlek zoals middelen voor een betere en dichtere verdeling van lucht in een luchtbellenscherm over de volledige breedte van de sluiskolk en het beperken van de zoutdoordringing door de combinatie van lucht- en (zoet)waterinjectie (Figuur 1.3).



Figuur 1.3 Schematische weergave van zoutlekbeperkende maatregelen in een scheepvaartsluis met zoet-zout scheiding: luchtbellenscherm in combinatie met zoetwaterinjectie en zoetwater instroom via de sluisdeuren. (Bron: Rijkswaterstaat)

Het hoofddoel van dit onderzoek is om te onderbouwen dat met de implementatie van zoutlekbeperkende maatregelen bij de Volkeraksluizen de zoutlek wordt beperkt tot minder dan 60 kg/s, uitgaande van het verwachte scheepsaanbod (vertaald in aantal schuttingen) in 2020. Het onderzoek heeft als kern een serie praktijkproeven, gericht op het bepalen van de effectiviteit van maatregelen die in de Volkeraksluizen kunnen worden geïmplementeerd om de zoutlek te beperken. Daarmee kan het ontwerp daarvan worden gebaseerd op in de praktijk, op een andere locatie, getoetste maatregelen.

Na een verkenning door Rijkswaterstaat en Deltares is de Stevinsluis in de Afsluitdijk bij Den Oever gekozen als locatie voor de praktijkproef. De Stevinsluis is als geschikt aangemerkt vanwege de daar aanwezige zoet-zout overgang, de afmetingen van de sluis en de beschikbare infrastructuur en voorzieningen ter plaatse. In vergelijking met de Volkeraksluizen leidt de combinatie van geringere diepte (4,7 m i.p.v. 7,5 m) bij hetzelfde zoutgehalte in de Stevinsluis tot een ca. 21% geringere voortplantingssnelheid van de zouttong. De overige aan dichtheid gerelateerde effecten en de werking van het luchtbellenscherm kunnen over en weer goed worden vertaald. Verder wordt de Stevinsluis op identieke manier gevuld

als de Volkeraksluizen, namelijk via rinketschuiven laag in de sluisdeuren.

Om de zoutlek en het effect van zoutlekbeperkende maatregelen zo nauwkeurig mogelijk te kunnen bepalen wordt een combinatie van numerieke modellering, laboratoriumproeven en veldmetingen gehanteerd:

1. Numerieke modellering is hierbij onder te verdelen in:
 - a Gedetailleerde modellering van de beperking van uitwisselingsstromingen in een schutsluis door luchtbellenschermen en/of waterschermen (Keetels & Uittenbogaard, 2010);
 - b Berekening van de zoutlek door de Stevinsluis en de Volkeraksluizen met behulp van het zogenaamde Zoutlekmodel (Uittenbogaard, 2010);
 - c Modellering van zoutverspreiding in het Noordelijk Deltabekken (Kaaij & De Goede, 2011);
2. Laboratoriumproeven van de combinatie uitwisselingsstroming, luchtbellenscherm en waterinjectie op kleine schaal (Mastbergen, 2010); en
3. Praktijkproeven in de Stevinsluis (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010).

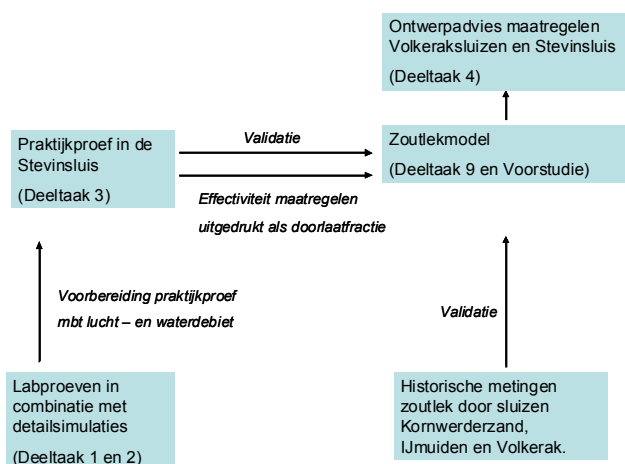
1.3 Activiteiten en deeltaken

Om het onderzoek goed te organiseren en uit te voeren is een aantal activiteiten in de vorm van deeltaken gedefinieerd. Dit betreft:

- 1 Verkenning praktijkproeven Stevinsluis door middel van detailsimulaties met CFX model en SPH model;
- 2 Verkenning maatregelen met behulp van laboratoriumproeven;
- 3 Voorbereiden, uitvoeren en verwerken meetgegevens van de praktijkproeven Stevinsluis;
- 4 Evaluatie en optimalisatie maatregelen met behulp van het Zoutlekmodel voor (a.) Stevinsluis en (b.) Volkeraksluizen inclusief bijbehorende specificaties (effectiviteit, kosten, e.d.);
- 5 Opstellen protocol met richtlijnen voor sluis- en maatregelenbeheer;
- 6 Evaluatie door middel van deskundigenoordeel van de invloed en mogelijkheden van maatregelen ten behoeve van vismigratie (met name intrek);
- 7 Opzet en calibratie/validatie 3D Noordelijk Deltabekken model voor zoutverspreiding inclusief scenarioberekeningen zoutlek;
- 8 Evaluatie mogelijke maatregelen voor andere sluisen;
- 9 Ontwikkeling en oplevering generiek Zoutlekmodel voor vergelijkbare sluisen.

Als voorbereiding van de praktijkproeven in de Stevinsluis zijn twee deeltaken uitgevoerd om vooraf een kwantitatieve schatting te hebben van het effect van een luchtbellenscherm in combinatie met waterinjectie tegen zoutindringing naar de sluiscolk. Deeltaak 1 betreft een serie gedetailleerde computerberekeningen en Deeltaak 2 betreft een laboratoriumstudie op kleine schaal. In beide deeltaken wordt het proces van de zoutuitwisseling in een scheepvaartsluis bij opening van de sluisdeur aan één zijde bij gelijke waterstand in kolk en voorhaven bestudeerd, al dan niet in combinatie met een luchtbellenscherm en/of een zoetwaterinjectie. In deze studies wordt geen aandacht gegeven aan andere fysische processen die van belang zijn in een schutcyclus, zoals nivellering, de door scheepvaart geforceerde waterbeweging en het effect van het openen en sluiten van de deuren tijdens een schutcyclus. Het effect van deze processen wordt wel beschouwd in de praktijkproeven in de Stevinsluis (deeltaak 3). De resultaten van de praktijkproeven worden vervolgens

gebruikt in het Zoutlekmodel (deeltaak 9). In deeltaak 4 wordt het Zoutlekmodel gebruikt om tot optimale zoutlekbeperkende maatregelen voor de Volkeraksluizen te komen en om de daggemiddelde zoutlek bij de Volkeraksluizen te berekenen. Figuur 1.4 geeft deze werkwijze schematisch weer.



Figuur 1.4 Overzicht van deeltaken in de ontwerpstudie en Praktijkproeven Zoutlekbeperving Volkeraksluizen.

1.4 Overzicht van producten van het project

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de producten welke in het kader van het onderzoek zijn of nog zullen worden opgeleverd. Deze producten bestaan uit verslagen, rapporten, gegevensbestanden en een simulatiemodel.

| Product | Deeltaak |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1. Bespreekverslag van startoverleg met de opdrachtgever | |
| 2. Rapport detailsimulaties Stevinsluis inclusief vergelijking labproef | 1 |
| 3. 1 ^e versie Zoutlekmodel | 1 |
| 4. Rapport labproeven | 2 |
| 5. Digitale datasets meetgegevens labproeven | 2 |
| 6. Meetplan en meetprotocol voor het uitvoeren van de praktijkproeven Stevinsluis | 1 & 2 |
| 7a. Verslag tussenresultaten praktijkproeven Stevinsluis | 3 |
| 7b. Rapport beschrijving en resultaten praktijkproeven Stevinsluis | 3 |
| 8. Digitale datasets meetgegevens praktijkproeven | 3 |
| 9. Rapport evaluatie maatregelen Stevinsluis | 4a |
| 10. Rapport evaluatie maatregelen Volkeraksluizen | 4b |
| 11a. Concept Eindrapport | alle |
| 11b. (Definitief) Eindrapport | alle |
| 12. Richtlijnen operationeel beheer Volkeraksluizen | 5 |
| 13. Rapport evaluatie visintrek | 6 |
| 14. Rapport kalibratie 3D zoutmodellering Noordelijk Deltabekken | 7 |

| Product | Deeltaak |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| 15. Rapport scenarioberekeningen zoutverspreiding zoutlek Volkeraksluizen | 7 |
| 16. Rapport mogelijkheden andere sluizen | 8 |
| 17. Model zoutlek sluizen inclusief handleiding | 9 |

1.5 Dit rapport

Het voorliggende presenteert de mogelijkheden om de zoutlek van de Volkeraksluizen te beperken. Als uitgangspunt wordt hierbij verondersteld dat het zoutgehalte van het Volkerak-Zoommeer is toegenomen tot 20 ppt, terwijl de scheepvaartintensiteit is gebaseerd op de prognose voor 2020. We presenteren onze mogelijkheden om te voldoen aan de gestelde bovengrens van 60 kg/s daggemiddelde zoutlek met hooguit 25 m³/s gebruik van water uit het Hollandsch Diep, en met minimale invloed op scheepvaart.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van het verleden, heden en toekomst van de operationele condities van de Volkeraksluizen, voor zo ver relevant voor de toekomstige zoutlek. Dit hoofdstuk geeft diverse belangrijke definities van ons begrippenkader. Wanneer een nieuw begrip of benaming voor het eerst wordt gebruikt wordt deze onderstreept en volgt direct zijn definitie.

Hoofdstuk 3 introduceert kort de processen die leiden tot zoutlek van schutsluizen.

Hoofdstuk 4 biedt een overzicht van het onderzoek in het huidige kader: laboratoriumproeven, gedetailleerde computerberekeningen en de praktijkproef in de Stevinsluis te Den Oever.

Hoofdstuk 5 presenteert een reeks uitspraken die wordt onderbouwd en gebaseerd is op de kennis en gegevens zoals samengevat in Hoofdstuk 4.

Hoofdstuk 6 vat deze uitspraken tot conclusies samen en ordent deze tot een reeks van maatregelen die steeds minder zoutlek leveren tegen vooral meer kosten. Dit hoofdstuk en dit rapport eindigt met twee voorbeelden van verdere optimalisatie van deze maatregelen waarvan de laatste op advies van opdrachtgever.

2 De Volkeraksluizen: toen, nu en in de toekomst

2.1 Inleiding

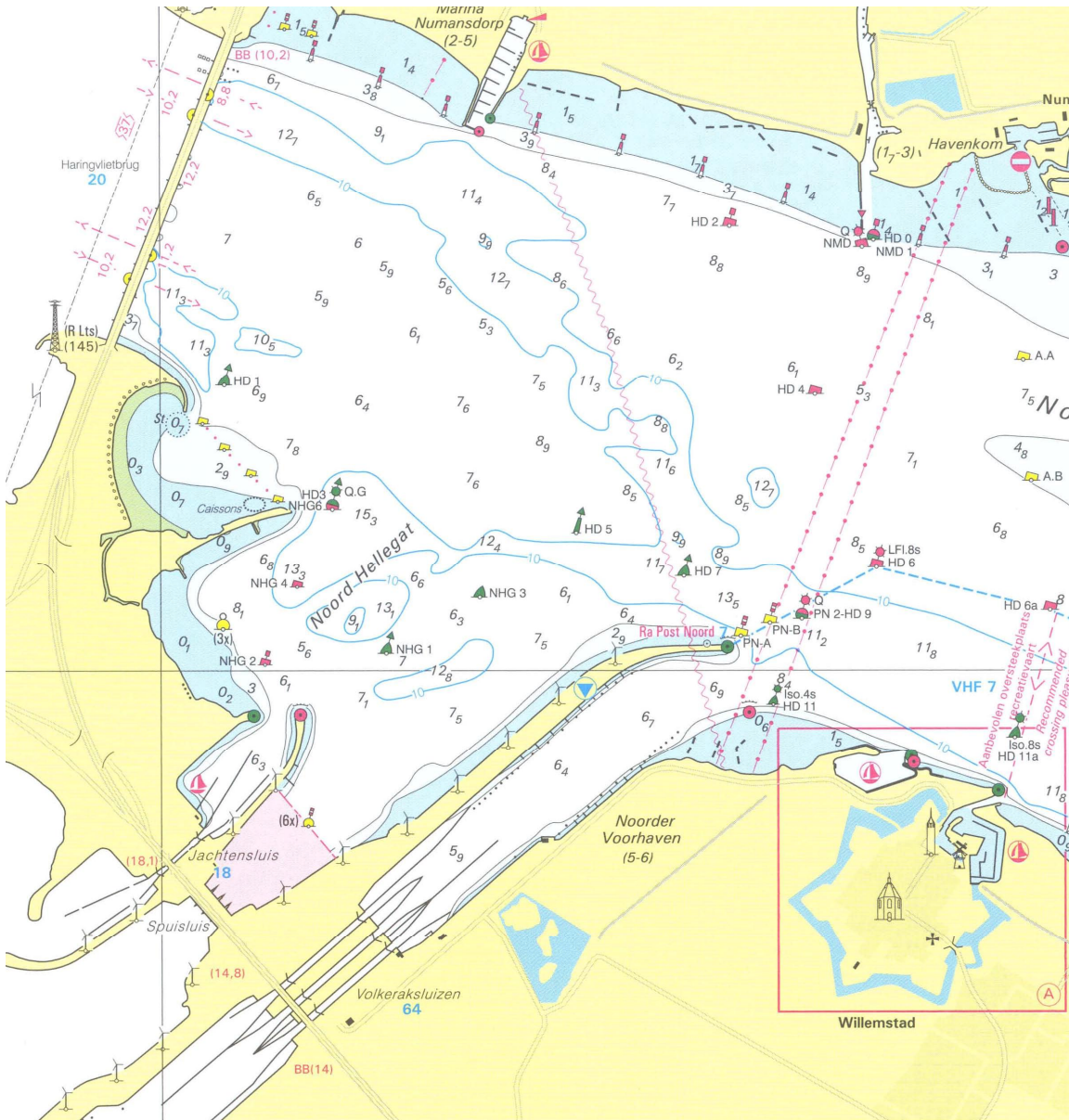
De huidige Volkeraksluizen bestaan uit drie sluizen voor de beroepsvaart en een jachtensluis voor de recreatievaart. Bij stremming in één van de beroepssluisen wordt de jachtensluis ook voor de kleinere beroepsvaart gebruikt.

Elke beroepssluis is 345 m lang, 24 m breed en 7,5 m diep met aan alle kolkeinden drempels op 6,5 m diepte (bij een waterstand op NAP 0 m). De jachtensluis is 154,5 m lang, 16 m breed en 6,75 m diep en heeft drempels op NAP - 6,25 m diepte. Tabel 2.1 vat de meest relevante gegevens van de Volkeraksluizen samen met gegevens uit de prognose van de scheepvaart in 2020 zoals toegelicht in paragraaf 2.3.2. Alleen de meest oostelijke beroepssluis is voorzien van een beweegbare brug. Voor de andere sluizen geldt een hoogtebeperking van ca. 14 m. Tussen de drie beroepssluisen en de jachtensluis ligt de spuisluis.

Tabel 2.1 Relevante gegevens Volkeraksluizen met RWS prognose scheepvaart 2020.

| | |
|--------------------------------------------------------------|------------------------|
| Beroepssluisen | |
| Aantal | 3 |
| Lengte | 345 m |
| Breedte | 24 m |
| Diepte kolkvloer | 7,5 m |
| Diepte drempel | 6,5 m |
| Drempelhoogte | 1 m |
| Volume kolk boven drempel | 53.820 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 |
| | |
| Oppervlak 3 kolken | 24.840 m ² |
| Volume boven drempel 3 kolken | 161.460 m ³ |
| | |
| Jachtensluis | |
| Aantal | 1 |
| Lengte | 154,5 m |
| Breedte | 16 m |
| Diepte kolkvloer | 6,75 m |
| Diepte drempel | 6,25 m |
| Drempelhoogte | 0,5 m |
| Oppervlak kolk | 2.472 m ² |
| Volume kolk boven drempel | 15.450 m ³ |

(*) Volgens RWS prognose scheepvaart 2020, zie Tabel 2.2.

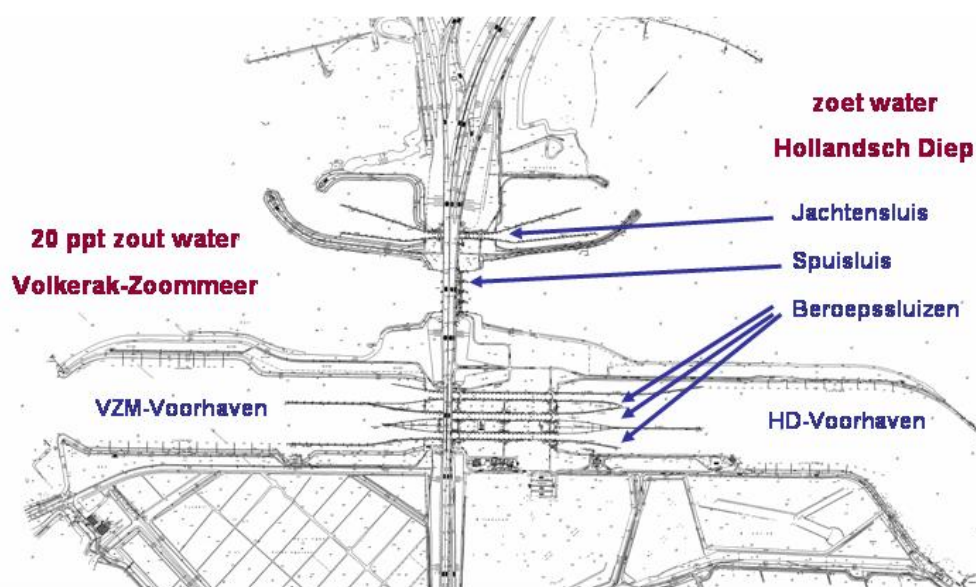


Figuur 2.1 Noordelijke omgeving van de Volkeraksluizen (kaartgegevens per 2010).

Tussen twee beroepssluisen bevindt zich nog een thans lege, diepe en grote kelderruimte waar vroeger de compressoren voor de luchtbellenschermen stonden. Tot ca. 1987-89, toen het Volkerak nog een zout getijdegebied (zg. zee-arm) was, beperkten luchtbellenschermen de zoutlek door de sluisen. In 1987 ontstond het Volkerak-Zoommeer, het getij verdween en het meer werd zoet en vertoonde steeds meer blauw-groene algen. Het voornemen is om deze algenplaag te onderdrukken en de ecologie in het algemeen te verbeteren door het Volkerak-Zoommeer weer voldoende zout te maken. Het oude zoutbezwaar komt hiermee terug met meer scheepvaart en daarmee meer schuttingen dan in het verleden.

Figuur 2.1 en 2.2 bieden een overzicht van de Volkeraksluizen en de verbinding met het Hollandsch Diep.

Figuur 2.1 toont dat op diverse locaties het Hollandsch Diep dieper is dan de drempel van de Volkeraksluizen. In de toekomst kan zout water uit het Volkerak-Zoommeer, zwaarder dan zoet water, via de sluisen naar de diepe locaties in het Hollandsch Diep stromen. Scheepvaart en windgeïnduceerde stroming en menging kunnen dit zoute water uit de diepe locaties verticaal mengen en het zoete water er boven verzilten. Mede onder invloed van wind en het spuiregiem (afvoer via Haringvlietspuisluizen en het Spui) kan het aldus gering verzilte water mogelijk diverse waterinnamepunten langs het Haringvliet en het Hollandsch Diep bereiken.



Figuur 2.2 Het Volkeraksluizencomplex (anno 2010) dat het Volkerak-Zoommeer (VZM) voor scheepvaart verbindt met het Hollandsch Diep (HD) via drie beroepssluisen en één jachtensluis, allen met zg. voorhavens, en daartussen de spuisluis.

In voorliggend rapport beperken we ons tot de zoutlek van de Volkeraksluizen via de monding van de noordelijke voorhavens naar het Hollandsch Diep. We presenteren mogelijkheden deze zoutlek te beperken tot onder daggemiddeld 60 kg/s. In een parallel lopende studie (Kaaij v.d. & De Goede, 2010) wordt onderzocht langs welke route en met welke chlorideconcentraties het zoute water uit de monding van de voorhavens van de Volkeraksluizen zich verspreid over het Hollandsch Diep en het Haringvliet.

2.2 Begrippenkader

In deze paragraaf introduceren we de gehanteerde begrippen en afkortingen en we geven onze definities van belangrijke processen en condities. Gelijktijdig illustreren we het gebruik en het belang van deze begrippen. Voor het leesgemak en terugbladeren onderstrepen we de begrippen waar deze worden gedefinieerd.

Vanaf nu korten we de naamgeving Hollandsch Diep af tot HD en het Volkerak-Zoommeer tot VZM. De voorhavens die in open verbinding zijn met het HD noemen we HD-voorhavens en idem staan de VZM-voorhavens in verbinding met het VZM, zie Figuur 2.2.

Het voornemen is om het VZM tot 20 ppt te verzilten en ppt is de afkorting voor *parts per thousand* zodat 20 ppt ruwweg 20 kg zout per m³ water betekent. Vaak laten we de toevoeging “zout” weg en we spreken kortweg over 20 ppt. Als regel bevat zeewater in de Noordzee 32 ppt zout zodat het VZM niet volledig met zeewater gevuld zal zijn.

Toch zullen we hier voortaan over zout water spreken en we bedoelen dan het VZM-water dat in de toekomst 20 ppt zout zal bevatten.

Door menging met zoet water uit het HD leveren de sluizen water dat veelal nog 6-15 ppt zout bevat, we noemen dit kortweg brak water. Het water in de kolken van de schutsluizen noemen we brak water of kolkwater.

Nog verder opgemengd heeft het water in de HD-voorhaven een laag zoutgehalte van 1-3 ppt en in dit rapport noemen wij dit verzilt water.

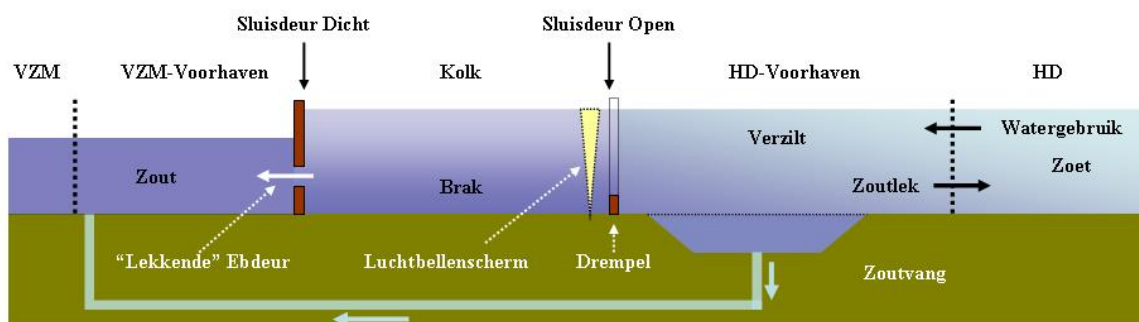
Door de benaming zout, brak en verzilt water willen we het mogelijk maken om als deze globale aanduiding volstaat we het (bereik in) zoutgehalte in ppt niet expliciet hoeven te geven. Met name is het bereik in zoutgehalte in de definitie van brakwater ruim genomen omdat het kolkwater deze variaties in zoutgehalte kan hebben.

Drinkwaterbedrijven en industrie spreken over verzilt water wanneer dit meer dan 150-250 mg chloride per liter bevat. De verschillen tussen deze laatste grenswaarden en de benaming louter voor dit rapport illustreren we als volgt.

Het chloridegehalte bedraagt ca. 55% van het zoutgehalte zodat 10 ppt zout water dus 5.5 kg chloride per m³ water bevat oftewel 5500 mg chloride per liter water.

De methoden en installaties die we voor het verminderen van de zoutlek zullen beschouwen noemen we zoutlekbeperkende middelen. Bij diverse zoutlekbeperkende middelen wordt zoet water uit het HD gebruikt waaraan een bovengrens van 25 m³/s is gesteld. De uitdaging is om met zo weinig mogelijk zoet water de zoutlek van de Volkeraksluizen zo veel mogelijk te beperken.

In dit rapport zijn aan de zoutlek én het verbruik van zoet water uit het HD essentiële beperkingen gesteld zodat we deze begrippen willen afkorten nadat we eerst hun definities als volgt helder maken. Figuur 2.3 illustreert de begrippen die meestal met bepaalde segmenten van de Volkeraksluizen verbonden zijn.



Figuur 2.3 Afkortingen en begrippen rondom beperken van zoutlek vanuit het Volkerak-Zoommeer (VZM) via de Volkeraksluizen naar het Hollandsch Diep (HD). Zie Figuur 2.2 voor een horizontaal overzicht van de kolken en voorhavens. De zoutvang is niet aanwezig.

De daggemiddelde doordringing van zout uit alle Volkeraksluizen noemen we zoutlek. De zoutlek is het daggemiddelde transport van zoutmassa dóór de mondingen van de HD-voorhavens naar het HD. Wij drukken de zoutlek uit in kg zout per seconde (kg/s). De gestelde bovengrens is 60 kg/s oftewel ca. 5200 ton zout per dag.

We noemen een schutting de handeling die nodig is om schepen de kolk in te laten varen. We spreken over een schutcyclus en deze cyclus bestaat uit twee opeenvolgende schuttingen waarbij sprake is van zowel vaart in de ene richting en vaart in de andere richting. De tijd dat een paar sluisdeuren aan één kolkeinde open staan noemen we deuropentijd. De deuropentijd wordt bepaald door de sluismeester en hangt af van het aantal schepen dat de kolk uit- en invaart en naar gelang de veiligheid, snelheid en vaardigheid van de schippers. Voor de beroepssluizen gaan we in deze studie uit van 25 minuten deuropentijd. Bij de recreatievaart in de jachtensluis zijn er wel eens lange deuropentijden b.v. als er veel kleinere jachten uit- en invaren of het aanbod gering is en de sluismeester wacht op naderende schepen.

Het schutverlies komt doordat het peil in het HD 0,5 m hoger is dan in het VZM. Het voornemen is om gelijktijdig met het verzouten van het VZM ook een gereduceerd getij van ca. 0,3 m toe te laten en 0,10 m middenstandsverlaging. Gemiddeld over het getij, wordt een peilverschil van ca. 0,5 m aangehouden. Bij elke schutting van het VZM naar het HD wordt het peil in een sluiscolk met 0,5 m verhoogd door zoet water uit het HD in de kolken te laten stromen. Vervolgens lozen de kolken dit water naar het VZM teneinde hun peil aan het VZM gelijk te stellen. Het gelijkstellen van de waterstand in de kolk aan het peil in een voorhaven wordt nivelleren genoemd. Door nivelleren met HD-peil 0,5 m hoger dan VZM-peil is er verlies van zoet water uit het HD: het schutverlies. Het volume kolkwater dat tijdens nivelleren de kolk in- of uitstroomt noemen we de schuttschijf.

Wanneer lengtematen in meters worden uitgedrukt en afgekort worden tot "m" plaatsen we deze dimensie zonder spatie achter het getal.

Het schutverlies volgt uit het aantal schuttingen per dag, het oppervlak van de kolken en het peilverschil. Daggemiddeld, d.w.z. gemiddeld over schuttingen en over gereduceerd getij, is er nu en in de toekomst sprake van een schutverlies van ca. 3,2 m³/s bij 20 schuttingen per dag per kolk.

Het verbruik van zoetwater uit het HD noemen we voortaan watergebruik en is inclusief het schutverlies. De bovengrens voor het watergebruik is 25 m³/s en inclusief ca. 3,2 m³/s schutverlies. We kunnen dus 22,8 m³/s extra watergebruik toestaan om de zoutlek te beperken.

Dit rapport bespreekt de mogelijkheden om de zoutlek te beperken vóórdát maar ook nádat het zout uit het VZM de HD-voorhaven bereikt. We bespreken zoutlekbeperkende middelen zoals een luchtbellenscherm, waterscherm, verhoogde drempel of combinaties hiervan.

Als referentie zullen we in Hoofdstuk 4 de ongeremde verandering van de zoutmassa (in de kolk) hanteren. De mathematisch-fysische schatting van de ongeremde verandering van de zoutmassa in de kolk noemen we de theoretische schatter. Het is deze verandering van de zoutmassa in de kolk tijdens geopende sluisdeuren welke we met zoutlekbeperkende middelen willen beperken. Immers des te kleiner deze verandering is des te minder zout zal de kolk naar de zoete voorhaven lozen. De ongeremde verandering van de zoutmassa treedt op zónder zoutlekbeperkende middelen en we spreken dan over een onbeschermde kolk.

Alhoewel niet onderzocht is het in principe ook mogelijk om de HD-voorhavens deels te verdiepen, het brakke water daarin te laten lopen en van daaruit het water terug te spuien (of anderszins) naar de VZM-voorhavens. Een dergelijk systeem wordt zoutvang genoemd. Het is mogelijk dat een zoutvang noodzakelijk is als de marges te vaak te groot blijken of alsnog minder zoutlek dan 60 kg/s wordt gewenst (zie Hoofdstuk 5).

Een luchtbellenscherm of luchtbellengordijn bestaat uit een dichte strook luchtbellen die over de kolkbreedte en veelal bij en tijdens open sluisdeuren vanaf de kolkvloer wordt ingeblazen. In de traditionele wijze komt de lucht uit een geperforeerde buis. De innovatieve luchtbellenschermen zoals Deltares nu aanbeveelt werken met dubbele rijen van diffusers lijkende op douchekoppen, zie Figuur 3.8 en 3.9. De douchekoppen produceren goed verdeeld kleine luchtbelletjes van 3-5 mm diameter. Elke douchekop is voorzien van één of meerdere luchtventielen die voor een aanmerkelijke meer constante en meer gelijkmatige verdeling van lucht zorgen dan geperforeerde buizen. De diffusers blazen horizontaal naar elkaar toe of blazen verticaal omhoog maar liggen dan onderling versprongen in rijen naast elkaar. Met deze constructie ontstaat een zo ondoordringbaar mogelijke nevel luchtbellen. In het vervolg van de tekst wordt dit type met Δ -luchtbellenscherm aangeduid.

De traditionele luchtbellenschermen zijn gebaseerd op luchtbellen uit geperforeerde buizen die mogelijk kunnen verstoppem en over de kolkbreedte ongelijkmatig de lucht kunnen verdelen. In de praktijkproef onderzochten we ook de werking van de oorspronkelijke luchtbellenschermen van de Stevinluis en we noemen deze schermen kortweg S-luchtbellenschermen.

Van belang is het luchtdebiet voor luchtbellenschermen die door compressoren moet worden geleverd wat energie vergt. Een betere maat voor het luchtdebiet is eigenlijk het zg. specifieke luchtdebiet waarmee per meter kolkbreedte het luchtbellenscherm wordt gevoed: een gelijkwerkend luchtbellenscherm in een tweemaal bredere kolk vraagt het dubbele luchtdebiet. Daarnaast is de waterdiepte van belang omdat de lucht bij de waterdruk op de kolkvloer wordt ingeblazen. Echter, lucht is samendrukbaar: het luchtvolume halveert bij dubbele luchtdruk. Anderzijds expanderen de luchtbellen op weg naar het wateroppervlak. Daarom hanteren we als eenheid voor luchtdebiet het volume lucht per tijdseenheid dat een

compressor onder normale atmosferische druk en temperatuur aanzuigt. We geven dit het symbool "N" en hanteren Nl/s als eenheid voor luchtdebiet of soms Nm³/s bij zeer grote luchtdebieten. Fabrikanten van compressoren hanteren deze afspraak. Door de context is er meestal geen verwarring dat hoofdletter N ook voor de eenheid van kracht (Newton) wordt gebruikt. Voor een luchtbellenscherm in een kolk kunnen we beter spreken in Nl/s.m zijnde het luchtdebiet per meter kolkbreedte, ook wel specifiek luchtdebiet genoemd.

Uit een spleet van 7,5 cm wordt over de kolkbreedte een verticaal waterscherm gemaakt waaruit veelal zoeter water stroomt dan het ontvangende water. Soms benadrukken we de voeding van het waterscherm met zoet of verzilt water en noemen het dan waterscherm.

Deltares onderzocht de combinatie van een waterscherm naast een luchtbellenscherm teneinde zo weinig mogelijk zout water door te laten. Een functie van een waterscherm is de teen van een luchtbellenscherm beter te beschermen tegen de druk van een zoutwaterkolom op een zoetwaterkolom. Een tweede functie van het waterscherm is om het indringende zoute water eerst met zoet water te verdunnen voordat het luchtbellenscherm wordt bereikt. Een derde functie is dat in zouter water het zoetere waterscherm opdrijft en de zout-zoet scheiding bevordert. In paragraaf 3.3.2 gaan we hier nader op in.

Evenals een waterscherm beschermt een verhoogde drempel de teen (onderste deel) van een luchtbellenscherm tegen de druk van een zoute kolom water op een zoete kolom water. De drempel dient voldoende hoog te zijn (meer dan 1,2 m) en bij voorkeur aan de zoute zijde naast een luchtbellenscherm geplaatst te zijn.

De meeste zoutlekbeperkende middelen beperken het noordgaande zouttransport via de schutkolken. Dergelijke zoutlekbeperkende middelen remmen bij geopende sluisdeuren de uitwisseling van water tussen de betreffende sluiscolk en voorhaven.

Een klassieke zoutlekbeperkende methode is het opzettelijk en extra laten "lekker" van die sluisdeuren welke bij lage buitenwaterstand (eb) worden gebruikt: de ebdeuren. In de sluisdeuren van de Volkeraksluizen zijn zogenaamde rinketschuiven. Bij gesloten sluisdeuren kunnen deze rinketschuiven omhoog getrokken worden. Bij een verschil in peil tussen kolk en voorhaven stroomt er dan water door de rinketschuiven en wordt de kolk genivelleerd aan het peil van de relevante voorhaven. Het is mogelijk om de rinketschuiven aan beide kolkeinden in de gesloten sluisdeuren beperkt te openen op een zogenaamde kierstand. Het is ook mogelijk deze kierstand in te stellen als aan de andere kolkeinde de sluisdeuren geopend zijn. Wanneer het peil in het HD hoger is dan in het VZM ontstaat er een stroming door de kolk van zoeter water uit het HD via de kolk naar het VZM. Dit wordt de methode van lekkende ebdeuren genoemd en het betrokken debiet heet ebdebiet.

Bij deze methode van lekkende ebdeuren stroomt onder vrij verval zoet water vanuit het HD via de kolken naar het zoute VZM: er wordt zout naar de zoute zijde, hier het VZM, terug gevoerd. Deze beperking in zoutlek gebruikt water. We onderzoeken de vraag of met maximaal 25 m³/s watergebruik de zoutlek minder dan 60 kg/s wordt.

De overige zoutlekbeperkende middelen gaan uit van voornoemde mogelijkheden. De overige zoutlekbeperkende middelen gebruiken een tijdelijke opvang van zout middels een zoutvang b.v. in een verdiepte HD-voorhaven. De eventuele zoutvangen in de HD-voorhavens dienen dieper te zijn dan de kolken en dieper dan de vaargeul naar het

Hollandsch Diep, voor bodemdiepten zie Figuur 2.1.

Het brakke water dat de sluizen door schutten leveren kan tijdelijk in een zoutvang worden opgevangen. Er zijn zoutlekbeperkende middelen die het brakke water uit deze zoutvang kunnen gebruiken om de zoutlek te verminderen. Het afvoeren van brak kolkwater uit een zoutvang in de HD-voorhaven onttrekt *de facto* water uit het HD, dit is watergebruik. Het is mogelijk dat al het brakke water dat in een zoutvang wordt gevangen naar het VZM wordt teruggebracht: er is dan nog enige zoutlek door menging vanuit een dergelijke zoutvang naar de HD-voorhaven.

Dergelijke zoutlekbeperkende middelen, waaronder een zoutvang, en hun combinaties zijn handmatig niet meer te schatten en anderzijds is nog niet bewezen dat uiterst gedetailleerde computersimulaties in 3D betrouwbaar zijn. Als rekenmiddel is gekozen voor een zg. Zoutlekmodel. Het Zoutlekmodel vat een aantal goed begrepen stromingsprocessen in een schutsluis samen en daarin is de netto invloed van zoutlekbeperkende middelen opgenomen. Het Zoutlekmodel is getoetst aan eerdere waarnemingen van zoutlek zoals beschreven in de volgende paragraaf. De werking en de basis van het Zoutlekmodel is opnieuw onderzocht in de praktijkproef in de Stevinsluis te Den Oever, evenals de netto invloed van zoutlekbeperkende middelen.

In Hoofdstuk 3 leggen we deze zoutlekbeperkende middelen verder uit. Eerst geven we in de volgende paragraaf een overzicht van de historie en de mogelijke toekomstige situatie van de Volkeraksluizen.

2.3 Historie en toekomst

2.3.1 De historie

Op 28 april 1969 werd de zeearm Volkerak door de Volkeraksluizen van het Hollandsch Diep gescheiden. Op 2 november 1970 werd het Haringvliet afgesloten en verdween grotendeels het getij aan de noordzijde van de Volkerak-sluizen maar bleef het getij in het zoute Volkerak. De Volkeraksluizen hadden toen twee beroepssluizen en nog geen jachtensluis. Vanaf januari 1977 zijn er drie beroepssluizen van het Volkeraksluizencomplex in werking en sinds juni 1977 is de jachtensluis in gebruik genomen.

Vanaf 2 november 1978 kwam de spuisluis in bedrijf. Aan Volkerakzijde heerste nog een aanzienlijk getij met een getijslag van 2,5-3 m terwijl jaargemiddeld het peil in het HD 0,50 m hoger lag dan in het Volkerak. Dit verklaart de noodzaak destijds van een grote diepte van de sluiscolken.

In de periode 1969-1980 had de zoutlek voortdurend de aandacht en zorg van Rijkswaterstaat (RWS). Daartoe verrichtte RWS diverse uitgebreide meetcampagnes. Ten westen en ten oosten van de Volkeraksluizen werden in noord-zuid dwarsdoorsneden van het Haringvliet en het HD de stroomsnelheden en zoutgehalten gemeten. Door deze dwarsdoorsneden werd het zouttransport berekend en uit het verschil de zoutlek. Aan de hand van deze meetcampagnes werd een vereenvoudigde procedure opgesteld welke minder metingen van stroming en zout in dwarsdoorsneden verlangde. Vervolgens is weekgemiddeld de zoutlek geschat en in figuren in diverse nota's gerapporteerd. Deze nota's

zijn ten dele bewaard gebleven maar de oorspronkelijke meetgegevens zijn getalsmatig nauwelijks beschikbaar.

Voor een toetsing van het Zoutlekmodel gebruiken we de operationele condities voor de periode 1977-1979, beschreven in (RWS, 1983) en hieronder samen gevat.

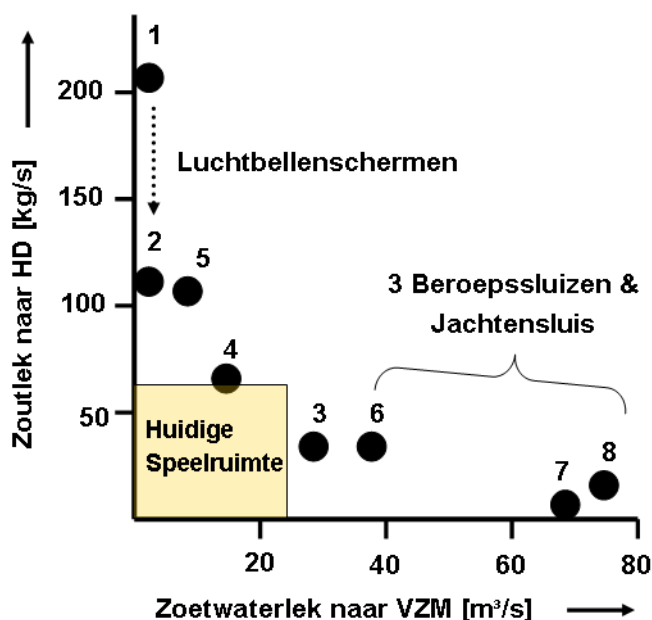
Na het in werking treden van de Volkeraksluizen op 28 april 1969 met twee beroepssluizen bedroeg de zoutlek ca. **216 kg/s** (case 1 in Figuur 2.4).

Na het inschakelen van (provisorische) luchtbellenschermen per 2 nov. 1970 reduceerde de zoutlek aanmerkelijk tot **108 - 126 kg/s** (cases 2 en 5 in Figuur 2.4). De operationele gegevens over de luchtbellenschermen (positie, ontwerp en luchtdebieten) zijn ons niet bekend.

Naast het gebruik van de luchtbellenschermen werd per juli 1971 de methode van lekkende ebdeuren toegepast die de zoutlek tot **32 kg/s** terugbracht (case 3 in Figuur 2.4).

Na mei 1973 werd de methode van lekkende ebdeuren niet toegepast en verhoogde de zoutlek tot **65 - 80 kg/s** (case 4 in Figuur 2.4) maar kwam om onbekende redenen niet terug tot de oorspronkelijke van voor juli 1971.

Vervolgens is er vanaf maart 1977 tot nov. 1979 het zg. 50 m³/s spuiprogramma ingezet waarmee de zoutlek tot ca. **27- 40 kg/s** afnam (cases 6, 7 en 8 in Figuur 2.4). Deze afname in zoutlek na maart 1977 is goed zichtbaar in de wekelijkse registraties. In deze periode bedroeg het jaargemiddelde watergebruik ca. 40 - 50 m³/s.



Figuur 2.4 Overzicht van zoutlek en watergebruik door de Volkeraksluizen in de periode 1969-1980. Zie Tabel 2.3 voor de condities voor cases 1 t/m 8.

Deze en andere resultaten hebben we samengevat tot acht kenmerkende testcases voor ons rekenmodel dat de zoutlek schat (Uittenbogaard, 2010); we komen in Hoofdstuk 4 hier op terug. Deze cases (1-8) zijn in Figuur 2.4 gegeven en verklaard in Tabel 2.3. Dit figuur toont dat destijds de zoutlek sterk beperkt werd door luchtbellenschermen en door het watergebruik. Het watergebruik werd benut in de methode van lekkende ebdeuren en met grotere debieten door spuien via de sluisluis. Spuien verlaagt het zoutgehalte ten zuiden van en vóór de monding van de VZM-voorhaven, zie Figuur 2.1. De methode van lekkende ebdeuren verlaagt het zoutgehalte in de VZM-voorhaven en transporteert zout uit de kolken naar het VZM, zie Figuur 2.3.

Tabel 2.2 Overzicht cases (periode 1969-1980) en laatste kolom uit metingen afgeleide zoutlek

| Case (Figuur 2.4) | Schutcycli per dag per sluis | Water-verplaatsing scheepvaart [m ³ /s] | Beroeps-sluisen [-] | Jachten-sluis [-] | Watergebruik lekkende ebdeuren [m ³ /s] | Watergebruik spuien via schutsluis [m ³ /s] | Zoutlek meting [kg/s] |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 10 | 1,31 | 2 | 0 | 0 | 0 | 216 |
| 2 | 10 | 1,23 | 2 | 0 | 0 | 0 | 108 |
| 3 | 10 | 1,13 | 2 | 0 | 10 | 19,4 | 32 |
| 4 | 10 | 1,20 | 2 | 0 | 0 | 15,0 | 70 |
| 5 | 10 | 1,30 | 2 | 0 | 10 | 0 | 102→42 |
| 6 | 11.9 | 1,32 | 3 | 1 | 13,5 | 25,6 | 27 - 40 |
| 7 | 11.9 | 1,29 | 3 | 1 | 20,5 | 49,5 | 0 - 10 |
| 8 | 11.9 | 1,29 | 3 | 1 | 19,5 | 56,3 | 10 - 40 |

In opdracht van RWS onderzocht Waterloopkundig Laboratorium (Roelfzema, 1977) het nut van een zoutvang, maar deze is niet aangebracht. Destijds werd een zoutvang of zoutbufferput aan HD-zijde overwogen om de zoutlek te beperken. Met een zoutvang werd geschat dat de zoutlek lager zal zijn dan bij de hoogste spuidebieten (Figuur 2.4) werd gevonden.

Anderzijds werd ook nagedacht over het beperken van het verzoeten van het Volkerak door minder watergebruik, zie Figuur 2.4. Mogelijk speelt deze laatste doelstelling opnieuw een rol gezien de argumenten om het VZM tot 20 ppt te verzouten met als doel de bloei van blauw-groene algen te onderdrukken. Immers, dan wordt een deel van het Volkerak wellicht niet zout genoeg voor een gezond zoutwatersysteem.

Figuur 2.4 toont de uitdaging voor deze studie: het beperken van de zoutlek tot maximaal 60 kg/s bij maximaal 25 m³/s watergebruik terwijl de prognose voor de scheepvaart in 2020 hoger ligt dan in 1969 -1980, zie Tabel 2.3. Vooral de verdubbeling van het aantal schuttingen per kolk en per dag zal de zoutlek ruwweg verdubbelen met dezelfde zoutlekbeperkende middelen.

In 1979 waren er per week 230 schuttingen naar één zijde voor de beroepssluisen, dus bijna 11 schuttingen naar één zijde per beroepssluis per dag; in de zomer waren er in de jachtensluis ca. 120 schuttingen naar één zijde per week. In 2007 passeerden per jaar in 2 vaarrichtingen 112.072 beroepsschepen met gemiddeld 2093 ton laadvermogen.

In 1979 passeerden 33.869 recreatievaartuigen dus jaargemiddeld 92,8 recreatieschepen/dag terwijl er in de periode mei-november 120 schutcycli per week voor de recreatievaart waren.

2.3.2 Toekomst

De verwachting voor 2020 loopt op tot totaal 113.880 beroepsschepen met gemiddeld 2440 ton laadvermogen. Jongeling (2007) schat dat de waterverplaatsing gemiddeld 72% van het laadvermogen bedraagt. Het aantal schuttingen zal dan ca. 20 schuttingen naar één zijde per kolk per dag bedragen wat de maximale capaciteit van de Volkeraksluizen nadert omdat één schutcyclus (van zoet naar zout en v.v.) ca. 1 uur duurt.

Hoewel wordt gedacht aan de uitbreiding met een vierde beroepssluis zal hierdoor de zoutlek niet toenemen omdat de zoutlek afhankelijk is van het aantal schuttingen. Hier is verondersteld dat dit aanbod bij een dergelijke uitbreiding niet zal veranderen (er is geen alternatieve route).

Vanwege de (bijna) verdubbeling van het aantal schuttingen naar één zijde per kolk en per dag (van 11 naar 20) zal de zoutlek met dezelfde zoutlekbeperkende middelen ruwweg verdubbelen.

Voor onze schatting van de zoutlek in 2020 veronderstellen we dat bij elke schutting elke kolk goed met schepen wordt gevuld. Tevens veronderstellen we dat ook de jachtensluis het hele jaar door met 20 schuttingen naar één zijde per dag wordt gebruikt. Dit laatste is waarschijnlijk een veilige overschatting voor de zoutlek, anderzijds draagt de jachtensluis slechts voor 18% bij aan de zoutlek.

Tenslotte nog enkele getallen over de vullingsgraad van schepen in de kolken. Het volume van een beroepskolk boven de drempels bedraagt ca. 53.820 m³. Per schutting zijn er gemiddeld 2,6 schepen/kolk met elk gemiddeld 2440 ton laadvermogen. Met de geschatte 72% waterverplaatsing t.o.v. laadvermogen bedraagt de totale waterverplaatsing slechts 8,3% van het werkbare kolkvolume. Verdeeld over 8280 m² oppervlak van één kolk verdringen 2,6 schepen/kolk met elk gemiddeld 2440 ton laadvermogen totaal ca. 0,55 m water. Wij concluderen dat de kolken t.o.v. de huidige en verwachte scheepvaart groot zijn.

Tabel 2.3 Beroepsscheepvaart en lading door de Volkeraksluizen

| Jaar (kolken) | beroepsvaart in 2-vaarrichtingen aantal | gemiddeld laadvermogen (ton) | beroepsvaart in 1-vaarrichting aantal/dag/kolk |
|---------------|-----------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|
| 1969 (2) | 163.268 | 702 | 112 |
| 1970 (2) | 152.074 | 711 | 104 |
| 1971 (2) | 156.046 | 731 | 107 |
| 1972 (2) | 135.931 | 665 | 93 |
| 1973 (2) | 148.894 | 733 | 102 |
| 1974 (2) | 151.388 | 718 | 104 |
| 1975 (2) | 128.569 | 749 | 88 |
| 1976 (2) | 141.666 | 807 | 97 |
| 1977 (3) | 139.021 | 802 | 63 |
| 1978 (3) | 143.717 | 843 | 66 |
| 1979 (3) | 130.516 | 865 | 60 |
| 1980 (3) | 129.862 | 877 | 59 |
| 2007 (3) | 112.072 | 2093 | 51 |
| 2020 (3) | 113.880 (*) | 2440 | 52 |

(*) Hierbij gelden 20 schuttingen per dag met tweerichtingverkeer en 2,6 schepen per kolk met 2440 ton laadvermogen per schip; volgens (Jongeling, 2007) e.e.a. gebaseerd op RWS prognoses.

2.3.3 De eerste indruk en een blik vooruit

Wanneer we de toekomstige situatie vergelijken met die eind '70er jaren valt het volgende op. Destijds en in de verwachte toekomstige situatie was er sprake van ca. 20 ppt zout in het VZM bij de Volkeraksluizen. Tevens was toen daggemiddeld én in de toekomstige situatie het peil in het HD 0,5 m hoger dan in het VZM. Wat wél zal veranderen is het aantal schuttingen naar één zijde per kolk en per dag: toen ca. 11 en naar verwachting 20 in de toekomst.

Met kleine afwijkingen is de zoutlek wel evenredig met het aantal schuttingen per kolk en per dag. Dit aantal wordt bijna verdubbeld (20/11) door de grotere belasting met scheepvaart. Met andere woorden: voor dezelfde overige omstandigheden en dezelfde inzet én doelmatigheid van zoutlekbeperkende middelen verdubbelt de zoutlek t.o.v. Figuur 2.4.

Figuur 2.4 geeft de speelruimte waarin de oplossingen moeten liggen: een zoutlek kleiner dan 60 kg/s met maximaal 25 m³/s (extra) watergebruik. Het schutverlies zal verdubbelen tot ca. 3,2 m³/s. Hieruit volgt dat we t.o.v. de cases 6, 7 en 8 in Figuur 2.4 zuiniger en dus doelmatiger moeten omgaan met het watergebruik teneinde onder de grenswaarde van 60kg/s zoutlek te blijven.

Uit Hoofdstuk 5 van dit rapport zal blijken dat deze beperkte speelruimte optimaal benut kan worden en het gestelde doel bereikt kan worden. Een belangrijke stap naar lage zoutlek is de inzet van de innovatieve Δ -luchtbellenschermen. Volgens onze metingen in een werkende schutsluis houden de Δ -luchtbellenschermen 50% méér zout tegen dan de traditionele luchtbellenschermen met geperforeerde buizen.

Echter, de verbeterde luchtbellenschermen zullen voor de Volkeraksluizen nog onvoldoende blijken te zijn en aanvullende zoutlekbeperkende middelen zijn zeker nodig. In dit rapport zullen we aantonen dat de innovatieve Δ -luchtbellenschermen gecombineerd met óf de methode van lekkende ebdeuren óf met voldoende hoge drempels het gestelde doel bereikt wordt. De werking van een verdiepte voorhaven als zoutvang hebben we niet in onze praktijkproef onderzocht hoewel de diepe zuidelijke voorhaven van de Stevinsluis die functie wel lijkt te hebben. Voor de beperking van de zoutlek lijkt een zoutvang zeer doelmatig, maar verlangt naast aanpassingen voor een verdiepte HD-voorhaven ook watertunnels naar de VZM-voorhaven of vergelijkbare verbindingen tussen de zoutvang en het VZM.

De innovatieve Δ -luchtbellenschermen presteren nog beter in hun zoutlekbeperkende werking wanneer ze ondersteund worden met waterschermen. De toevoeging van waterschermen vergt naast watertunnels ook extra pompen.

Om de lezer te overtuigen van voorgaande conclusies zullen we eerst in het volgende Hoofdstuk 3 de stromingsprocessen uitleggen die de zoutlek veroorzaken. Langs verschillende wegen zullen we vervolgens in Hoofdstuk 4 concluderen wat de beste zoutlekbeperkende middelen presteren.

Naast de resultaten van de lab proeven en rekenmodellen zijn vooral de resultaten van de praktijkproeven als maatgevend beschouwd omdat deze zijn verricht in een werkende schutsluis mét scheepvaart én met getij én met wisselende zoutgehalten in de zoute voorhaven. Dit scala aan variaties onderzocht tijdens de praktijkproef in de Stevinsluis geeft robuustheid aan onze conclusies.

Anderzijds is de Stevinsluis 140 m lang, 14 m breed en 4,7 m diep terwijl de beroepskolken van de Volkeraksluizen 345 m lang, 24 m breed en 7,5 m diep zijn. Kortom een vertaling is nodig. Het middel voor deze vertaling is ons rekenmodel voor de zoutlek, Zoutlekmodel genaamd. Daarin passen we tevens de theorie van luchtbellenschermen toe en ervaringen uit het verleden, zie (Abraham & V.d. Burgh, 1962) en (Abraham, 1972). Deze belangrijke kennis en ervaring is getoetst in diverse grote sluizen en met kolkdiepten van 5 tot 15 m diepte. Deze kennis en ervaring vullen we aan met laboratoriumproeven (Mastbergen, 2010) en gedetailleerde computerberekeningen van luchtbellenschermen en waterschermen (Keetels en Uittenbogaard, 2010).

Het Zoutlekmodel blijkt daarbij een betrouwbaar gereedschap te zijn. Bij gegeven watergebruik en scheepvaart beschrijft het Zoutlekmodel de grote variaties in de zoutlek volgens Figuur 2.4 voldoende nauwkeurig; dit bewezen we in (Uittenbogaard, 2010). De praktijkproef in de Stevinsluis toonde vervolgens aan dat de grondslag van het Zoutlekmodel, de zg. zout-zoet uitwisseling, correct is. Daarom begint het volgende Hoofdstuk 3 met de uitleg van die grondslag: de zout-zoet uitwisseling.

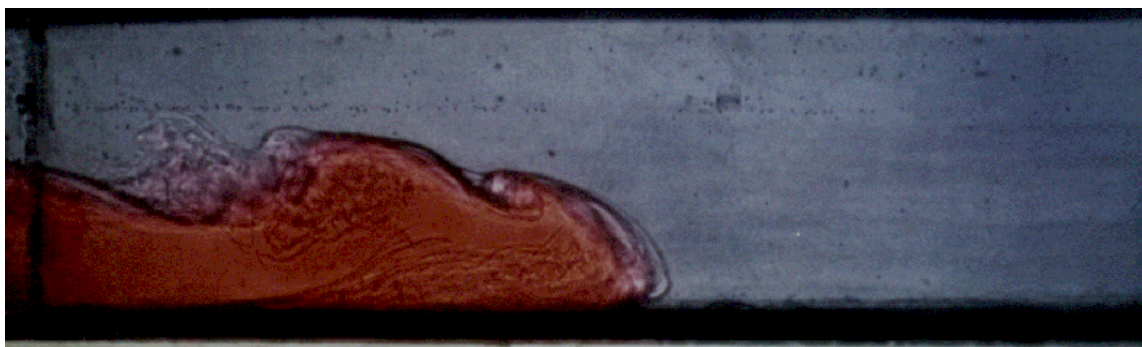
3 Oorzaken van zoutlek en Zoutlekmodel

3.1 Inleiding: zout-zoet uitwisseling van een kolk

Zonder in wiskundige details te treden bespreken we in dit hoofdstuk de concepten van de oorzaken van zoutlek, op welke wijze de zoutlek beperkt kan worden en een rekenmodel voor de zoutlek.

De essentie van de zoutlek van de Volkeraksluizen is de zg. zout-zoet uitwisseling tijdens en door geopende sluisdeuren. Bij hoger peil in het HD dan in het VZM is er geen extra zoutlek tijdens het nivelleren van de kolken want daarvoor wordt zoet water gebruikt (zie schutverlies in paragraaf 2.2).

Figuur 3.1 toont een foto van een kolk in het laboratorium waarin links rood gekleurd zout water aanvankelijk gescheiden was van zoet water, rechts in de kolk. Rechts van de foto is de kolk door dichte sluisdeuren afgesloten. Nadat links de sluisdeuren openen, stroomt het zoute water ónder het zoete water naar rechts de kolk in. Doordat de kolk aan het andere eind is afgesloten wordt het zoete water naar links en boven het zoute water verdrongen: het zoete water stroomt de kolk uit. Dit stromingsproces heet zout-zoet uitwisseling en is veelvuldig beschreven in de wetenschappelijke literatuur en wordt goed begrepen. De vorm van het volume bewegend zout water wordt zouttong genoemd en deze zouttong lijkt veel op het front van een sneeuwlavine of van een gebroken golf die het strand oploopt.



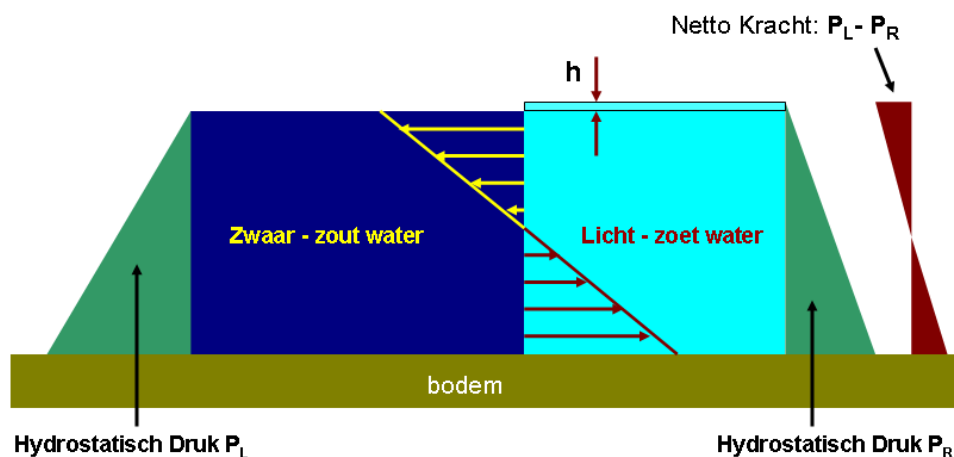
Figuur 3.1 Voortplanting van de (rode) zouttong naar rechts over een bodem, niet zichtbaar is de retourstroming van lichter water naar links en boven de zouttong

We verklaren dit voor de zoutlek essentiële stromingsproces als volgt:

Wanneer zout wordt opgelost in zoet water vullen de zout-ionen de ruimte tussen de watermoleculen: het watervolume verandert nauwelijks maar het gewicht neemt wél toe. De aandrijvende kracht achter de zouttong is te verklaren uit het grotere soortelijk gewicht van zout water t.o.v. zoet water.

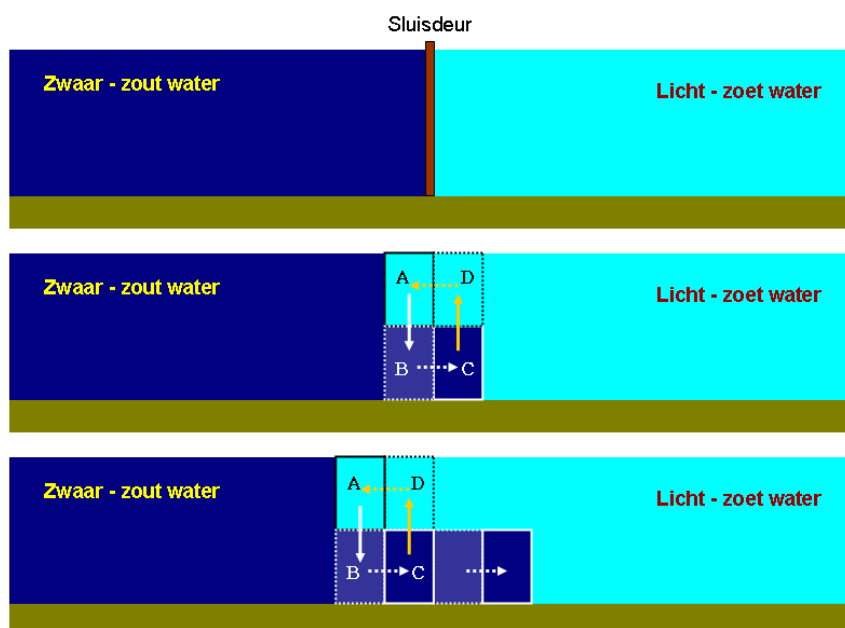
De groene driehoeken in Figuur 3.2a tonen de opbouw van de druk in het stilstaande water, hydrostatische druk genoemd. Vanaf het wateroppervlak naar de bodem stijgt de hydrostatische druk in het zoute water sneller dan in het zoete water. Het verschil tussen deze drukken vormt de aandrijvende kracht. De totale kracht welke het zoute water op het zoete water (en op gesloten sluisdeuren) uitoefent is nul indien een gering hogere waterstand is (h in Figuur 3.2a).

Bij de bodem is de aandrijvende kracht naar het zoete water gericht en bij het wateroppervlak naar het zoute water, derhalve is er een momentwerking (bruine driehoeken rechts in Figuur 3.2a). Tijdens het openen van de deuren verplaatst het zoute water zich snel (middels een translatiegolf) iets in de richting van het zoute water waardoor het niveauverschil verkleind wordt. Het drukverschil bij de bodem stuwt het zoute water uit de voorraad stilstaand zoutwater richting zoetwater en vormt de zouttong. Bij het wateroppervlak stroomt het zoete water naar het zoute volume, zie ook Figuur 3.2b.



Figuur 3.2a Links in het zwaardere wegend (zout) water neemt de waterdruk (groene driehoek) sneller toe dan rechts in het lichtere (zoet) water. Voor evenwicht is rechts een geringe waterstandverhoging (h) nodig. Het verschil tussen de waterdrukken levert de krachtverdeling (bruine driehoeken) welke de geschetste uitwisselingsstroming (pijlen) aandrijft.

De beweging van het zoete water lijkt op de zouttong in Figuur 3.1 maar met boven en onder én links en rechts verwisseld: we noemen dit een zoet(water)tong. Het aanvankelijk verticale scheidingsvlak bij de open sluisdeuren tussen zout en zoet water kantelt daarbij op de halve waterdiepte.



Figuur 3.2b Bij de bodem weerstaat de sluisdeur de hogere druk van de zoute waterkolom t.o.v. de zoete waterkolom. Na het wegnemen van de sluisdeur wordt blok C door de hogere druk versneld. Hierbij zuigt Blok C het Blok A naar positie B.. Met het wegvallen van blok A stopt de aandrijving voor blok C: blok C heeft nu zijn eindsnelheid. Blok C verdringt zoet water dat schematisch via blok D de ruimte van blok A opvult. Dit proces herhaalt zich sequentieel: een zouttong wordt gevormd en daarboven de zoetwatertong.

De voortgaande zouttong wordt gevoed met zout water dat aanvankelijk stil staat d.w.z. in Figuur 3.2b wordt Blok B versneld en naar Blok C (deel van de zouttong) verplaatst. Het horizontale verschil in druk zorgt voor de versnelling van het stilstaande water tot de snelheid van de zouttong. De benodigde energie veroorzaakt dat zoet water uit Blok A naar Blok B wordt gezogen. Het zoete water in Blok A wordt gevoed met zoet water uit Blok D dat door Blok C wordt verdrongen. Dit is de uitwisseling van zout water met zoet water zonder een netto transport van water.

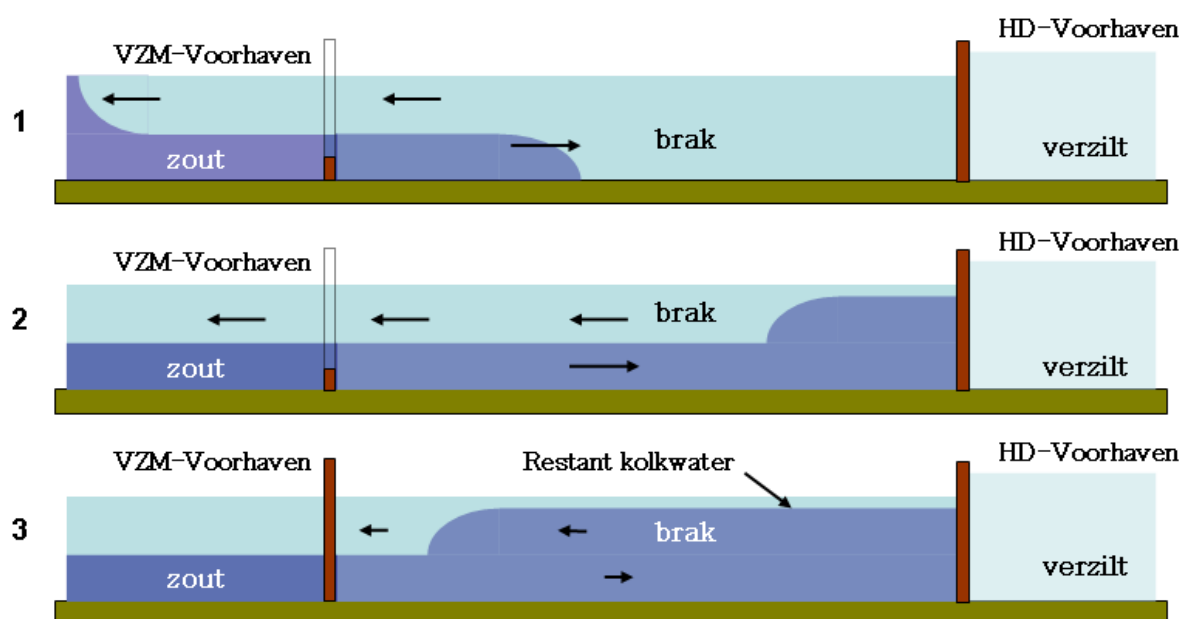
Experimenteel en theoretisch blijkt dat de zouttong een vaste snelheid heeft die evenredig is met de wortel van de waterdiepte en ook evenredig is met de wortel van het verschil in gewicht per volume-eenheid van zout en zoet water. Er zijn wel geringe afwijkingen door wrijving en menging van de zouttong. De snelheid van de zouttong verdubbelt 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.

Totdat de voorraad zout water of zoet water in de kolk is uitgeput blijft de aandrijvende krachtverdeling heersen. Deze krachtverdeling voedt de zouttong voortdurend met aanvankelijk stilstaand zout water. Vanaf de zoute zijde wordt nu een volume zout water de kolk ingestuurd: dit volume is gelijk aan het volume van de zouttong. Eenzelfde volume zoet water verlaat de kolk. Per eenheid van kolkbreedte is het aldus uitgewisselde volume gelijk aan het product van de dikte van zouttong (halve waterdiepte of dunner) en zijn afgelegde

weg. De zouttong neemt zout mee: de zoutmassa in de kolk neemt toe. De toename van de zoutmassa (uitgedrukt in kg zout) in de kolk is het product van het zoutgehalte in de zouttong, de snelheid van de zouttong en de (kolk)breedte en de dikte van zouttong.

Figuur 3.3 toont de zouttong in een kolk die naar de (zoute) VZM-voorhaven is geopend en waarbij de kolk nog een restant zout bevat dat achterbleef na de vorige schutting. Wanneer de zouttong aan het andere kolkeinde de gesloten sluisdeuren bereikt klimt de zouttong naar het wateroppervlak. Idealiter bereikt de zouttong zijn oorspronkelijk uitgangshoogte nl. het wateroppervlak (zie ook Figuur 3.2b). Echter, door energieverlies stijgt de zouttong tot dicht onder het wateroppervlak. Bij de gesloten sluisdeur begint een nieuwe zouttong die naar de geopende sluisdeuren reist. Deze zouttong wordt gevoed met zout water dat via de onderlaag wordt aangevoerd, zie stadia 2 en 3 in Figuur 3.3.

Terwijl de zouttong beweegt verlaat de toplaag de kolk als een zoetwatertong bestaande uit oorspronkelijk kolkwater. Aan het wateroppervlak blijft nog een restant oorspronkelijk kolkwater achter door het energieverlies van de zouttong tijdens zijn reis door de kolk. Dit restant blijkt ca. 10% van het kolkvolume boven de drempel zijn. Het restant stroomt de kolk zo traag uit dat zelfs bij lange deuropentijd het restant grotendeels in de kolk achterblijft. We noemen het gemiddelde zoutgehalte van het kolkwater in dit stadium nog steeds brak water hoewel zouter dan voorafgaand aan deze schutting maar nog niet zo zout als de VZM-voorhaven.



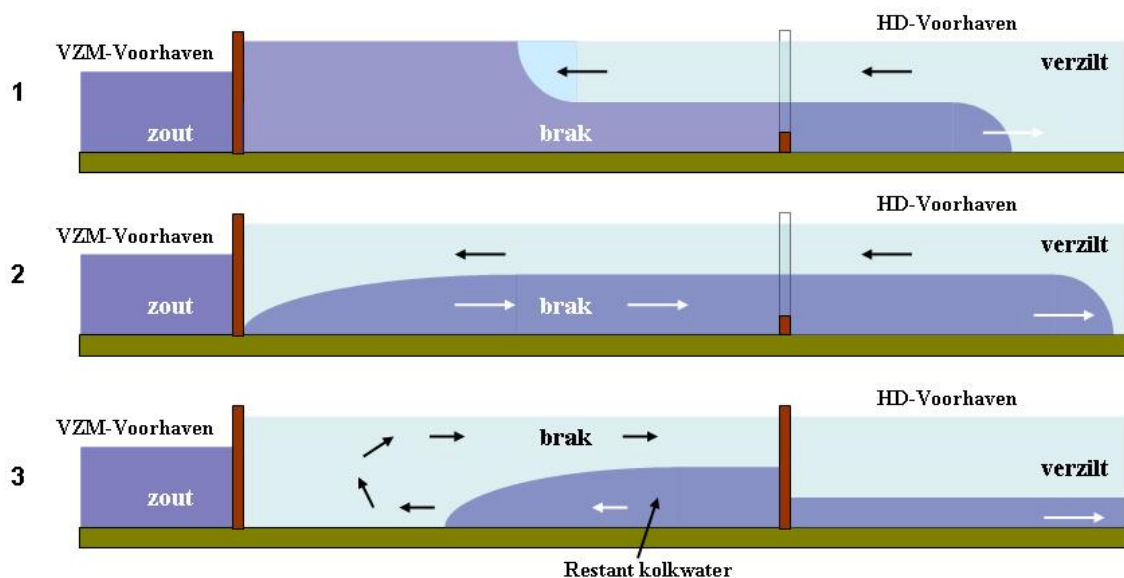
Figuur 3.3 Verschillende stadia verplaatsing zouttong; sluisdeur open aan VZM-zijde;
 Stadium 1: zouttong van water uit VZM-voorhaven dringt de kolk in en verdringt water de kolk uit;
 Stadium 2: na reflectie tegen de gesloten sluisdeuren reist de zouttong terug naar de VZM-voorhaven;
 Stadium 3: de aandrijving van de zouttong stopt na het sluiten van de sluisdeuren. De kolk is nu zouter dan vóór deze schutting. Een restant zoeter kolkwater blijft achter in de toplaag.

Om twee redenen stopt deze zout-zoet uitwisseling: óf de kolk is (voor ca. 90%) met VZM-water uitgewisseld óf de sluisdeuren worden gesloten. De tijd dat de sluisdeuren geopend zijn

noemen we voortaan deuropentijd. De minimale deuropentijd wordt bepaald door het veilig in en uit kunnen varen van schepen.

Na het nivelleren met het HD worden de deuren maar de HD-zijde geopend en vindt zout-zoet uitwisseling plaats. Figuur 3.4 toont het uittreden van de zouttong naar de HD-voorhaven. Op dit moment begint de zoutlek: er wordt zout naar de zoete zijde gebracht. De gunstige invloed van een minder zoute kolk op de zoutlek wordt merkbaar wanneer de kolk naar de HD-voorhaven opent: vanuit een minder zoute kolk is de aandrijvende kracht van de uittredende zouttong geringer. En niet alleen beweegt de zouttong trager maar brengt ook zoeter water (minder zout) naar de HD-voorhaven. Kortom, bij gelijke deuropentijd maar lager zoutgehalte van het kolkwater verliest de kolk minder zoutmassa naar de HD-voorhaven: het water is minder zout en de zouttong beweegt trager.

We zien dus dat een zoutlekbeperkend middel aan de zoute VZM-zijde indirect de zoutlek (naar de zoete HD-zijde) vermindert. Er wordt nog minder zout gelekt als zoutlekbeperkende middelen ook aan de zoete zijde de uittredende zouttong nog meer afremmen.



Figuur 3.4 Verschillende stadia verplaatsing zouttong; sluisdeur open aan HD-zijde:

Stadium 1: zouttong van brak kolkwater beweegt naar de HD-voorhaven terwijl verzilt water uit de HD-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 vóór deze schutting.

Voor de verandering van de zoutmassa in de kolk leiden we uit voorgaande af:

- De waterdiepte bepaalt de dikte van de zouttong, zijn snelheid en de zoute massa;
- Het verschil in zoutgehalte tussen zout en zoet water bepaalt mede de snelheid van de zouttong en dus de toename van de zoutmassa in de kolk;
- De tijd dat de zouttong de kolk kan binnenstromen bepaalt de totale verandering van de zoutmassa in de kolk;
- De totale verandering van de zoutmassa wordt bepaald door het minimum van de deuropentijd én de reistijd van de zouttong heen en terug door de kolk.

Bij voldoende korte deuropentijd of voldoende trage snelheid van de zouttong en zoetwatertong wordt niet al het kolkwater vervangen door het water uit de voorhaven. Een luchtbellenscherm en/of waterscherm en/of verhoogde drempel verlagen de snelheid van de zouttong. Bij een gelijke, maar voldoende korte, deuropentijd zorgen deze zoutlekbeperkende middelen ervoor dat een sluiskolk aan de zoute kant minder snel zout wordt (en aan de zoete kant minder snel zoet) dan bij een gewone sluiskolk.

3.2 Invloedsfactoren op de zoutlek

Gegeven de uitleg in de vorige paragraaf van de oorzaak én de aandrijving van de zout-zoet uitwisseling bespreken we hier de invloedsfactoren op de zoutlek. Eerst benoemen we deze factoren, daarna lichten we ze toe.

Invloedsfactoren op de zoutlek:

1. Volume-gemiddeld zoutgehalte in de kolk op het moment dat de sluisdeuren openen naar de HD-voorhaven;
2. Deuropentijd, bepaald door veilig in- en uitvaren van schepen;
3. Aantal schuttingen per dag;
4. De waterdiepte boven de drempel als verschil tussen kolkdiepte en effectieve drempelhoogte;
5. Waterverplaatsing door scheepvaart.

De eerste drie punten zijn al voldoende in het vorige paragraaf besproken. De werking van drempels (punt 4) lichten we als volgt toe en daarna de invloed van de scheepvaart (punt 5) op de zoutlek.

3.2.1 Invloed drempels op zoutlek

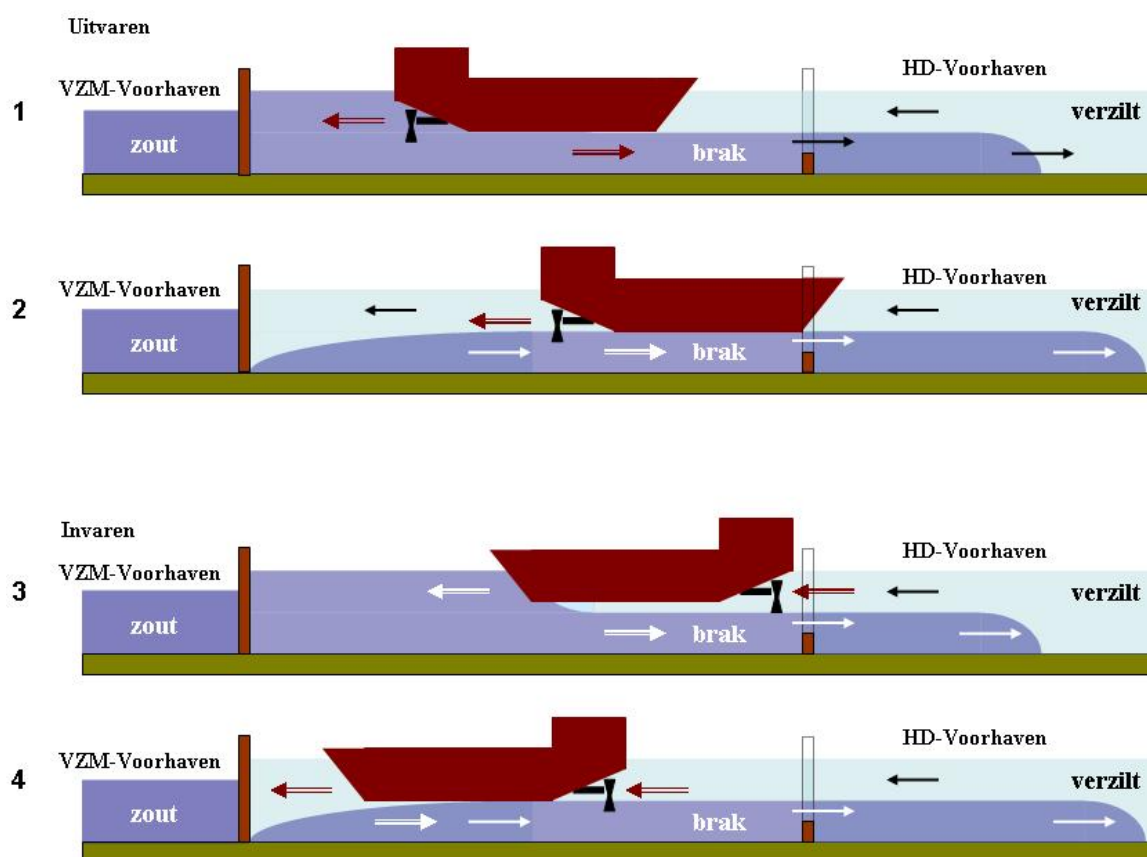
Veelal hebben de sluisdeuren zg. aanslagen of drempels. Bij de Volkerak-schutsluizen zijn deze drempels relatief hoog, maar zouden nog verder verhoogd kunnen worden omdat de oorspronkelijke zeesluisfunctie (getij) vervallen is. Over hun hoogte nemen drempels een deel van de verschilkracht door de druk van een zoute waterkolom naast een zoetere waterkolom op. De aandrijving van de zout-zoet uitwisseling wordt verminderd met de kracht overgenomen door deze drempel. Uit onze experimenten blijkt ca. 80% van de fysieke hoogte van de drempel deze functie te hebben. Hierdoor vermindert de effectieve waterdiepte waarover de zout-zoet uitwisseling in Figuur 3.3 en 3.4 wordt aangedreven met 80% van de drempelhoogte. De drempels in de beroepssluisen liggen nu op 6,5 m diepte en in de jachtensluis op 6,25 m.

Opmerking: Door het volume van een schip en door zijn schroefwerking verplaatst een varend schip water dat tegen de vaarrichting in rondom en onder het schip stroomt. De drempels beperken de doorstroomhoogte onder het schip. De drempels vergroten dan de stroomsnelheid van het water rond het schip waardoor de weerstand van het schip wordt vergroot. Vooral diepstekende schepen, of anders gezegd schepen met weinig kielspeling, zullen óf trager varen óf meer schroefvermogen gebruiken.

3.2.2 Invloed scheepvaart op zoutlek

Veel complexer is de invloed van scheepvaart op de zoutlek. Het gewicht van een schip en lading wordt opgenomen door de waterdruk op de scheepsromp wat zijn diepgang bepaalt. Het volume aldus verplaatst water heet waterverplaatsing en wordt in tonnen water uitgedrukt (1 ton is ca. 1 m³ water). Een schip dat afgemeerd ligt in de kolk beperkt het natte kolkvolume met zijn statische waterverplaatsing. In de Volkeraksluizen is deze zogenaamde statische waterverplaatsing van gemiddeld 2,6 schepen een bescheiden fractie van gemiddeld 8,3 %, zie verder de toelichting op Tabel 2.1.

Voor de zoutlek blijkt belangrijker te zijn het water verplaatst door een bewegend schip en door zijn schroef: de zg. dynamische waterverplaatsing. Tijdens in- en uitvaren verdringt het schip water de kolk uit of in wat bijdraagt tot de zout-zoet uitwisseling. Tevens moet een invarend schip afremmen en een uitvarend schip op gang komen. Hierbij verplaatst de schroef één tot twee keer de statische waterverplaatsing, zie verder (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010). Zowel bij afremmen als op gang komen stuwt de schroef water naar het gesloten kolkeinde, zie Figuur 3.5.



Figuur 3.5 De dubbele bruingekleurde pijlen geven mogelijke circulatiepatronen door de schroefstraal van een uitvarend (1 en 2) of invarend (3 en 4) schip aan HD-voorhaven; 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.

Naar gelang de hoogte van de zouttong (zie Figuur 3.5) en de diepgang van het schip en zijn schroef zal kolkwater worden uitgewisseld en gemengd met het water uit de voorhaven waarnaar geschut wordt. Drempels spelen hierbij een rol want ze vergroten de stroming rond het schip waardoor het schip bij invaren sneller afremt en bij uitvaren krachtiger schroefwerking verlangt. In de praktijkproef in de Stevinsluis onderzochten we de bijdrage tot deze verandering van de zoutmassa in de kolk. We vonden dat vooral uitvarende scheepvaart water uit de voorhaven naar de kolk brengt als gevolg van schroefwerking (en volumeverplaatsing schip), maar nog niet alles is hiervan bekend en er zijn in de Stevinsluis geen metingen aan verricht.

Uit onze waarnemingen concluderen we het volgende. Een naar het VZM uitvarend schip verhoogt de zoutmassa in de kolk: de kolk wordt zouter dan zonder schip (bij dezelfde opentijd van de deur). Een naar VZM uitvarend schip verhoogt eerst het zoutgehalte in de kolk. Als gevolg daarvan verloopt daarna (na het nivelleren tijdens de volgende schutting) de zout-zoet uitwisseling met de HD-voorhaven sneller met een zoutere kolk: een naar het VZM uitvarend schip versterkt hiermee indirect de zoutlek.

Omgekeerd een schip dat naar het HD uitvaart verlaagt de zoutmassa en het zoutgehalte in de kolk: de kolk wordt zoeter dan zonder schip (bij dezelfde opentijd van de deur). Een naar HD uitvarend schip levert meer zout naar de HD-voorhaven, dus vergroot de zoutlek. Deze bevindingen hebben we in het Zoutlekmodel verwerkt maar meer inzicht in details moet nog verkregen worden door laboratoriumproeven en mogelijke nadere analyse van de waarnemingen in de Stevinsluis. In Paragraaf 3.5 en verder bespreken we het Zoutlekmodel. In dit project trachtten we ook meer inzicht te verkrijgen door computersimulaties maar deze bleken niet voldoende betrouwbaar (Groeneboom, 2010).

3.3 Reductie van de zoutlek: zoutlekbeperkende middelen

3.3.1 Inleiding

In dit paragraaf bespreken we kort de door ons onderzochte mogelijkheden om de zoutlek te verminderen, voor details zie (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010). In eerder laboratoriumonderzoek (Roelfzema, 1977) werd een zoutvang onderzocht.

We splitsen de zoutbeperkende middelen op in twee categorieën. De eerste categorie zoutbeperkende middelen legt de basis voor de zoutlekreductie zonder extra watergebruik. Feitelijk remt deze groep ook het debiet van brak water naar de HD-voorhaven. De tweede categorie versterkt de remming van de zoutlek, maar gebruikt daar met opzet zoet water voor (tot een totaal maximum van 25 m³/s). Beide categorieën zijn ook in de Stevinsluis beproefd.

Tot de eerste categorie zoutlekbeperkende middelen, zonder extra watergebruik, horen:

- Luchtbellenscherm: vertraagt de zout-zoet uitwisseling;
- Drempel: vermindert de aandrijvende kracht van en vertraagt de zout-zoet uitwisseling.

Tot de tweede categorie van door ons beproefde zoutlekbeperkende middelen, die wél watergebruik vragen, horen:

- Waterschermen naast en in combinatie met luchtbellenschermen;
- De methode van lekkende ebdeuren.

Niet beproefd maar wel in dit rapport beschouwd is een spuidebiet vanuit het HD, of de voorhaven aan die zijde, naar het VZM, of de voorhaven aan die zijde, en het gebruik van een zoutvang in de HD-voorhaven (Figuur 2.3).

We overwogen geen constructieve aanpassingen van het vul- en ledigsysteem van de Volkeraksluizen omdat alternatieve systemen weliswaar de zoutlek verlagen maar ten koste van aanmerkelijk meer investering, realisatietijd en schuttijd.

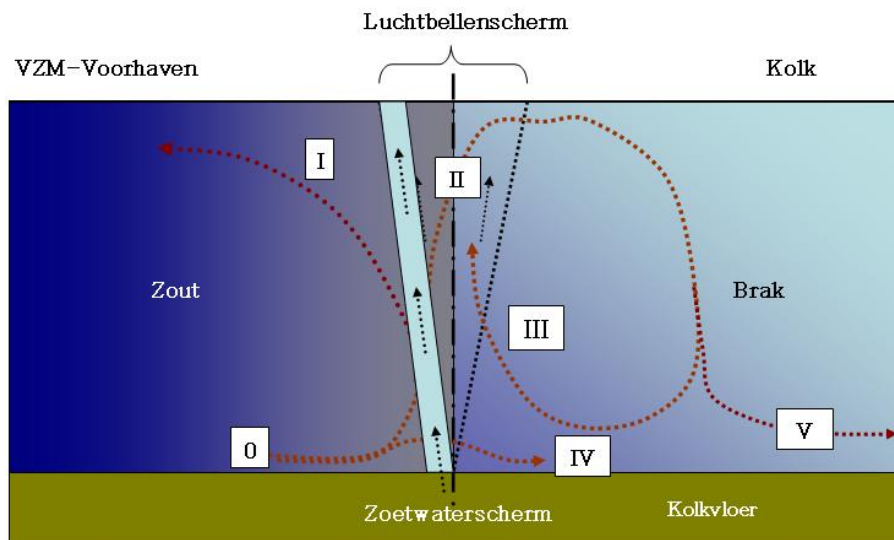
Vooruitlopend op onze analyses melden we hier dat de eerste categorie zoutlekbeperkende middelen nog onvoldoende helpt om aan de criteria te voldoen en het noodzakelijk blijkt te zijn om de tweede categorie in te zetten met een watergebruik van maximaal 25 m³/s.

Bij incidenteel geringer aanbod van scheepvaart zijn nog diverse mogelijkheden voor reductie van de zoutlek zoals het gebruiken van zg. deelkolken (voor zover aanwezig). Echter, we gaan uit van de maximale condities van scheepvaart zoals in 2020 verwacht met 20 schuttingen per kolk per dag. Hieruit bepalen we welke zoutlekbeperkende middelen nodig zijn om onder de maximale grenzen in zoutlek én watergebruik te blijven.

3.3.2 Luchtbellenschermen en waterschermen

Er zijn verschillende toepassingen met luchtinjectie zoals beluchters en mixers in de bereiding van drinkwater en het onderdrukken van de bloei van blauwalgen in meren. Het is daarom bijzonder dat luchtbellenschermen ook als horizontale scheider van zout-zoet kunnen werken. De verklaring daarvoor is complex.

Een compressor perst lucht door leidingen naar een luchtverdeler op de kolkvloer (de zog. teen van het luchtbellenscherm) die zo gelijkmatig verdeeld over de kolkbreedte luchtballen inblaast. De luchtballen stijgen op in water, verlagen lokaal het soortelijke gewicht van het water-lucht mengsel wat een opdrijvende kracht levert. Door de opdrijvende kracht ontstaat een omhoog gerichte straal die veel omgevingswater meesleept. Nabij de bodem stroomt omgevingswater het luchtbellenscherm in en nabij het wateroppervlak het luchtbellenscherm uit. Naar gelang de waterdiepte kan een bellenscherm al snel meer dan tienmaal het luchtdebiet aan water meeslepen. Het meegesleepte water dient dan niet meer als voeding van de zouttong, zie daartoe de uitleg van de vorming van een zouttong aan de hand van Figuur 3.2. In plaats daarvan ontstaat aan de zoute zijde een circulatiepatroon zoals bij symbool I in Figuur 3.6 aangegeven. Dit patroon neemt zoutwater nabij de bodem op (symbool 0) dat tot de zouttong zou gaan behoren, de zouttong krijgt minder voeding en zal daardoor langzamer de sluis in komen.



Figuur 3.6 Zoutlekbeperkende werking luchtbellenscherm ondersteund met een waterscherm (lichtblauwe band) op zout-zoet overgang (geopende sluisdeur) in verticale langsdoorsnede van een kolk. (I) Toestromend zout aangedreven door horizontale verschillen in zoutgehalten (II) Opwaarts transport van zout en retourstroming naar de zoute zijde. (III) Menging van zout water met kolkwater in het luchtbellenscherm waardoor transport van zout naar de kolk. (IV) Recirculatie van inkomend zout en aangedreven door het luchtbellenscherm. (V) Zout dat door de teen van het luchtbellenscherm dringt. (VI) De vorming van een zwak aangedreven zouttong (zie ook Figuur 3.1) door de beperkte levering van zout water en de menging met het zoetere kolkwater.

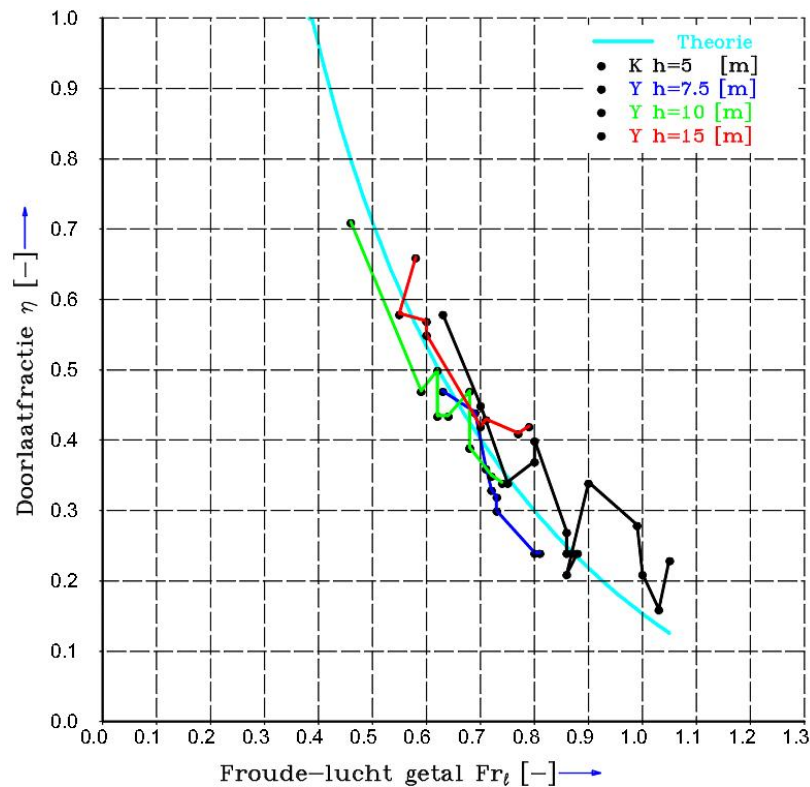
Via de teen (symbool IV in Figuur 3.6) begint het meeslepen van water terwijl daar het drukverschil door verschillend gewicht van de kolommen water het grootst is, zie ook de uitleg bij Figuur 3.2. De teen zal meestal zout water doorlaten en dat levert het zoutpad IV in Figuur 3.6.

Tevens zal een deel van het meegesleurde zoute water van de VZM-voorhaven via het luchtbellenscherm naar de kolk mengen, dit geeft het zoutpad bij symbool II. Het weliswaar minder zoute water dat door het luchtbellenscherm dringt is zwaarder dan het kolkwater en zakt uit. Tevens sleurt het luchtbellenscherm aan de kolkzijde brak water uit de kolk mee. Beide processen resulteren in het circulatiepatroon bij symbool III. Aan de kolkzijde van het luchtbellenscherm ontstaat een afgezwakte zout-zoet uitwisseling en de zouttong wordt gevoed volgens het zoutpad bij symbool V. De voeding van deze zouttong wordt bepaald door wat via de teen (symbool IV) én door menging via het luchtbellenscherm wordt doorgelaten (symbool II). De beperkte levering van zout via een luchtbellenscherm aan de VZM zijde en de menging door dat scherm begrenst de snelheid van zouttong zodat de zoutmassa in de kolk trager stijgt dan zonder luchtbellenscherm. Door het toepassen van een luchtbellenscherm aan de HD-zijde van de sluis zal de zoutmassa trager weglekken naar de HD-voorhaven en daarmee de zoutlek verder reduceren, voor details zie Figuur 1.1 in (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010).

Het tempo waarin zout via een luchtbellenscherm wordt doorgelaten blijkt een deel te zijn van wat een ongeremde zouttong aan kg/s zout zou leveren. We noemen deze fractie voortaan doorlaatfractie en we korten dit soms af met het Griekse symbool η (etta).

De techniek van zoet-zout scheiding met luchtbellenschermb is inmiddels klassiek en gebaseerd op het voor ons belangrijke werk van Dr.Ir. G. Abraham van Waterloopkundig Laboratorium en ir. P. v.d. Burgh van Rijkswaterstaat. Zij beproefden deze techniek zowel in het laboratorium als in diverse sluiskolken met kolkdiepten van 5 m tot 15 m maar niet in een werkende schutsluis d.w.z. zonder scheepvaart en zonder eventuele invloeden door het nivelleren van de kolken.

Abraham & V.d. Burgh (1962) bereikten toen doorlaatfracties tot zelfs ca. 0,15 hetgeen betekent dat slechts ca. 15% van de ongeremde zouttong werd doorgelaten. Onze recente laboratoriumproeven (Mastbergen, 2010) en computersimulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010) bevestigen deze lage doorlaatfracties.



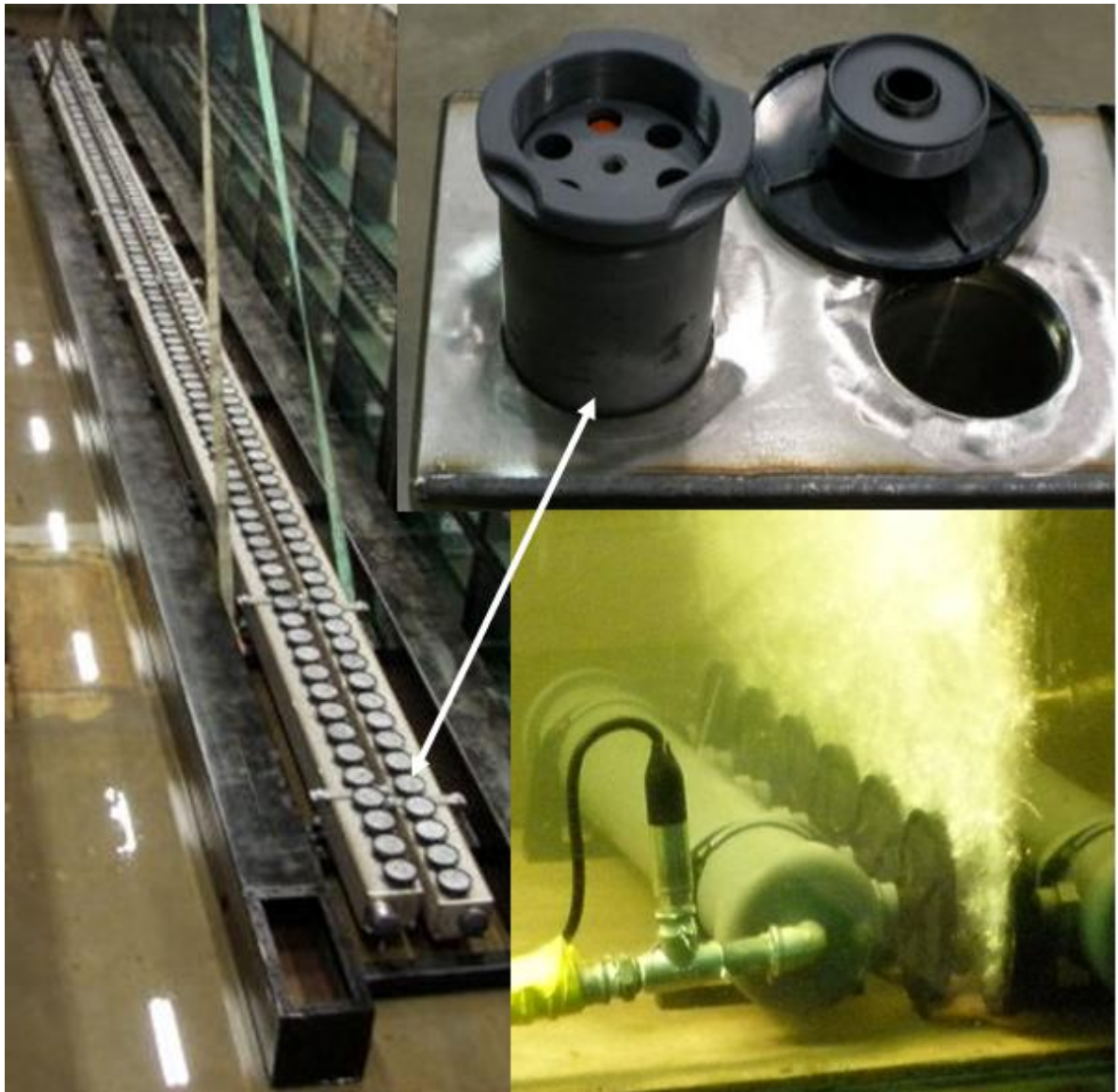
Figuur 3.7 Overzicht van in het verleden bereikte resultaten in de Lorentzschutsluis bij Kornwerderzand (K ; zwarte lijn) en in zeesluizen bij IJmuiden (Y; groene, blauwe en rode lijn). De lichtblauwe lijn is de rekenregel volgens (Abraham & V.d. Burgh, 1962). De metingen zijn verricht zonder scheepvaart en zonder nivelleren. (Het Froude-lucht getal is de verhouding tussen de verticale watersnelheid in het luchtbellenschermb en de horizontale snelheid van de zouttong).

In de studie van Abraham & V.d. Burgh (1962) wordt de doorlaatfractie met een combinatie van meting en theorie verklaard. Deze theorie maakt gebruik van de verhouding tussen de verticale snelheid waarmee het water-lucht mengsel opdrijft en de horizontale snelheid van de zouttong. Deze snelheidsverhouding noemen wij het Froude-lucht getal en soms korten we dit getal af met Fr_l met subscript l voor lucht. Figuur 3.7 toont de resultaten uit het

overzichtsartikel (Abraham, 1972) en gebaseerd op metingen in de Lorentzschutsluis bij Kornwerderzand (K) en in diverse (waaronder de grote) sluizen te IJmuiden (Y). De resultaten en de theoretische curve tonen goede overeenkomst om het Froude-lucht getal als primaire stuurgrootheid wel te vertrouwen. Anderzijds zien we in Figuur 3.7 afwijkingen, zoals de hoge doorlaatfracties in de diepste (15 m) zeesluis, die wijzen op andere secundaire stuurgrootheden.

In 1970-1987 bestonden luchtbellenschermen uit geperforeerde buizen die de lucht niet altijd gelijkmatig over de kolkbreedte verdeelden en in een biologisch actief marien milieu kunnen verstopen. Uit diverse mondelinge berichten en visuele waarnemingen blijkt dat de luchtbellenschermen uit geperforeerde buizen niet gelijkmatig de kolk over de gehele breedte afdichten. Zodoende ontstaan er gaten of zwakke plekken in de schermen die dan meer zout doorgelaten. Uit Figuur 2.4 en de toelichtende tekst in paragraaf 2.3.1 blijkt dat in 1970-1987 luchtbellenschermen in de Volkeraksluizen de zoutlek met ca. 50% verminderden.

Met deze ervaringen ontwierpen we luchtbellenschermen, zie Figuur 3.8, gebaseerd op diffusers en luchtventielen die een gelijkmatige luchtverdeling over de kolkbreedte garanderen. We gebruikten een dubbele rij met onderling versprongen diffusers die het luchtbellenscherm en in het bijzonder de teen zo ondoordringbaar mogelijk tegen zout maken, zie Figuur 3.9.



Figuur 3.8 Het Δ -luchtbellenscherm bestaande uit twee luchtkokers (zwart) met diffusers ("douchekoppen") op houders met luchtventielen (zie detailfoto rechtsboven). Kantelen van de balken zodat de diffusers horizontaal tegen elkaar in blazen (rechtsonder) geeft het meest ondoordringbare luchtbellenscherm.



Figuur 3.9 Δ -luchtbellenscherm (Figuur 3.8) met 400 Nl/s luchtdebiet aan de zeezijde van de Stevinsluis.

Behalve dit verbeterde ontwerp bedachten we dat de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm nog lager kan worden door een waterscherm naast het luchtbellenscherm aan te brengen. Figuur 3.6 toont het concept achter dit idee. Het water dat anders door het bellenscherm aangezogen moet worden wordt nu via het waterscherm en aan een zijde van het luchtbellenscherm aangeboden. De snelle uitstroming van het waterscherm voorkomt dat de luchtbelenstroom bij de teen met de zouttong meebuigt en het luchtbellenscherm ijler wordt en meer zout doorlaat. Het gehanteerde peilverschil van 0,5 m hoger in HD helpt de toevoer van zoet of verzilt water naar de waterschermen.

In zoutpad II (Figuur 3.6) wordt het luchtbellenscherm nu primair gevoed met zoet water uit het waterscherm in plaats van met zout water uit de VZM-voorhaven. Van belang is wel de juiste mengverhouding te vinden tussen de debieten van lucht en van zoet water. Deze uitbreiding van een luchtbellenscherm vergt een watergebruik hoewel er brak water uit een zoutvang kan worden gebruikt.

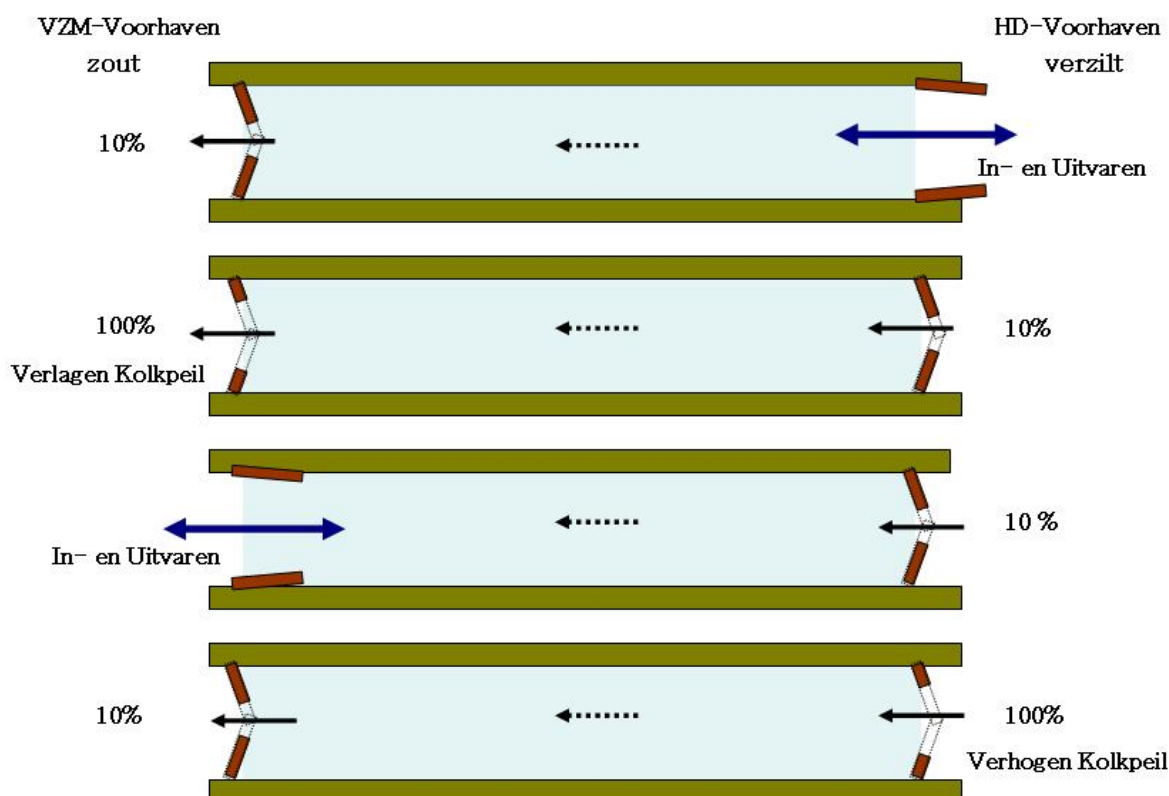
Een voldoende hoge drempel naast een luchtbellenscherm zou de beschermende functie van een waterscherm kunnen vervangen, zonder watergebruik. De menging van zout en zoet volgens pad II blijft dan wel intact. Hierdoor zou een luchtbellenscherm ondersteund met een drempel méér zout kunnen doorlaten dan ondersteund met een waterscherm. Echter, onze analyses van experimenten in de Stevinsluis met luchtbellenschermen ondersteund door een 1,2 m hoge drempel óf door een waterscherm leveren inderdaad lagere maar onderling weinig verschillende doorlaatfracties. Met andere woorden: voldoende hoge drempels kunnen waterschermen vervangen in hun functie de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm te verlagen.

Een wezenlijk deel van ons onderzoek in de Stevinsluis was gericht op het bepalen van de doorlaatfractie van door ons verbeterde luchtbellenschermen bij verschillende luchtdebieten en gecombineerd met andere zoutlekbeperkende middelen. Tijdens onze metingen passeerden schepen en er werd geschut waarbij de kolk gelegegd en gevuld werd, naar gelang het getij in de Waddenzee.

Het onderzoek naar de doorlaatfractie vormt de kern van onze praktijkproef in de Stevinsluis te Den Oever. De Stevinsluis is gelegen in het meest westelijke deel van de Afsluitdijk. Door spuien via de naast gelegen spuisluizen in de Afsluitdijk varieerde het zoutgehalte in de zoute, noordelijke voorhavens aanmerkelijk. Deze variaties in zoutgehalte en in verschillen waterstanden, groter dan bij de Volkeraksluizen, bieden robuuste conclusies o.a. over de doorlaatfractie die we in Hoofdstuk 4 zullen herhalen n.a.v. de studie (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010).

3.3.3 Lekkende ebdeuren

In de Volkeraksluizen is destijds ook de methode van lekkende ebdeuren toegepast. Uit (Roelfzema, 1977) lezen we dat er minder continue een watergebruik door de kolken stroomde dan wij hierna voorstellen en in de Stevinsluis beproefden.



Figuur 3.10 Bij onze methode van lekkende ebdeuren is er altijd een stroming van het HD door de kolken (gestippelde pijlen) naar het VZM. Dit watergebruik brengt zout uit de kolken terug naar het VZM. De percentages zijn de fractie van opening (kierstand) van de rinkschuiven in de zg. ebdeuren.

Figuur 3.10 toont ons concept voor de methode van lekkende ebdeuren. De waterstand in het HD is hoger dan in het VZM zodat de zg. ebdeuren worden gebruikt. Dit paar sluisdeuren zwaait naar het HD open en sluiten tegen elkaar in een puntvorm zoals getoond. De sluisdeuren van de Volkeraksluizen en ook van de Stevinsluis bezitten zg. rinketschuiven. Dit zijn schuiven die in de deuren zijn gemonteerd en in een verticale sponning bewegen. Een stang trekt de schuiven open of duwt ze dicht. In principe kan deze beweging tussentijds worden onderbroken zodat de schuiven gedeeltelijk geopend blijven. In dit rapport zullen we deze tussenstand kierstand noemen of beperkte schuifopening uitgedrukt in % van de totale opening (100%) van de rinketschuiven.

Met de rinketschuiven wordt een kolk genivelleerd d.w.z. het kolkpeil wordt aan het peil van een voorhaven aangepast zodat daarna de sluisdeuren geopend kunnen worden.

Ons concept van de methode van lekkende ebdeuren luidt dat bij hoge waterstand aan de HD-zijde de rinketschuiven in gesloten ebdeuren op een kierstand staan. Aan de andere zijde zijn de rinketschuiven volledig geopend óf staan de sluisdeuren open. Figuur 3.10 illustreert dit concept met een kierstand van b.v. 10% van het maximale doorstroomoppervlak van de rinketschuiven. Bij een kierstand van 10% stroomt dan ruwweg 10% van het debiet door de kolk dat tijdens nivelleren optreedt. Door de lek van kolkwater neemt de tijd voor nivelleren ruwweg evenredig met een kleine kierstand toe, dus 10% meer niveleertijd bij 10% kierstand. Onze ervaringen in de Stevinsluis leert dat voor grote kierstanden van 30% of meer de niveleertijden aanmerkelijk groter worden en het verval over de te openen deuren mogelijk groter dan toelaatbaar voor bediening kunnen worden.

Tussen uit- en invaren naar de HD-zijde en daarna naar de VZM-zijde moet het kolkpeil aan het peil in de VZM-voorhaven worden aangepast. Dan worden de rinketschuiven aan VZM-zijde volledig geopend (100% in Figuur 3.10). Omgekeerd, als voorbereiding op het uit- en invaren aan de HD-zijde, worden de rinketschuiven naar de HD-voorhaven volledig geopend. Tijdens het uit- en invaren blijven de rinketschuiven aan het gesloten kolkeinde op hun kierstand staan.

Op deze wijze is er altijd een watergebruik door de kolk die het zout uit de kolk naar het VZM terug brengt, het zoutgehalte in de VZM-voorhaven verlaagt én de kolk zoeter maakt. Al deze processen bleken in het verleden en opnieuw in de Stevinsluis effectief de zoutlek te beperken maar ten koste van een watergebruik. De methode van lekkende ebdeuren levert een marginale stroming door de kolk (stippellijn in Figuur 3.10). Deze stroomsnelheid is aanmerkelijk kleiner dan tijdens het nivelleren en tijdens de zoet-zout uitwisseling. In Hoofdstuk 4 geven we getalsmatige voorbeelden.

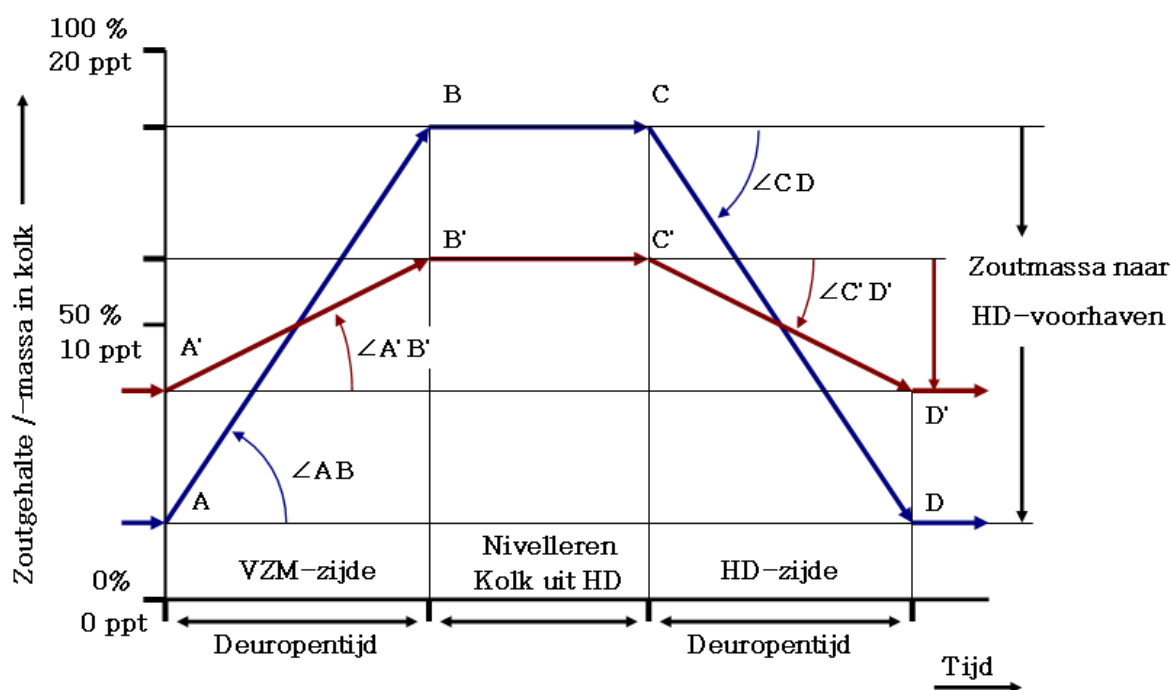
3.4 De hartslag van een schutsluis: methode van analyse

Tot nu toe beschreven we in dit hoofdstuk het zouttransport in diverse stadia van schutten en gehinderd door diverse zoutlekbeperkende middelen. In deze paragraaf introduceren we onze methode van analyse om de werking van zoutlekbeperkende middelen vast te stellen. Aansluitend en als voorbeeld presenteren we een schatting voor de sterke reductie van de zoutlek door o.a. luchtbellschermen.

We leiden veel af uit de registratie van de "hartslag" van de schutsluis nl. hoeveel zoutmassa de kolk verpompt door inname en afgifte gedurende een schutcyclus, bestaande uit twee

opeenvolgende schuttingen. We leggen later uit op welke wijze we in de Stevinssluis de zoutmassa in de kolk en de zoutgehalten in de voorhavens hebben gemeten. Hier volstaat de melding dat langs de kolk lengte in vijf verticalen en op vijf verschillende diepte het zoutgehalte is gemeten waaruit de zoutmassa wordt geschat. Tevens maten we het zoutgehalte in elke voorhaven met vijf zoutopnemers verdeeld over de lokale diepte, dicht bij de sluisdeuren en dicht bij de vaargeul naar de kolk.

Figuur 3.11 is een vereenvoudigd voorbeeld van wat er tijdens een schutting met de zoutmassa gebeurt en onze methode van analyse. Op de verticale as staat het volume-gemiddelde zoutgehalte van de kolk dat voor de Volkeraksluizen tussen 0 en 20 ppt zal liggen. Het volume-gemiddelde zoutgehalte vermenigvuldigd met het kolkvolume geeft de zoutmassa in de kolk. Deze zoutmassa drukken we hier uit in een 0 - 100% vullingsgraad met zout water uit het VZM. Horizontaal is de tijd uitgezet en gerekend vanaf het moment dat de sluisdeuren naar het VZM openen.



Figuur 3.11 Zoutmassa naar HD-voorhaven. Schuttingen zonder (blauwe lijnen ABCD) en met gelijkwerkende luchtbellenschermen (bruine lijnen A'B'C'D') aan beide kolkeinden. Met luchtbellenschermen verloopt de toename (A'B') en afname (C'D') van de zoutmassa in de kolk trager en daardoor de variatie in zoutmassa in de kolk: de levering van zout naar de HD-voorhaven is kleiner, vergelijk C'D' met CD.

Gedurende de deuropentijd van een schutting naar het VZM verloopt de zout-zoet uitwisseling (zie ook Figuur 3.3) en neemt de zoutmassa toe van A naar B. Zonder zoutlekbepurende middelen (blauwe lijnen) wisselt een bijna zoete kolk (A) snel zijn inhoud uit met het zoute water uit de VZM-voorhaven. Bij gegeven kolkafmetingen hangt de toename van de zoutmassa in de kolk af van het initiële verschil in zout tussen kolk en VZM-voorhaven én van de deuropentijd. De toename van de zoutmassa is in Figuur 3.11 af te lezen als de hellingshoek van de lijn A-B welke we aangeven met $\angle AB$; het symbool \angle betekent hoek.

Des te groter hoek $\angle AB$ des te sneller neemt de zoutmassa in de kolk toe. En des te groter hoek $\angle CD$ des te sneller daalt zoutmassa. Het verschil in zoutgehalte in de VZM-voorhaven (bijna 20 ppt) en het initiële zoutgehalte (bij A) in de kolk bepaalt de aandrijvende kracht van de zout-zoet uitwisseling.

Afhankelijk van het peilverschil wordt tijdens nivelleren (periode B-C) zoet of verzilt water uit de HD-voorhaven ingelaten: de zoutmassa verandert niet maar het zoutgehalte vermindert. De horizontale lijn BC in Figuur 3.11 betreft nu alleen de zoutmassa. Bij 0,5 m hoger peil in het HD verandert het zoutgehalte in de kolk met slechts 7,5% tijdens het nivelleren.

Daarna (vanaf C) openen de sluisdeuren naar de HD-voorhaven. De zoutmassa in de kolk neemt af door de zout-zoet uitwisseling met de HD-voorhaven, zoals besproken met Figuur 3.4. De afname van de zoutmassa in de kolk (blauwe lijn C-D) verloopt zonder zoutlekbeperkende middelen keer-symmetrisch (+ wordt -) gelijk met de toename (blauwe lijn A-B). De grootte van de hellingshoek $\angle CD$ voor de afname van de zoutmassa wordt nu bepaald door het verschil tussen het gemiddelde zoutgehalte in de kolk en in de HD-voorhaven.

Diverse zoutlekbeperkende middelen zoals luchtbellenschermen, waterschermen en/of drempels vertragen de zout-zoet uitwisseling door de sluisdeuren waar ze zijn ingezet. In de navolgende bespreking worden geen andere middelen ingezet om de zoutmassa eventueel terug te voeren naar de VZM-zijde.

Luchtbellenschermen, waterschermen en/of drempels vertragen de toename en/of de afname van de zoutmassa in de kolk. In Figuur 3.11 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 VZM en het HD fluctueren. Bij kortere deuropentijden, en gelijk aan beide kolkeinden, worden de fluctuaties rond 10 ppt kleiner.

De geringere variatie in volume-gemiddeld zoutgehalte van de kolk levert een geringere aandrijvende kracht op voor de zoet-zout 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 HD-voorhaven minder zoutmassa dan zonder zoutlekbeperkende middelen: vergelijk het verlies in zoutmassa over het traject C'D' met het verlies tijdens het traject CD, rechts in Figuur 3.11 aangegeven.

Wat meer getalsmatig kunnen we uit deze hartslag al veel afleiden over de bijzonder goede zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen. We beschouwen daartoe twee extreme situaties nl. de maximale situatie met de grootste zoutlek en de ideale situatie met de kleinste zoutlek.

In de niet te bereiken limiet van gelijke en verdwijnende doorlaatfracties aan beide kolkeinden blijft het zoutgehalte in de kolk 10 ppt. We noemen dit de ideale situatie die alleen te benaderen is met uitstekende werkende luchtbellenschermen, waterschermen en/of drempels. In de ideale situatie bedraagt het verschil in zoutgehalte tussen kolk en zoete of zoute voorhavens 10 ppt. Dit verschil van 10 ppt zoutgehalte drijft de zout-zoet uitwisseling aan. De snelheid van de zouttong is evenredig met de wortel uit het verschil in zoutgehalte.

En het zoutgehalte van het water in de uittredende zouttong tijdens schutten naar het HD bepaalt, samen met de snelheid van de zouttong en deuropentijd, de zoutmassa die in de HD-voorhaven komt.

In het andere en helaas wél beter te bereiken uiterste is de kolk óf zuiver zoet (0 ppt) of zout (20 ppt). We noemen dit de maximale situatie d.w.z. maximaal in termen van zoutlek. In de maximale situatie is tijdens schutten het verschil in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven maximaal 20 ppt, dus tweemaal zo groot als in de ideale situatie. We nemen aan dat in de maximale situatie de deuropentijd zo lang is dat de kolk juist volledig is uitgewisseld en niet (nog) langer open staat.

Ten opzichte van de maximale situatie bevat de zouttong in de ideale situatie water met het halve verschil in zoutgehalte (van 20 naar 10 ppt). Ten opzichte van de maximale situatie reist in de ideale situatie de zouttong met de wortel uit deze helft (ca. 0,71) trager door de kolk. Hieruit volgt dat in de ideale situatie de verandering van de zoutmassa in de kolk ca. 35% (de helft van 0,71) bedraagt van die in de maximale situatie.

De ideale situatie wordt benaderd door het zouttransport tijdens zout-zoet uitwisseling sterk te beperken door b.v. luchtbellenschermen. Het bijzondere van Figuur 3.7 is dat de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm is gebaseerd op verandering van de zoutmassa onder omstandigheden die het luchtbellenscherm in de loop van vele schuttingen zélf in de kolk creëerde. Er is dus sprake van het volgende meekopeffect:

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

Met andere woorden, het hierboven genoemde minimum van 35% wordt verder beperkt met een fractie gelijk aan de doorlaatfractie van de luchtbellenschermen. Volgens de metingen in het verleden (Figuur 3.7) kan onder gunstige condities de doorlaatfractie 0,25-0,30 bedragen. De zoutlek wordt dan minimaal ca. 10% (0,25 - 0,30 van 35%) van de maximale situatie maar alleen wanneer de luchtbellenschermen de ideale situatie weten te creëren.

We zien uit dit rekenvoorbeeld dat het zeer de moeite loont de doorlaatfractie van luchtbellenschermen zo laag mogelijk te maken. Luchtbellenschermen met lage doorlaatfractie zullen ons uitgangspunt zijn voor het beperken van de zoutlek door de Volkeraksluizen. We zullen vervolgens aantonen dat diverse andere zoutlekbeperkende middelen óf inzetbaar zijn óf effectiever werken bij gegeven maximum in watergebruik.

Tevens concluderen we dat uit de tijdsregistratie van de zoutmassa in de kolk, zoals schematisch getoond in Figuur 3.11, veel informatie kan worden verkregen of herleid over de doorlaatfractie van o.a. de luchtbellenschermen en over de zoutlek naar de zoete voorhaven.

Door andere processen in een werkende schutsluis wordt het schematische beeld van Figuur 3.11 complexer waarvoor een rekenmodel nodig is. In de volgende paragraaf introduceren we een geschikt rekenmodel.

3.5 Het Zoutlekmodel

3.5.1 Het nut van het Zoutlekmodel

Hoewel het principe van de hartslag van een schutsluis, de zout-zoet uitwisseling, relatief eenvoudig lijkt (Figuur 3.11) is de combinatie met luchtbellenscherm, waterscherm, drempel, nivellieren, scheepvaart, voorhavens, eventuele zoutvang en de methode van lekkende ebdeuren complex. Om al deze invloedsfactoren voor de schatting van de zoutlek door de Volkeraksluizen mee te nemen ontwierpen we het Zoutlekmodel.

Een wezenlijk deel van ons onderzoek in de praktijkproef in de Stevinsluis was gericht op het toetsen van de bouwstenen van het Zoutlekmodel zoals:

- De zout-zoet uitwisseling;
- De doorlaatfractie van luchtbellenschermen, waterscherm en/of drempels;
- De verandering in zoutgehalte in de kolk tijdens de methode van lekkende ebdeuren en
- De verandering in zoutmassa door passage van schepen.

Pas dan kunnen we op een Zoutlekmodel vertrouwen en de zoutlek door de Volkeraksluizen berekenen bij variatie in eigenschappen en met combinaties van zoutlekbeperkende middelen. Het onderzoek in de Stevinsluis geeft dit vertrouwen, zie verder (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010).

Het Zoutlekmodel (Uittenbogaard, 2010) berekent de zoutlek gemiddeld over veel gelijke schuttingen. Met dit Zoutlekmodel zullen we in Hoofdstuk 5 onze analyses maken.

In de praktijk blijkt het onmogelijk om dezelfde schutcyclus exact te herhalen met slechts één van de samenstellende bouwstenen uitgeschakeld of gewijzigd. Dergelijk gevoeligheidsonderzoek kan alleen met een Zoutlekmodel waarbij eerst is getoetst dat de bouwstenen van het model voldoende nauwkeurig de werkelijkheid weergeven.

De volgende paragraaf beschrijft de inhoud van het Zoutlekmodel. In de hierop volgende paragraaf 3.5.3 illustreren we e.e.a. met het verloop in de tijd van het zouttransport door de Volkeraksluizen.

3.5.2 De basis van het Zoutlekmodel

We bespreken nu kort de concepten van het Zoutlekmodel, zie (Uittenbogaard, 2010) voor de details en de wiskundige uitwerking.

Het Zoutlekmodel beschouwt een reeks gelijke en opeenvolgende schuttingen, eerst naar het VZM, de volgende naar het HD en dan weer terug naar het VZM 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. De zoutlek is de zoutmassa per tijdseenheid (kg/s) die de monding van de HD-voorhaven naar het HD verlaat.

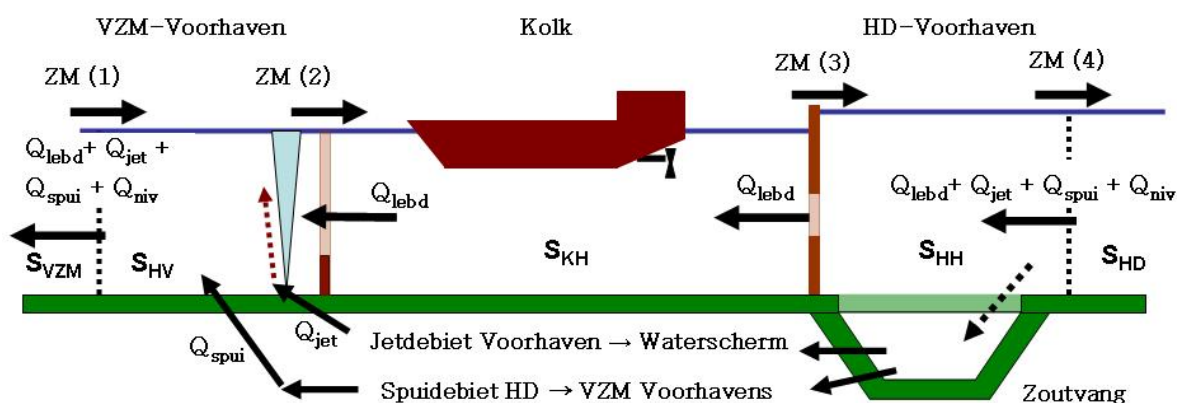
Figuur 3.12 toont één van de twee schuttingen waarmee het Zoutlekmodel rekent, hier de schutting naar het VZM. Figuur 3.13 toont de andere schutting naar het HD.

De mondingen van de voorhavens zijn aangegeven met verticale stippellijnen. Overigens, de volumina van de voorhavens zijn vele malen groter dan van de kolken maar deze figuren zijn niet op schaal en schematisch bedoeld. Bruine verticale balken geven de positie van de sluisdeuren. De bruine balken zijn lichter gekleurd bij opening of ten dele licht gekleurd wanneer de rinketschuiven in de sluisdeuren geopend zijn. Een drempel is 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 HD-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 HD-voorhavens. Dit spuidebiet wordt geloosd in de VZM-voorhavens. Dit spuidebiet kan onafhankelijk van de schuttingen worden toegepast.

Verder rekent het Zoutlekmodel met het waterdebiet Q_{lebd} voor de methode van lekkende ebduren. Het daggemiddelde schutverlies of waterdebiet voor nivelleren Q_{niv} is in Figuur 3.12 aangegeven. De som van al deze debieten is links en rechts in Figuur 3.12 en 3.13 opgeteld en vormt het (daggemiddelde) watergebruik.



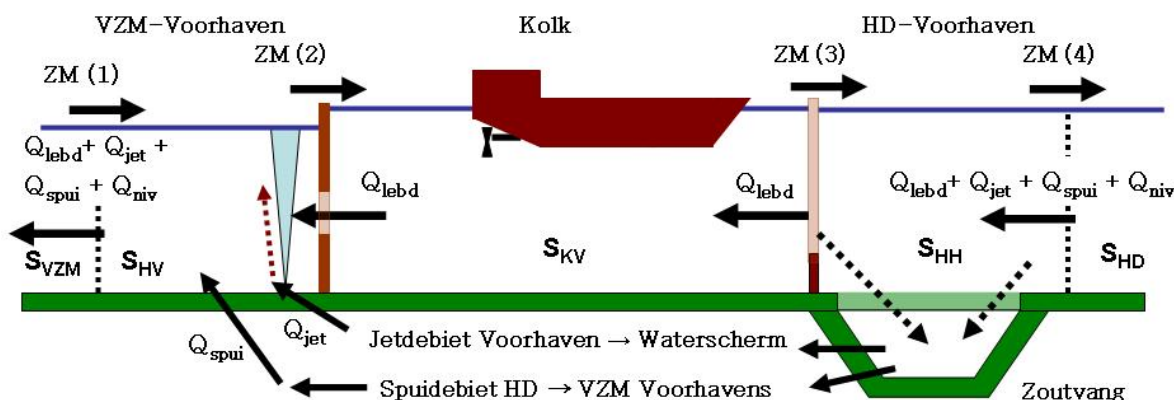
Figuur 3.12 Concepten Zoutlekmodel. Schutting naar VZM-voorhaven, zie hoofdstek voor uitleg van symbolen en processen.

Het zoutgehalte in het VZM is in Figuur 3.12 afgekort tot S_{VZM} en is bekend; in deze figuren hanteren we hoofdletter S voor saliniteit. Tevens is het zoutgehalte in het HD bekend en in de figuren afgekort tot S_{HD} .

Onbekend zijn de diepte-gemiddelden zoutgehalten in de VZM-voorhaven (S_{HV}) en in de HD-voorhaven (S_{HH}). Op het moment van schutten naar het VZM heeft de kolk het volume-gemiddelde zoutgehalte S_{KH} dat wordt bepaald door de voorafgaande deuropensituatie met het HD. Omgekeerd, op het moment van schutten naar het HD, heeft de kolk het volume-

gemiddelde zoutgehalte S_{KV} na de voorafgaande deuropensituatie met het VZM. Deze variaties in zoutgehalte in de kolk bespreken we aan de hand van Figuur 3.11.

De zout-zoet uitwisselingen zoals gegeven in Figuur 3.11 verbinden de deuropensituatie met het VZM (Figuur 3.12) met die met het HD (Figuur 3.13). 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 d.w.z. niet alleen tijdens geopende sluisdeuren.



Figuur 3.13 Concepten Zoutlekmodel. Schutting naar HD-voorhaven, zie hoofdstekst voor uitleg van symbolen en processen.

De debieten water in m^3/s en zout in kg/s worden o.a. bepaald door de zout-zoet uitwisseling, het nivellieren, door scheepvaart, via lekkende ebdeuren en de tijdelijke opvang van kolkwater in een zoutvang (zie zwarte stippellijn met pijl in Figuur 3.13).

De zouttransporten ZM(1) t/m ZM(4) in Figuur 3.12 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 worden uitgedrukt. Al deze onbekende zoutgehalten en debieten kunnen worden opgelost 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; dit is de wet van behoud van massa.

Het Zoutlekmodel berekent tenslotte de zoutmassa per tijdseenheid door de monding van de HD-voorhaven naar het HD en dat is de zoutlek, in Figuur 3.12 en 3.13 als ZM(4) aangeduid. Hierbij wordt de werking van de jachtensluis met de overige drie beroepssluisen meegewogen.

Het voorgaand kan abstract overkomen. Daarom ter ondersteuning en ter illustratie presenteert de volgende paragraaf het verloop in de tijd van het zouttransport door de Volkeraksluizen. Tevens wordt inzicht geboden in de operationele handelingen van de sluismeester en de bezetting van deze schutsluizen.

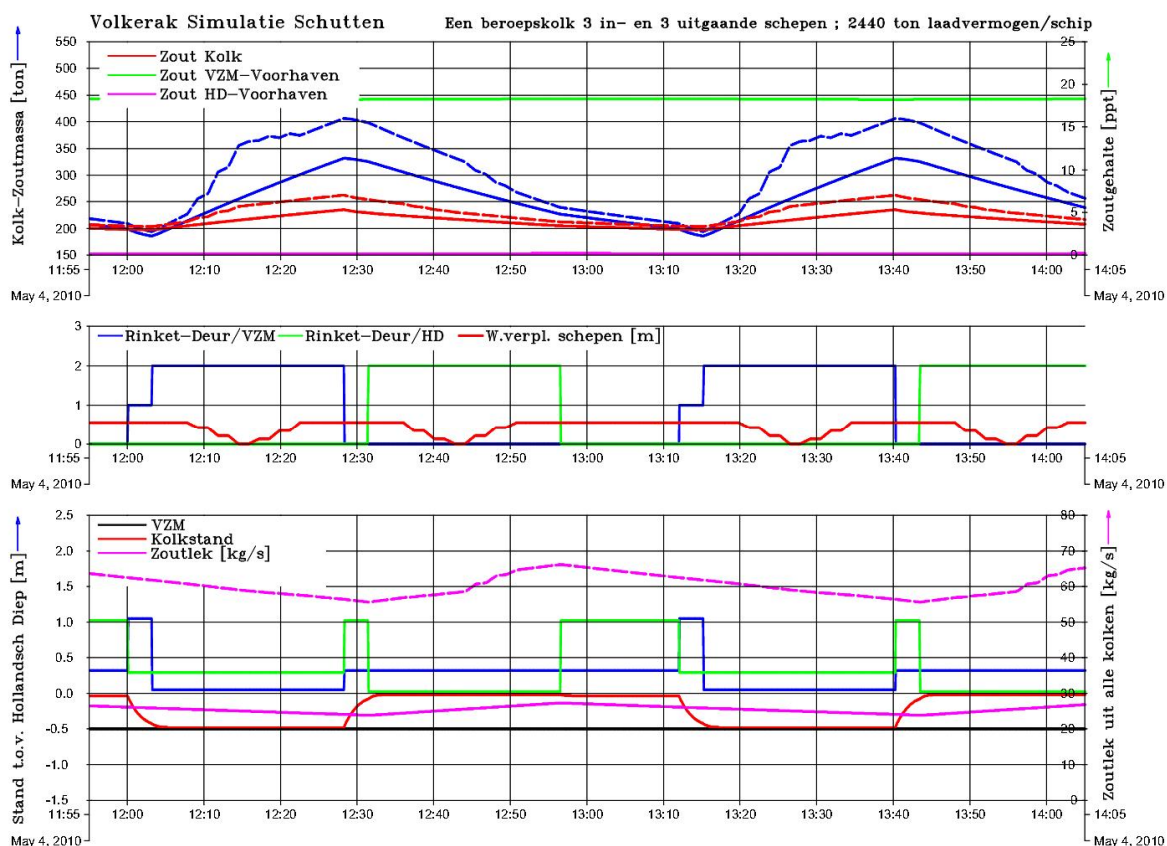
3.5.3 Een illustratie van zouttransport door de Volkeraksluizen

Als demonstratie van de inhoud van het Zoutlekmodel illustreren we hoe de hartslag van een beroepskolk er in de toekomstige praktijk van de Volkeraksluizen eruit zou kunnen zien. We illustreren dit met een dynamische versie van het Zoutlekmodel waarbij in de tijd de zoutmassa in de kolk wordt gevolgd. De dynamische versie is meer rekenintensief dan het originele en gevalideerde Zoutlekmodel uit paragraaf 3.5.2 dat alleen de zoutlek als gemiddelde over veel gelijke schuttingen berekent. Door een deel van het bedieningsprotocol over te nemen besluit de dynamische versie op basis van berekende peilverschillen de momenten waarop sluisdeuren geopend kunnen worden.

Aan de hand van Figuur 3.14 en 3.15 illustreren we op welke wijze een samenstel van processen in de Volkeraksluizen in volgorde en in de tijd zullen verlopen. We gaan uit van een peil in het VZM 0,5 m onder het HD, het VZM is 20 ppt zout en het HD is zoet.

In Hoofdstuk 2 bespraken we dat volgens de prognose van RWS voor 2020 er per kolk 2,6 schepen van elk 2440 ton laadvermogen geschut worden. We kiezen hier voor twee gelijke schepen met elk 2440 ton laadvermogen waarvan gemiddeld 72% waterverplaatsing; het 3^e schip heeft 60% van 2440 ton laadvermogen. Uitgesmeerd over het kolkoppervlak bedraagt de waterverplaatsing van het 1^e en 2^e schip dan 0,21 m en 0,13 m voor het 3^e schip. De drie schepen verlaten na elkaar de kolk naar het VZM zodat de totale waterverplaatsing stapsgewijs met 0,21 m per 2440 ton afneemt van totaal 0,55 m tot geen waterverplaatsing.

Even laten varen deze schepen vanuit het VZM de kolk in, de totale waterverplaatsing stijgt nu van nul naar 0,55 m. Daarna wordt er genivelleerd en het kolkpeil stijgt 0,5 m naar het peil in het HD. Vervolgens verlaten drie schepen de kolk naar het HD. Even later en na elkaar varen twee schepen met 2440 ton laadvermogen en een derde met 60% van 2440 ton de kolk in vanuit het HD. Dit patroon herhalen we de hele dag met een ritme van 20 schuttingen per dag en per kolk.



Figuur 3.14 Volgorde van processen in één beroepskolk met de totale zoutlek (paarse lijnen in onderste figuurdeel) van alle Volkeraksluizen. De zwarte lijn is het peil in het VZM to.v. het HD. In de centrale grafiek heeft de blauwe lijnde waarde 1 voor het volledig openen van de rinketschuiven en de waarde 2 voor geopende sluisdeuren, idem de groene lijn voor openen schuiven en deuren aan HD-zijde. In de onderste grafiek geeft de groene lijn de kierstand van 0 tot 1 van de rinketschuiven aan de HD-zijde, de blauwe lijn voor de schuiven aan VZM-zijde. Met lekkende ebdeuren zijn de rinketschuiven aan één zijde volledig geopend en aan de andere zijde op een kierstand. Om ca. 12:55 sluiten de sluisdeuren aan HD-zijde maar blijven hun rinketschuiven volledig geopend terwijl de scheepvaart in de kolk afmeert. Het zoutgehalte in de kolk neemt in deze periode daarom verder af. Gestippelde lijnen met en getrokken lijnen zonder scheepvaart. Doorlaatfractie 0,25 beide kolkeinden met de methode van lekkende ebdeuren zonder verhoogde drempels.

Verder passen we toe luchtbellenschermen die een doorlaatfractie van 0,25 leveren aan beide kolkeinden. Daarnaast hanteren we de methode van lekkende ebdeuren met de rinketschuiven op kierstand, zie ook Figuur 3.10 en zijn toelichting.

We veronderstellen 20 schutcycli gelijkmatig verdeeld over 24 uur. De deuropentijd is 25 minuten en de wachttijd in de kolk voor nivelleren en omschakelen naar de andere sluisdeuren stellen we op 3 minuten. Een schutcyclus, bestaande uit één schutting naar HD en daarna een schutting naar het VZM, duurt zodoende ca. 56 minuten.

We simuleren ook het vullen van de kolk met water uit de HD-voorhaven reps. de VZM-voorhaven. We gebruiken daarvoor de eigenschappen van de rinketschuiven van de

Volkeraksluizen. Tevens berekenen we de berging van water en van zout in de voorhavens. Maar ook het waterdebiet en de zoutlek door de monding van de voorhavens.

We berekenen de waterstand in de kolk die mede bepaald wordt de kierstand van de rinketschuiven. Als de rinketschuiven aan VZM-zijde volledig geopend zijn krijgt de blauwe lijn in de centrale deel van Figuur 3.14 de waarde "1" en als de sluisdeuren open staan waarde "2". Dezelfde afspraken gelden voor de stand van rinketschuiven en sluisdeuren aan HD-zijde, aangegeven met de groene lijn.

Wanneer het peilverschil over de gesloten sluisdeuren kleiner is dan 8 cm (onze keuze) worden deze geopend en vindt de resterende nivellering plaats terwijl de deuren open zwaaien. De rode lijn in het onderste deel van Figuur 3.14 toont het peil in de kolk dat tussen VZM (hier -0,5 m) en HD verloopt en tussentijds afwijkt tijdens nivelleren of door het verval van het debiet veroorzaakt door de methode van lekkende ebdeuren.

De kierstanden van de rinketschuiven in de sluisdeuren aan VZM-zijde en HD-zijde zijn in de onderste deel van Figuur 3.14 gegeven met resp. de blauwe en de groene lijnen. De kierstanden (linker maatlijn) krijgen de waarde "0" voor gesloten of bij geopende sluisdeuren, "1" voor volledige opening en tussenliggende waarden voor een kierstand. Voor leesbaarheid zijn de lijnen onderling verticaal wat verschoven.

Onder omstandigheden dat de kolk nóch open staat nóch genivelleerd wordt kiezen we voor volledig geopende rinketschuiven aan de zoete HD-zijde. Aan de andere VZM-zijde staan de rinketschuiven op een kierstand. Deze keuze geeft een peil in de kolk die bijna gelijk is aan het HD-peil. Er is nu geen tijd nodig voor nivelleren van de kolk met het peil in de HD-voorhaven wat zichtbaar is in het ontbreken van de stap "1" (nivelleren) in de groene lijn in de centrale deel van de Figuur 3.14: de sluisdeuren naar het HD kunnen meteen geopend worden.

Vervolgens wordt enkele minuten gewacht waarin het eerste schip zijn trossen losmaakt en op gang komt. Daarna vaart het eerste schip van de drie schepen de kolk uit. De rode lijn in de centrale deel van Figuur 3.14 toont de totale waterverplaatsing van de schepen. Door uitvaren daalt de totale waterverplaatsing van de schepen in de kolk van 0,55 m tot nul en neemt vervolgens weer tot 0,55 m toe door drie invarende schepen.

Het resultaat is het verloop van de zoutmassa in de kolk volgens de gestippelde blauwe lijn in het bovenste deel van Figuur 3.14. De linker maatlijn geeft de zoutmassa en deze verandert per kolk met 150 - 200 ton. Het bovenste figuurdeel van Figuur 3.14 heeft betrekking op één beroepskolk. De getrokken blauwe lijn toont hoe de zoutmassa in één beroepskolk zou verlopen zónder scheepvaart. Het verschil tussen deze curven toont dat de schepen hier relatief veel bijdragen tot de zout-zoet uitwisseling. De oorzaak voor deze relatief grote rol van scheepvaart op de zoutmassa is dat de zout-zoet uitwisseling sterk is beperkt door de geringe doorlaatfracties van 0,25 én de toepassing van de methode van lekkende ebdeuren in Figuur 3.14.

Figuur 3.11 toont het symmetrische patroon van vullen en ledigen van de kolk met zout. De getrokken blauwe lijn in Figuur 3.14, zonder scheepvaart, wijkt van dit symmetrische patroon af omdat de kolk wordt doorstroomd met zoet water uit de HD-voorhaven. Vooral op momenten dat de sluisdeuren zijn gesloten en er niet naar het VZM wordt genivelleerd is in

Figuur 3.14 zichtbaar dat het zoutgehalte en de zoutmassa in de kolk daalt. Deze afname in zoutmassa komt doordat de kolk bij onze methode van lekkende ebdeuren voortdurend met zoet of verzilt water uit de HD-voorhaven wordt ververst.

Bij de gekozen kierstand veroorzaakt de methode van lekkende ebdeuren een volume-gemiddelde zoutgehalte in de kolk kleiner dan 10 ppt, zie de rode lijnen in de bovenste deel van Figuur 3.14 met de rechter maatlijn in ppt. De groene lijn in het bovenste deel van Figuur 3.14 is het zoutgehalte van de VZM-voorhaven welk nu onder 20 ppt ligt. De reductie in zoutgehalte in de VZM-voorhaven komt door het nivelleren met zoet water uit het HD én door het zoetwaterdebiet bij de methode van lekkende ebdeuren.

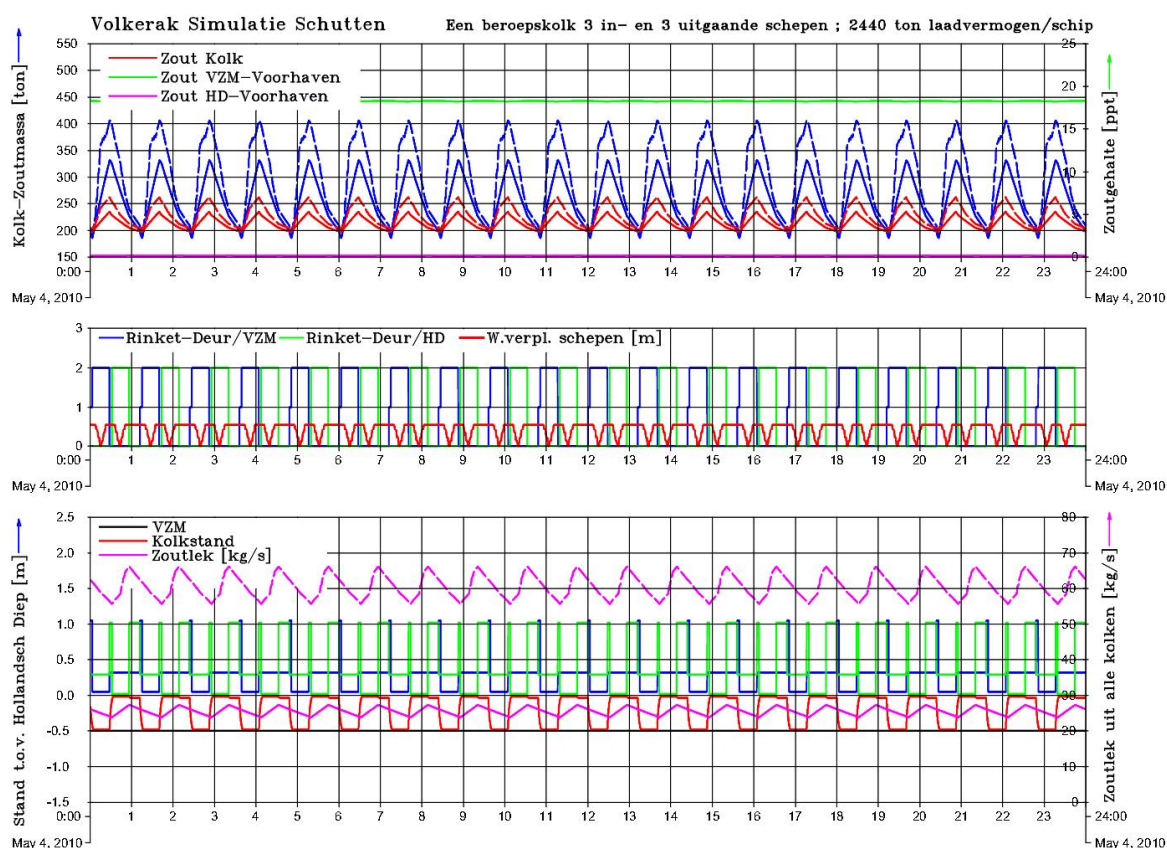
In dit rekenvoorbeeld is het zoutgehalte in de HD-voorhaven nauwelijks groter dan 0 ppt, zie de paarse lijn in het bovenste deel van Figuur 3.14, met referentie naar de rechter maatlijn. Zonder lekkende ebdeuren of zonder spuidebiet bedraagt het zoutgehalte in de HD-voorhaven wél enkele ppt (verzilt water). Het hogere zoutgehalte in de HD-voorhaven is in evenwicht met de zout-zoet uitwisseling door de monding met het HD en hoort bij een grotere zoutlek.

Met scheepvaart verloopt de zoutlek door de monding van de HD-voorhaven volgens de gestippelde paarse lijn in het onderste deel van Figuur 3.14; de getrokken paarse lijn is de aanmerkelijk geringere zoutlek zónder scheepvaart. Deze curve is de gesommeerde zoutlek voor alle drie de beroepssluizen en de jachtensluis, aannemende dat deze onderling gelijktijdig schutten.

Bij 150 ton verlies aan zoutmassa naar de HD-voorhaven (zie Figuur 3.14 van 400 naar 250 ton tijdens kolk open naar HD-zijde) en met 20 schuttcycli per kolk en per dag leveren alle beroepskolken en de jachtkolk ca. 170 kg/s zout naar hun voorhavens. De methode van lekkende ebdeuren voorkomt dat deze zoutlek de monding van de HD-voorhaven verlaat en de methode beperkt de zoutlek tot 55-65 kg/s (paarse stippellijn in onderstel deel van Figuur 3.14).

Met kennis van de werking van de zout-zoet uitwisseling zien we aan de hand van Figuur 3.14 dat de methode van lekkende ebdeuren twee neveneffecten veroorzaakt. Met de methode van lekkende ebdeuren wordt de kolk zoeter dan het gemiddelde zoutgehalte van 10 ppt. Het eerste neveneffect is dat aan de VZM-zijde de zouttong sterker wordt aangedreven dan aan de HD-zijde. Aan de VZM-zijde zal een zwaarder luchtbellenscherm nodig zijn dan aan de HD-zijde om hetzelfde Froude-lucht getal te behalen teneinde dezelfde doorlaatfractie te bereiken. Het tweede neveneffect is dat met een zoetere kolk er via het debiet van de methode van lekkende ebdeuren minder zout naar het VZM wordt teruggevoerd.

Naarmate dit debiet stijgt, en de kolk zoeter wordt, daalt ook de invloed van het debiet op de zoutlek: er is onevenredig veel water nodig om een nóg geringere zoutlek te bereiken. Met luchtbellenschermen en met de methode van lekkende ebdeuren en met de prognose van scheepvaart in 2020 varieert de zoutlek in dit voorbeeld rond 60 kg/s. De zoutlek door de monding van de HD-voorhavens fluctueert, maar gering door de bergende werking van hun grote volumina op de pulserende zoutlek van de kolken.



Figuur 3.15 Volgorde van processen in een beroepskolk van de Volkeraksluizen en de totale zoutlek. Gestippelde lijnen met, en getrokken lijnen zonder scheepvaart. Doorlaatfractie 0,25 beide kolkeinden met de methode van lekkende ebdeuren zonder verhoogde drempels.

Figuur 3.15 is een voortzetting van Figuur 3.14 over 24 uur en toont dat de kolken sterk bezet zijn met 20 schuttingen naar één zijde per dag en per kolk. Er lijkt o.i. weinig speelruimte voor méér dan 20 schutcycli per dag of deuropentijden langer dan 25 minuten. Bij mist en slecht zicht wordt per beroepskolk besloten tot scheepvaart in één vaarrichting wat het aantal schepen per schutting halveert.

3.6 Samenvatting en conclusies

De essentiële oorzaak van de zoutlek door de Volkeraksluizen vanuit een tot 20 ppt verzoute VZM ligt in de zout-zoet uitwisseling door open sluisdeuren. Dit stromingsproces is goed begrepen.

Luchtbellenschermen bij sluisdeuren verlagen de zoutlek aanmerkelijk doordat deze schermen het zoutgehalte in de kolk minder laten variëren waardoor de aandrijving van de zouttong daalt en de schermen de zoutlek aan de zouttong begrenzen. Uit analyse van de zoutlek door de Volkeraksluizen in de periode 1969-1979 blijken luchtbellenschermen de zoutlek met ca. 50 % te verminderen.

Sinds de jaren 1960 zijn luchtbellenschermen uitgebreid experimenteel onderzocht maar alleen onder ideale omstandigheden: zonder scheepvaart en zonder neveneffecten door nivelleren. Verder bleek dat luchtbellenschermen bestaande uit geperforeerde buizen vervuilden en de luchtballen niet gelijkmatig over de kolkbreedte verdeelden waardoor ze in de loop van de tijd meer zout doorlieten.

Eén van onze uitdagingen is om de werking van de luchtbellenschermen te verbeteren en robuuster te maken tegen vervuiling: we toonden ons ontwerp waarvan we de resultaten in het volgende Hoofdstuk 4 zullen bespreken.

Zo lang het peil in het HD hoger blijft dan in het VZM zal het nivelleren van de kolken de zoutlek verlagen door een watergebruik naar het VZM; deze watergebruik wordt het schutverlies genoemd. Een kolk wordt op het 0,5 m lagere VZM-peil gebracht door een deel van zijn volume, schuttschijf genaamd, te lozen op de VZM-voorhaven. Hierdoor wordt zout uit de kolk naar het VZM terug gevoerd. Tevens wordt de kolk gevuld met zoet of verzilt water uit het 0,5 m hogere HD wat de kolk met zoet water ververst.

Een uitbreiding van voorgaand mechanisme is de klassieke methode van lekkende ebdeuren. Moedwillig wordt een waterdebiet, ook wel ebdebiet genoemd, door de kolken gestuurd door de rinketschuiven in de sluisdeuren op een kierstand te zetten, alsof de sluisdeuren lekken. Een eis voor toepassing van deze methode is dat het peil in het HD hoger is dan in het VZM.

We bespraken de verwachte invloed van scheepvaart op de zout-zoet uitwisseling. Schepen die de kolk uit varen verplaatsen het meeste zout. Hiermee liepen we vooruit op de bevindingen uit onze praktijkproef in de Stevinsluis en we meldden dat er nog onvoldoende inzicht bestaat over de onderliggende stromingsprocessen.

Diverse zoutlekbeperkende middelen laten zich combineren maar zonder rekenmodel is hun bijdrage tot de zoutlek moeilijk te isoleren of te doorgronden. Daartoe ontwierpen we het zg. Zoutlekmodel dat deze combinaties berekent. Met een dynamische versie van dit Zoutlekmodel illustreerden we hoe een schutsluis werkt en welke processen leiden tot de zoutlek en watergebruik. Deze illustratie overtuigt ons dat de Volkeraksluizen volgens RWS' prognose van de scheepvaart in 2020 tot hun maximum belast zullen worden.

4 Toetsing van de bouwstenen van het Zoutlekmodel

4.1 Inleiding

De definitieve toetsing van de bouwstenen van het Zoutlekmodel vond plaats met de praktijkproef in de werkende schutsluis van de Stevinsluis mét scheepvaart en mét 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 scheepvaart en met effecten van voorafgaande schuttingen?

Ter voorbereiding van het meetprotocol in de Stevinsluis en voor meer inzicht in stromingsprocessen zijn in dit project eerst laboratoriumproeven en computerberekeningen uitgevoerd. Uit deze experimenten en computersimulaties is nog meer informatie te ontlenu dan binnen dit project kon worden uitgewerkt. Deltares heeft wel een aanzet tot dergelijk vervolgonderzoek gegeven; de resultaten zijn kort in dit rapport opgenomen.

Momenteel (nov. 2010) verricht Deltares waarnemingen in de Stevinsluis naar de grootte en de verdeling van de oppervlakt snelheden bij luchtbellenschermen. De uitkomsten zijn nog niet bekend maar van nut voor verdere detaillering o.a. voor een protocol voor de afhandeling van scheepvaart in schutkolken met luchtbellenschermen.

4.1.1 Eenheid van luchtdebiet $N\ell/s$ of Nm^3/s

Vanaf dit hoofdstuk zullen we vaak getalsmatig het luchtdebiet voor de luchtbellenschermen vermelden; we introduceren de eenheid voor luchtdebiet als volgt. Een betere maat voor het luchtdebiet is eigenlijk het zg. specifieke luchtdebiet waarmee per meter kolkbreedte het luchtbellenscherm wordt gevoed: een gelijkwerkend luchtbellenscherm in een tweemaal bredere kolk vraagt het dubbele luchtdebiet. Daarnaast is de waterdiepte van belang omdat de lucht bij de waterdruk op de kolkvloer wordt ingeblazen. Echter, lucht is samendrukbaar: het luchtvolume halveert bij dubbele luchtdruk. Anderzijds expanderen de luchtballen op weg naar het wateroppervlak.

Daarom hanteren we als eenheid voor luchtdebiet het volume lucht per tijdseenheid dat een compressor onder normale atmosferische druk en temperatuur aanzuigt. We geven dit het symbool "N" en hanteren $N\ell/s$ als eenheid voor luchtdebiet of soms Nm^3/s bij zeer grote luchtdebieten. Fabrikanten van compressoren hanteren deze afspraak. Door de context is er meestal geen verwarring dat hoofdletter N ook voor de eenheid van kracht (Newton) wordt gebruikt. Voor een luchtbellenscherm in een kolk kunnen we beter spreken in $N\ell/s.m$ zijnde het luchtdebiet per meter kolkbreedte, ook wel specifiek luchtdebiet genoemd.

4.1.2 Laboratoriumproeven

In het verleden zijn zeker door het Waterloopkundig Laboratorium uitgebreid laboratoriumproeven verricht naar de invloed van luchtbellenschermen en waterschermen en de invloed op de zout-zoet uitwisseling in een schutkolk.

De huidige laboratoriumproeven zijn uniek in de combinatie van luchtbellenschermen mét waterschermen. In het verleden zijn op laboratoriumschaal luchtbellenschermen onderzocht, maar niet voor zoutlekbeperking in een sluis. Er zijn wel veel praktijkmetingen uitgevoerd door Rijkswaterstaat met luchtschermen in schutsluizen, zoals bij IJmuiden, Kornwerderzand (Van Der Burgh, 1962) en de jachtensluis van de Volkeraksluizen (Vrijburcht, 1989). Waterschermen zijn alleen in het laboratorium onderzocht (Bruyn, 1963).

Onze laboratoriumproeven zijn uitgewerkt tot doorlaatfracties. Deze fracties zijn vergeleken met eerdere praktijk- en laboratoriumproeven met luchtbellenschermen en waterschermen in schutsluizen: de doorlaatfracties komen onderling goed overeen.

Onze laboratoriummetingen o.a. met hoge resolutie opgenomen 2D-videobeelden van deeltjespatronen en metingen van stroomsnelheden bevatten nog meer informatie voor gedetailleerde toetsing van computer-berekeningen.

4.1.3 Computersimulaties

De computerberekeningen van zout-zoet uitwisseling onder invloed van luchtbellenschermen, waterschermen en hun combinatie zijn niet eerder door ons verricht.

Weliswaar zijn de berekeningen, evenals onze laboratoriumproeven, geschematiseerd tot een kolk zonder drempel, zonder bredere voorhaven, zonder neveneffecten van voorafgaande schuttingen en zonder scheepvaart. Toch bieden deze computerberekeningen inzicht in de circulatiepatronen die van belang zijn voor een optimale positie van de meetinstrumenten in de praktijkproef en de positie van luchtbellenschermen t.o.v. sluisdeuren. De berekende stroomsnelheden rond de schermen zijn van belang voor hun invloed op de scheepvaart en op het afmeren in de kolk.

De uitkomsten van de computerberekeningen blijken opvallend goed met de laboratoriumproeven en met geschematiseerde grootschalige experimenten in schutkolken overeen te komen. Deze conclusie vormt een uitnodiging in de toekomst verschillende computerprogramma's en rekentechnieken onderling te vergelijken. Hieruit zal hun dan bewezen betrouwbaarheid blijken om in toekomstige projecten meer op deze simulaties te kunnen vertrouwen voor zowel ontwerpkeuzen als detaillering, met minder kosten voor praktijkmetingen en/of aanpassingen achteraf.

Een stap te ver bleek de simulatie van een varende schip met werkende schroef tijdens de zout-zoet uitwisseling (Groeneboom, 2010). Hiervoor blijven laboratoriumproeven en praktijkproeven nodig, mede omdat expliciete grootschalige waarnemingen ontbreken.

De laboratoriumproeven en de gedetailleerde computerberekeningen waren vooral gericht op de voorbereiding van de praktijkproef in de Stevinsluis. Eerst zijn de computerberekeningen vergeleken met de laboratoriumproeven en later toegepast voor de Stevinsluis. Na de eerste bevindingen in de praktijkproef bleek dat met lagere luchtdebieten voor de luchtbellenschermen gewerkt kon worden dan vooraf overwogen. Ook bleek het zoutgehalte in de zoute voorhaven van de Stevinsluis aanmerkelijk geringer te zijn dan de aanvankelijk beproefde 35 ppt zodat nog enkele proeven en berekeningen met 20 ppt zoutgehalte zijn verricht.

We gebruiken dimensieloze getallen zoals het Froude-lucht getal of we schalen de afmetingen met de kolkbreedte of met de kolk lengte. Uitgezet tegen deze dimensieloze getallen komen laboratoriumproeven, de gedetailleerde computerberekeningen en de praktijkproef goed met elkaar overeen.

4.1.4 Praktijkproef Stevinsluis

In het verleden zijn praktijkproeven in meerdere sluisgolven 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 innovatieve 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 we maten tijdens schuttingen mét scheepvaart waaruit we de doorlaatfracties van de schermen en drempel afleidden.

Veel complexer bleek het om de invloed van de scheepvaart expliciet uit de praktijkproef te distilleren: een voldoende nauwkeurige herhaling van dezelfde schutting zonder scheepvaart bleek niet haalbaar. Toch menen we dat in de verzamelde gegevens van de praktijkproef, waaronder videobeelden, meer informatie verborgen ligt waaruit meer expliciet de invloed van scheepvaart (diepgang, vaarsnelheid e.d.) op de zout-zoet uitwisseling kan worden afgeleid.

4.1.5 Zoutlekmodel

In de aanloop van dit project werd het Zoutlekmodel ontworpen, wiskundig gecontroleerd en getoetst aan de uit metingen afgeleide zoutlek door de Volkeraksluizen in de periode 1969-1979. De laboratoriumproeven, computersimulaties en de praktijkproef bieden veel details en nauwkeuriger informatie voor een nadere toetsing van de concepten van Zoutlekmodel. Met deze toetsing sluiten we dit hoofdstuk af.

Met het Zoutlekmodel adviseren we in Hoofdstuk 5 welke zoutlekbeperkende middelen en instellingen voldoen aan de bovengrenzen van zoutlek en watergebruik.

4.1.6 Betrouwbaarheid door een samenhangend beeld

Het doel is om vanuit verschillende invalshoeken van laboratorium, computer en praktijk een samenhangend beeld te verkrijgen van de processen die tot 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 we met ons advies rekening dienen te houden. Met het verkregen vertrouwen en de mate van onzekerheid adviseren we in Hoofdstuk 5 de volgorde waarin zoutlekbeperkende middelen ingezet zouden kunnen worden.

Ons doel is zekerheid te bieden dat voldaan kan worden aan de gestelde bovengrenzen in zoutlek en watergebruik van de Volkeraksluizen wanneer het VZM tot 20 ppt is verzout.

4.2 Laboratoriumproeven

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. In de Volkeraksluizen en de Stevinsluis zwaaien de sluisdeuren horizontaal open. Door het open zwaaien van de sluisdeuren zal aanvankelijk meer water worden verplaatst en meer zout worden gemengd dan bij een verticale beweging van de schuif in het laboratoriumexperiment.

Het open kanaal heeft glazen verticale wanden en een glazen bodem en de waterdiepte is 290 mm. We noemen dit een experiment op (lengte)schaal omdat de kolk lengte en diepte met een bepaalde factor verkleind worden weergegeven in vergelijking met de beroepskolken in de Volkeraksluizen of de Stevinsluis. De looptijd van het zoutfront en de snelheden worden dan op basis van schalen met het zg. Froude-getal weergegeven. Het kanaal is 500 mm breed en 14 m lang met de schuif op 4,09 m kolk lengte van een kanaaleinde en de resterende lengte van het kanaal dient als voorhaven, voor details zie (Mastbergen, 2010).

Diverse variaties zijn beproefd met zoet kolkwater en 20 of 35 ppt zout water in de voorhaven d.w.z. de rest van het kanaal aan de andere zijde van de schuif. In één experiment was de kolk zout en de rest van het kanaal zoet: een proef voor het uittreden van de zouttong naar een zoete voorhaven.

In tegenstelling tot de lengteschalen wijzigden we niet de zoutgehalten in het laboratoriumexperiment t.o.v. de werkelijkheid. Gebaseerd op de lange ervaring van Waterloopkundig Laboratorium weten we in hoeverre deze laboratoriumproeven, uitgedrukt in dimensieloze getallen zoals het Froude-lucht getal, met de werkelijkheid overeen moeten stemmen.

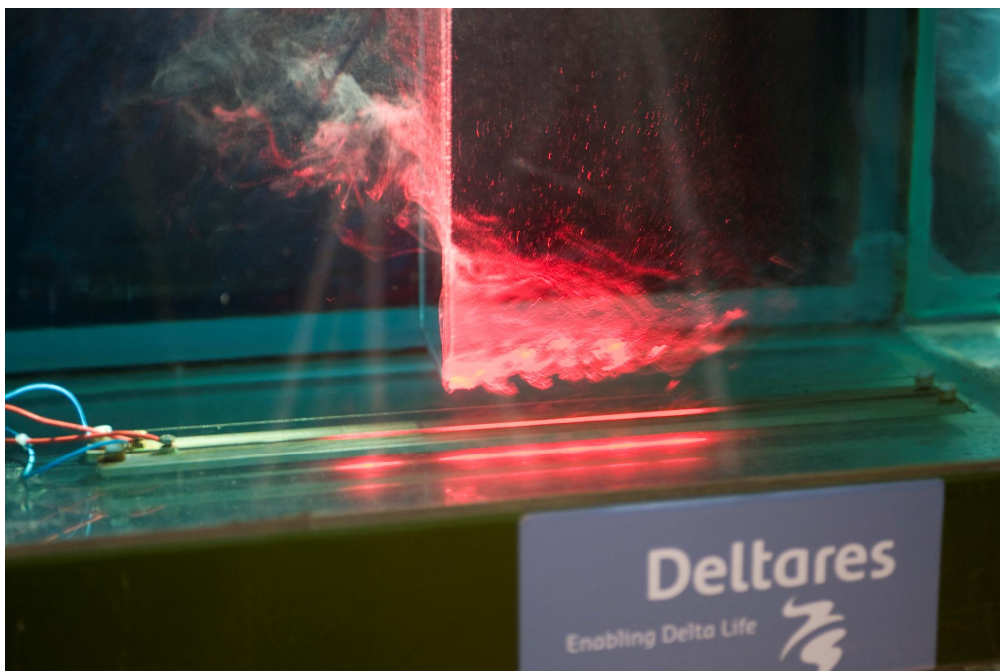
Figuur 4.1 toont de verticale verdeling van de horizontale snelheid van het water aan de zoute zijde van de schuif buiten de aanvankelijk zoete kolk. In de kolk is op twee afstanden vanaf de schuif en op 12 punten over de waterdiepte de verdeling van het zoutgehalte gemeten en daarvan het tijdsverloop gelijktijdig geregistreerd. Uit dit tijdsverloop kan de momentane zoutmassa berekend worden, maar met informatie uit slechts twee verticalen geeft dit een minder gedetailleerde weergave van de zoutmassa op een bepaalde tijd. De uiteindelijke waarde van de ingestroomde zoutmassa na sluiting van de kolk wordt zo wel

nauwkeurig bepaald. Dit werd gecontroleerd door een tweede bepaling van de toename van de zoutmassa in de kolk die werd gemaakt ná het afsluiten van de kolk met de schuif. De kolkinhoud werd daarna goed gemengd en het zoutgehalte met een nauwkeurig geijkt instrument gemeten. Vermenigvuldigd met het kolkvolume is dan de zoutmassa in de kolk bij de gehanteerde deuropentijd nauwkeurig bekend. Beide methoden leverden vrijwel gelijke waarden. Bij de aanvullende labproeven is daarom langer doorgemeten en is de zoutmassa op een bepaald tijdstip afgelezen.

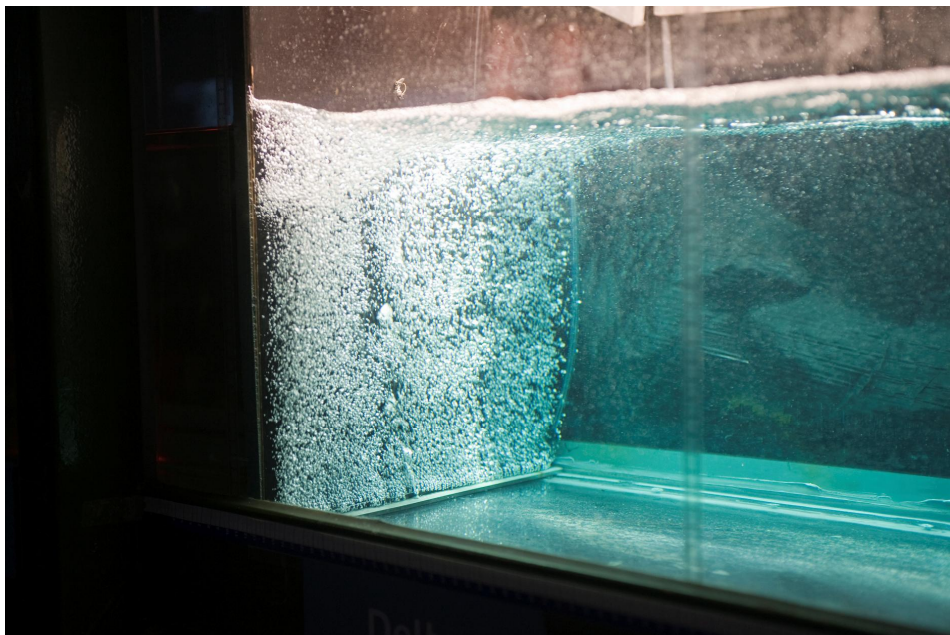
Uit de verschillende experimenten met vaste deuropentijd en wel/niet luchtbellenschermen en/of waterschermen volgt hun doorlaatfractie als het verhoudingsgetal tussen toename in zoutmassa met én zonder zoutlekbeperkend middel.

Op de bodem bij de schuif en over de kanaalbreedte ligt een platte poreuze strip dat aangesloten op een persluchtleiding het luchtbellenscherm van Figuur 4.2 maakt. Over de kanaalbreedte en naast de poreuze strip komt water uit een 3mm smalle sleuf dat een waterscherm creëert.

Het waterscherm en luchtbellenscherm kunnen afzonderlijk én gelijktijdig worden aangezet. Het water- en luchtdebiet wordt op schaal t.o.v. de praktijkproef in de Stevinsluis weergegeven; de schaalregel voor het luchtdebiet is niet nauwkeurig bekend, we komen hierop terug. Vooralsnog werd en wordt het zg. Froude-lucht getal gehanteerd welke we als volgt toelichten. Het Froude-lucht getal is de verhouding tussen de verticale snelheid van water door het luchtbellenscherm meegesleurd en de horizontale snelheid van de voortplanting van de zouttong. De verticale snelheid is evenredig met het luchtdebiet per meter kolkbreedte tot de macht $1/3$: een achtvoudige vergroting van het luchtdebiet geeft slechts een verdubbeling van het Froude-lucht getal. Voor waterschermen wordt dezelfde verhoudingsgetal gehanteerd tussen verticale watersnelheid en de voortplantingssnelheid van de zouttong. Deze verhouding is een definitie van het Froude getal.



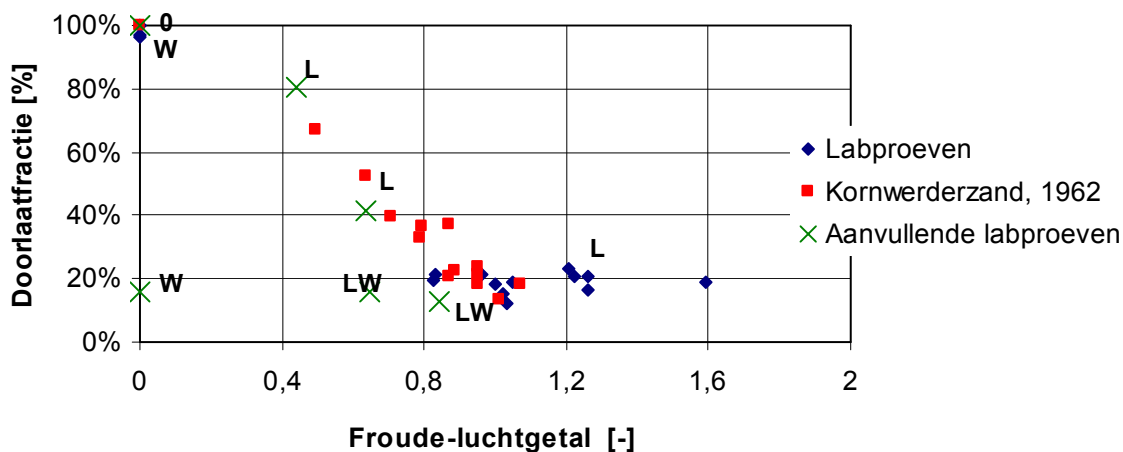
Figuur 4.1 Horizontale snelheidsverdeling tijdens de zout-zoet uitwisseling die ontstond door het omhoog trekken van een schuif rechts van het Deltareslogo. Links is het water zout en stroomt bij de bodem naar de zoete kolk, daarboven stroomt het zoete water de kolk uit. Langs een verticale as worden met een electrode zeer fijne waterstofgasbelletjes ingebracht die met een rode spleetvormige laser worden aangelicht in een dun verticaal symmetrievlak van het kanaal.



Figuur 4.2 Luchtbellenscherm uit een poreuze strip op de bodem van het laboratoriumkanaal in Figuur 4.1 ter plaatse van de scheiding tussen 4,2 m lange kolk en de rest van het kanaal (lees: voorhaven).

Figuur 4.3 vat de meeste van deze laboratoriumproeven samen en toont meteen de goede overeenkomst en samenhang met de geïdealiseerde metingen in de 5 m diepe Lorentzschutsluis gelegen aan het oostelijke einde van de Afsluitdijk bij Kornwerderzand. De laagste doorlaatfracties van ca. 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 in de figuur zich niet voortzet bij verdere toename van het Froude-luchtgetal, dit in tegenstelling tot de tot nog toe gehanteerde theorie. Boven een bepaalde waarde is het dus niet meer zinvol het luchtdebiet nog verder te verhogen.

Aanvullende metingen met alléén een waterscherm geven aan dat pas bij onwerkbaar hoge waterdebieten dit tot vergelijkbaar lage doorlaatfracties leidt. 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.



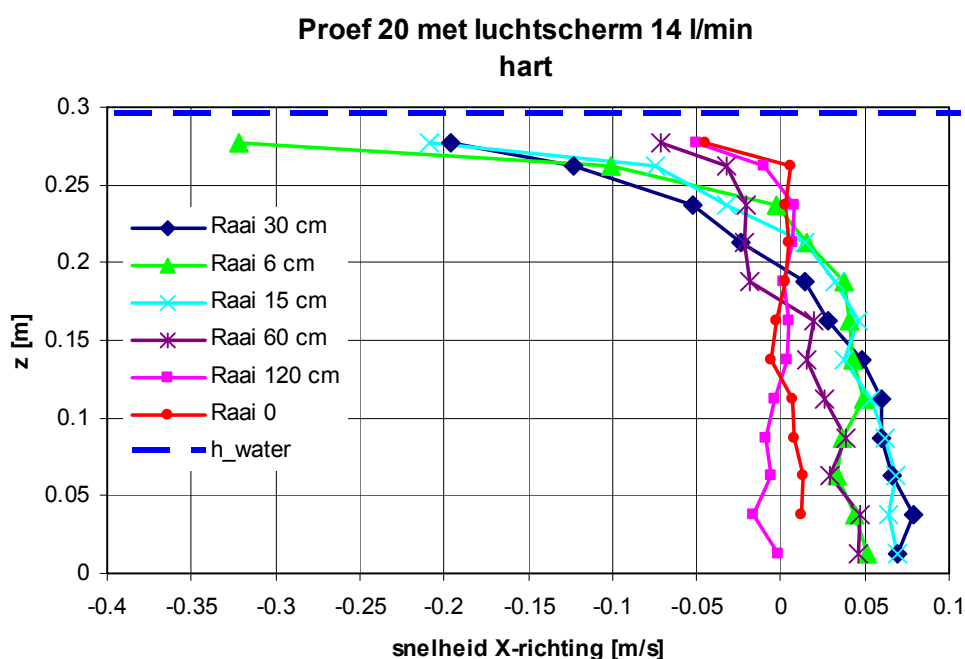
Figuur 4.3 De doorlaatfractie als functie van het Froude-lucht getal voor onze laboratoriumproeven met luchtbellens- en waterschermen. De resultaten komen goed overeen met eerdere veldmetingen met alleen luchtbellenschermen in de 5 m diepe Lorentzschutsluis (Kornwerderzand):

- 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 aanmerkelijk de zout-zoet uitwisseling 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 zoutlekbeperkende middelen met luchtballen- en waterschermen. Het lijkt mogelijk een optimale mengverhouding water-lucht te kiezen waarbij met het minste energieverbruik de laagste doorlaatfractie bereikt wordt. Hierbij moet worden afgewogen de levering van water aan het waterscherm onder vrij verval of met pompen tegenover de levering van perslucht met compressoren. In Hoofdstuk 5 komen we hierop terug. De aanvullende 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.

Na een deuropentijd die vergelijkbaar is met 11 minuten in de Stevinsluis en met 25 minuten in de Volkeraksluizen wordt de schuif gesloten terwijl de zouttong nog in de kolk voortplant, zie ook stadium 3 in Figuur 3.3. In het laboratorium veroorzaakt het sluiten van de schuif zg. interne golven tussen zoeter en zouter water binnen de kolk. Deze interne golven hebben een slingertijd van ruwweg de deuropentijd en veel korter dan de enkele minuten waarna in een werkelijke schutkolk de andere sluisdeuren geopend worden. De vraag is in hoeverre deze interne deining de zout-zoet uitwisseling in de daarop volgende schutting beïnvloedt? Het antwoord meten we in de praktijkproef in de Stevinsluis.



Figuur 4.4 De verticale verdeling van de horizontale snelheid in zoet water op diverse afstanden (raaien) van het luchtbellenscherm in Figuur 4.2 in het laboratorium. Voor toepassing in de Volkeraksluizen zijn de snelheid vijfmaal groter dan in dit figuur en bedraagt het luchtdebiet dan ca. 740 Nl/s per 24 m brede beroepskolk.

Deltares verrichtte aanvullend onderzoek naar de horizontale en verticale snelheden in verschillende verticale vlakken in de lengterichting van de kolk. Hierbij zijn in zoet water luchtbellenschermen en waterschermen met verschillende debieten onderzocht. Als voorbeeld toont Figuur 4.4 de verticale verdeling van de horizontale snelheid op diverse afstanden tot het luchtbellenscherm dat in de Volkeraksluizen ca. 30 Nl/s per meter kolkbreedte zou leveren. Het vergelijkbare luchtdebiet voor de Stevinsluis is ca. 210 Nl/s welke we in de praktijkproef ook onderzochten.

Figuur 4.4 bevestigt het wel bekende beeld (Bulson, 1961) van een circulatiepatroon waarin tot $\frac{3}{4}$ van de waterdiepte vanaf de bodem water wordt aangezogen dat over $\frac{1}{4}$ van de waterdiepte onder het wateroppervlak zijdelings afstroomt. Bulson (1961) mat de stroomsnelheden rondom lijnvormige luchtbellenschermen gelegen over de breedte van een 270 m lange en 30 m brede scheepsdok en tot waterdiepten van 10 m.

In Figuur 4.4 ligt de omslagdiepte voor de horizontale snelheid op ca. 0,22 m boven de bodem. In de beroepskolken van de Volkeraksluizen komt $\frac{1}{4}$ van de waterdiepte overeen met ca. 1,9 m diepte. Deze diepte is meestal geringer dan de diepgang van beladen beroepsvaart. Onder ca. 1,9 m diepte is de horizontale snelheid door de schermen verwaarloosbaar zodat onder deze diepte roer en schroef normaal functioneren.

De circulatiepatronen zijn tot ca. tweemaal de waterdiepte vanaf de luchtbellenschermen merkbaar en mogelijk is afmeren van vooral kleine schepen/jachten in deze invloedszone moeilijk. Anderzijds kan overwogen worden de luchtbellenschermen aan de zoute zijde buiten de sluisdeuren te plaatsen en de werkbare kolk lengte voor afmeren te vergroten. Deze opstelling van een luchtbellenscherm op tweemaal de kolk diepte aan de zoute zijde buiten de sluisdeuren en buiten de kolk onderzochten we in de praktijkproef in de Stevinsluis.

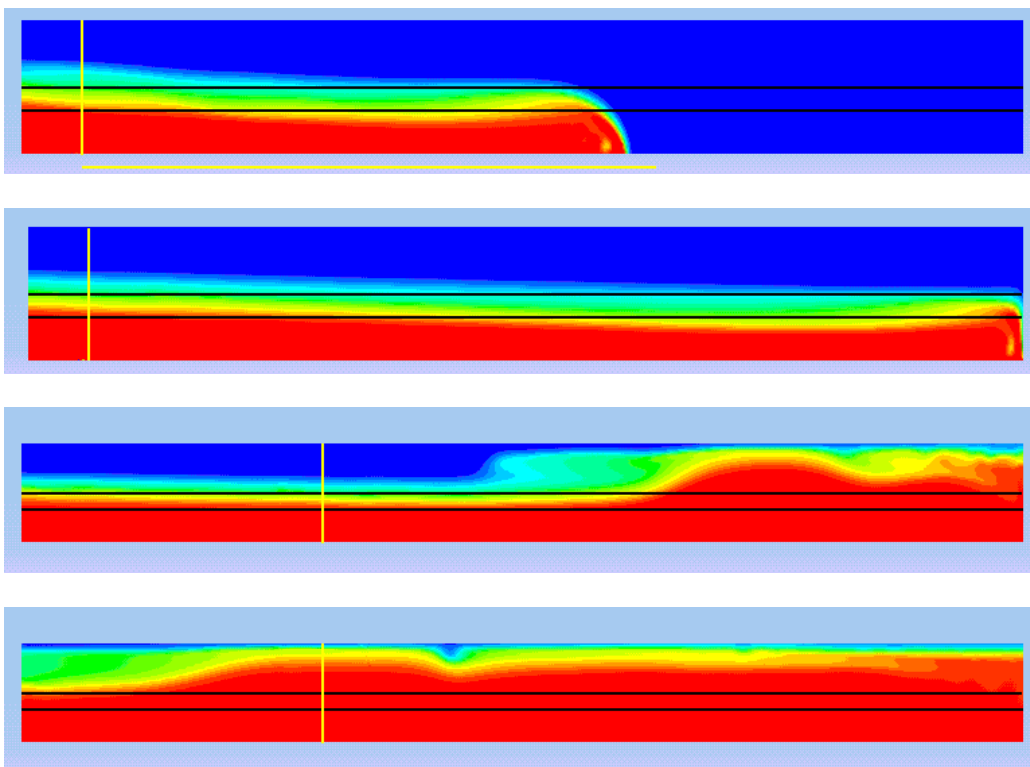
In de lopende (nov.-dec. 2010) aanvullende proeven meet Deltares in de Stevinsluis de oppervlaktesnelheid veroorzaakt door luchtbellenschermen. Met deze aanvullende metingen kan het beeld van Figuur 4.4 en met eerdere grootschalige metingen (Bulson, 1961) in zoet water worden vergeleken. Hieruit volgt meer inzicht in de optimale locatie van luchtbellenschermen in verband met het afmeren van schepen in een kolk.

De ondersteuning van een luchtbellenscherm met een waterscherm is op schaal onderzocht. Anderzijds blijven er vragen over de schaalregels waaronder de luchtdebieten in deze laboratoriumexperimenten naar de praktijk vertaald moeten worden. Volgens de studie (Mazijk, 1971) zijn de schaalregels voor het debiet aan meegesleept water door een luchtbellenscherm verdeeld over de kolkbreedte niet duidelijk. Evenmin blijken er duidelijke schaalregels voor luchtbellenuitstromingen (Milgram, 1983). Echter, Figuur 4.3 toont dat de doorlaatfracties van de laboratoriumproeven uitgezet tegen het Froude-lucht getal wél met grootschalige experimenten overeenkomen.

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.

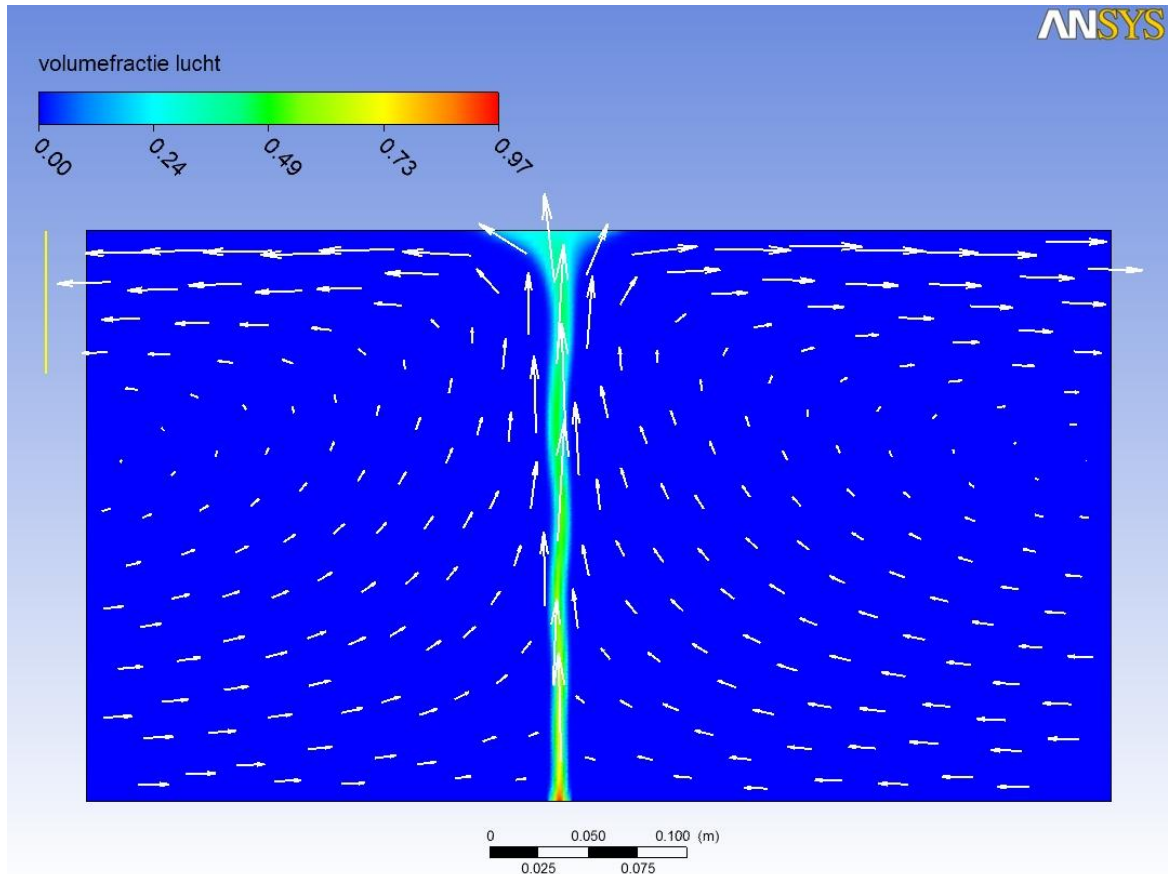
4.3 Gedetailleerde computerberekeningen

Het computerprogramma Delft3D-Flow van Deltares berekent nauwkeurig en in drie dimensies de voortplanting van een zouttong in een estuarium zoals de Nieuwe Waterweg. Echter, de berekening van de circulatie nabij een luchtbellenscherm en in zout-zoet uitwisseling is met deze programmatuur nog niet mogelijk. Daarom pasten we toe het computerprogramma ANSYS-CFX (kortweg CFX) dat is ontwikkeld voor industriële stromingen en 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. We testten CFX voor de voortplanting van de zouttong. De uitkomsten bleken uitstekend met de theorie en laboratoriumproeven overeen te komen. Figuur 4.5 geeft diverse stadia van de berekende zout-zoet uitwisseling; zie (Keetels & Uittenbogaard, 2010) voor de getalsmatige toetsing aan zoutmetingen. Voor een betere visualisatie van de verticale circulatie is in sommige figuren de waterdiepte groter dan in verhouding tot de horizontale afmetingen.



Figuur 4.5 Berekening met CFX van zout-zoet uitwisseling op laboratoriumschaal (zie paragraaf 4.2). 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, zie ook Figuur 3.1. 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.

De berekening van de watersnelheden en circulatiezone van het luchtbellenscherm in Figuur 4.6 komt goed overeen met de laboratoriumproef in Figuur 4.4.



Figuur 4.6 Segment uit de gedetailleerde computerberekening van luchtbellenscherm in zoet water op laboratoriumschaal (zie paragraaf 4.2). De kleuren geven de mengverhouding lucht-water. De stroomsnelheid aan het wateroppervlak is ca. 0,35 m/s en is goed vergelijkbaar met Figuur 4.4. Op schaal van de Stevinsluis is de overeenkomende oppervlaktesnelheid 1,4 m/s en 1,8 m/s in de Volkeraksluizen. De verticale gele lijnen links en rechts van de figuur geven de gemeten diepte (Bulson, 1961) waarover het luchtbellenscherm water zijdelings laat afstromen.

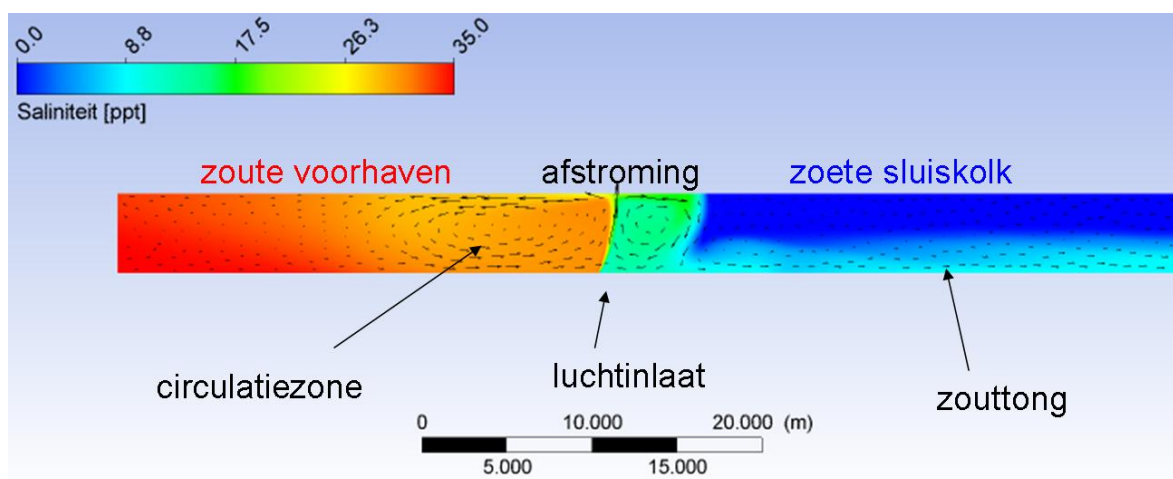
Gesterkt door de goede overeenkomsten tussen berekening en laboratoriummeting van zowel de zout-zoet uitwisseling als van het luchtbellenscherm in zoet water worden hierna beide mechanismen gecombineerd voor afmetingen van schutkolken. We gebruiken de computerberekeningen op ware schaal in plaats van schaalregels voor de laboratoriumproeven.

De berekening van de zout-zoet uitwisseling op ware schaal van de Stevinsluis begint zoals bij de laboratoriumproef: ineens wordt de horizontale scheiding (lees: sluisdeur) verwijderd tussen een zoete kolk en een even brede zoute voorhaven. Voorafgaand aan dat moment én daarna worden vanaf de kolkvloer naast de kunstmatige scheiding/sluisdeuren luchtballen

geïnjecteerd met een ingesteld luchtdebiet. De luchtbellen hebben een diameter van ca. 3mm welke goed overeenkomt met visuele waarnemingen van de innovatieve luchtbellenschermen van Deltares, zie Figuur 3.9.

Figuur 4.7 toont een moment na verwijderen van de zout-zoet scheiding terwijl het luchtbellenscherm circulaties in het verticale symmetrievlak van de kolk aandrijft.

In Figuur 4.7 heeft het zoete water in de kolk een blauwe kleur en is het zoute water van de voorhaven rood gekleurd. Het water in de groene zone rechts van het luchtbellenscherm in de kolk is brak en volgt het circulatiepatroon zoals in Figuur 3.6 met symbool III aangegeven. De horizontale afmeting van de groene zone is ruwweg gelijk aan de waterdiepte. Links van het luchtbellenscherm in Figuur 4.7 is aan het oppervlak het water geel-oranje gekleurd en zouter dan het brakke water in de groene zone. De recirculatiezone aan de zoute zijde is ca. tweemaal de waterdiepte. De asymmetrie in de grotere recirculatiezone aan de zoute zijde t.o.v. aan de zoete zijde kan verklaard worden met de versterking of verzwakking van de tegen de klok in draaiende recirculatie door dichtheidsverschillen. Links van het luchtbellenscherm in Figuur 4.7 bevindt zich op dit moment water dat via het luchtbellenscherm de kolk verlaat en naar het wateroppervlak is gebracht.

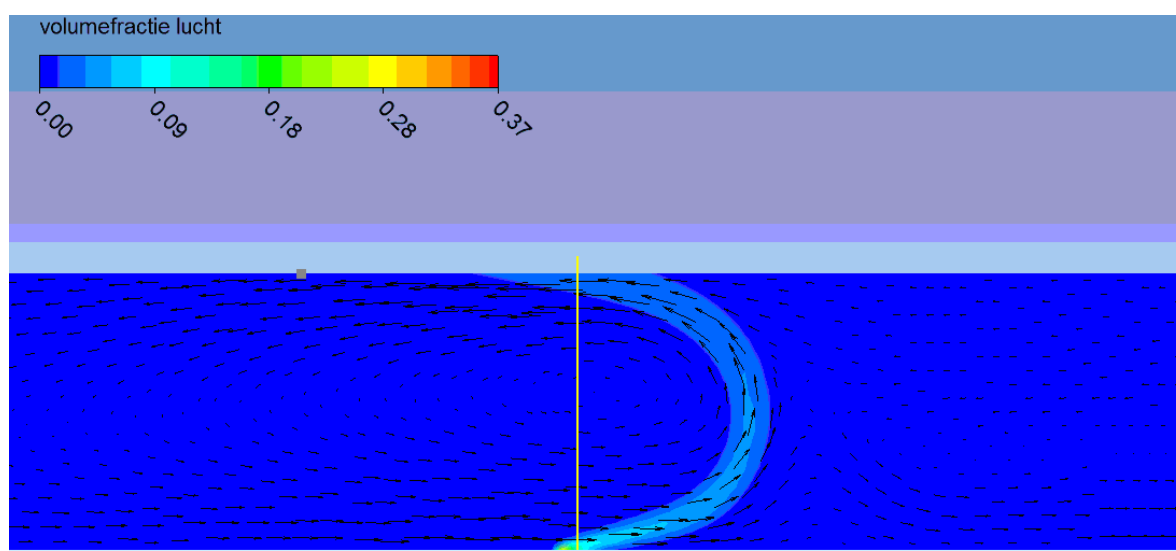


Figuur 4.7 Stadium in de berekening van de zout-zoet uitwisseling in de Stevinsluis met 35 ppt zoute voorhaven en zoete kolk gehinderd door een luchtbellenscherm van 700 Nl/s na openen van de sluisdeuren (Froude-lucht getal 0,76). Zoet water is blauw en het zoute water in de voorhaven is rood gekleurd. 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.

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 lichtblauw gekleurd in Figuur 4.7) dan zonder luchtbellenscherm zie Figuur 4.5 met dezelfde kleurcodering.

Figuur 4.8 biedt ons bijzonder inzicht in de vervorming van het luchtbellenscherm onder druk van de zoute kolom water links op de zoete kolom water rechts en de zout-zoet uitwisselingsstroming. 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.

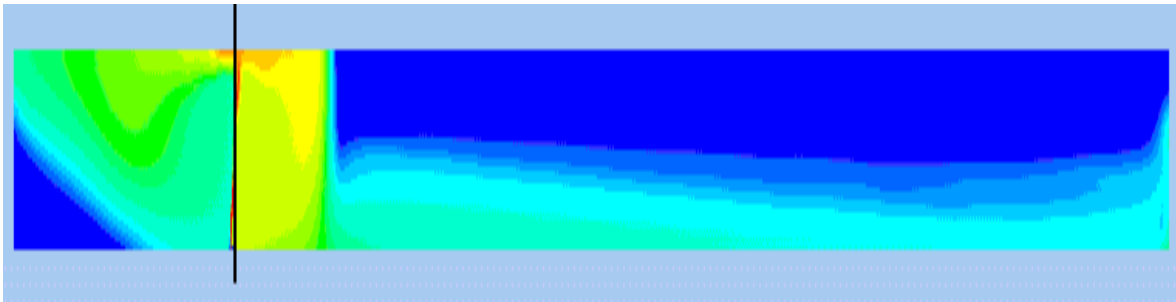
De laboratoriumproeven toonden dat de ondersteuning van een luchtbellenscherm met een waterscherm een lagere doorlaatfractie geeft dan zonder waterscherm. Nu kunnen we aan de berekening ontleen op welke wijze het waterscherm deze verlaging van de doorlaatfractie veroorzaakt. Figuur 4.9 toont de mengverhouding van water uit het waterscherm met omgevingswater.



Figuur 4.8 Analoog Figuur 4.6 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 oppervlakt snelheid maximaal en 0,8 m/s aan de zoute zijde (voorhaven) en ca. 0,2 m/s in de kolk.

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, zie Figuur 4.8. De verticale impuls van het water uit het waterscherm zorgt ervoor dat het waterscherm veel minder afbuigt dan de luchtbellenscherm zonder waterscherm.

Verder zien we in Figuur 4.9 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.

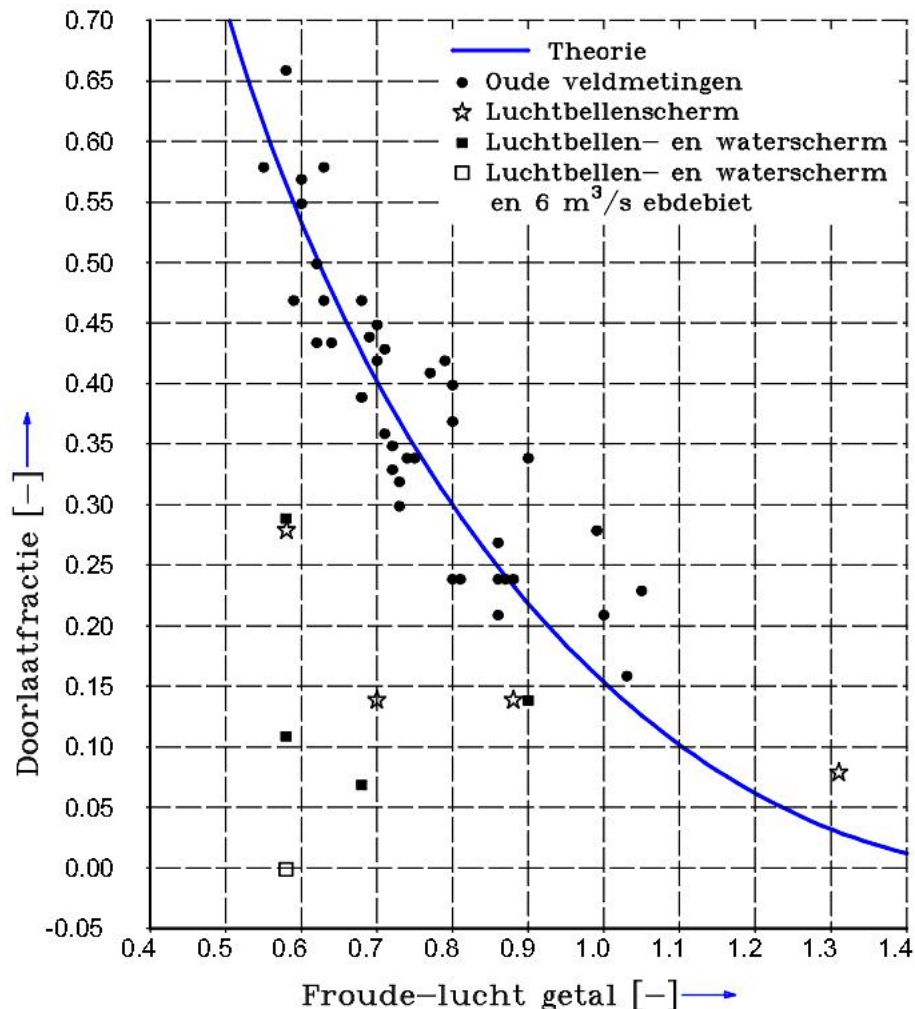


Figuur 4.9 Waterschermb van 1,6 m³/s naast luchtbellenschermb van 1400 Nl/s in zoete kolk (rechts van zwarte lijn) en 35 ppt zoute voorhaven (links van zwarte lijn) voor afmetingen van de Stevinsluis. De kleuren tonen de mengverhouding van water uit het waterschermb met omgevingswater: rood 30% en blauw 0%, zie verder kleurentabel in Figuur 4.7.

Zoals aangekondigd in de inleiding is sindsdien gebleken dat het luchtdebiet van 1400 Nl/s in Figuur 4.9 voor de 14 m brede kolk van de Stevinsluis onnodig hoog is. In de Stevinsluis onderzochten we luchtdebieten tot maximaal 450 Nl/s hoewel de installatie tot 1400 Nl/s beschikbaar was. Het maximaal haalbare waterdebiet van 1,6 m³/s werd in de Stevinsluis wél toegepast. Overigens, dit waterdebiet van 1,6 m³/s werd bepaald door de capaciteit van te huren pompen maar niet uit een analyse naar de optimale mengverhouding van waterdebiet - luchtdebiet. Deze analyse wordt in (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010) aanbevolen.

We eindigen deze paragraaf met Figuur 4.10 over de doorlaatfracties van de luchtbellenschermen en gecombineerd met waterschermen. De simulaties zijn betrokken op de kolkafmetingen van de Stevinsluis. Tenzij anders vermeld is de kolk zoet en de voorhaven (erg) zout nl. 35 ppt en met 1,6 m³/s zoetwaterdebiet voor het waterschermb.

De gedetailleerde computerberekeningen geeft voor het grootste Froude-lucht getal van 1,31 een doorlaatfractie van 0,08. Dit rekenresultaat is bereikt met een krachtig luchtbellenschermb van 700 Nl/s en een 10 ppt brakke kolk in open verbinding met een zoete voorhaven, zoals aan de zoete zijde van een kolk kan optreden. Uit de praktijkproef in de Stevinsluis blijkt echter dat voor een Froude-lucht getal groter dan ca. één niet minder en mogelijk zelfs meer zout wordt doogelaten.



Figuur 4.10 Vergelijking tussen gedetailleerde computerberekeningen betrokken op de Stevinsluis met oude veldmetingen (zie Figuur 3.7) en theorie (Abraham & V.d. Burgh, 1962). Het open vierkant geldt voor de simulatie van luchtbellens- en waterscherm samen met een ebdebiet van $6 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de methode van lekkende ebdeuren.

De laagst berekende doorlaatfractie is 0,07 met een waterscherm naast een luchtbellenscherm en een 10 ppt brakke kolk. De opdrijvende kracht van het zoete water van het waterscherm, geloosd in een 10 ppt brakke omgeving, helpt zijn beschermende werking en verzoet de kolk, zie ook Figuur 4.9. Eén berekening is toegevoegd met een zoetwaterdebiet van $6 \text{ m}^3/\text{s}$ vanaf het gesloten kolkeinde zoals bij de methode van lekkende ebdeuren (open vierkant in Figuur 4.10). Het doel van deze berekening was om vast te stellen dat een zoetwaterdebiet door de kolk de werking van het luchtbellenscherm niet nadelig beïnvloed; gezien de zeer lage doorlaatfractie (vierkante symbool in Figuur 4.10) is het tegendeel waar. Dit is een schijnbare doorlaatfractie omdat er niet is gecorrigeerd voor de invloed van het ebdebiet op het verlagen van het zoutgehalte van de kolk.

Nadere analyse van het pad waarlangs zout door de schermen wordt getransporteerd en gemengd verschillen met de grondslagen van de theorie van Abraham & V.d. Burgh (1962).

Afhankelijk van de sterkte van de luchtbellenschermen berekenen we verschillende circulatiepatronen voor en achter de schermen, voor details zie (Keetels & Uittenbogaard, 2010). We vermoeden dat naast het Froude-lucht getal ook andere (dimensieloze) grootheden een rol spelen. Daarom zullen we later het toepassen van het Froude-lucht getal als ordenende parameter een “praktische rekenregel” noemen.

4.4 Wat hebben we tot nu toe geleerd?

Voor dezelfde condities van de luchtbellenschermen hebben we geen opvallende verschillen gevonden tussen de huidige laboratoriummetingen en laboratorium- en veldmetingen in de jaren 1960-1970. Het moderne gebruik van computers tijdens en voor verwerking van onze metingen weegt niet op tegen de veelheid van meetinstrumenten die destijds zijn ingezet.

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 én waterscherm komen goed overeen met de geïdealiseerde laboratoriumexperimenten en bieden ons meer ruimtelijk inzicht in circulatiepatronen rondom de schermen op ware schaal. De berekende doorlaatfracties komen goed overeen met de laboratoriumexperimenten. De verkregen ruimtelijke inzichten achten we betrouwbaar omdat de berekeningen kloppen met meetbare uitkomsten van onze laboratoriumproeven en onze laboratoriumproeven overeen stemmen met eerdere metingen van Waterloopkundig Laboratorium in 1960-1970.

De inzichten zijn gebruikt in de keuzes en compromissen die we maakten voor de opstelling van de schermen in de Stevinsluis. Een voorbeeld is dat de schermen niet noodzakelijkerwijs tussen de vloed- en ebdeuren geplaatst moeten 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 we weten 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 maar dat onderzochten we niet.

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 luchtbellenschermen. De luchtbellenschermen veroorzaken oppervlaktesnelheden van dezelfde orde-grootte als de vaarsnelheden van invarende en uitvarende schepen. Anderzijds nemen de oppervlaktesnelheden met toenemende diepte snel af en zijn nihil op diepten groter dan ca. 2 m in de beroepskolken van de Volkeraksluizen. Roer en schroef op diepten groter dan 2 m zullen dan normaal functioneren. Gerekend vanaf het hart van de luchtbellenschermen is hun horizontale invloedszone maximaal tweemaal de waterdiepte in de kolk. Aan de zoute zijde kunnen de luchtbellenschermen wel buiten de sluisdeuren geplaatst worden zodat hun invloedszone in de kolk korter wordt.

Ons 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 een brug te ver (Groeneboom, 2010). We verwachten 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.

In de volgende paragraaf presenteren we de praktijkproef in de Stevinsluis waarmee we voorgaand onderzoek bevestigen in aanwezigheid van scheepvaart en invloeden van nivelleren (interne golven).

4.5 Praktijkproef in de Stevinsluis

4.5.1 Motivatie

Enerzijds vinden we de stap van laboratoriumproef naar Volkeraksluizen met 26 maal grotere waterdiepte te groot om alleen op schaalwetten te vertrouwen en deze toe te passen op nieuwe combinaties van luchtbellenschermen en waterschermen. Anderzijds zijn experimenten in de Volkeraksluizen niet mogelijk omdat deze sluizen nog niet op een zout-zoet scheiding liggen.

In termen van lengteschalen vormt de Stevinsluis een goed tussenstation tussen metingen in het laboratorium en de Volkeraksluizen: de beroepskolken van Volkeraksluizen zijn 1,6 maal dieper en 2,2 maal langer dan de kolk van de Stevinsluis. De Stevinsluis is weliswaar ook goed bezet met scheepvaart maar buiten het recreatieseizoen blijken er wel dagdelen beschikbaar te zijn voor het aanbrengen van instrumenten en proefopstellingen.

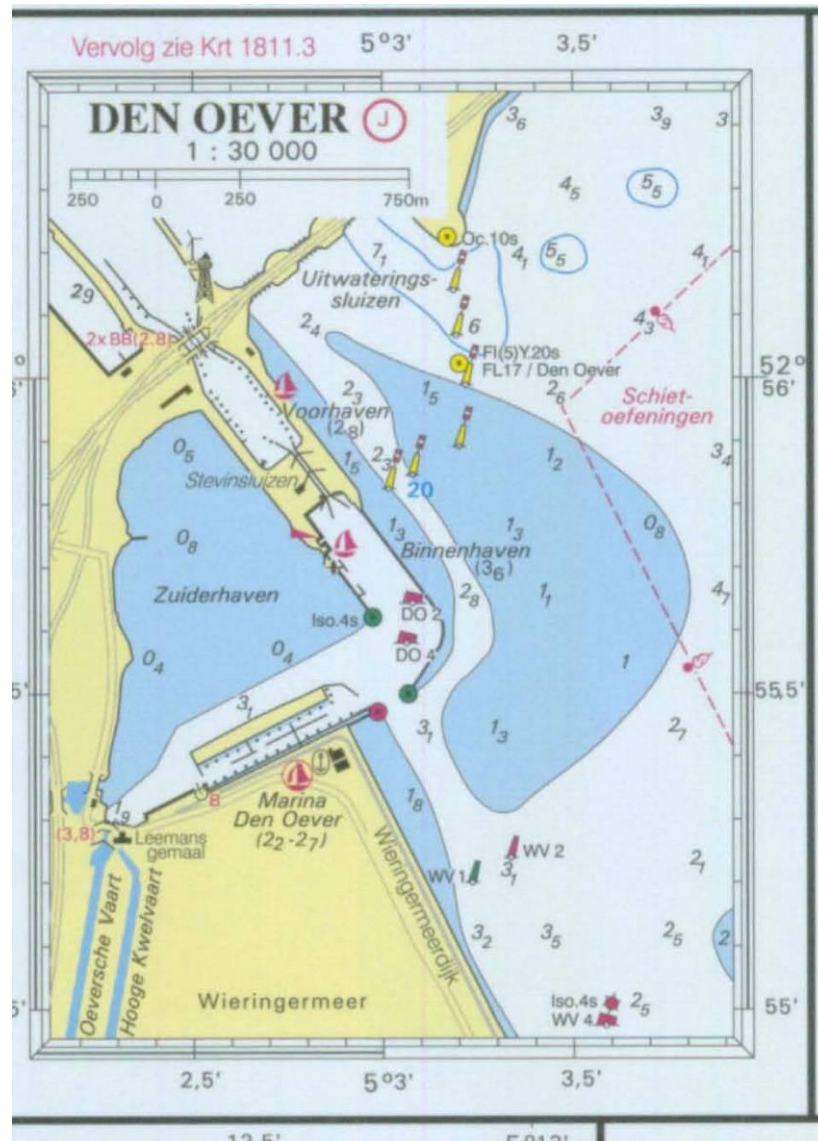
Een belangrijke maar nog niet beantwoorde vraag luidt of interne deining door nivelleren en circulatiepatronen door scheepvaart de doorlaatfracties nadelig vergroten. Tot op heden zijn laboratoriumproeven, computerberekeningen en veldmetingen van de zoutlek door schutsluizen onder geïdealiseerde omstandigheden verricht. Alle ons bekende metingen en berekeningen zijn uitgevoerd zonder nivelleren en zonder scheepvaart. Het nivelleren tussen zout en zoet water veroorzaakt al een geremde zouttong of zoetwatertong door de kolk. De looptijd van de zouttong is veel langer dan de tijd voor nivelleren zodat op het moment van het openen van de sluisdeuren de kolk veelal niet in rust is. Vervolgens worden de sluisdeuren geopend en vindt de inmiddels goed onderzochte zout-zoet uitwisseling plaats, maar met verstoringen door nivelleren en door de vorige schutting.

Daarom onderzochten we de invloed van zoutlekbeperkende middelen op de zoutlek in een werkende schutsluis die zo veel als mogelijk op de Volkeraksluizen lijkt. Zowel de vorm van de kolk als de methode van nivelleren van de Stevinsluis met rinketschuiven komen goed overeen met die van de Volkeraksluizen. De Stevinsluis ligt op een zout-zoet scheiding tussen de Waddenzee en het IJsselmeer, zie Figuur 4.11. De Stevinsluis beschikt over de traditionele luchtbellenschermen waarmee ons ontwerp van luchtbellenschermen vergeleken kan worden.

In het vervolg noemen we de traditionele luchtbellenschermen van de Stevinsluis met geperforeerde buizen de S-luchtbellenschermen en de innovatieve luchtbellenschermen van Deltares met dubbele rijen diffusers en luchtventielen de Δ-luchtbellenschermen.

Een nadeel dat meestal een voordeel werd is dat door spuien het zoutgehalte voor de Stevinsluis aanmerkelijk varieert maar meestal wel de 20 ppt bereikt die het VZM in de toekomst zou kunnen krijgen. Ook het getij van +/- 1,5 m op de Waddenzee leek aanvankelijk nadelig voor een goed vergelijk met de Volkeraksluizen, hoewel het voornemen is in het VZM een gereduceerd getij van +/- 0,15 m toe te laten. Echter, de variaties in buitenwaterstand en daarmee in schutverlies en in ebdebiet tijdens de methode van lekkende ebdeuren leverden meer testgevallen voor ons onderzoek naar de doorlaatfracties van zoutlekbeperkende middelen.

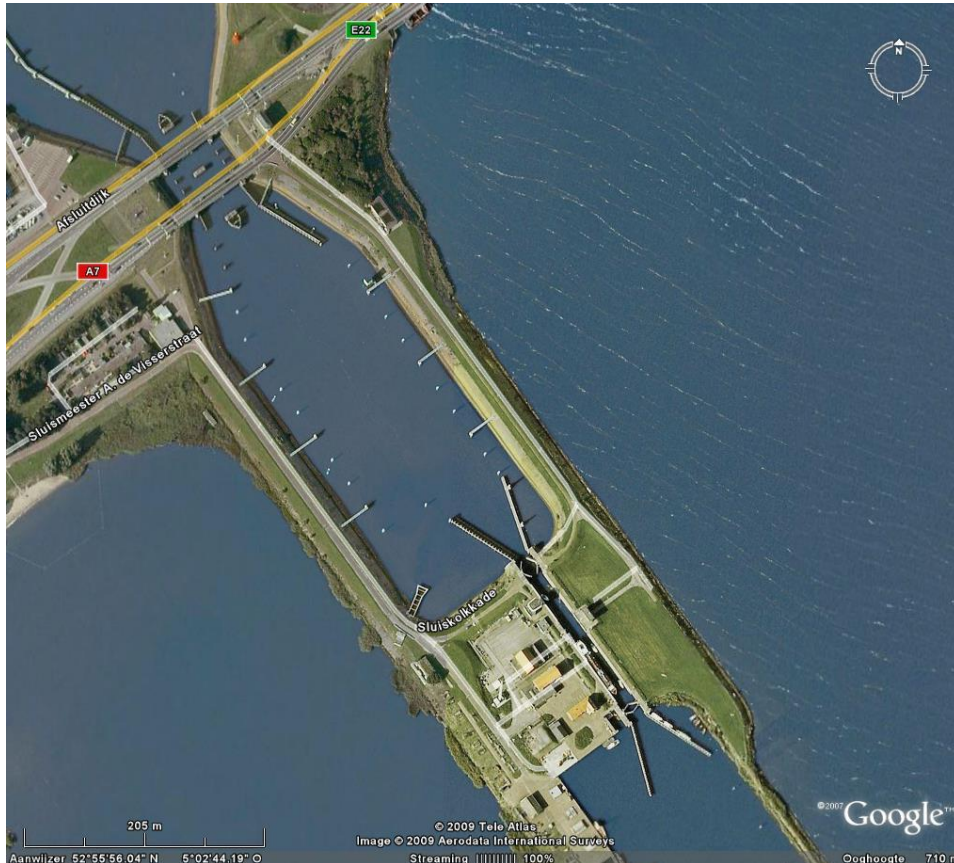
Een belangrijke eis voor ons onderzoek was het hanteren van deuropentijden in de Stevinsluis die vergelijkbaar zijn met de 25 minuten deuropentijd in de Volkeraksluizen. Maatgevend hierbij is de gelijke uitwisselingsgraad van de zoutmassa in de kolk van de Stevinsluis en in de beroepskolken van de Volkeraksluizen. Een gelijke uitwisselingsgraad betekent dezelfde verhouding tussen de afgelegde weg van de zouttong en de kolk lengte. We streefden naar 15 minuten deuropentijd in de Stevinsluis met maximaal 149 m kolk lengte. In termen van uitwisselingsgraad zijn de metingen in de Stevinsluis dan zeker goed te vertalen naar de Volkeraksluizen met 25 minuten deuropentijd en kolk lengten van maximaal 345 m.



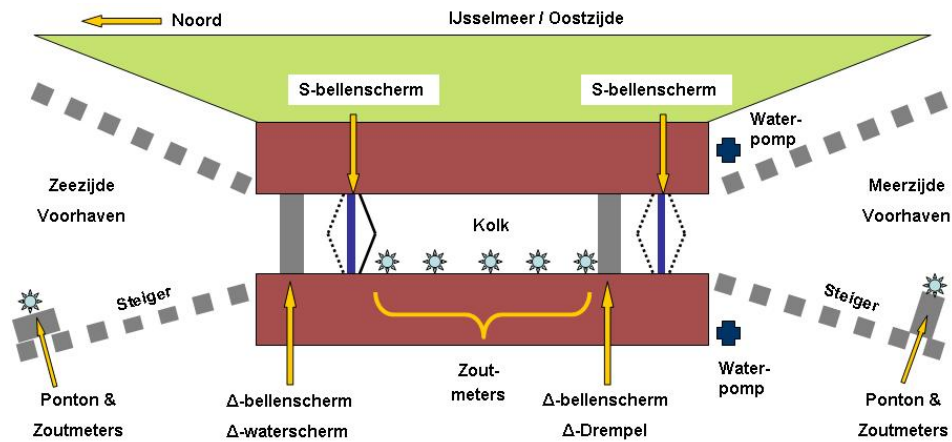
Figuur 4.11 Bodemligging aan IJsselmeerzijde en nabij de Stevinsluis. Merk op de ligging van de uitwateringssluizen naast de Stevinsluis en de ondiepere omgeving, de vaargeul naar Marina Den Oever (ZW in kaart) en de ondiepe stroomgeul naar de spuisluizen (oostelijk naast de strekdam van de voorhaven).

Na recent onderhoudswerk werd de zoete, zuidelijke voorhaven (zie Binnenhaven in Figuur 4.11) van de Stevinsluis ca. 5 m diep en dieper dan de 3-3,5 m diepe vaargeul door het IJsselmeer. Tijdens onze praktijkproef bleek deze voorhaven goed als zoutvang te fungeren. Echter, we betrokken deze functie niet in ons onderzoek: uit deze voorhaven pompten we op 2 m diepte water voor de waterschermen, dus boven het niveau van de kolkvloer. Hier liggen nog mogelijkheden voor onderzoek op ware schaal naar de afmetingen en de werking van een zoutvang tijdens het vullen met kolkwater, het onttrekken van brak water uit de zoutvang én de verticale menging van brak water uit de zoutvang naar de voorhaven.

Dankzij veel inzet en flexibiliteit van diverse diensten van Rijkswaterstaat, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, PWN drinkwaterleidingbedrijf Noord-Holland, van de sluismeesters en van technisch personeel ter plaatse kon Deltares deze praktijkproeven in de Stevinsluis te Den Oever (NH) uitvoeren.



Figuur 4.12 Overzichtsfoto Stevinsluis met zijn voorhavens naar Waddenzee (Noord) en IJsselmeer (Zuid). Bij de letter S van de tekst Sluiskolkkade in de foto is de uitlaat van het gemaal Leemans zichtbaar. De sluisdeuren staan naar de zoute zijde gedeeltelijk open. Aan het zuidelijke kolkeind zijn zowel de vloed- als eb- sluisdeuren in ruitvorm gesloten.



Figuur 4.13 Schematisch overzicht van posities zoutlekbeperkende middelen, meetpunten en benaming; met drukmeters werden de waterstanden in kolk en voorhavens gemeten. De kolk is 148,6 m lang, 14,3 m breed, de kolkvloer ligt op -4,7 m NAP. De frames met de Δ -luchtbellenschermetc. liggen op ca. 10 m aan zeezijde van de sluisdeuren, zie ook Figuur 4.14.



Figuur 4.14 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 druiptocht in de ruimte voor de aandrijving van de deuren.

Midden-centraal: één van de twee waterpompen met zijn dieselgenerator.

Midden-rechts: de gele compressor voor onze luchtbellenschermen.

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

4.5.2 Opstelling en instrumentatie van de praktijkproef in de Stevinsluis

In deze paragraaf bespreken we kort de opstelling van de luchtbellenschermen, waterscherm, drempel en de vele meetinstrumenten, voor details zie (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010).

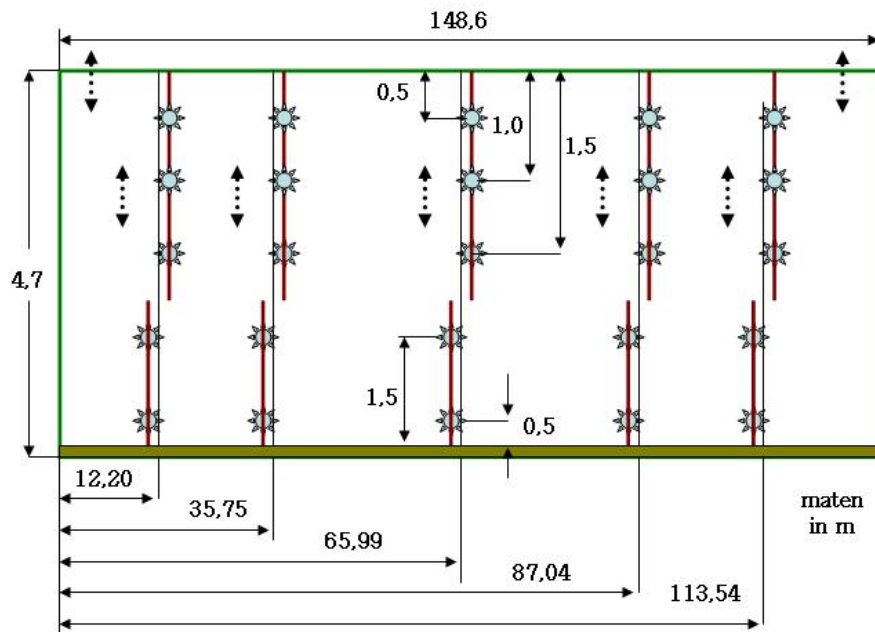
Figuur 4.12 toont een luchtfoto van de Stevinsluis en zijn zoute voorhaven aan de noordzijde in verbinding met de Waddenzee en de zoete voorhaven aan de zuidzijde verbonden met het IJsselmeer. Ten oosten van de Stevinsluis ligt de Afsluitdijk met spuisluizen, zie Figuur 4.11.

Al snel bleek het zoutgehalte in de noordelijke voorhaven veel lager dan 20 ppt te zijn, terwijl we 28 ppt verwachten. Zo veel als mogelijk werd in het weekend gespuid of via de spuisluizen bij Kornwerderzand, aan het oostelijk eind van de Afsluitdijk. Het beperkte spuien resulteerde in 15-25 ppt zout water bij de monding van en in de zoute voorhaven.

Op zich toonde de toename van het zoutgehalte voor de schutsluis door het beperken van het spuiregime de gunstige locatie van spuisluizen naast een zout-zoet scheidende schutsluis zoals ook bij de Volkeraksluizen. Werkende spuisluizen verlagen de zoutlek. Hetzelfde geldt voor het overslaan van polderwater via gemaal Leemans in de zoute voorhaven (zie ook tekst bij Figuur 4.12). Deze overslag werd gedurende onze meetperiode verlegd naar het veel zuidelijker gelegen gemaal Lely.

Figuur 4.13 geeft een schematisch overzicht van de opstellingen met luchtbellenschermen etc. en de foto's in Figuur 4.14 deze opstellingen, computers, waterpompen, luchtcompressoren en één van de grootste schepen (tankers of zandschepen) in de kolk.

In de praktijkproef maten we het zoutgehalte in de kolk met totaal 25 zoutmeters over vijf posities langs de kolk en op vijf posities over de kolkdiepte, zie Figuur 4.15. Per verticaal in de kolk en in de voorhavens bewogen de bovenste drie zoutmeters mee met de locale waterstand. De zoutmeters werden beschermd door stootkussens en de scheepvaart kreeg instructies om aan de andere kolkzijde af te meren. De sluismeesters hielpen ons hierbij uitstekend.

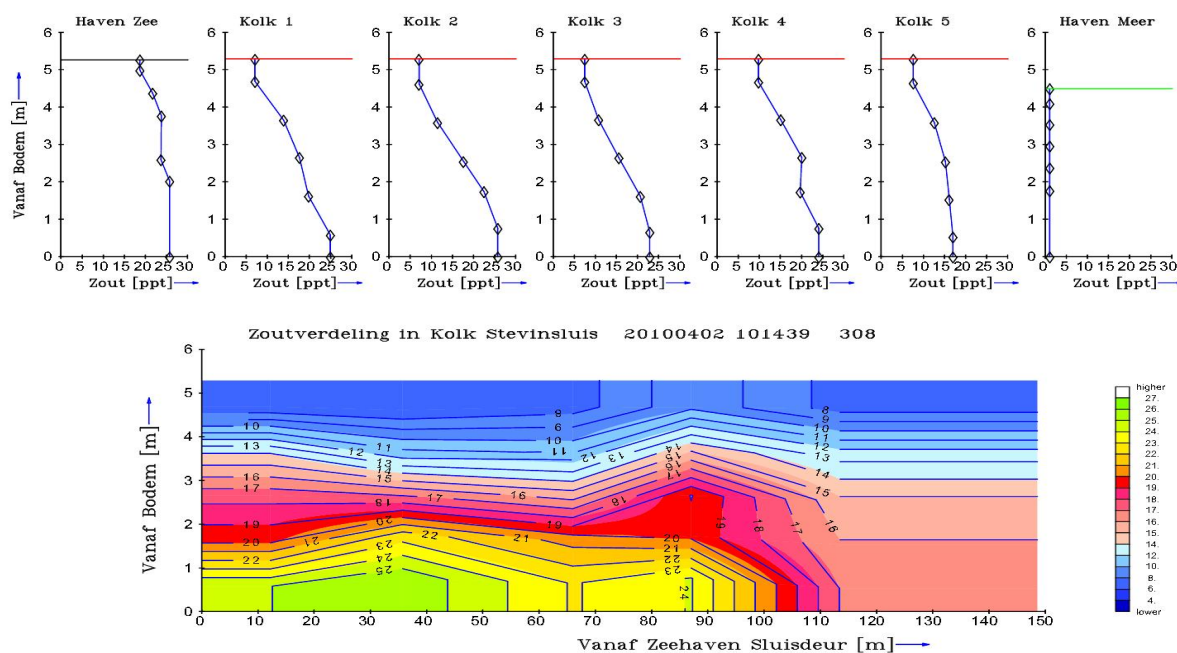


Figuur 4.15 Positie van 25 zoutmeters (druk, temperatuur en geleidbaarheid) in de kolk en rechts is de zeezijde: de bovenste drie hangend aan een boei die in de kolk drijft en de twee onderste zoutmeters op vaste hoogte boven de kolkvloer.

Het kolkeinde verbonden met de noordelijke voorhaven van de Stevinsluis, in verbinding met de Waddenzee, noemen we veelal de zeezijde van de kolk en het andere kolkeinde ligt aan meerzijde van de kolk.

Ongeacht het stadium van wel/niet schutten registreerden we per 5-10 seconden de zoutgehalten. Hieruit berekenden we de zoutmassa in de kolk van de Stevinsluis, ongeacht het stadium van schutten. In hetzelfde ritme maten we ook de zoutgehalten in de voorhavens en wat trager de waterstanden in de kolk en voorhavens. Verder registreerden we gelijktijdig met deze metingen ook de instructies voor het openen en sluiten van sluisdeuren en rinketschuiven, vergelijkbaar met Figuur 3.14. Tenslotte maten we ook de luchtdebieten van de Δ -luchtbellenschermen, het waterdebiet van ons waterscherm en de periode van werkende compressoren voor de S-luchtbellenschermen.

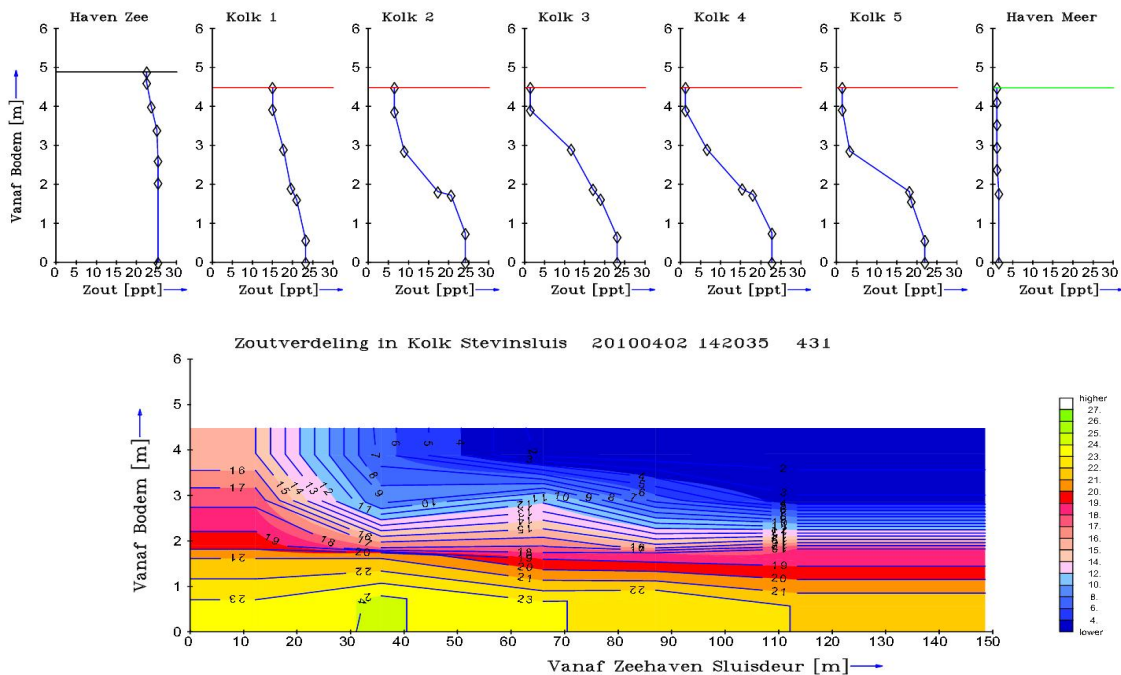
Als illustratie van de nauwkeurigheid van de bepaling van de zoutmassa in de kolk tonen we slechts twee stadia van de verdeling van zout in de kolk tijdens een schutting naar zeezijde (zout) en naar meerzijde (zoet).



Figuur 4.16 Reis van zouttong in de Stevinsluis naar gesloten kolkeinde, uittreden van zoetere toplaag al merkbaar in zoutprofiel in voorhaven zeezijde ; 5 minuten na opening van sluisdeuren naar zeezijde om 10:09:39 uur op 2 april 2010.

Figuur 4.16 toont de zoutverdeling in de kolk 5 minuten na het openen van de sluisdeuren naar de zeezijde van de Stevinsluis. De zouttong is duidelijk herkenbaar. Figuur 4.16 toont de verticale verdeling van zoutgehalte bij de sluisdeuren in de zoute voorhaven en de heersende waterstand die uiteraard gelijk is aan het kolkpeil. Aan de zoete zijde is de kolk afgesloten. De grafiek rechtsboven in Figuur 4.16 toont verzilt water in de zuidelijke voorhaven naar het IJsselmeer en zijn lagere waterstand (horizontale, groene lijn).

Analoog toont Figuur 4.17 een momentopname 4 minuten nadat de sluisdeuren naar de zoete zijde openen. Duidelijk zichtbaar is de zoetwatertong (blauw gekleurd) die de kolk van rechts, vanuit de zoete voorhaven, intreedt. Het zoute kolkwater onderin de kolk stroomt naar de zoete voorhaven.



Figuur 4.17 Reis van zoetwatertong naar gesloten kolkeinde, 4 minuten na openen sluisdeuren naar meerzijde om 14:16:35 op 2 april 2010.

De gegevens achter dergelijke figuren zijn bewerkt tot zoutmassa in de kolk. Voor details zie de studie (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010) naar de praktijkproef in de Stevinsluis.

4.5.3 Luchtbellenscherm, waterscherm en extra drempel: de resultaten

We bewerkten ca. 870 schuttingen, gemeten vanaf 31 maart 2010 tot 27 mei 2010, en Tabel 4.1 en 4.2 biedt een overzicht van de onderzochte variaties. We onderzochten niet de werking van de 5 m diepe meerzijde-voorhaven als zoutvang. Weliswaar werden de waterschermen gevoed met verzilt water uit de meerzijde-voorhaven maar dit water werd op 2 m diepte onttrokken en dus boven het niveau van de kolkvloer gelegen op ca. 4,5 m onder het peil van deze voorhaven.

Uit 144 schuttingen naar meerzijde en 157 naar zeezijde bepaalden we eerst in hoeverre de theoretische schatter volgens de theorie van zout-zoet uitwisseling toepasbaar is. De theoretische schatter is in mathematisch-fysische termen in (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010) gedefinieerd. De theoretische schatter geldt voor de totale verandering van de zoutmassa in de kolk gedurende de deuropentijd en zónder zoutlekbeperkende middelen.

Na het openen van de kolk naar de zeezijde zal de zoutmassa in de kolk toenemen maar afnemen na het openen van de kolk naar meerzijde. In beide gevallen spreken we over de verandering van de zoutmassa in de kolk, ongeacht het teken. De verandering van de zoutmassa van de kolk bij schutten naar meerzijde is dus in werkelijkheid een afname van zoutmassa uit de kolk naar de zoete voorhaven.

De theoretische schatter voor de horizontale as in Figuur 4.18 is gebaseerd op:

- de diepte-gemiddelde zoutgehalte in de relevante voorhaven;
- het volume-gemiddelde zoutgehalte in de kolk op het moment van openen van de sluisdeuren;
- het kolkpeil en
- de deuropentijd.

Tabel 4.1 Overzicht van geanalyseerde schuttingen bij geopende sluisdeuren naar zeezijde met definitie en naamgeving van de onderzochte cases. S-luchtbellenschermb van de Stevinsluis, Δ -luchtbellenschermen waterschermb. Fr_t is het zg. Froude-lucht getal (Abraham & V.d. Burgh, 1962) gerelateerd aan het luchtbellenschermb of tussen haakjes aan het waterschermb en gemiddeld per case.

| Zeezijde | Omschrijving in tekst | Lucht [N/s] | Water [t/s] | Fr_t [-] | Schuttingen |
|----------|--------------------------------------------------|----------------|----------------|---------------|-------------|
| 1 | Onbeschermd kolk | 0 | 0 | 0 | 157 |
| 2 | S-luchtbellenschermb | 103 | 0 | 0,77 | 97 |
| 3 | S-luchtbellenschermb | 246 | 0 | 1,44 | 76 |
| 4 | Δ -luchtbellenschermb | 144 | 0 | 0,64 | 1 |
| 5 | Δ -luchtbellenschermb | 207 | 0 | 1,22 | 28 |
| 6 | Δ -luchtbellenschermb | 431 | 0 | 1,67 | 15 |
| 7 | Δ -luchtbellen- & waterschermb | 94 | 1543 | 0,83 | 9 |
| 8 | Δ -luchtbellen- & waterschermb | 221 | 889 | 0,98 | 8 |
| 9 | Δ -luchtbellen- & waterschermb | 227 | 1479 | 1,14 | 7 |
| 10 | Δ -luchtbellen- & waterschermb | 411 | 1523 | 1,13 | 16 |
| 11 | Δ -waterschermb | 0 | 860 | (1,92) | 7 |
| 12 | Δ -waterschermb | 0 | 1505 | (2,21) | 10 |
| 13 | Lekkende ebdeuren & Δ -luchtbellenschermb | 123 | 0 | 0,58 | 7 |

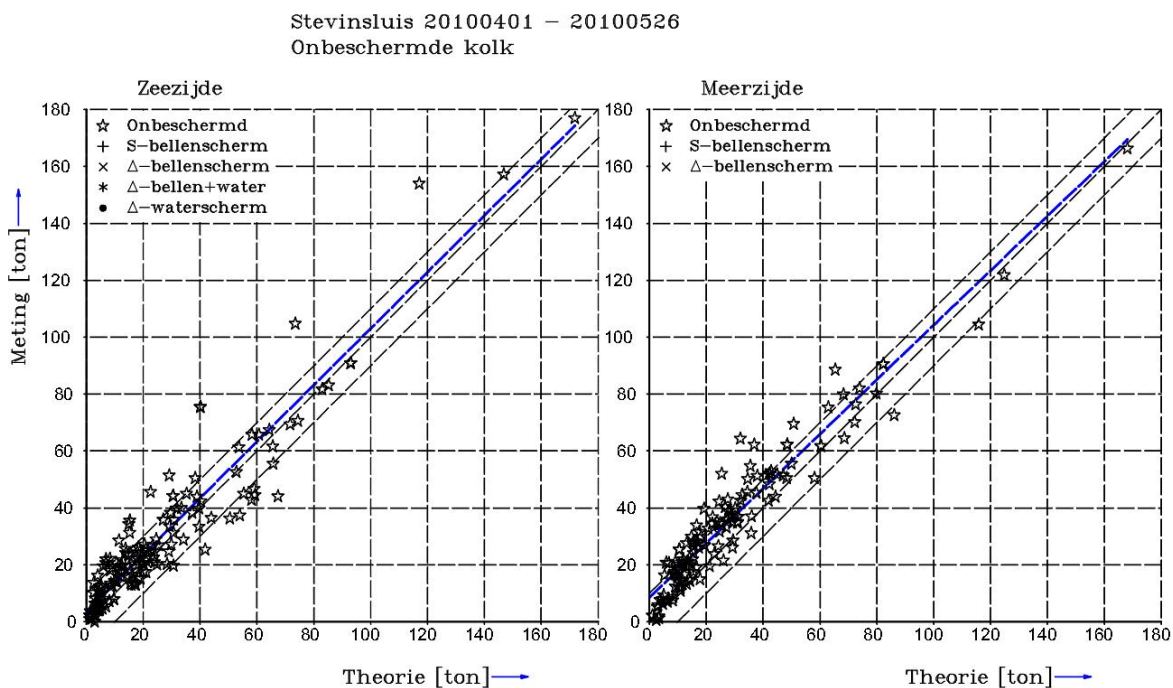
Tabel 4.2 Overzicht van geanalyseerde schuttingen bij geopende sluisdeuren naar meerzijde met definitie en naamgeving van de onderzochte cases. S-luchtbellenschermb van de Stevinsluis, Δ -luchtbellenschermen waterschermb van Deltares. Het Froude-lucht getal heet betrekking op het luchtbellenschermb en is gemiddeld per case.

| Meerzijde | Omschrijving in tekst | Lucht [N/s] | Water [t/s] | Froude-lucht getal [-] | Schuttingen |
|-----------|--------------------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------|-------------|
| 1 | Onbeschermd kolk | 0 | 0 | 0 | 144 |
| 2 | Verhoogde drempel | 0 | 0 | 0 | 64 |
| 3 | S-luchtbellenschermb | 103 | 0 | 0,67 | 78 |
| 4 | S-luchtbellenschermb | 245 | 0 | 1,02 | 36 |
| 5 | S-luchtbellenschermb & verhoogde drempel | 99 | 0 | 0,61 | 17 |
| 6 | S-luchtbellenschermb & verhoogde drempel | 248 | 0 | 1,08 | 51 |
| 7 | Δ -luchtbellenschermb | 241 | 0 | 1,10 | 28 |
| 8 | Δ -luchtbellenschermb | 439 | 0 | 1,23 | 23 |
| 9 | Δ -luchtbellenschermb & verhoogde drempel | 103 | 0 | 0,73 | 8 |
| 10 | Δ -luchtbellenschermb & verhoogde drempel | 201 | 0 | 0,82 | 6 |
| 11 | Lekkende ebdeuren & Δ -luchtbellenschermb | 187 | 0 | 1,06 | 11 |

Al deze grootheden zijn in de Stevinsluis gemeten of direct uit metingen afgeleid zonder correcties voor scheepvaart. Hieruit volgt de theoretische schatter voor de verandering van de zoutmassa in de kolk.

Metingen in de kolk en berekeningen (zie toplaag in Figuur 4.5) tonen dat er ook voor zeer lange deuropentijden een restant oorspronkelijk kolkwater achter blijft. Daarom begrepsden we het volume-gemiddelde zoutgehalte van de kolk tot 2 ppt zout onder het diepte-gemiddelde zoutgehalte van de zoute voorhaven. Omgekeerd, bij lange deuropentijden naar de zoete zijde, begrepsden we het volume-gemiddelde zoutgehalte van de kolk tot 2 ppt zout boven het diepte-gemiddelde zoutgehalte van de zoete voorhaven. Hiermee begrepsden we het maximale en minimale zoutmassa en de theoretische schatting van de verandering van de zoutmassa in de kolk.

Deze theoretische schatter vormt de grondslag van het Zoutlekmodel. Figuur 4.18 toont het goede resultaat dat weliswaar afwijkingen heeft vnl. onder invloed van getij bij lange deuropentijden naar zeezijde en door scheepvaart naar zee- en meerzijde.



Figuur 4.18 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. De blauwe lijn is de lineaire benadering en zou idealiter 1:1 moeten zijn.

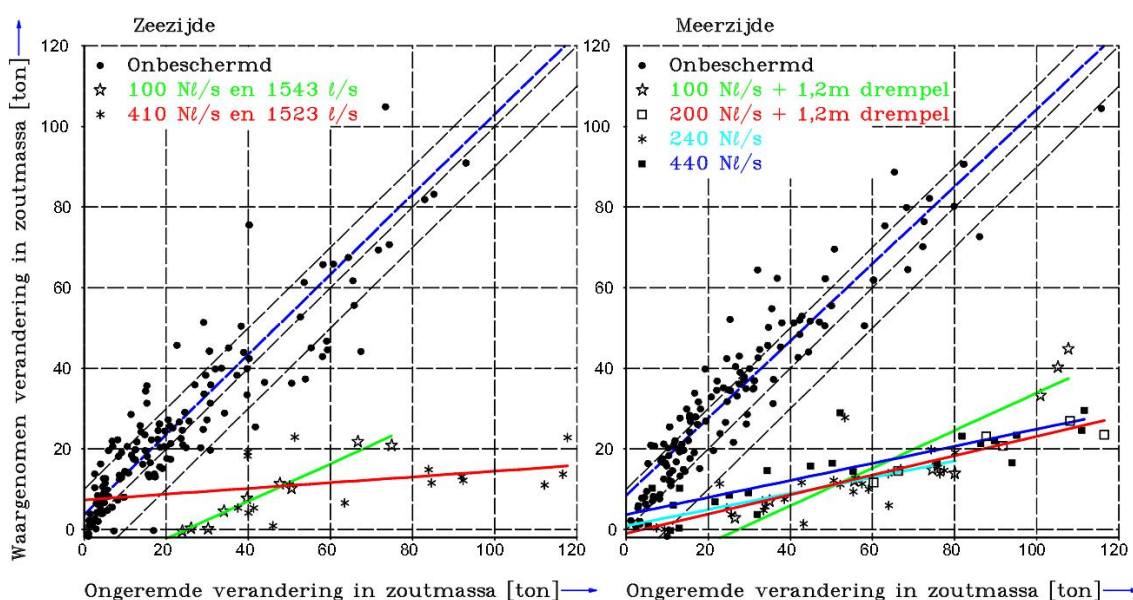
Zonder zoutlekbeperkende middelen volgt uit deze afname én uit het aantal schuttingen per dag de zoutlek van de Stevinsluis; we illustreren dit met het volgende rekenvoorbeeld. Uit het rechterdeel van Figuur 4.18 volgt dat de kolk wel 60 ton per schutting naar meerzijde kan verliezen. Wanneer de kolk per dag 20 keer naar meerzijde schut onder dezelfde omstandigheden bedraagt de zoutlek 1200 ton per 24 uur oftewel ca. 14 kg/s.

De resultaten in Figuur 4.18 zonder zoutlekbeperkende middelen zijn ook van groot belang als referentie van proeven mét zoutlekbeperkende middelen. Een directe herhaling van de

proef met en zonder zoutlekbeperkend middel bleek veelal niet haalbaar door getij en voorrang aan afhandelen van scheepvaart.

Echter, van een proef met enig zoutlekbeperkend middel is bovenstaande puntenlijst aan gegevens beschikbaar. Uit deze gegevens leiden we met de theoretische schatter de referentie af. Deze referentie hanteren we in de volgende bespreking. Figuur 4.18 toont de betrouwbaarheid van deze referentie. We noemen deze referentie: de ongeremde verandering van de zoutmassa (in de kolk).

We gaan later in op de methode van lekkende ebdeuren maar tonen eerst in Figuur 4.19 de beste resultaten van de overige experimenten uit Tabel 4.1 en 4.2. Langs de horizontale as is uitgezet de ongeremde verandering van de zoutmassa volgens de theoretische schatter.



Figuur 4.19 Verticaal de in de Stevinsluis waargenomen verandering van de zoutmassa tijdens geopende kolk uitgezet tegen horizontaal de ongeremde verandering. Vergelijken van linker en rechter figuur toont dat geringe zout-zoet uitwisseling verkregen wordt met óf drempels óf waterschermen naast luchtbellenschermen.

Het linkerdeel van Figuur 4.19 toont de experimenten die we aan de zeezijde verrichten met luchtbellenscherm en waterscherm. Hiermee werden de geringste veranderingen in zoutmassa geregistreerd t.o.v. de ongeremde verandering in zoutmassa. De gekleurde lijnen in dit figuur zijn de beste lineaire schatting behorende bij de proevenserie met dezelfde zoutlekbeperkende middelen. De gekleurde lijnen dienen ter verduidelijking van de uitkomsten per proevenserie.

Meteen valt in het linkerdeel van Figuur 4.19 de groene lijn op als benadering van de metingen aangegeven met open sterretjes. Dit zijn metingen in proevenserie 7 volgens Tabel 4.1 met het Δ -luchtbellenscherm gevoed met een beperkt luchtdebiet van 100 Nl/s én ondersteund met een waterscherm van 1,6 m³/s debiet. De deuropentijd tijdens deze proevenserie was constant 15 minuten.

Het linkerdeel van Figuur 4.19 toont dat bij 20–30 ton ongeremde verandering in zoutmassa deze combinatie van luchtbellenscherm en waterscherm de zoutmassa niet verandert. De meetpunten (open sterretjes) bij 20-30 ton bewijzen deze uitspraak. We menen dat hier de stromingsprocessen optreden die Figuur 4.9 illustreert: het luchtbellenscherm buigt niet mee met de zouttong en een deel van het zoetere water uit het waterscherm komt in de kolk en vervangt de indringing van zouter water uit de zeezijde-voorhaven. Deze conclusie stemt overeen met visuele waarnemingen van duidelijk herkenbare schuimranden voor en achter het bellenscherm. De schuimranden markeren de scheidingslijn water opgestuwd door de schermen en oppervlaktewater van de kolk zoals in Figuur 3.9.

Waarom varieert de ongeremde verandering van de zoutmassa in de kolk terwijl de deuropentijd 15 minuten blijft? Het antwoord luidt dat wanneer het verschil in zoutgehalte over de schermen toeneemt bij gelijke deuropentijd ook de ongeremde verandering in zoutmassa toeneemt. Een groter verschil in zoutgehalte kan veroorzaakt worden doordat de zeezijde-voorhaven zouter wordt omdat er niet wordt gespuid via de Afsluitdijk. Een andere mogelijkheid is dat de kolk zoeter is geworden door bewust gekozen grote deuropentijden naar meerzijde.

Bij meer dan 50-55 ton ongeremde verandering van de zoutmassa blijkt uit Figuur 4.19 dat het luchtdebiet dan onvoldoende krachtig is: er kan beter op 400 Nl/s worden overgeschakeld. Deze omschakeling naar een krachtiger luchtbellenscherm geeft de meetpunten met gesloten sterretjes en benaderd door de rode lijn in het linkerdeel van Figuur 4.19.

Uit deze en vele andere metingen blijkt dat de geringste zoutlek ontstaat door het aanpassen van het luchtdebiet aan de heersende verschillen in zoutgehalte over de schermen; in Figuur 4.19 zichtbaar als variaties in ongeremde zoutmassa. Zoals we later aan de hand van Figuur 4.20 nog zullen bespreken is het Froude-lucht getal de stuurparameter. Een dergelijk adaptieve sturing vergt representatieve zoutmetingen in de kolk en in de voorhavens en een eenvoudige rekenregel in het besturingsprotocol dat een geschikt regelbaar luchtbellenscherm instelt. Immers, Figuur 4.19 toont dat wanneer bij te kleine verschillen in zoutgehalte, lees geringe ongeremde verandering in zoutmassa, het luchtdebiet op 400 Nl/s wordt gehouden het scherm zijn zout-zoet scheidende functie benadeelt door te veel menging. Het te krachtige luchtbellenscherm laat meer zout door dan minimaal mogelijk is en vergt ook onnodig veel compressorvermogen en energieverbruik. Bij voldoende grote verschillen in zoutgehalte laat een zwakker luchtbellenscherm van 100 Nl/s meer dan minimaal mogelijk zout door bij lager energieverbruik.

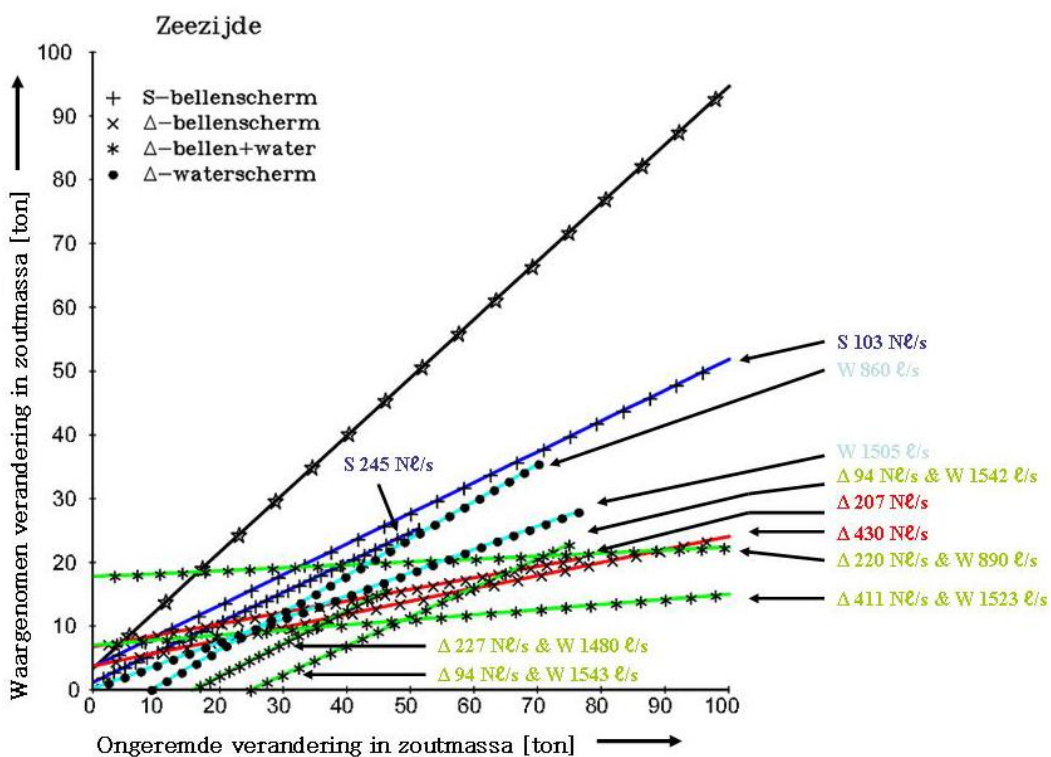
Uit proeven aan de meerzijde van de kolk zien we in Figuur 4.19 overeenkomstige bevindingen waarbij een extra 1,2 m hoge drempel naast het luchtbellenscherm de beschermende rol van een waterscherm lijkt grotendeels over te nemen. Vergelijk daartoe de groene en rode lijnen in beide figuurdelen: aan zeezijde met het waterscherm van 1,6 m³/s en aan meerzijde met een extra 1,2 m hoge drempel.

Aan meerzijde blijkt dat het Δ -luchtbellenschermen ook zonder drempel zeer goed werken. Een waterscherm biedt een luchtbellenscherm méér bescherming dan zijn werking als drempel. Deze extra bescherming blijkt uit de lagere waarden van de rode lijn met waterscherm (linkerdeel Figuur 4.19) t.o.v. de rode lijn met drempel (rechterdeel Figuur 4.19).

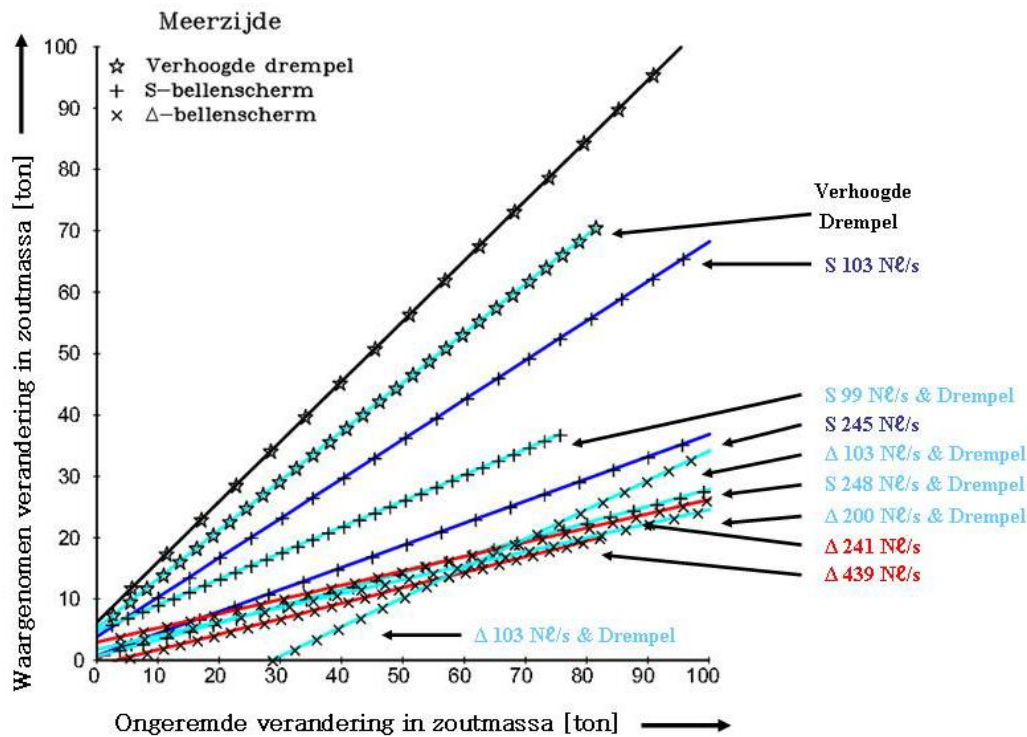
Figuur 4.20 en 4.21 vat alle proevenseries van Tabel 4.1 en 4.2 samen met uitzondering van de methode van lekkende ebdeuren die we hierna wel bespreken.

Uit de proevenseries 5 en 6 in Tabel 4.2 blijken de S-luchtbellenschermen uit geperforeerde buizen wél opvallend baat te hebben bij de beschermende werking van een extra verhoogde drempel, zie Figuur 4.21.

Ook blijkt dat bij ruwweg dezelfde luchtdebieten, compressorvermogen en energieverbruik de Δ -luchtbellenschermen 50% minder zout door laten dan de S-luchtbellenschermen. Kortom, de eerste stap is het toepassen van Δ -luchtbellenschermen met dubbele rijen van diffusers en luchtventielen (zie Figuur 3.8) in plaats van geperforeerde buizen.



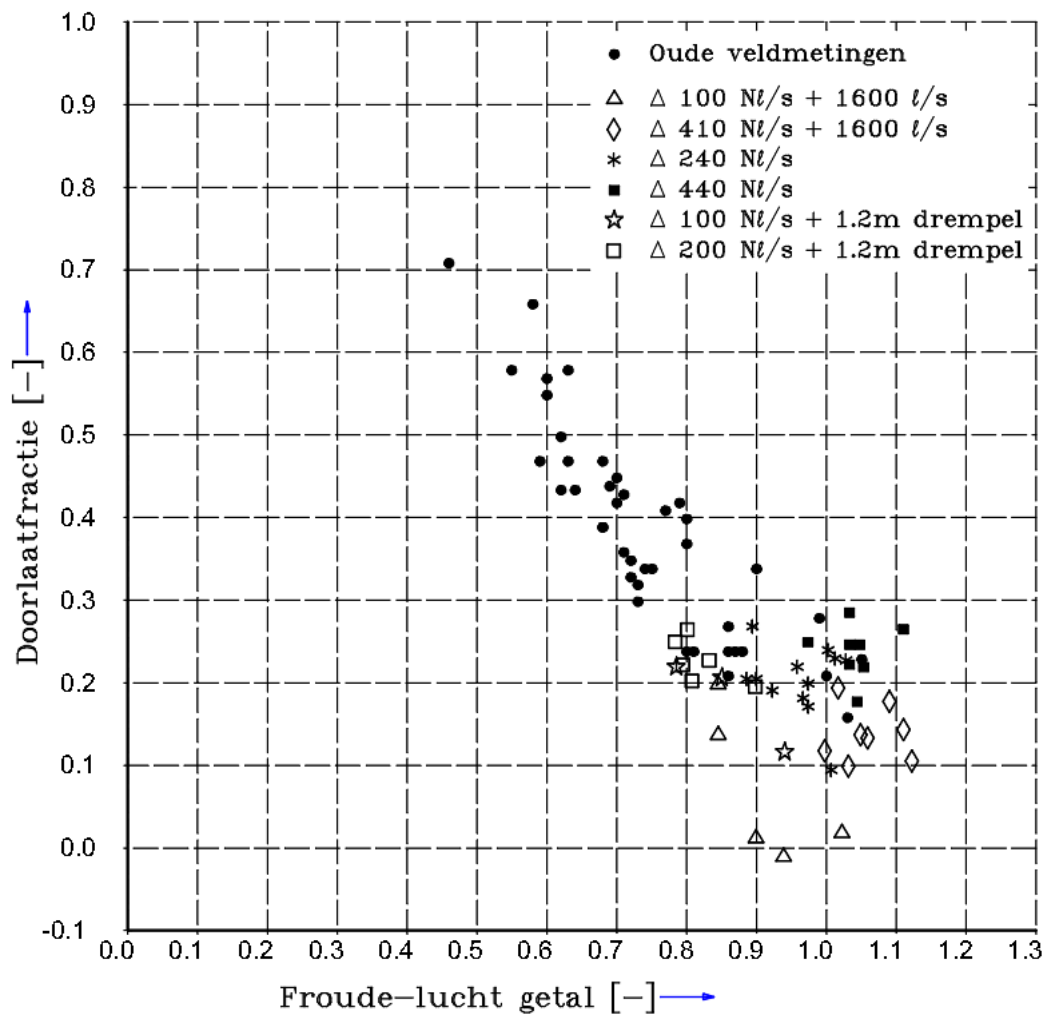
Figuur 4.20 Verzameling van regressielijnen voor schuttingen naar zeezijde. Horizontaal de toename van de zoutmassa in de kolk na een schutting zónder en verticaal mét zoutlekbeperkende middelen. Symbool S staat voor Stevinsluis-luchtbellenscherm, Δ voor Deltares-luchtbellenscherm en W voor waterscherm, Nℓ/s heeft betrekking op luchtdebiet en ℓ/s op het waterdebiet.



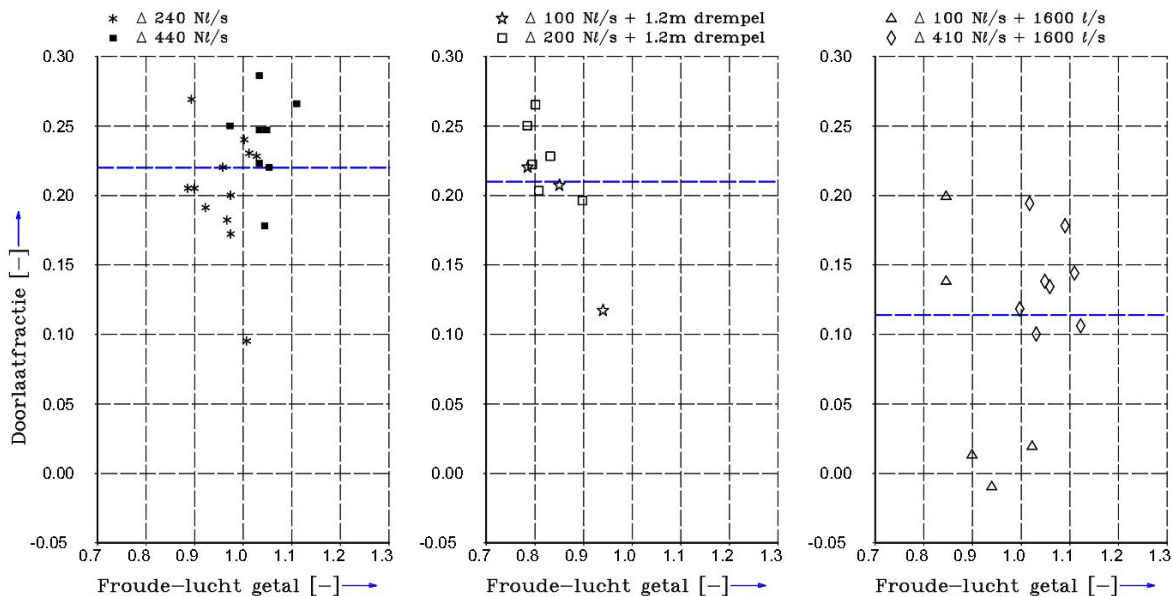
Figuur 4.21 Verzameling van regressielijnen voor schuttingen naar meerzijde. Horizontaal de toename van de zoutmassa in de kolk na een schutting zónder en verticaal mét zoutlekbeperkende middelen. Symbool S staat voor Stevinsluis-luchtbellenscherm, Δ voor Deltares-luchtbellenscherm, Nl/s heeft betrekking op het luchtdebiet.

4.5.4 Optimaal bereik in Froude-lucht getal van luchtbellenschermen

De doorlaatfractie speelt een belangrijke rol als invoergrootheid in het Zoutlekmodel. Eerder bespraken we Figuur 3.7 met de doorlaatfracties die in het verleden zijn bereikt met geïdealiseerde veldproeven in diverse schutsluizen. De uitkomsten van Figuur 4.19 zijn als doorlaatfractie in Figuur 4.22 geplaatst, samen met de doorlaatfracties uit eerdere metingen (Figuur 3.7). Voor Figuur 4.22 selecteerden we de proeven met een Froude-luchtgetal tussen 0,8 en 1,2. In Figuur 4.23 splitsten we deze selectie uit per combinatie van luchtbellenscherm zonder of met drempel of waterschermb. 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.



Figuur 4.22 Uitbreiding van Figuur 3.7 (zwarte stippen) met onze beste varianten van luchtbellenschermen en soms ondersteund met waterscherm of drempel volgens de praktijkproef in de Stevinsluis.



Figuur 4.23 Detail van Figuur 4.22 m.b.t. resultaten bereikt in de Stevinsluis. Linkerdeel alleen Δ -luchtbellenschermen, rechterdeel Δ -luchtbellenschermen met waterschermen en centraal Δ -luchtbellenschermen met extra drempel. De gestippelde blauwe lijnen geven het gemiddelde van de getoonde doorlaatfracties.

Het 0,8 - 1,2 interval in Froude-lucht getal wordt ook onderbouwd met onze laboratoriumproeven en gedetailleerde computersimulaties welke tonen dat bij een Froude-lucht getal veel groter dan 1,0 de doorlaatfractie nauwelijks afneemt (Figuur 4.10). Figuur 4.23 is gebaseerd op een groot bereik in verschillen in zoutgehalte van ca. 10 ppt tot 20 ppt.

Het optimale bereik van het Froude-lucht getal van 0,8 - 1,2 lijkt klein en daarom moeilijk beheersbaar te zijn. Echter, in termen van luchtdebiet is het optimale bereik wel groot. We lichten dit als volgt toe. Het Froude-lucht getal is evenredig met het luchtdebiet per meter kolkbreedte tot de macht 1/3 (Abraham & V.d. Burgh, 1962). Een verandering van het Froude-lucht getal van 0,8 naar 1,2 wordt dus bereikt met ca. 3,4 maal zo groot luchtdebiet. De omschakeling van 100 Nl/s naar 400 Nl/s past in dit bereik.

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 drempel zullen we in Hoofdstuk 5 de zoutlek door de Volkeraksluizen bespreken. Daartoe concluderen we als volgt:

1. Aan de hand van Figuur 4.22 concluderen we dat met optimaal ingestelde Δ -luchtbellenschermen een doorlaatfractie van 0,25 wel met voldoende zekerheid gehaald kan worden;
2. Een optimaal ingestelde Δ -luchtbellenschermen ondersteund met een drempel bereikt een doorlaatfractie van 0,20 wel met voldoende zekerheid;
3. Met optimaal ingestelde Δ -luchtbellenschermen ondersteund met een waterscherm kan een doorlaatfractie van 0,15 wel met voldoende zekerheid worden bereikt en
4. Voor een gevoeligheidsanalyse van de robuustheid van ons advies rekenen we met een tegenvallende doorlaatfracties die 0,05 hoger liggen dan voornoemde.

4.5.5 Methode van lekkende ebdeuren in de praktijkproef

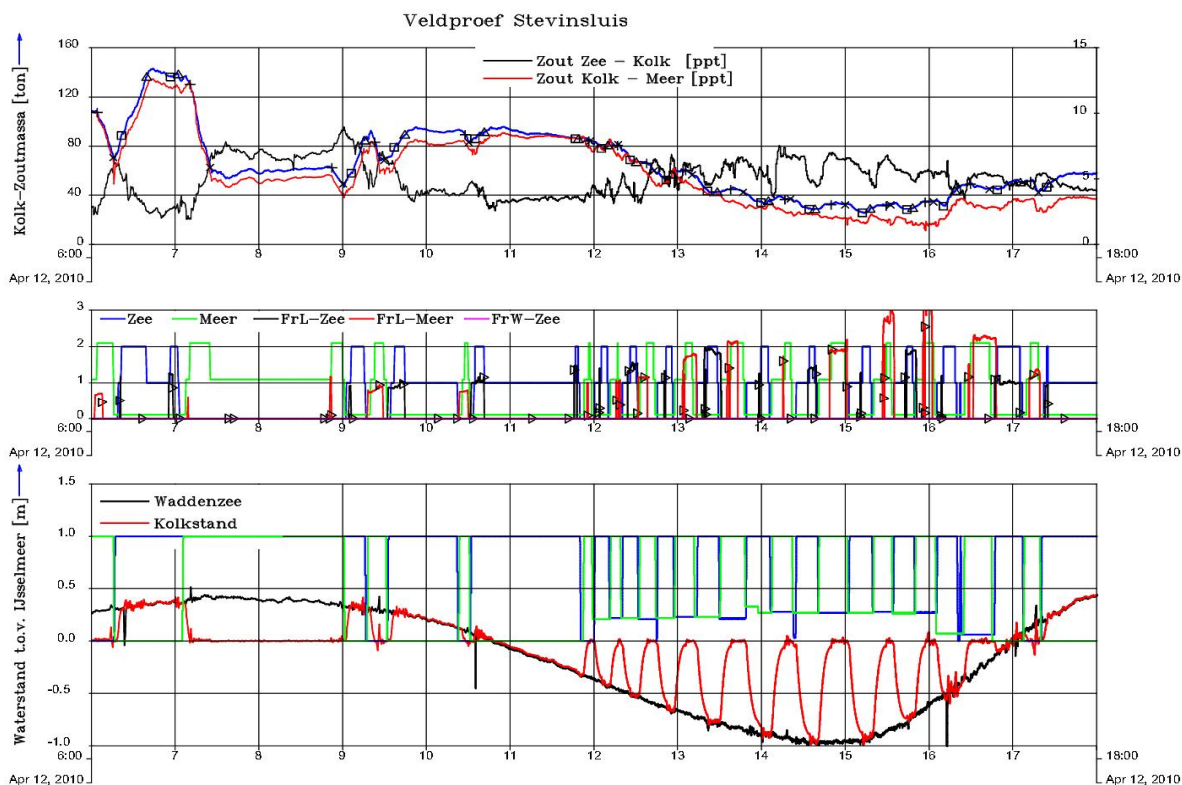
De toevoeging van drempels of waterschermen zal o.a. afhangen van hun kosten en/of hun beperking van scheepvaart. Bij deze afweging kan de methode van lekkende ebdeuren nog de voorkeur krijgen waarbij nu het watergebruik wordt benut om de kolk te verversen. Een zoetere kolk levert minder aandrijving voor de zout-zoet uitwisseling naar meerzijde met zoeter kolkwater en dus een geringe zoutlek. In deze paragraaf bespreken we de bevindingen van onze continue toepassing van de methode van lekkende ebdeuren; in paragraaf 3.3.3 en met Figuur 3.10 legden we onze procedure uit.

Een complicatie is dat er voor de Stevinsluis een beperkt getijdenvenster geldt waarin de methode van lekkende ebdeuren kan worden toegepast. Naar verwachting blijft het peil in het HD hoger dan in het VZM en kan in de Volkeraksluizen de methode van lekkende ebdeuren in de Volkeraksluizen altijd toegepast worden.

Gedurende het getijdenvenster voor de Stevinsluis verandert het verval over de kolk en bij gelijke kierstand van de rinketschuiven verandert ook het zg. ebdebiet dóór de kolk. Met dit getijafhankelijke ebdebiet varieert het zouttransport via de kolk terug naar de zeezijde.

Daarom bleek het niet eenvoudig de vermindering van de zoutlek door het toepassen van de methode van lekkende ebdeuren in de Stevinsluis te demonstreren en te kwantificeren. Toch is het effect aanmerkelijk maar de overtuigingskracht hangt af van inzicht in de "hartslag" van de schutsluis. We demonstreren de invloed van de methode van lekkende ebdeuren op de zoutlek als volgt.

Analoog Figuur 3.14 toont Figuur 4.24 het *cardiogram* van de Stevinsluis op 12 april 2010. Bij lage buitenwaterstand (eb) van 12:00 tot 16:45 uur pasten we de methode van lekkende ebdeuren toe. We stelden de rinketschuiven op afstand maar handmatig in met registratie van hun kierstand.



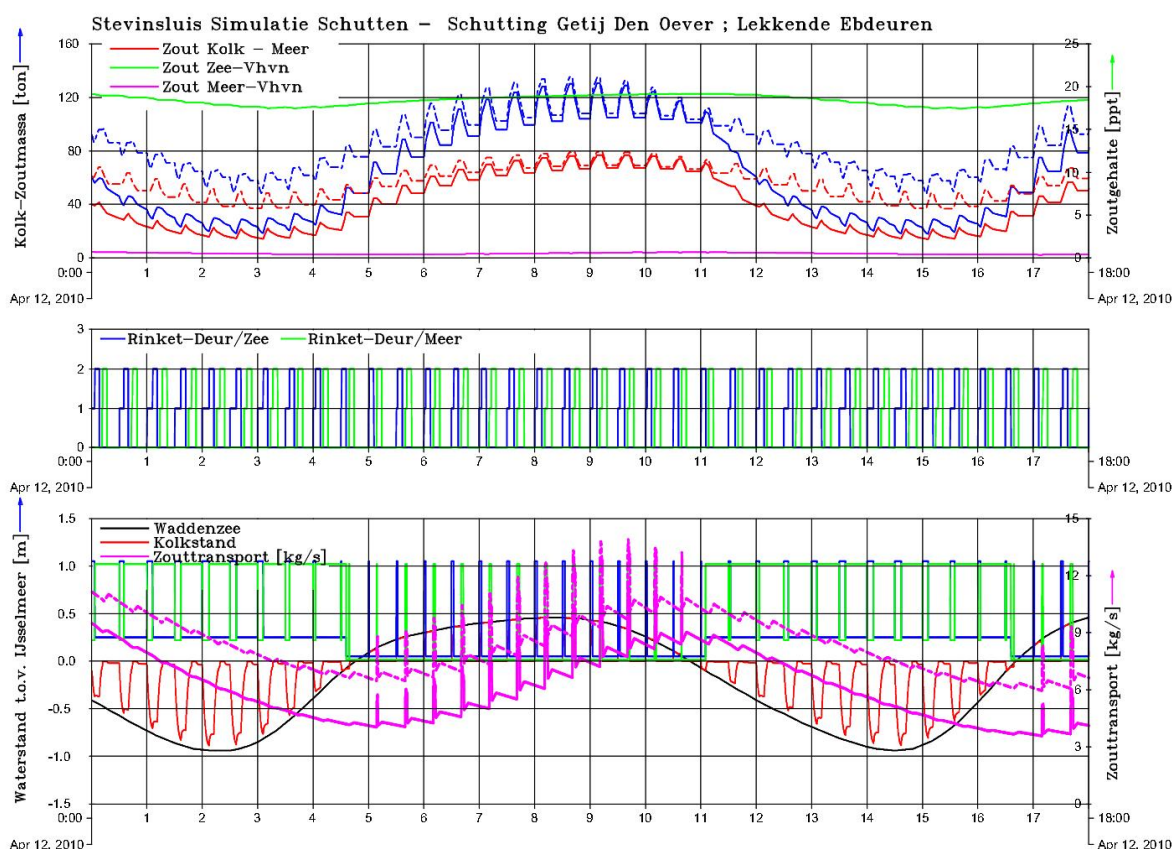
Figuur 4.24 Van 12:00 tot 16:45 is de methode van lekkende ebdeuren toegepast waarbij rinketschuiven aan één zijde volledig geopend zijn en aan de andere zijde 20-30% geopend. Merk op het afnemend verschil tussen zoutgehalten van kolk en meerzijde-voorhaven (rode lijn in bovenste figuur) en het ontbreken van een afname van zoutmassa in de kolk bij schutten naar meerzijde wat duidt op een geringe zoutlek.

In de voorafgaande periode is de buitenwaterstand hoger dan in het IJsselmeer (zie zwarte lijn in onderste figuurdeel) en kan de methode niet worden toegepast. In die vloed-periode zijn er slechts enkele schuttingen maar die tonen dat de zoutmassa in de kolk sterk daalt tijdens schutten naar meerzijde. Volg daartoe de blauwe lijn in het bovenste deel van Figuur 4.22 voor de zoutmassa in de kolk. Aan o.a. de rode lijn van het kolkpeil (onderste figuurdeel) kan de lezer zien dat even na 07:00 uur de kolk naar de meerzijde-voorhaven wordt genivelleerd en open staat. De zoutmassa neemt met ca. 80 ton af. Vóór 12:00 uur is het volume-gemiddelde zoutgehalte in de kolk meer dan 7,5 ppt (rode lijn in bovenste figuurdeel). Na 12:00 uur kan de methode van lekkende ebdeuren worden toegepast. De groene en blauwe lijn in de onderste grafiek tonen de kierstand van 20 – 30 %. Tot 17:00 uur vindt er die middag een intense reeks schuttingen met korte deuropentijden plaats.

Bij elke schutting verwachten we sterke dalingen in de zoutmassa zolang de kolk naar meerzijde open staat. Elke daling in zoutmassa betekent zouttransport naar de meerzijde-voorhaven dat uiteindelijk naar het IJsselmeer stroomt en zoutlek veroorzaakt. Echter, in de periode 12:00 tot ca. 16:45 uur blijft een dergelijk verlies van de zoutmassa in de kolk uit: de blauwe lijn voor de zoutmassa in het bovenste deel van Figuur 4.24 vertoont slechts rimpels. Juist het ontbreken van de sterke dalingen in zoutmassa, zoals die na 07:00 uur, is een demonstratie dat de methode van lekkende ebdeuren de zoutlek sterk onderdrukt.

Terwijl de kolk vanaf 12:00 uur wordt doorstroomd met verzilt water uit de meerzijde-voorhaven daalt zijn volume-gemiddelde zoutgehalte tot enkele ppt zout (rode lijn bovenste figuurdeel). Omgekeerd neemt het verschil in zoutgehalte tussen zeezijde-voorhaven en de kolk juist toe (zwarte lijn in bovenste figuurdeel). We zien hieruit dat de kolk die middag langzaam aan zoeter wordt zodat de zout-zoet uitwisseling bij schutten naar meerzijde steeds zwakker wordt: de zoutlek daalt die middag gestaag tijdens lage buitenwaterstand.

Omgekeerd neemt het verschil in zoutgehalte tussen kolk en zeezijde-voorhaven toe wat bij schutten naar zeezijde de zout-zoet uitwisseling versterkt. De versterking van de zout-zoet uitwisseling tussen kolk en zeezijde-voorhaven tracht de kolk zouter te maken bij de schutting naar meerzijde. Er wordt een nieuw evenwicht bereikt tussen watergebruik en zoutgehalte van de kolk. Er blijkt sprake te zijn van een vorm van verminderde meeropbrengst d.w.z. het watergebruik moet onevenredig sterk toenemen om de zoutlek nog meer te onderdrukken. In Hoofdstuk 5 tonen we voorgaand met figuren gebaseerd op het Zoutlekmodel.



Figuur 4.25 Berekening van de hartslag van de Stevinssluis voor en tijdens het toepassen van de methode van lekkende ebdeuren zoals beproef op 12 april, vergelijk met Figuur 4.24. De stippellijnen gelden voor dezelfde schuttingen maar zonder de methode van lekkende ebdeuren.

In de berekeningen voor Figuur 4.25 we passen elke dag de methode van lekkende ebdeuren toe én we doen wat in de praktijk onmogelijk is: we herhalen een vast patroon van schuttingen zonder de methode van lekkende ebdeuren.

In Figuur 4.25 kan en wordt vanaf 11:00 uur de methode van lekkende ebdeuren ingezet, evenals in voorafgaande dagen, en daalt de zoutmassa in de kolk snel. De kolk wordt ververst met verzilt water uit de meerzijde-voorhaven.

Tussen de schuttingen, met alle sluisdeuren gesloten, zien we de zoutmassa in de kolk afnemen. De oorzaak is dat de kolk ook dan wordt doorstroomd met verzilt water. De getrokken paarse lijn toont de zoutlek. De zoutlek is geringer dan zónder de methode van lekkende ebdeuren (gestippelde paarse lijn in onderste deel Figuur 4.25).

Er kan overwogen worden alleen bij geopende kolk een ebdebiet toe te passen door aan het (andere) gesloten kolkeinde de rinketschuiven op een kierstand te openen. Dan moet het momentane ebdebiet naar rato verhoogd worden als compensatie van het verzoeten van de kolk tijdens de periode met gesloten en/of niet-werkende kolken.

De overeenkomsten tussen Figuur 4.24 en 4.25 tonen dat we de methode van lekkende ebdeuren goed kunnen berekenen. Tevens toont Figuur 4.25 dat de methode consequent en met beheerste deuropentijd moet worden toegepast. Pas dan blijft de kolk op een laag zoutgehalte. Eén te lange schutting naar zeezijde brengt de kolk terug in de meer zoute toestand. In de daarop volgende schuttingen naar meerzijde zal de kolk dan veel meer zoutmassa verliezen totdat de oorspronkelijke zoete situatie in de kolk is hersteld.

We concluderen dat

- De methode van lekkende ebdeuren zeker de zoutlek verlaagt en dat we dit proces goed begrijpen en kunnen berekenen;
- Voor het sluisbeheer moet het bedieningsprotocol worden aangepast zodat de rinketschuiven op een gewenste kierstand geplaatst kunnen worden en
- De sluismeesters zullen een strenge discipline in deuropentijd moeten hanteren om het watergebruik voor de methode van lekkende ebdeuren zo nuttig mogelijk te besteden aan een constante zoete kolk en dito lage zoutlek.

4.5.6 Scheepvaart tijdens de praktijkproef en zoutlek

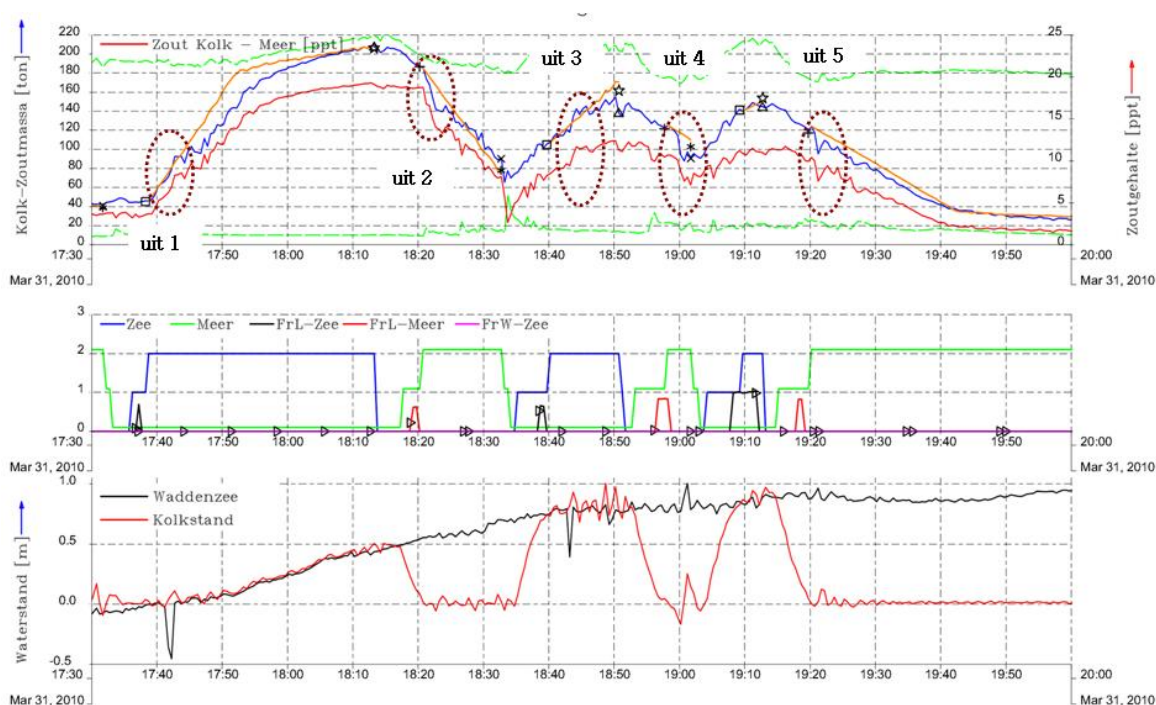
Tijdens nagenoeg alle door ons onderzochte schuttingen was er scheepvaart in de kolk. Een herhaling van een schutting maar dan zonder schepen bleek niet haalbaar. Op video en handmatig noteerden we de passage van schepen en de verkeersregistratie van de beroepsvaart leverde hun diepgang en afmetingen. Door in detail het invaren en uitvaren van vooral de grote beroepsvaart te bestuderen komen we tot de volgende bevindingen en rekenregel die de bijdrage van scheepvaart tot de zoutlek zal overschatten.

Figuur 4.26 is de registratie van de praktijkproef op 31 maart 2010 waar vijf grote schepen de kolk in- en uitvoeren. Hun passage veroorzaakt aanmerkelijke variaties in de gemeten drukken die we in Figuur 4.26 als equivalente waterstanden weergeven. Vooral de oscillaties in de rode lijn in het onderste figuurdeel verraden de passage van een schip.

In Figuur 4.26 omcirkelden we de momenten waarop de vijf schepen uitvaren. De blauwe lijn in het bovenste figuurdeel toont de reactie van de zoutmassa in de kolk op het uitvaren van een schip. De verklarende tekst bij dit figuur geeft de statische waterverplaatsing en diepgang. Overigens, bij de Volkeraksluizen bedraagt de gemiddelde statische waterverplaatsing ca. 1760 m³ per schip (72 % van 2440 ton, zie verder paragraaf 2.3.2). De

grootste beroepsschepen in de Stevinsluis hebben dus een waterverplaatsing vergelijkbaar met de gemiddelde waterverplaatsing van scheepvaart door de Volkeraksluizen.

De oranje lijn in het bovenste figuurdeel is de zoutmassa in de kolk volgens de eerder besproken en getoetste theoretische schatter. In dit figuur begint de theoretische schatter met de gemeten zoutmassa op het moment dat de sluisdeuren openen. Met het vierkantje □ is het moment van openen naar zeezijde gegeven, met een + teken het moment van openen naar meerzijde. Daarna gebruiken we de schatter om het verloop van de zoutmassa in de geopende kolk te voorspellen. Na een periode van uitvaren volgt veelal ook een periode van invaren. Echter, de verstoringen op de zoutmassa door het invaren zien we niet in Figuur 4.26. De verstoring van de zoutmassa door een uitvarend schip lijkt eerder tijdelijk dan blijvend te zijn d.w.z. op het moment van sluiten komt de theoretische schatting van de zoutmassa goed overeen met de gemeten zoutmassa. Soms nemen we waar dat een naar meerzijde uitvarend schip de zoutmassa in de kolk sterker laat dalen dan de voorspelling zonder schip: er treedt dan meer zout-zoet uitwisseling en dus meer zoutlek naar de zoete zijde op dan zonder schip.



Figuur 4.26 Invloed scheepvaart op de totale verandering in zoutmassa in de kolk. De oranje lijnen onder een hellingshoek is het theoretisch geschatte verloop van de zoutmassa.

Schip 1 Z→N : 1920 m³ en 2,8m diep;

Schip 2 N→Z : 1000 m³ en 1,5 m diep ;

Schip 3 Z→N : 1300 m³ en 2,8 m diep ;

Schip 4 N→Z : 2360 m³ en 2,9 m diep ;

Schip 5 N→Z : 1000 m³ en 1,3 m diep .

Voor het doel van dit project voor de Volkeraksluizen veronderstellen we de volgende regel die de bijdrage van scheepvaart aan de zoutlek zal overschatten.

We veronderstellen invarende en uitvarende schepen van gelijke statische waterverplaatsing. Een dergelijk twee-richting verkeer is in de Volkeraksluizen gebruikelijk maar uitzonderlijk in de Stevinsluis. In de Stevinsluis worden vaak schepen vanaf één zijde “gehaald” of schepen (tankers, zandschepen) worden heen beladen maar leeg terug geschut.

Door twee-richting verkeer door de Volkeraksluizen stellen we vervolgens dat een volume water tussen kolk en voorhaven wordt uitgewisseld dat gelijk is aan de statische waterverplaatsing van de schepen die invaren (of uitvaren).

Dit volume tellen we op bij het volume water dat de kolk door de veronderstelde ongewijzigde zout-zoet uitwisseling met de voorhaven verwisseld. Daaruit berekenen we de uitgewisselde zoutmassa die blijkens onze analyse van Figuur 4.24 de meting overschat en dus ook de zoutlek. Voor de Volkeraksluizen komen we dan op de volgende bijtelling van het uitgewisselde volume water per dag.

Uit de prognose van RWS voor 2010, zie paragraaf 2.3.2, volgt gemiddeld per dag de waterverplaatsing van schepen in één richting door alle kolken. Gesommeerd over alle kolken bedraagt de daggemiddelde waterverplaatsing ca. 3,2 m³/s. We namen hiervoor 2,6 schepen per kolk in één vaarrichting met 2440 ton per schip waarvan 72% waterverplaatsing. Deze getallen zijn in paragraaf 2.3.2 besproken. Het volume water dat alle kolken van de Volkeraksluizen uitwisselen in 20 schuttingsen per dag bedraagt tenminste 35 m³/s. Zelfs met de veronderstelde overschatting zien we dat de scheepvaart door de Volkeraksluizen zeker minder dan 10% bijdraagt aan de zout-zoet uitwisseling. Al eerder in paragraaf 3.5.3 besproken we dat de equivalente waterverplaatsing van de scheepvaart in de Volkeraksluizen overeenkomt met een waterlaag van 0,55 m. In de beroepssluizen is de drempeldiepte 6,5 m zodat de rol van de scheepsvolumina (0,55 m) gering is in verhouding tot het uitwisselbare gedeelte van het kolkvolume; Tabel 2.1 geeft deze volumina en afmetingen.

4.6 Het Zoutlekmodel: wat weten we zeker, wat kunnen we zeker?

In deze paragraaf baseren we onze conclusies en standpunten op de uitgebreide reeks van zowel laboratoriumproeven van Waterloopkundig Laboratorium en veldmetingen in schutsluizen in het verleden als op onze laboratoriumproeven, gedetailleerde computerberekeningen en vooral de praktijkproef in een werkende schutsluis.

We concluderen als volgt:

1. De theoretische schatter voor de ongeremde verandering van de zoutmassa in de kolk tijdens de zout-zoet uitwisseling door geopende sluisdeuren is zeer goed toepasbaar;
2. De innovatieve luchtbellenschermen van Deltares (type Δ -luchtbellenschermen) bestaande uit dubbele rijen diffusers (Fifuur 3.8) en luchtventielen kunnen bij gelijk luchtdebiet, compressorvermogen en energieverbruik ca. 50% meer zout tegen houden dan de traditionele luchtbellenschermen met geperforeerde buizen;
3. De optimale instelling van de luchtbellenschermen wordt bereikt door het Froude-lucht getal als stuurparameter binnen het interval 0,8 – 1,2 te beheersen. Voor het luchtdebiet geldt dan de ruime variatie 1 : 3,4 voor het interval 0,8 – 1,2 van het Froude-lucht getal. Meting van zoutgehalten in kolk en voorhavens is nodig om het benodigde luchtdebiet te sturen. Tevens dienen de Δ -luchtbellenschermen over het gewenste ruime bereik in luchtdebiet goed te blijven werken.
4. Froude-lucht getallen groter dan ca. 1,2 verlagen nog maar zeer beperkt de doorlaatfracties maar vergen onevenredig veel meer luchtdebiet, compressorvermogen en energieverbruik;
5. Met aldus optimaal ingestelde Δ -luchtbellenschermen kan in een werkende schutkolk een doorlaatfractie van 0,25 wel met voldoende zekerheid bereikt worden;
6. Met optimaal ingestelde Δ -luchtbellenschermen ondersteund met een extra drempel kan in een werkende schutkolk een doorlaatfractie van 0,20 wel met voldoende zekerheid worden bereikt;
7. Met optimaal ingestelde Δ -luchtbellenschermen ondersteund met een waterscherm kan in een werkende schutkolk een doorlaatfractie van 0,15 wel met voldoende zekerheid worden bereikt;
8. Voor een gevoeligheidsanalyse van de robuustheid van onze adviezen zullen we rekening moeten houden met een tegenvallende doorlaatfractie van 0,05 hoger dan hierboven genoemd;
9. In termen van waterverplaatsing onderzochten we passages van scheepvaart vergelijkbaar met de gemiddelde scheepvaart door de Volkeraksluizen. Voor de Volkeraksluizen volgt daaruit onze rekenregel welke de bijdrage van scheepvaart tot de zout-zoet uitwisseling overschat. Overigens, de bijdrage van de scheepvaart tot de zout-zoet uitwisseling in de Volkeraksluizen is bij de huidige kolkvolumina kleiner dan 10% (zie ook Tabel 2.1).

In het volgende Hoofdstuk 5 hanteren we het Zoutlekmodel waarvan zijn concepten en invoerparameters nu uitgebreid zijn onderzocht want:

1. De voorstudie (Uittenbogaard, 2010) bewees wiskundig dat de grondslag van het Zoutlekmodel correct is.
2. De voorstudie toonde dat het Zoutlekmodel voldoende nauwkeurig de zoutlek door de Volkeraksluizen beschrijft zoals afgeleid uit de meting van snelheid en zoutgehalte langs raaien door het Haringvliet en het HD.
3. Uit voorliggend onderzoek volgt dat de theoretische schatter voor de verandering van de zoutmassa in de kolk zonder zoutlekbeperkende middelen goed kan worden toegepast op een werkende schutsluis. Dit is de fysische grondslag van het Zoutlekmodel.

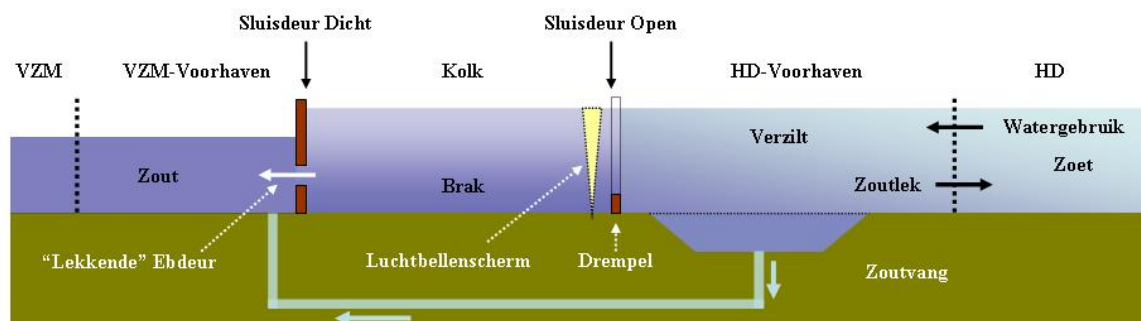
4. Uit voorliggend onderzoek en uit details in (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010) volgen de doorlaatfracties voor reductie van de theoretisch geschatte zout-zoet uitwisseling. Deze doorlaatfracties dienen als invoer in het Zoutlekmodel.
5. In het bijzonder concluderen we de haalbare doorlaatfracties gebruik van optimaal ingestelde luchtbellenscherm, eventueel ondersteund met een waterscherm of een extra hoge drempel.
6. We hebben een rekenregel welke de bijdrage van twee-richtingen scheepvaart tot de zoutlek door de Volkeraksluizen zal overschatten; voor de Volkeraksluizen loopt de bijdrage door scheepvaart op van minder dan 10% tot ca. 50% naarmate de zout-zoet uitwisseling door geopende sluisdeuren en door zoutlekbeperkende middelen wordt beperkt.

Met de overschatte bijdrage door scheepvaart en de gevonden lage doorlaatfracties van optimaal ingestelde schermen en de getoetste grondslag van het Zoutlekmodel schatten we in het volgende hoofdstuk de zoutlek door de Volkeraksluizen onder invloed van door ons onderzochte zoutlekbeperkende middelen.

5 Beperken van toekomstige zoutlek van de Volkeraksluizen

5.1 Inleiding

Eenzijds zo compact mogelijk en anderzijds qua tekst zo zelfstandig mogelijk onderbouwen we de volgende reeks uitspraken. Wel zullen we begrippen en afkortingen hanteren die grotendeels in het begrippenkader (paragraaf 2.2) zijn gedefinieerd. In het bijzonder korten we in figuren en soms in de tekst Volkerak-Zoommeer af tot VZM en het Hollandsch Diep tot HD. Figuur 5.1 is een herhaling van Figuur 2.3 en geeft de belangrijkste termen hun plaats en functie.



Figuur 5.1 Afkortingen en begrippen rondom beperken van zoutlek vanuit het Volkerak-Zoommeer (VZM) via de Volkeraksluizen naar het Hollandsch Diep (HD). Zie Figuur 2.2 voor een horizontaal overzicht van de kolken en voorhavens. De zoutvang is niet aanwezig.

We benadrukken hier dat de zoutlek het gewicht aan zout is dat gemiddeld per dag de monding van de voorhavens naar het Hollandsch Diep verlaat; de maximaal toegestane zoutlek is gesteld op 60 kg/s (5200 ton per dag).

Wel verklaren we hier nogmaals twee veelvuldig voorkomende begrippen: de deuropentijd en de doorlaatfractie. De deuropentijd is de tijd dat de kolk in open verbinding staat met één van de twee voorhavens. Voor de Volkeraksluizen nemen we een deuropentijd van 25 minuten. Het schutten van schepen van de ene naar de andere voorhaven vergt dan tweemaal de deuropentijd van elk 25 minuten plus tweemaal de tijd voor het omschakelen tussen de sluisdeuren en de tijd nodig om het kolkpeil aan te passen aan de waterstand in de voorhavens, het zg. nivelleren. We noemen dit een schutcyclus en deze vergt tenminste 56 minuten. Verder veronderstellen dat er per dag 20 schuttingen naar één zijde of voorhaven plaats vinden voor elke kolk, inclusief de kolk van de jachtensluis.

Het tweede hier veelvuldig voorkomend begrip is de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm, soms gecombineerd met een waterscherm of met een extra, hoge drempel. De doorlaatfractie is de verhouding tussen de zoutmassa die het scherm tijdens geopende sluisdeuren doorlaat ten opzichte van de ongeremde zoutmassa, zonder scherm, onder dezelfde verschillen in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven en met gelijke deuropentijd.

Tevens is het watergebruik het debiet aan water dat het Hollandsch Diep door de monding

van de HD-voorhaven verlaat; het maximaal toegestane watergebruik is gesteld op 25 m³/s. Hierin is opgenomen het zg. daggemiddelde schutverlies van ca. 3,2 m³/s zoet water door het nivelleren van de kolken voor de schuttingen. We veronderstellen dat alle drie beroepssluizen én de jachtensluis werken met 20 schutcycli per dag. Overigens, de jachtensluis draagt ca. 18% bij aan de zoutlek.

Voor de leesbaarheid zullen we zo min mogelijk naar voorgaande hoofdstukken refereren hoewel daar en in de genoemde referenties de verdere technisch-wetenschappelijke onderbouwing van de uitspraken liggen.

De uitspraken omvatten onze algemene adviezen over de inrichting van de Volkeraksluizen om de gestelde bovengrenzen van zoutlek en watergebruik te garanderen. Nadat de hier voorgelegde majeure keuzen zijn gemaakt is verdere detaillering tot het concrete ontwerp nodig.

In dit hoofdstuk onderbouwen we de volgende uitspraken waarmee het gestelde doel van maximaal 60 kg/s zoutlek wordt bereikt met maximaal 25 m³/s watergebruik.

Uitspraak 1: Met een goed ingesteld Δ -luchtbellenscherm kan met zekerheid een minimale doorlaatfractie van 0,25 worden bereikt. Voor het optimale luchtdebiet bestaat een praktische rekenregel. Deze regel is afhankelijk van het verschil in zoutgehalte tussen kolk en HD-voorhaven. Het optimale Δ -luchtbellenscherm bestaat uit twee rijen van diffusers die horizontaal tegen elkaar in blazen.

Uitspraak 2: We gaan uit van een verschil in zoutgehalte tussen het VZM en het HD van 20 ppt en van de reële deuropentijd van 25 minuten en van de minimaal haalbare doorlaatfractie van 0,25 voor Δ -luchtbellenschermen. Dan is de gestelde bovengrens van 60 kg/s zoutlek alleen te bereiken met aanvullende zoutlekbeperkende middelen.

Uitspraak 3: Het doorspoelen van de schutkolk met zoet water uit het HD via de methode van lekkende ebdeuren vermindert de zoutlek aanmerkelijk. De methode kan gecombineerd worden met Δ -luchtbellenschermen. De methode kan alleen toegepast worden bij hoger peil in het HD ten opzichte van het VZM. Uitbreiden met waterschermen naast Δ -luchtbellenschermen verlaagt de zoutlek verder maar vergt grote watertunnels of -buizen, grote pompen en meer energieverbruik. Het protocol voor geheel en gedeeltelijke opening van rinketschuiven moet worden aangepast. De sluisdeuren kunnen zonder bezwaar worden geopend. De scheepvaart heeft geen hinder van het extra debiet.

Uitspraak 4: Δ -luchtbellenschermen naast voldoende hoge drempels bereiken bijna dezelfde lage doorlaatfractie als Δ -luchtbellenschermen naast waterschermen. Drempels beperken de diepgang door scheepvaart; echter in hoogte instelbare drempels zijn mogelijk.

Uitspraak 5: Met zekerheid kan aan de VZM-zijde een doorlaatfractie van 0,15 worden bereikt met het Δ -luchtbellenschermen waterscherm. Voor het gehele schutsluizencomplex vraagt het waterscherm daggemiddeld 6 m³/s zoet of verzilt of brak water. Leidingen en pompen voor watertoevoer moeten worden aangelegd. Beroepsscheepvaart zal nauwelijks hinder ondervinden van de water- en Δ -luchtbellenschermen.

Uitspraak 6: Het door de kolken geleverde brakke water kan tijdelijk worden opgevangen in een verdiepte HD-voorhaven (zoutvang). Bij voldoende goed werkende Δ -luchtbellenschermen is het debiet van brak kolkwater naar de zoutvang geringer dan het maximaal toegestane watergebruik. Dan kan het volledige debiet van brak kolkwater via de zoutvang naar de VZM-zijde worden afgevoerd. De resterende zoutlek komt vnl. uit de zoutvang door transport, overslag en verticale menging van interne golven, scheepvaart en eventueel wind. De waterschermen kunnen worden gevoed met brak water uit de zoutvang.

Uitspraak 7: Bij 0,5 m hoger peil in het HD t.o.v. het VZM vergen drempels, lekkende ebdeuren en een zoutvang geen extra pompenergie. Waterschermen vergen veel en grote pompen met energieverbruik. Luchtbellenschermen vergen compressorvermogen en daarbij energieverbruik.

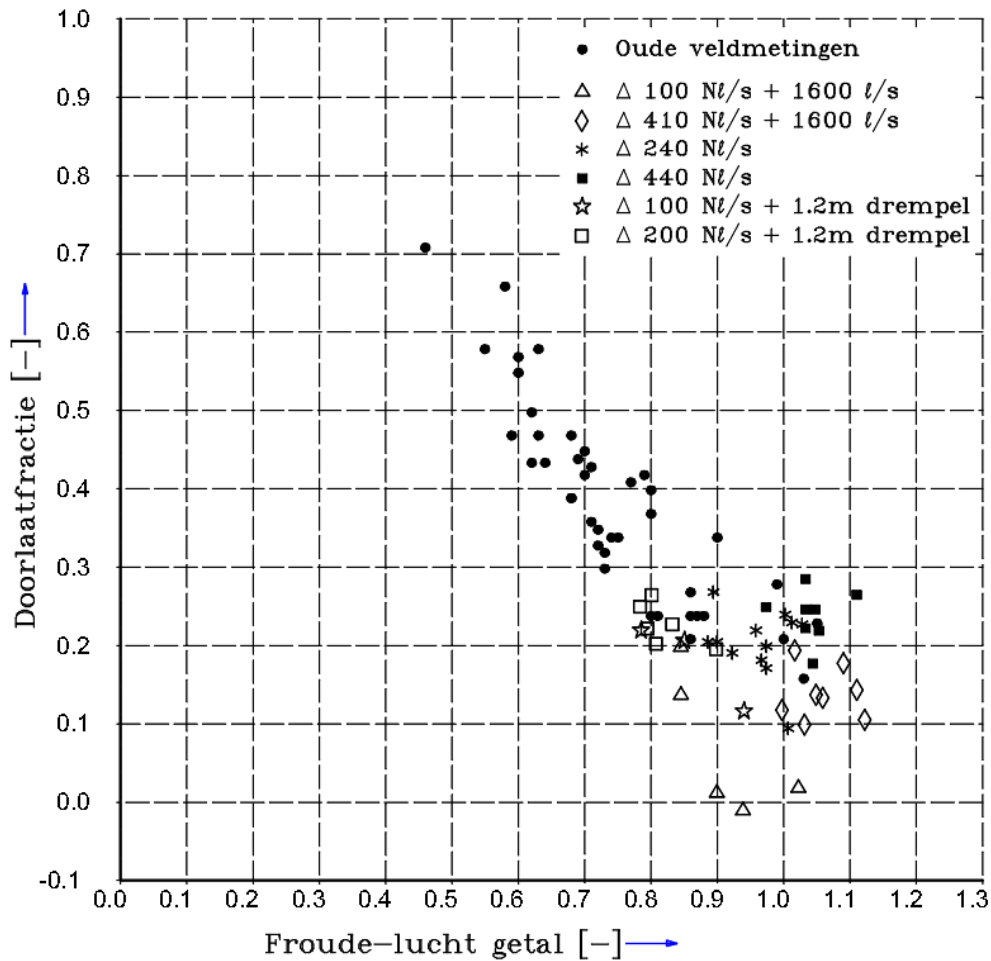
Uitspraak 8: De luchtbellenschermen verlagen de stroming en troskrachten voor schepen in de kolk. Tot 2 m diepte en horizontaal binnen tweemaal de waterdiepte is de stroming door luchtbellenschermen aanmerkelijk. Beroepsscheepvaart zal nauwelijks hinder ondervinden van de water- en luchtbellenschermen. De recreatievaart dient wel rekening te houden met de luchtbellenschermen maar daarvoor bestaan wel oplossingen of compromissen.

Uitspraak 9: Een zoutvang biedt waarschijnlijk de beste reservemogelijkheid voor de capaciteit om de zoutlek - indien gewenst - wanneer hogere eisen aan de beperking van de zoutlek gesteld worden dan 60 kg/s zoutlek en 25 m³/s watergebruik.

5.2 Onderbouwing van de uitspraken

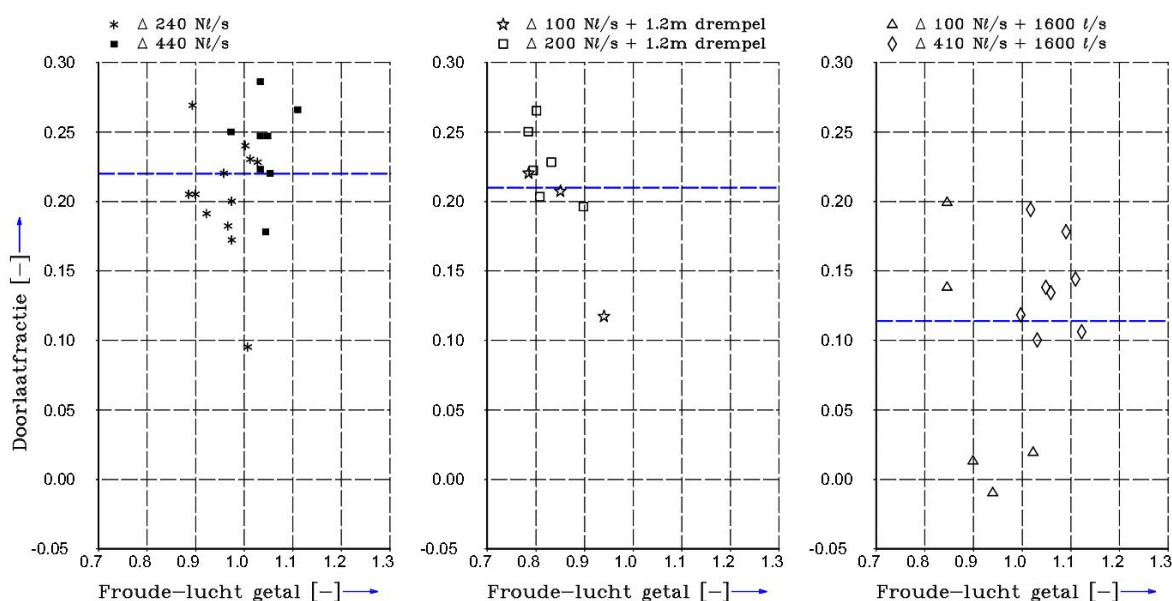
Uitspraak 1: Met een goed ingesteld Δ -luchtbellenscherm kan met zekerheid een minimale doorlaatfractie van 0,25 worden bereikt. Voor het optimale luchtdebiet bestaat een praktische rekenregel. Deze regel is afhankelijk van het verschil in zoutgehalte tussen kolk en HD-voorhaven. Het optimale Δ -luchtbellenscherm bestaat uit twee rijen van diffusers die horizontaal tegen elkaar in blazen.

Ondanks de getoonde variaties in doorlaatfracties concluderen we met Figuur 5.2 en Figuur 5.3 dat met zekerheid een doorlaatfractie van 0,25 haalbaar is met goed ontworpen en goed onderhouden Δ -luchtbellenschermen met goed ingestelde luchtdebieten.



Figuur 5.2 Overzicht van in het verleden (stippen) bereikte resultaten in de Lorentzsluis bij Kornwerderzand en in de zeesluizen bij IJmuiden. De overige punten voor door ons gemeten doorlaatfracties met diverse luchtbellenschermen en gecombineerd met waterscherf of drempel in de Stevinsluis. Het Froude-lucht getal is de verhouding tussen de verticale watersnelheid in het luchtbellenscherm en de horizontale snelheid van de zouttong. Het luchtdebiet is in Nl/s en het waterdebiet in l/s ; we beoordelen deze instellingen als volgt:

- △ licht Δ -luchtbellenscherm en waterscherf
- ◇ sterk Δ -luchtbellenscherm en waterscherf
- * gemiddeld Δ -luchtbellenscherm
- sterk Δ -luchtbellenscherm
- ☆ licht Δ -luchtbellenscherm en drempel
- gemiddeld Δ -luchtbellenscherm en drempel



Figuur 5.3 Detail van Figuur 5.2 m.b.t. resultaten bereikt in de Stevensluuis. Linkerdeel alleen Δ -luchtbellenschermen, rechterdeel Δ -luchtbellenschermen met waterschermen en centraal Δ -luchtbellenschermen met extra drempel. De gestippelde blauwe lijnen geven het gemiddelde van de getoonde doorlaatfracties.

We bereikten de beste resultaten met luchtbellenschermen bestaande uit twee rijen diffusers die horizontaal tegen elkaar in blazen (type Δ -luchtbellenschermen). Deze opstelling geeft een voor zout moeilijk doordringbaar luchtbellenscherm, zie Figuur 3.8.

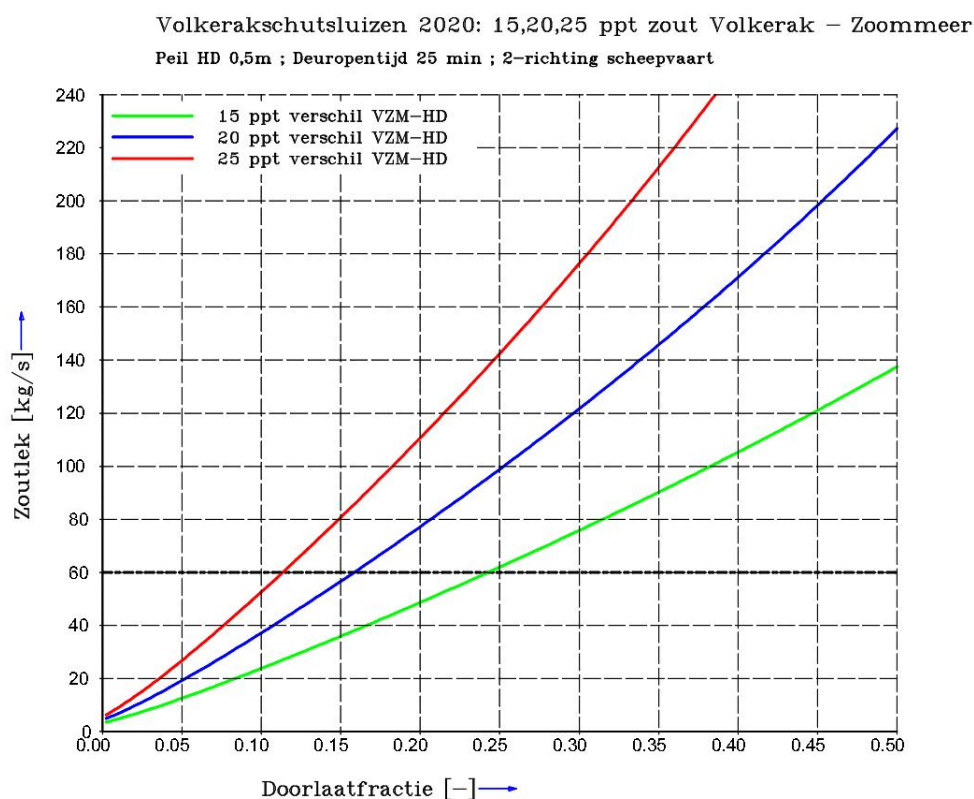
Het Froude-lucht getal is evenredig met de verhouding tussen de verticale watersnelheid boven een luchtbellenscherm en de snelheid van de zouttong. Om een Δ -luchtbellenscherm een doorlaatfractie van 0,25 te laten geven moet het luchtdebiet regelbaar zijn zó dat deze werkt bij een Froude-lucht getal van minimaal 0,8 tot maximaal 1,2. Voor de regeling van het luchtdebiet is ook nodig (een benadering voor) het volume-gemiddelde zoutgehalte in de kolk en de diepte-gemiddelde zoutgehalten in de ermee in open verbinding staande voorhavens. We verwachten dat het maximale luchtdebiet ten hoogste driemaal groter is dan het minimale luchtdebiet omdat het verschil in zoutgehalten met maximaal een factor twee kan wijzigen. Deze conclusie is gebaseerd op een maximaal verschil in zoutgehalten tussen kolk en in open verbinding staande voorhaven van 20 ppt en minimaal verschil van 10 ppt. We adviseren de optimalisatie van de luchtbellenschermen voor 10 ppt verschil in zoutgehalte omdat 10 ppt hoort bij de meest voorkomende werkconditie van de sluisen.

Tussen de beroepskolken van de Volkeraksluisen bevindt zich nog een grote kelderruimte waar in het verleden de compressoren voor de oude luchtbellenschermen hebben gestaan. Gezien de verbeterende technieken zal deze ruimte voldoende groot zijn voor de installatie van energiezuinige lage-druk compressoren. Bij lage druk zullen de luchtleidingen naar de Δ -luchtbellenschermen waarschijnlijk een grotere diameter hebben dan de oude leidingen. De bestaande openingen van luchtleidingen in kolkwanden zijn klein en we nemen aan dat de oude leidingen inmiddels zijn vergaan. Nieuwe luchtleidingen met grotere diameter zullen ondergronds naast de kolken en door de kolkwanden moeten worden aangelegd.

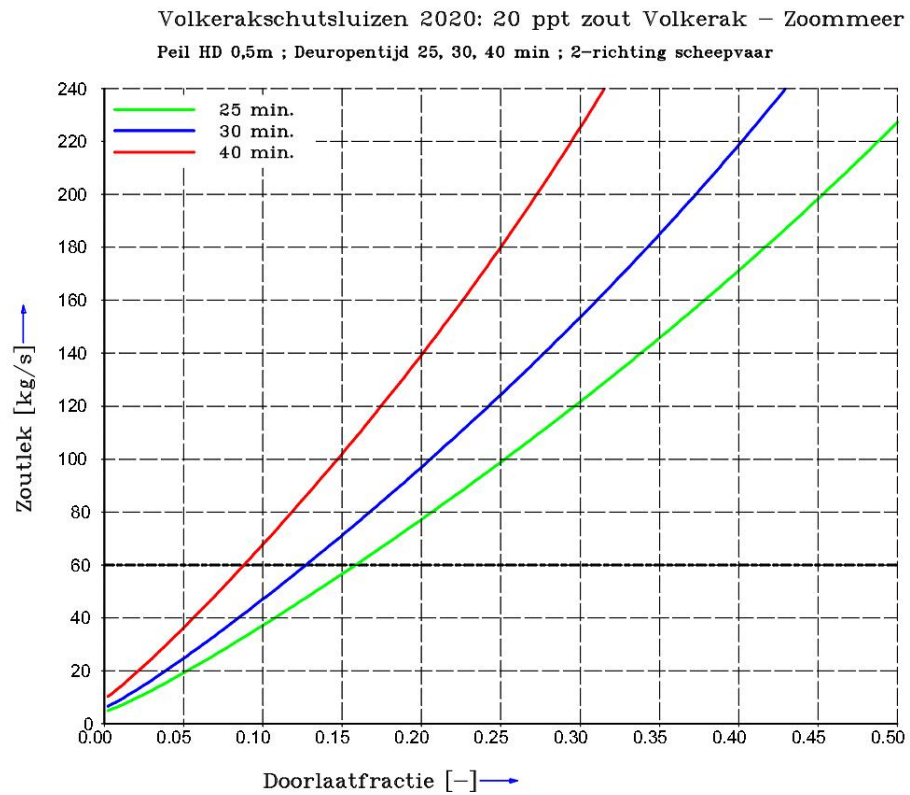
Uitspraak 2: We gaan uit van een verschil in zoutgehalte tussen het VZM en het HD van 20 ppt en van de reële deuropentijd van 25 minuten en van de minimaal haalbare doorlaatfractie van 0,25 voor Δ -luchtbellenschermen. Dan is de gestelde bovengrens van 60 kg/s zoutlek alleen te bereiken met aanvullende zoutlekbeperkende middelen.

Figuren 5.4, 5.5 en 5.6 zijn gebaseerd op het getoetste Zoutlekmodel. Het Zoutlekmodel is ingesteld op de toekomstige (2020) scheepvaart, het zoutgehalte en het gemiddelde peil in het Volkerak-Zoommeer (VZM) en in het Hollandsch Diep (HD). Voor 25 minuten deuropentijd en 20 ppt zoutgehalte in het VZM toont Figuur 5.4 dat de zoutlek pas kleiner dan 60 kg/s wordt voor doorlaatfracties onder 0,16. Doorlaatfracties kleiner dan 0,25 zijn alleen haalbaar in combinatie met waterscherm en drempel; een doorlaatfractie van 0,16 is waarschijnlijk alleen aan de VZM-zijde te bereiken met de beste water-lucht mengverhouding in de combinatie van Δ -luchtbellenschermen en waterschermen, zie Figuur 5.3.

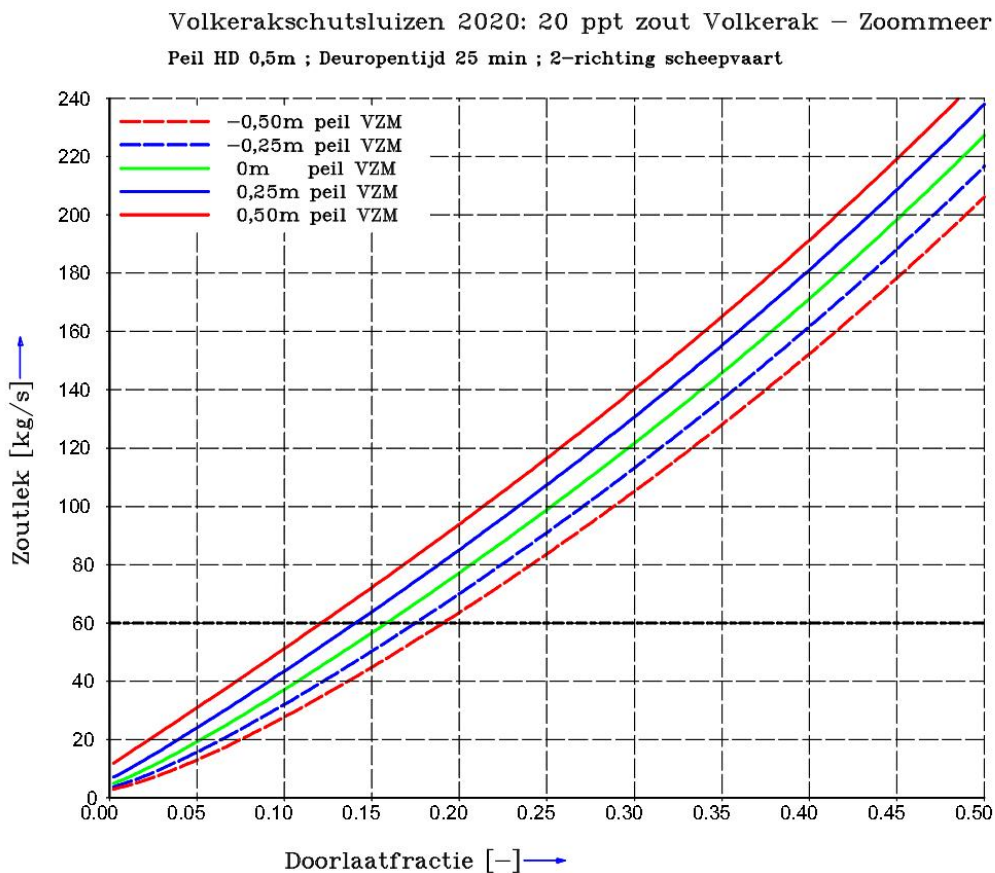
Overigens, deze aanvullende zoutlekbeperkende middelen kunnen worden gecombineerd met de methode van lekkende ebdeuren. De methode van lekkende ebdeuren beïnvloedt niet de doorlaatfractie maar verlaagt wél de zoutlek.



Figuur 5.4 Zoutlek door de Volkeraksluizen bij gebruik van methoden (luchtbellen- en/of waterscherm en/of drempel) met dezelfde doorlaatfractie aan alle kolkeinden; variatie verschil in zoutgehalte VZM-HD bij 25 minuten deuropentijd en bij peil VZM van 0 meter.



Figuur 5.5 Zoutlek door de Volkeraksluizen bij gebruik van methoden (luchtbellen- en/of waterscherm en/of drempel) met dezelfde doorlaatfractie aan alle kolkeinden; variatie deuropentijd bij VZM 20 ppt zout en bij peil VZM van 0 meter.



Figuur 5.6 Zoutlek door de Volkeraksluizen bij gebruik van gelijke luchtbellenschermen met eventueel waterschermen of hoge drempels en aan alle kolkeinden; variatie peil VZM bij VZM met 20 ppt zout en 25 minuten deuropentijd.

De zoutlek neemt aanmerkelijk toe met langere deuropentijden, zie Figuur 5.5. Hier speelt een afweging tussen hinder voor scheepvaart en zoutlek.

Het voornemen is om op het VZM een gereduceerd getij toe te laten van 0,3 m getijslag met 0,1 m middenstand verlaging en 0,5 m lager peil ten opzichte van het HD. Uit Figuur 5.6 leiden we af dat een gereduceerd getij onder deze condities de daggemiddelde zoutlek en dito watergebruik door schutverliezen niet zal beïnvloeden.

Uitspraak 3: Het gebruik van zoet of verzilt water met de methode van lekkende ebdeuren vermindert de zoutlek aanmerkelijk. De methode kan gecombineerd worden met Δ -luchtbellenschermen. De methode kan alleen toegepast worden bij hoger peil in het HD ten opzichte van het VZM. Uitbreiden met waterschermen naast Δ -luchtbellenschermen verlaagt de zoutlek verder maar vergt grote watertunnels of -buizen, grote pompen en meer energieverbruik. Het protocol voor geheel en gedeeltelijke opening van rinketschuiven moet worden aangepast. De sluisdeuren kunnen zonder bezwaar worden geopend. Scheepvaart heeft geen hinder van het extra debiet.

We gaan uit van optimaal werkende Δ -luchtbellenschermen met doorlaatfractie 0,25 aan alle kolkeinden. De methode van lekkende ebdeuren wordt altijd toegepast, ongeacht het stadium van een schutting.

Figuur 5.7 toont dat het watergebruik bij de methode van lekkende ebdeuren de zoutlek tot onder 60kg/s kan verlagen. Bij een daggemiddeld watergebruik van ca. 20 m³/s, gesommeerd over alle kolken, bedraagt de zoutlek 60 kg/s. Hierin zijn de schutverliezen (3,2 m³/s) betrokken voor het nivelleren van de kolken bij 0,5 m lager peil in het VZM.

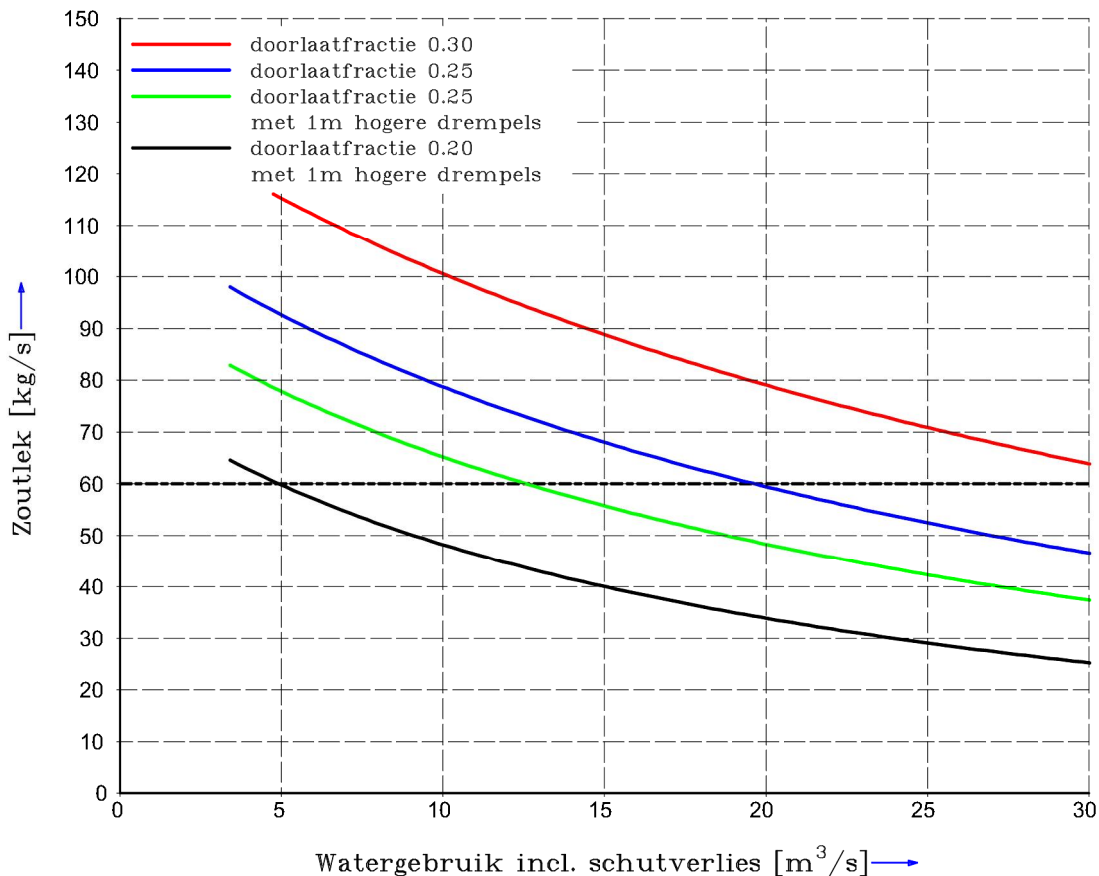
Figuur 5.7 toont ook de resultaten voor een tegenvallende doorlaatfractie van 0,30 die we later in onze risico-analyse (paragraaf 5.3) zullen bespreken.

Tevens presenteren we de zoutlek met doorlaatfractie van 0,20. Voor deze lagere doorlaatfractie van 0,20 is wél de ondersteuning van voldoende hoge drempels nodig, zie Figuur 5.3. De huidige drempelhoogten zijn 1 m in de beroepskolken en 0,5 m in de jachtensluis, zie ook Tabel 2.1. Met 1 m hogere drempels in alle kolken verwachten we dat de Δ -luchtbellenschermen op de kolkvloer voldoende beschermd worden. De uitkomst is dan de zwarte lijn in Figuur 5.7 voor de tot 0,20 verlaagde doorlaatfractie welke ook de zout-zoet uitwisseling door de geopende kolken verder zal beperken.

De ondersteuning van de Δ -luchtbellenschermen met waterschermen is ook mogelijk maar deze variant tonen we niet omdat de waterschermen veel meer aanpassingen vergen.

Volkerakschutsluizen : 20 ppt zout Volkerak – Zoommeer

HD-Peil 0.5 m ; Deuropentijd 25 min ; 2-richting scheepvaart



Figuur 5.7 Ongeacht de doorlaatfracties van luchtbellenschermen aan alle kolkeinden wordt de zoutlek vermindert door het watergebruik in de methode van lekkende ebdeuren. Voor een doorlaatfractie van 0,20 moeten de luchtbellenschermen worden beschermd met voldoende hoge drempels (getoond) of met waterschermen (niet getoond).

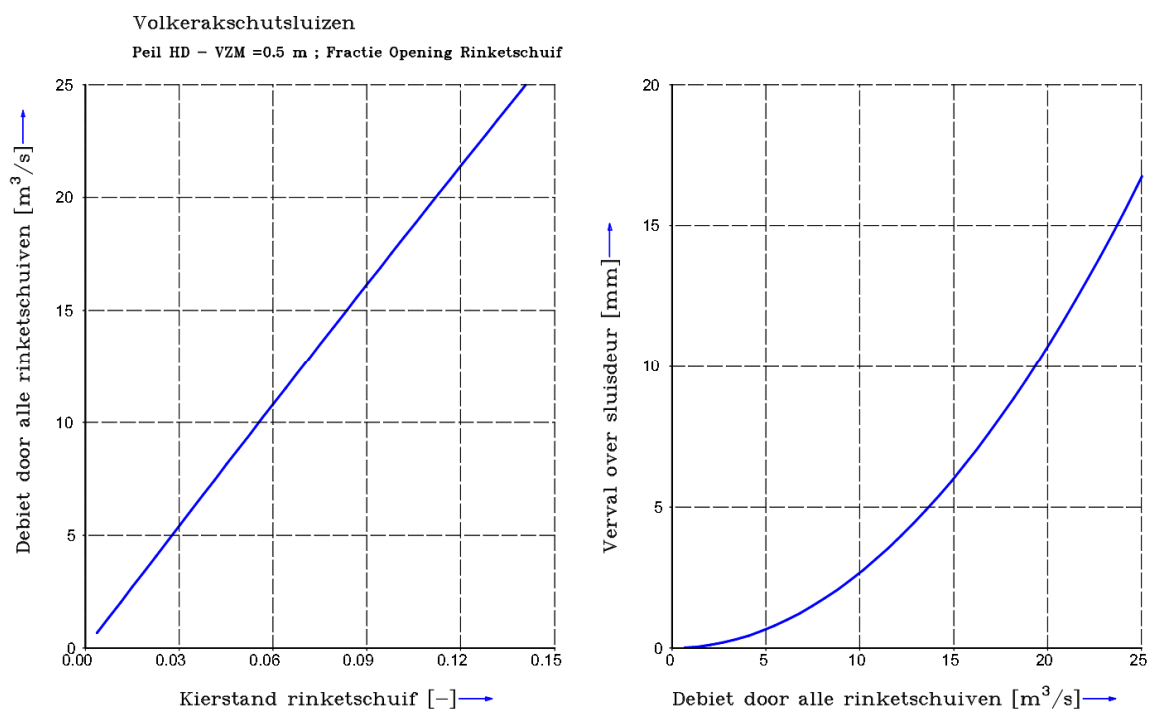
De methode van lekkende ebdeuren kan worden toegepast zolang het peil in het HD hoger is dan in het VZM. Het watergebruik in de methode van lekkende ebdeuren gebeurt onder vrij verval: er zijn geen pompen nodig. Het watergebruik veroorzaakt een verval over de gesloten maar te openen sluisdeuren. Zolang dit verval geringer is dan ca. 10cm (mondelling overleg A. Vrijburcht, RWS) kunnen de sluisdeuren zonder schade worden geopend. Gegeven een gekozen zoutlek en doorlaatfractie volgt uit Figuur 5.7 het watergebruik door gedeeltelijk geopende rinketschuiven moet stromen.

De groene lijn in Figuur 5.7 is voor de risico-analyse die we later zullen bespreken (Uitspraak 9) waarbij de doorlaatfractie van 0,20 van Δ -luchtbellenschermen naast voldoende hoge drempels tegenvalt en 0,25 zou worden.

De vraag luidt of dit debiet door de kolken kan stromen en het verval over de sluisdeuren zodanig beperkt blijft dat deze kunnen worden geopend? Dit blijkt goed mogelijk en we illustreren de antwoorden met Figuur 5.8.

In Figuur 5.8 zijn de eigenschappen van de rinketschuiven van de Volkeraksluizen gebruikt. Bij volledige opening van de rinketschuiven stroomt er bij 0,5 m verval over de sluisdeuren aanvankelijk ca. 37 m³/s water door één beroepskolk. Hierdoor duurt het nivelleren ca. 3,7 minuten.

Figuur 5.8 toont dat bij het maximaal toegestane watergebruik van 21,8 m³/s (25-3,2) voor de methode van lekkende ebdeuren het verval voldoende gering blijft om de sluisdeuren zonder schade te openen. Per beroepskolk mag het maximaal toegestane watergebruik voor de methode van lekkende ebdeuren ca. 6,5 m³/s bedragen waarvoor dus kleine openingen (kierstand ca. 0,10) van de rinketschuiven nodig zijn, zie Figuur 5.8. We concluderen dat de uitkomsten van het benodigde watergebruik uit Figuur 5.7 altijd zijn te realiseren met de methode van lekkende ebdeuren zolang het peilverschil tussen het HD en het VZM voldoende debiet kan leveren.

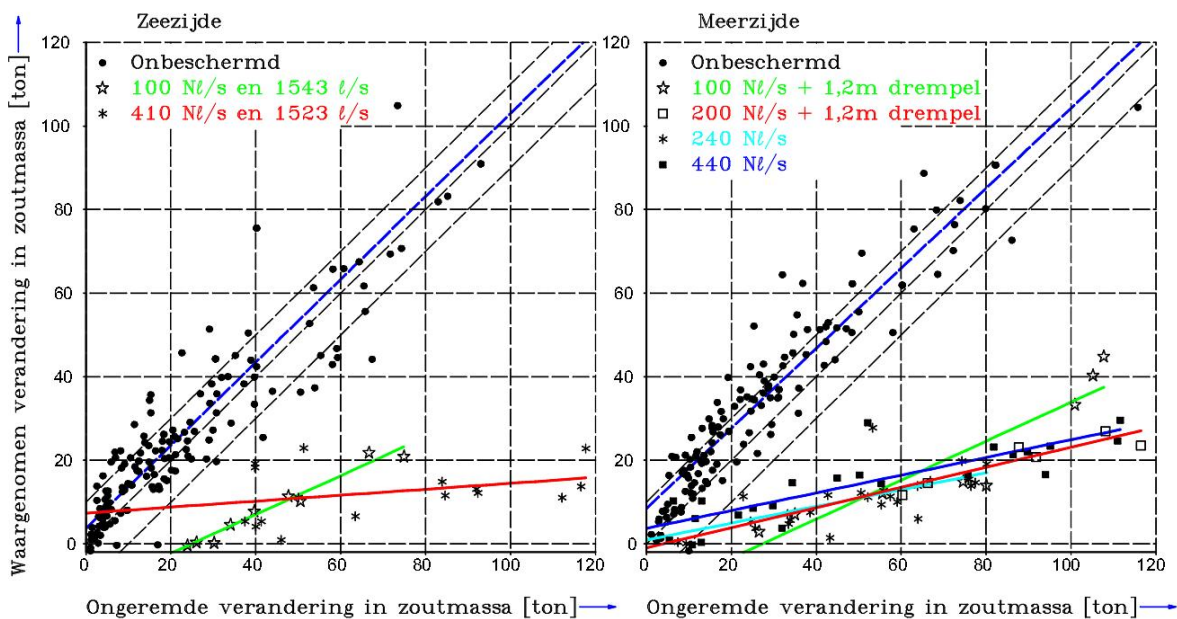


Figuur 5.8 Uitgaande van geheel geopende rinketschuiven aan één van de kolkeinden ontstaat een watergebruik afhankelijk van gedeeltelijk geopende rinketschuiven aan de andere einden (linker grafiek). Dit watergebruik veroorzaakt een beperkt verval over de gesloten sluisdeuren waarin de rinketschuiven volledig geopend zijn (rechter grafiek).

Wanneer overwogen wordt de methode alleen tijdens geopende sluisdeuren toe te passen moet ruwweg hetzelfde daggemiddelde watergebruik worden gehanteerd. Bij 20 schuttingen per dag met 25 minuten deuropentijd staat een kolk 1000 minuten per dag van 1440 minuten open. Het ebdebiet door de geopende kolk wordt dan 44% hoger dan het daggemiddelde debiet en het verval over een nog te openen sluisdeur met volledig geopende rinketschuiven tweemaal hoger dan in Figuur 5.8 gegeven. Dit tweemaal hogere verval blijft nog ruimschoots onder de grens voor het openen van de sluisdeuren.

Uitspraak 4: Δ -luchtbellenschermen naast voldoende hoge drempels bereiken bijna dezelfde lage doorlaaf fractie als Δ -luchtbellenschermen naast waterschermen. Drempels beperken de diepgang door scheepvaart; echter in hoogte instelbare drempels zijn mogelijk.

Uit onze waarnemingen tijdens de praktijkproef in de Stevinsluis blijkt dat een extra verhoogde drempel de zout-zoet uitwisseling beperkt reduceert. Gebleken is dat ca. 80% van de fysieke drempelhoogte bijdraagt tot een vermindering van de resterende waterdiepte welke de zout-zoet uitwisseling aandrijft. De huidige drempels in de beroepskolk van de Volkeraksluizen zijn 1 m hoog en liggen op ca. 6,5 m diepte t.o.v. NAP. Bij het 0,5 m hogere peil in het HD ligt de effectieve drempeldiepte van de beroepssluis op 7,0 m. Worden deze drempels met 1 m verhoogd dan is boven de drempels de fysieke waterdiepte 5,5 m t.o.v. NAP maar effectief voor zout-zoet uitwisseling 5,7 m (5,5 m plus 20% van 1 m) of 7,2 m (7,0 m plus 20% van 1 m) aan HD-zijde. Toepassen van de theorie voor zout-zoet uitwisseling geeft dan een bescheiden reductie van de zout-zoet uitwisseling en van de zoutlek met ca. 18%.



Figuur 5.9 Verticaal de in de Stevinsluis waargenomen verandering van de zoutmassa tijdens geopende kolk uitgezet tegen horizontaal de ongeremde verandering. Vergelijken van linker en rechter figuur toont dat geringe zout-zoet uitwisseling verkregen wordt met óf drempels óf waterschermen naast luchtbellenschermen. De stippen zijn de referentieproeven van een onbeschermd kolk. Het luchtdebiet is in Nl/s en het waterdebiet in l/s . We benoemen deze instellingen als volgt:

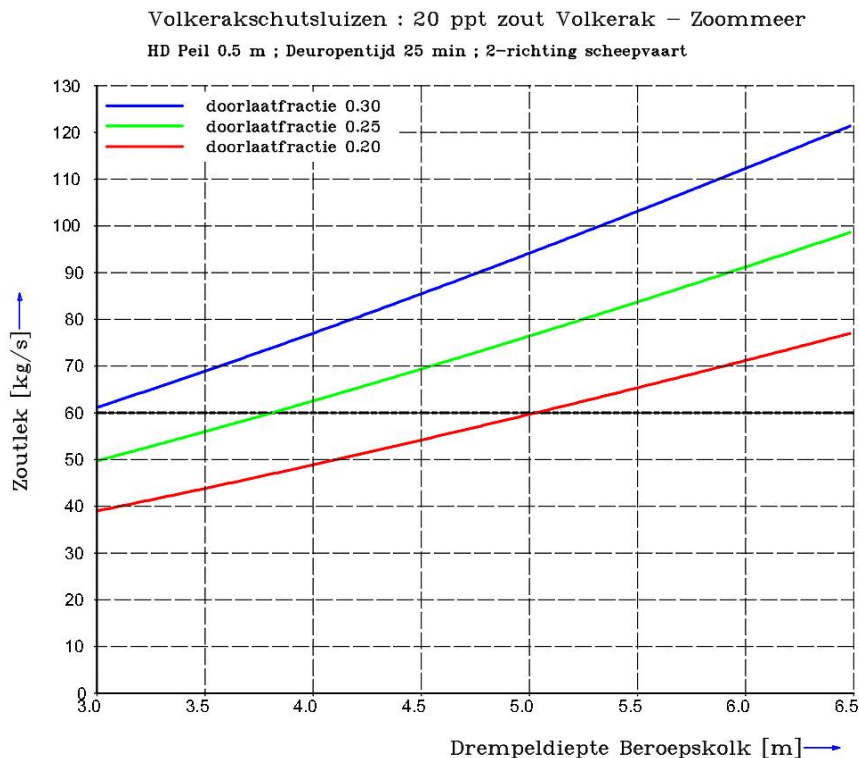
- Δ licht Δ -luchtbellenscherm en waterscherm
- \diamond sterk Δ -luchtbellenscherm en waterscherm
- *
- sterk Δ -luchtbellenscherm
- \odot licht Δ -luchtbellenscherm en drempel
- gemiddeld Δ -luchtbellenscherm en drempel

Een drempel levert een beperkte reductie van de zout-zoet uitwisseling. Uitgaande van deze enigszins verminderde zout-zoet uitwisseling blijkt een drempel tevens de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm te verlagen: een goed geplaatste drempel t.o.v. een luchtbellenscherm levert zodoende een tweede en vaak sterkere reductie in de zout-zoet uitwisseling dan zónder luchtbellenscherm.

De zoutlekbeperkende werking van de huidige of eventueel verhoogde drempels blijkt namelijk doelmatiger als de drempels de teen (onderste deel) van de Δ -luchtbellenschermen tegen de zout-zoet verschildruk afschermen. Omgekeerd betekent voorgaand dat met een drempel het luchtdebiet geringer kan zijn en/of de constructie van het luchtbellenscherm eenvoudiger kan worden om dezelfde doorlaatfractie zónder drempel te bereiken. De huidige drempelhoogte van ca. 1 m in de beroepskolken en ca. 0,5 m in de jachtensluis lijken nog onvoldoende beschermend te zijn om de doorlaatfractie van luchtbellenscherm met drempel tot 0,20 te verlagen. In de ondiepere Stevinsluis onderzochten we de invloed van een extra drempel met 1,2 m hoogte geplaatst naast de Δ -luchtbellenschermen op de doorlaatfractie. We concluderen als volgt.

Indien toelaatbaar, en in termen van doorlaatfractie, kunnen drempels naast luchtbellenschermen de waterschermen grotendeels vervangen. Vergelijk daartoe de groene lijnen in Figuur 5.9 (links met waterscherm, rechts met extra drempel) en de rode lijn in het linker figuurdeel met waterscherm en de rode lijn in het rechter figuurdeel. Zie Figuur 5.3 voor de onderliggende meetpunten.

Vergelijken van beide rode lijnen toont wel dat een waterscherm méér bescherming biedt aan een luchtbellenscherm en minder zout doorlaat dan een extra 1,2 m hoge drempel, zie ook Figuur 5.3. We maken deze vergelijking tussen metingen met een drempel aan de zoete zijde en een waterscherm aan de zoute zijde. Echter, uit hydrodynamische overwegingen concluderen we dat een drempel aan de zoute zijde van de kolk dezelfde werking als aan de zoete zijde zal hebben.



Figuur 5.10 Optimaal werkende Δ -luchtbellenschermen bereiken aan alle kolkeinden een doorlaatfractie van 0,20 wanneer deze naast voldoende hoge drempels zijn geplaatst. De drempelhoogte zélf verlaagt enigszins de zout-zoet uitwisseling. Dezelfde verhoging is toegepast op alle drempels van de beroepskolken én van de jachtenkolk.

Figuur 5.3 toont dat een optimaal werkende luchtbellenscherm beschermd door een drempel een doorlaatfractie van zekerheidshalve 0,20 bereikt. Uitgaande van de doorlaatfractie van 0,20 toont de rode lijn in Figuur 5.10 dat bij drempeldiepten van ca. 5,0 m de zoutlek 60 kg/s bedraagt, zonder extra watergebruik.

Eerder bespraken we met Figuur 5.7 een voorbeeld van Δ -luchtbellenschermen naast 1 m hogere drempels. In de beroepskolken bedraagt de waterdiepte boven de verhoogde drempels nu 5,5 m. Met deze drempels op 5,5 m diepte in de beroepskolken én een gewenste 60 kg/s zoutlek is slechts 1,8 m³/s watergebruik voor de methode van lekkende ebdeuren nodig, samen met 3,2 m³/s schutverlies (zwarte lijn, Figuur 5.7).

Overigens, de luchtbellenschermen werken onder condities van een doorlaatfractie van 0,25. De verlaging van de doorlaatfractie van 0,25 naar 0,20 door beperkt verhoogde drempels vergt hetzelfde luchtdebiet, compressorvermogen en energieverbruik dan zonder drempels.

We concluderen dat de combinatie van beperkt verhoogde drempels en de methode van lekkende ebdeuren geschikt is om te voldoen aan de gestelde grenzen in zoutlek en watergebruik.

Uitspraak 5: Met zekerheid wordt aan de VZM-zijde een doorlaatfractie van 0,15 bereikt met het Δ -luchtbellenscherm en waterscherm. Voor het gehele schutsluizencomplex vraagt het waterscherm daggemiddeld 6 m³/s zoet of verzilt of brak water. Leidingen en pompen voor watertoevoer moeten worden aangelegd. Beroepsscheepvaart zal nauwelijks hinder ondervinden van de water- en Δ -luchtbellenschermen.

We verwijzen opnieuw naar Figuur 5.2 en 5.3 met de combinaties van Δ -luchtbellenscherm met waterscherm of met voldoende hoge drempel. Alleen aan het zoute kolkeinde hebben we de combinatie van luchtbellenscherm en waterscherm onderzocht en alleen aan het zoete kolkeinde de combinatie van luchtbellenscherm en extra 1,2 m hoge drempel.

Het is niet gemeten dat de combinatie Δ -luchtbellenscherm en waterscherm aan het zoete kolkeinde even goed werkt als we maten aan het zoute kolkeinde. Aan het zoute kolkeinde zal de beperkte bijdrage tot het behoud van de verticale watersnelheid door het zoete, lichte water uit het waterscherm groter zijn dan aan het zoete kolkeinde. Van de beschermende werking van de drempels verwachten we dat deze even goed is aan alle kolkeinden. De blauwe lijn in het rechterdeel van Figuur 5.3 is het rekenkundig gemiddelde van de getoonde doorlaatfracties en dit gemiddelde bedraagt slechts 0,11. We ronden dit gemiddelde veiligheidshalve naar boven af tot 0,15.

We hebben nog onvoldoende vertrouwen in de werking van de nieuwe combinatie Δ -luchtbellenscherm en waterscherm aan de zoete zijde, hier HD-zijde. We weten wél dat aan de zoute zijde (hier VZM-zijde) het merendeel van het zoetere water van dit scherm in de kolk komt en zijn zoutmassa verlaagt, zie Figuur 4.9. Mogelijk geldt dit gunstige effect niet voor een waterscherm aan de zoete zijde. Voor hetzelfde mengpatroon zal het water uit dit scherm in de voorhaven komen en dan niet de kolk zoeter maken en niet de zoutlek verder beperken. Nader onderzoek is geboden, zoals aanbevolen in (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010). We vertrouwen wél dat de combinatie van Δ -luchtbellenscherm en waterscherm aan de (zoete) HD-zijde zeker zo goed zal presteren als met een voldoende hoge extra drempel d.w.z. met een doorlaatfractie van 0,20.

Volgens schaalregels is de spleetbreedte van een identiek werkend waterscherm met voldoende hoge snelheid evenredig met de waterdiepte. Gezien het aantal schuttingen per dag zal een waterscherm aan VZM-zijde ca. 37,5 % van de tijd aanstaan. Voor het gehele schutsluizencomplex vragen de waterschermen aan de VZM-zijde dan daggemiddeld 6 m³/s water. Elk werkende waterscherm (per kolk) vraagt ca. 6 m³/s pompcapaciteit. Het waterscherm mag gevoed worden met verzilt water uit de HD-voorhaven. Hiermee kan het geproduceerde verzilte water nuttig worden besteed maar de voeding van de waterschermen vergroot wel het watergebruik.

De Δ -luchtbellenschermen werken met het luchtdebiet voor een doorlaatfractie van 0,25. Voor de verlaging van de doorlaatfractie van 0,25 tot 0,20 met waterschermen is extra pompvermogen en dus extra verbruik van energie nodig.

In onderstaande tabel beschouwen we de volgende drie combinaties:

1. Δ -luchtbellenschermen mét waterschermen aan alle kolkeinden aan de VZM-zijde maar zónder waterschermen aan de HD-zijde;
2. Δ -luchtbellenschermen mét waterschermen aan alle kolkeinden aan de VZM-zijde maar aan de HD-zijde Δ -luchtbellenschermen met 1 m hogere drempels;
3. Δ -luchtbellenschermen mét waterschermen aan alle kolkeinden aan de VZM-zijde én aan de HD-zijde.

In alle gevallen hanteren we aan de VZM-zijde de doorlaatfractie van 0,15 voor de Δ -luchtbellenschermen met waterschermen. Aan de HD-zijde gelden de volgende doorlaatfracties.

In het eerste geval werken de Δ -luchtbellenschermen aan HD-zijde zonder verdere ondersteuning en met een doorlaatfractie van 0,25.

In het tweede geval bedraagt de doorlaatfractie van de Δ -luchtbellenschermen aan HD-zijde met 1 m hogere drempels nu 0,20. Deze verhoogde drempels passen we ook toe aan de VZM-zijde zonder verdere invloed op de doorlaatfractie van 0,15 aan de VZM-zijde.

Tenslotte het derde voorbeeld waar aan alle kolkeinden de Δ -luchtbellenschermen met waterschermen worden ondersteund. Echter, voor die combinatie geldt aan HD-zijde de doorlaatfractie van 0,20 d.w.z. het waterscherm functioneert niet beter dan een voldoende hoge drempel.

Tabel 5.1 Drie varianten van Δ -luchtbellenschermen aan HD-zijde, uitgaande van lage doorlaatfractie van 0,15 voor Δ -luchtbellenschermen met waterschermen aan VZM-zijde.

| Combinatie | Doorlaatfractie VZM-zijde | Doorlaatfractie HD-zijde | Zoutlek kg/s | Debiet waterscherm m ³ /s | Zout-zoet uitwisseling m ³ /s |
|------------|---------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
| 1 | 0,15 (+ waterscherm) | 0,25 | 72 | 6 (+ 3,2 = 9,2) | 9,9 |
| 2 | 0,15 (+ waterscherm) | 0,20 (+ 1 m drempel) | 53 | 6 (+ 3,2 = 9,2) | 8,0 |
| 3 | 0,15 (+ waterscherm) | 0,20 (+ waterscherm) | 55 | 12 (+ 3,2 = 15,3) | 7,1 |

De eerste combinatie voldoet niet aan de gestelde bovengrens voor de zoutlek. De zoutlek van de tweede combinatie voldoet aan de bovengrens in zoutlek en vraagt daggemiddeld 6 m³/s water voor de waterschermen aan de VZM-zijde, samen met 3,2 m³/s schutverlies is het watergebruik 9,2 m³/s. De derde combinatie geeft ook een zoutlek kleiner dan de bovengrens van 60 kg/s. De waterschermen aan alle kolkeinden vragen daggemiddeld 12 m³/s water en samen met 3,2 m³/s schutverlies is het watergebruik 15,3 m³/s.

Wanneer we deze combinaties vergelijken met die in uitspraak 3 zien we dat voor dezelfde zoutlek het watergebruik wat geringer is dan met de methode van lekkende ebdeuren. Anderzijds zijn voor de waterschermen kostbare aanpassingen nodig zoals watertunnels of -buizen, zeer grote pompen en meet- en regelsystemen.

De laatste kolom in Tabel 5.1 toont het daggemiddelde debiet aan brak water dat alle kolken met de HD-voorhavens zullen uitwisselen. In principe kan deze productie van brak kolkwater voor de waterschermen benut door het kolkwater in een zoutvang op te vangen. Hiermee wordt voorkomen dat het door de kolken geloosde zout de HD-voorhaven verlaat en zoutlek wordt. Het water onttrokken uit de zoutvang blijft wel watergebruik. Vooral de tweede combinatie in Tabel 5.1 is in dit opzicht gunstig omdat de waterschermen 6 m³/s vragen terwijl de kolken meer brak water leveren nl. 8 m³/s. De volgende uitspraak gaat in op de mogelijkheden van een zoutvang.

Uitspraak 6: Het door de kolken geleverde brakke water kan tijdelijk worden opgevangen in een verdiepte HD-voorhaven (zoutvang). Bij voldoende goed werkende Δ -luchtbellenschermen is het debiet van brak kolkwater naar de zoutvang geringer dan het maximaal toegestane watergebruik. Dan kan het volledige debiet van brak kolkwater via de zoutvang naar de VZM-zijde worden afgevoerd. De resterende zoutlek komt vnl. uit de zoutvang door transport, overslag en verticale menging van interne golven, scheepvaart en eventueel wind. De waterschermen kunnen worden gevoed met brak water uit de zoutvang.

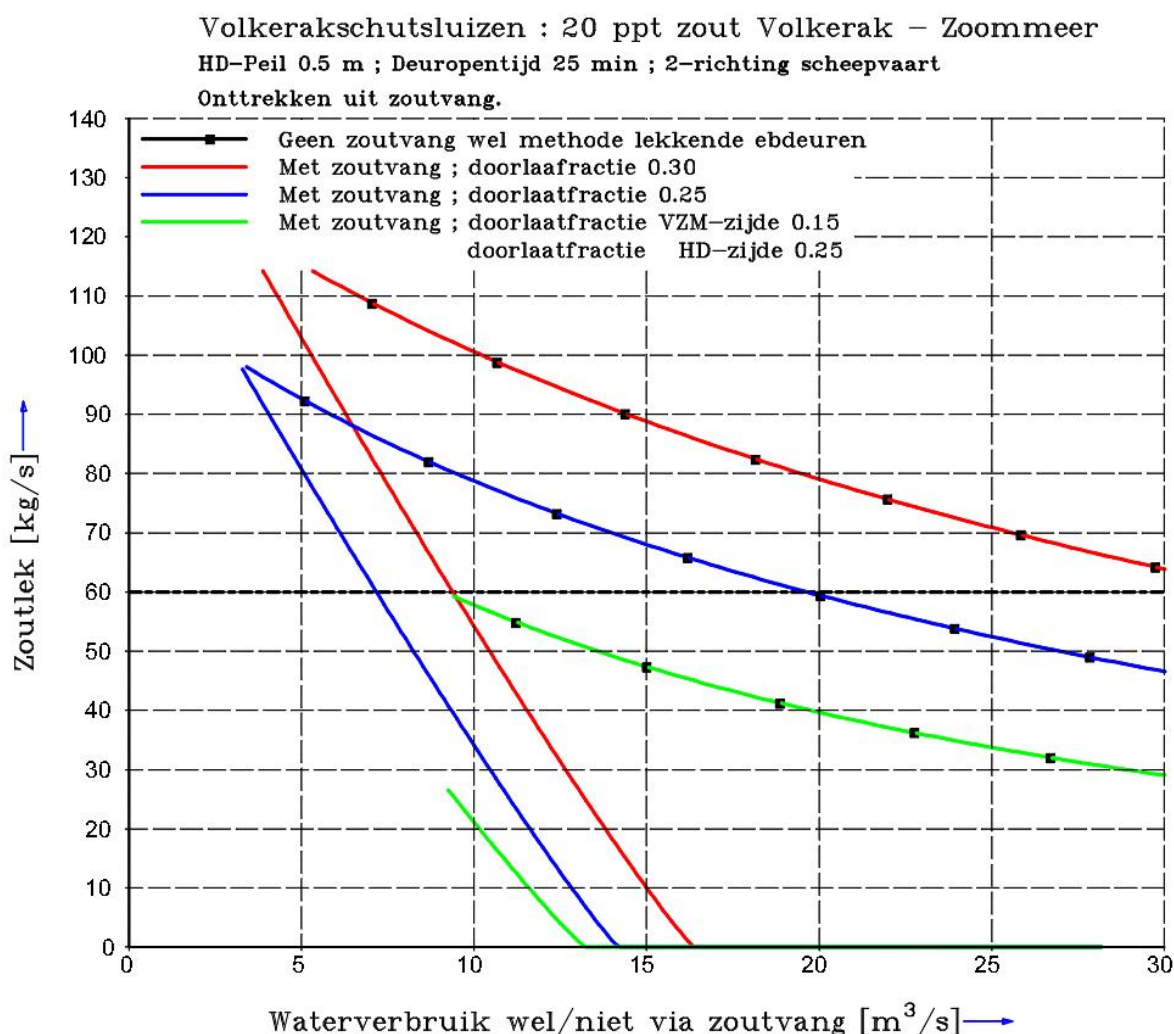
We introduceren hier de mogelijkheden van het gebruik van een zoutvang als middel om de zoutlek verder dan 60 kg/s te reduceren dan met de overige zoutlekbeperkende middelen. De methode is echter niet in detail onderzocht omdat aan 60 kg/s zoutlek voldaan kan worden met andere minder kostbare methoden.

De definitie van de zoutlek stelt dat deze pas optreedt wanneer verzilt water de monding van de HD-voorhaven naar het HD verlaat, zie ook Figuur 5.1. Voordat verzilt water de HD-voorhaven uitstroomt, kan het verzilte water tijdelijk worden opgeslagen in een verdiepte HD-voorhaven.

Het debiet brak water dat de kolken naar de HD-voorhaven leveren neemt af naarmate luchtbellenschermen beter de zout-zoet uitwisseling beperken. Wanneer het daggemiddelde debiet van geloosd brak water minder is dan het toegestane watergebruik kan al het brakke water uit de zoutvang worden onttrokken. Het watergebruik is dan in theorie gelijk aan de som van het debiet geloosd brak water en het verlies door nivelleren. Dit vergt echter wel een nauwkeurig ontwerp van de zoutvang met terugvoersysteem, en zonder verticale menging van de zouttong naar en vanuit de zoutvang en geen overslag van het brakke water uit de zoutvang. De theoretisch haalbare situatie is weergegeven in Figuur 5.11.

De waterschermen kunnen gevoed worden met het brakke water uit de zoutvang. Ondanks dat het HD-peil meestal 0,5 m boven het VZM-peil ligt zijn pompen nodig voor de voeding van de waterschermen aan de zoute kolkeinden. Deze pompen moeten veel water verplaatsen nl. daggemiddeld totaal 6 m³/s of ca. 2,3 m³/s per beroepskolk en de rest voor de jachtensluis. Elk werkend waterscherm vraagt een momentane pompcapaciteit van ca. 6 m³/s per tunnel van de beroepskolk en ca. 3,6 m³/s per tunnel van de jachtensluis.

Wanneer het debiet geloosd brak water en opgevangen in de zoutvang groter is dan de vraag van de waterschermen kunnen de waterschermen volledig uit de zoutvang gevoed worden. Daarmee kan een doorlaatfractie van 0,15 aan de VZM-zijde worden bereikt en nog geringere zoutlek (rode lijnen in Figuur 5.11) bij hetzelfde watergebruik.



Figuur 5.11 Onttrekken van brak water uit een tijdelijke zoutvang in de HD-voorhaven verlaagt aanmerkelijk meer de zoutlek dan zonder zoutvang. Alleen het meerdere van 3,2 m³/s schutverlies kan uit de zoutvang worden onttrokken. De groene lijnen zijn gebaseerd op de combinatie van luchtbellenschermen met waterschermen aan de kolkeinden aan VZM-zijde; de waterschermen vragen ca. 6 m³/s watergebruik. Een zoutvang werkt niet voor de methode van lekkende ebdeuren: een waterscherm wordt dan gevoed met verzilt water uit de HD-voorhaven.

Het goed dimensioneren van de zoutvang vergt nadere studies. De pulserende levering van brak kolkwater veroorzaakt interne golven in de zoutvang maar ook scheepvaart en eventueel wind kunnen zout uit de zoutvang transporteren en mengen. Bovendien zullen krachtige luchtbellenschermen aan de HD-zijde de daar uittrekkende zouttong verticaal mengen. We leiden dit o.a. af uit Figuur 4.9 waar de zouttong diffuser is dan zonder luchtbellenscherm. De aldus gemengde en verdunde zouttong maakt kans niet volledig in de zoutvang te stromen. Dan ontstaat er een zout-zoet uitwisseling in de monding van de HD-voorhaven en dus zoutlek. Feitelijk wordt een goede werking van de zoutvang tegengegaan door de verticale menging van een luchtbellenscherm (Roelfzema, 1977).

Het brakke water moet voorzichtig uit de zoutvang worden weggezogen omdat anders relatief veel zoet water meegesleept wordt of teveel brak water in de zoutvang achter blijft. Zie ook (Van Mazijk, 1973) en (Ligteringen, 1973) waarin onderzoeksresultaten naar selectief afzuigen van zout water zijn beschreven.

Een zoutvang in de HD-voorhaven ligt beschut tegen windgedreven stroming en menging in het Hollandsch Diep. Uit (Roelfzema, 1977) blijkt dat een zoutvang direct achter de kolken de beste locatie is om brak kolkwater in te vangen. Een dergelijke zoutvang vergt dan wel aanpassingen van de bestaande remmingswerken voor de diepere bodem. Zoutvangen in de HD-voorhavens welke buiten de remmingswerken en dus verder van de sluisdeuren liggen vormen mogelijk een aanvaardbaar compromis. Deze overwegingen vergen nadere ontwerpstudie, uitgaande van de laboratoriumproeven met een zoutvang (Roelfzema, 1977).

Voor zowel waterschermen als de lozing van brak water uit de zoutvang zijn grote tunnels naar de kolkeinden aan VZM-zijde nodig. In geval van alleen lozing kan dat onder vrij verval plaats vinden mits het peil in het HD voldoende hoog is t.o.v. het peil in het VZM. Bij kleinere doorsneden van tunnels/leidingen of als voeding van de waterschermen moet het brakke water verpompt worden.

Bij de methode van lekkende ebdeuren onttrekken de rinketschuiven vooral water uit de HD-voorhaven boven de kolkvloer en dus bóven de laag brak water in de zoutvang. Het is daarom dat een zoutvang niet doelmatig geleege kan worden via lekkende ebdeuren.

Met de zoutvang als aanvullende maatregel zal altijd een vermindering van de zoutlek gerealiseerd kunnen worden. Voorwaarde is dat een goed ontwerp wordt gemaakt waardoor weinig menging optreedt en het beschikbare watergebruik (maximaal $25-3,2=22,8 \text{ m}^3/\text{s}$) voldoende is om de zoutvang te legen.

Uitspraak 7: Bij 0,5 m hoger peil in het HD t.o.v. het VZM vergen drempels, lekkende ebdeuren en een zoutvang geen extra pompenergie. Waterschermen vergen veel en grote pompen met energieverbruik. Luchtbellenschermen vergen compressorvermogen en daarbij energieverbruik.

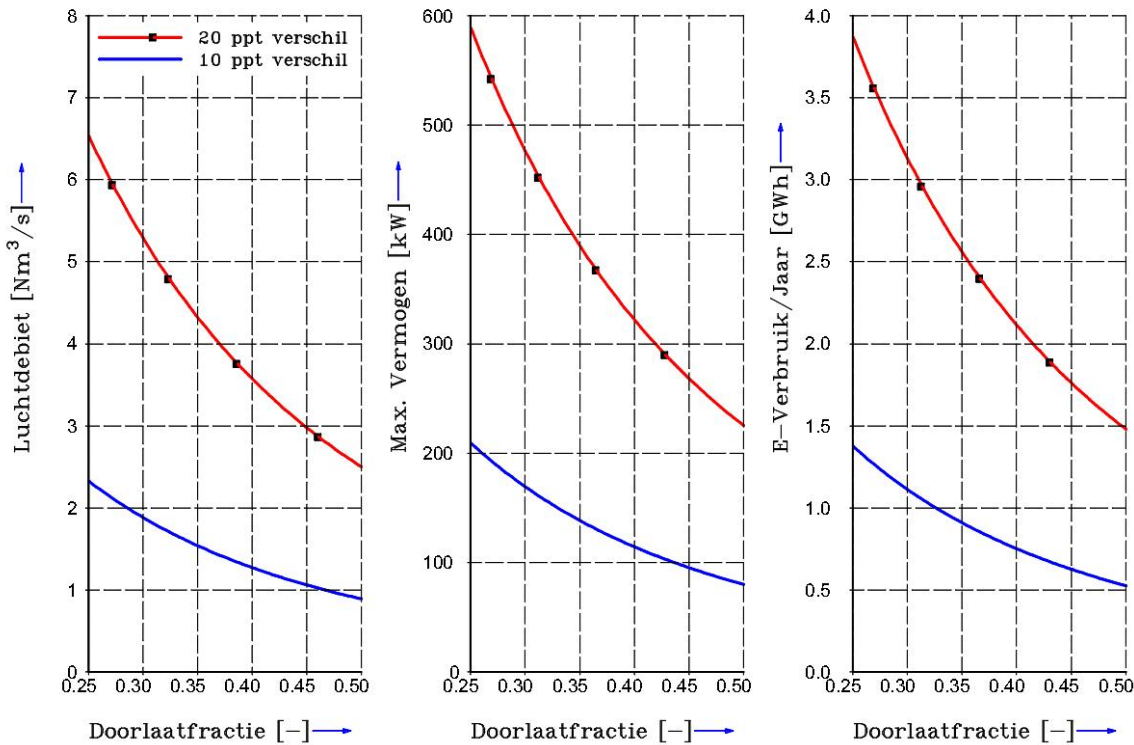
5.2.1 Energieverbruik luchtbellenschermen

Bij afnemende doorlaatfractie van gelijk werkende Δ -luchtbellenschermen aan alle kolkeinden zal het volume-gemiddelde zoutgehalte in de kolk minder variëren dan zonder schermen.

Gesteld dat de zoutverschillen over beide kolkeinden tussen het HD en het VZM ruwweg 20 ppt blijft. In het ideale geval van uiterst kleine doorlaatfracties wordt het zoutgehalte van de kolk gelijk aan het gemiddelde van de zoutgehalten in het VZM en het HD en dat is 10 ppt. Hiermee daalt het verschil in zoutgehalte over deze schermen tot minimaal 10 ppt.

Deze tendens naar lagere verschillen in zoutgehalte over de schermen vermindert het benodigde luchtdebiet én het energieverbruik. Zekerheidshalve en gezien het aanlooptraject moet wel het maximale compressorvermogen behorende bij het maximale verschil (20 ppt) in zoutgehalten worden geïnstalleerd. De regeling van het luchtdebiet voor de optimale werking van de Δ -luchtbellenschermen is afhankelijk van het werkelijke momentane verschil in zoutgehalten. Het energieverbruik bij 20 ppt zoutverschil over de schermen is eveneens gebaseerd op Δ -luchtbellenschermen die aan alle kolkeinden werken. Echter, het extreme verschil van 20 ppt zoutgehalte ontstaat door zeer lange deuropentijden waarmee het energieverbruik evenredig toeneemt. In Figuur 5.9 houden we de deuropentijd constant op 25 minuten. In termen van geïnstalleerd vermogen en energieverbruik moeten de ons nog onbekende extra verliezen in de compressoren in Figuur 5.12 worden meegeteld.

Volkerakschutsluizen lucht, vermogen en jaarlijks energieverbruik
 Peil HD 0,5m ; Deuropentijd 25 min ; 2-richting scheepvaart



Figuur 5.12 Luchtdebiet, geïnstalleerd compressorvermogen en jaarlijks energieverbruik voor alle kolken afhankelijk van verschil in zoutgehalte over de Δ -luchtbellenschermen; voor deuropentijd van 25 minuten, met 2 minuten opstarttijd en 20 schutcycli/dag. Het Froude-lucht getal is optimaal voor de laagste doorlaatfracties en daalt met toenemende doorlaatfracties. Vermogens en energieverbruik zijn exclusief verliezen in de compressoren.

5.2.2 Energieverbruik waterschermen

We bespraken dat waterschermen in combinatie met Δ -luchtbellenschermen de doorlaatfractie van 0,25 naar 0,15 verlagen wanneer toegepast aan de zoute kolkeinden van de drie beroepssluizen en van de jachtensluis. Bij dezelfde verschillen in zoutgehalte vragen de luchtbellenschermen hetzelfde luchtdebiet, geïnstalleerd compressorvermogen en energiegebruik zoals gegeven in Figuur 5.12. Door de eenzijdige ondersteuning met de waterschermen en eenzijdige verlaging van de doorlaatfractie worden de verschillen in zoutgehalte over de beide kolkeinden wat anders verdeeld.

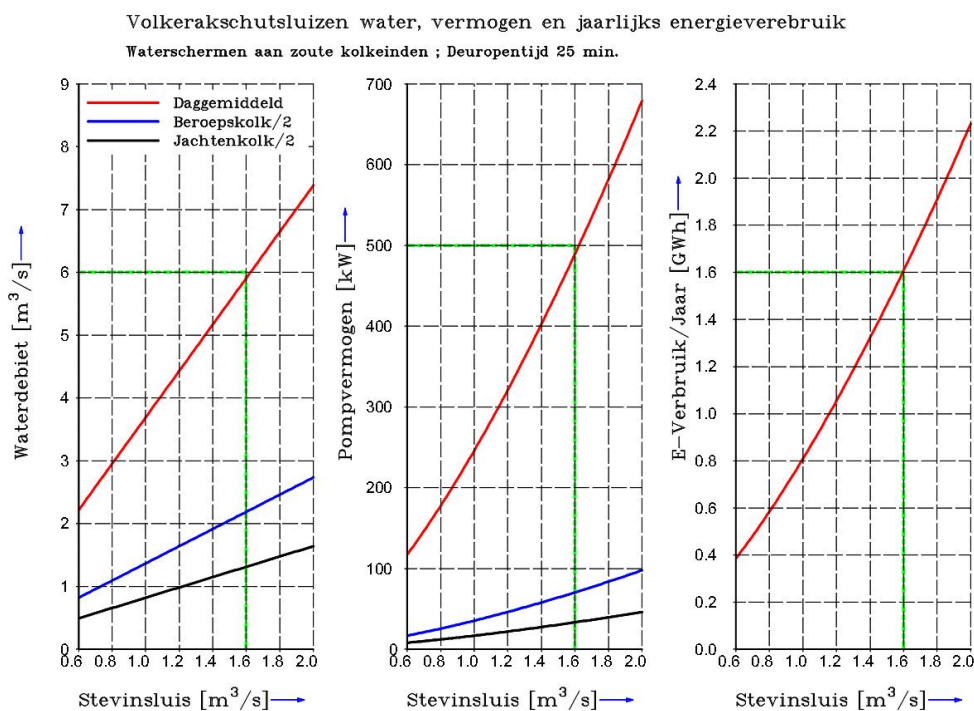
We geven hier enkele conceptuele ontwerpen en instellingen voor waterschermen die voor verdere detaillering en optimalisatie nadere studie vereisen.

Vertaald vanuit de toegepaste waterschermen in de Stevinsluis schatten we het volgende in voor waterschermen in de Volkeraksluizen. In de Stevinsluis werkten we met waterschermen van max. 1600 l/s verdeeld over 14 m kolkbreedte in gemiddeld 4,7 m waterdiepte. In de Stevinsluis werd de bovengrens van 1600 l/s bepaald door de beschikbare capaciteit van

gehuurde pompen en niet vanuit een optimale instelling van de combinatie waterschermen en Δ -luchtbellenschermen. We gaan desondanks uit van 1600 l/s en vergroten dit debiet evenredig met kolkbreedte en waterdiepte van de beroepskolken en jachtensluis t.o.v. de kolk in de Stevinsluis. Deze schaling volgt uit de theorie voor waterschermen met verwaarloosbare invloed van dichtheidsverschillen tussen water in het waterscherm en het ontvangende water.

De waterschermen vergen extra watertunnels en pompen om het water vanuit de HD-voorhaven naar de zoute kolkeinden (VZM-zijde) te leveren. Twee watertunnels met vierkante dwarsdoorsneden voeden elk kolkeinde aan de VZM-zijde. We schatten de tunnallengte in op ca. 400 m. Elke tunnel wordt gevoed door één pomp. De pompcapaciteit en het pompvermogen van elke pomp op het moment dat de waterschermen werken is in Figuur 5.13 gegeven. De groene lijnen gelden voor waterschermen in de Volkeraksluizen die (gelijkvormig) werken onder dezelfde condities als in de Stevinsluis. Elk van de totaal zes pompen voor de drie beroepskolken moet dan ca. 2,2 m³/s leveren en vraagt ca. 75 kW theoretisch vermogen, excl. energieverliezen in de pompen (blauwe lijnen in Figuur 5.13). Het peilverschil van 0,5 m tussen HD en VZM helpt de pompen bij hun levering van water uit de HD-voorhaven naar de kolkeinden aan VZM-zijde.

In termen van geïnstalleerd vermogen en energieverbruik moeten de ons nog onbekende extra verliezen in de pompen bij het vermogen en energieverbruik volgens Figuur 5.13 worden meegeteld.



Figuur 5.13 Per tunnel het waterdebiet en geïnstalleerd pompvermogen voor de waterschermen aan de zoute kolkeinden; voor deuropentijd van 25 min, 2 min. opstarttijd en 20 schuttingen/dag. Het jaarlijks energieverbruik is gesommeerd voor alle pompen. Vermogens en energieverbruik zijn exclusief pompverliezen. De groene lijnen refereren naar een waterscherm vergelijkbaar met die in Stevinsluis bij 1600 l/s.

De watersnelheid in een tunnel houden we op 2 m/s en de uitreesnelheid voor het waterscherm op 2,5 m/s. Voor waterschermen overeenkomend met die toegepast in de Stevinsluis heeft elke watertunnel voor de beroepskolken een dwarsdoorsnede van ca. 1*1 m² en 0,8*0,8 m² voor de jachtenkolk. Bij voorkeur dienen de waterschermen uit een zoutvang in de HD-voorhaven gevoed te worden want dan legen de schermen de zoutvang. Dan dient zo veel als mogelijk het brakke water uit de zoutvang te worden aangezogen, zonder dat het zoetere water daarboven meekomt.

Voor dit zg. selectief onttrekken dient de aanzuigsnelheid gering te blijven en veiligheidshalve bijvoorbeeld op 20 cm/s gesteld te worden, bij voldoende diepe zoutvang. Onder deze grenswaarde kan brak water naar de aanzuigmond worden gezogen zonder dat in een 3 m diepe zoutvang het brak-zoet oppervlak naar de monding zó omlaag wordt getrokken dat zoet water uit de HD-voorhaven wordt meegezogen.

Een grove schatting van de minimale afmetingen van de zoutvang volgt uit een grotere deuropentijd van 30 minuten. Dan stroomt er, gesommeerd over alle kolken, maximaal 13 m³/s brak water naar de HD-voorhaven. Wanneer alle kolken gelijktijdig openen wordt 23.400 m³ brak water geloosd welke de zoutvang moet opvangen. Hiervan komt ca. 18% of 4212 m³ van de jachtensluis. Voor een 3 m diepe zoutvang in de HD-voorhaven van de drie beroepssluisen is dan diepte-gemiddeld 6400 m² aan horizontaal oppervlak nodig en 1400 m² voor de jachtensluis. Deze waarden moeten worden vermeerderd met de ruimte nodig voor demping van de golfbewegingen in het interne grensvlak tussen zoet en brak water. Anders zal de intredende zouttong bij de achterrand van de zoutvang overslaan en de HD-voorhaven verzilten. Bovendien moet er rekening meer worden gehouden dat niet al het brakke water wordt afgevoerd. Er is dus een mate van overdimensionering nodig. Ook ervaringen met de zoutwaterput van de grote schutsluis Terneuzen geven aan dat een te krappe berging slecht werkt.

In de HD-voorhaven denken we aan een 150 m brede zoutvang en voor de lengte kan gedacht worden aan bijvoorbeeld 150 m. Voor een 50 m brede zoutvang in de HD-voorhaven van de jachtensluis is eveneens ca. 150 m lengte nodig. We menen dat dergelijke grote zoutvangs in de beide voorhavens wel mogelijk zijn.

Ook zonder waterschermen maar met nuttig gebruik van de zoutvang dient water uit de zoutvang naar de zoute zijde van de kolken getransporteerd te worden. Het debiet is dan continue nodig, maar aanmerkelijk geringer dan voor de waterschermen tijdens geopende sluisdeuren. De watertunnels kunnen dan ook kleiner worden, of er zijn geen pompen nodig. Volgens de blauwe lijn in Figuur 5.11, na aftrek van 3,2 m³/s schutverlies, is gesommeerd over alle kolken continue tenminste 4 m³/s transport uit de zoutvang nodig om onder de 60 kg/s zoutlek te blijven. Hierbij geldt wel als voorwaarde dat vanuit de zoutvang geen zouttransport naar de HD-voorhaven ontstaat welke anders de zoutlek zal verhogen.

Er zijn dan tenminste twee tunnels nodig: één naar de VZM-voorhaven van de beroepssluisen en één naar de VZM-voorhaven van de jachtensluis. Het water uit deze tunnels dient wél voor de sluisdeuren aan de zoute VZM-zijde geloosd te worden. Tijdens geopende kolken naar de VZM-zijde stroomt dan het brakkere zoutvangwater de kolken in. Deze waterverdeling per kolk en voor de VZM-sluisdeuren vergt vanuit één tunnel meerdere vertakkingen naar elke kolk of meerdere tunnels. Bij 0,5 m peilverschil tussen HD en VZM en voldoende grote dwarsdoorsneden van de tunnels zijn geen pompen nodig om de gewenste stroming (lees watergebruik) vanuit de zoutvang naar de zoute voorhavens te transporteren. Pompen zijn wél nodig bij te gering peilverschil en zeker tijdens omkering van het peilverschil (peil VZM hoger dan HD) b.v. door een grotere getijslag in het VZM.

Uitspraak 8: De luchtbellenschermen verlagen de stroming en troskrachten voor schepen in de kolk. Tot 2 m diepte en horizontaal binnen tweemaal de waterdiepte is de stroming door luchtbellenschermen aanmerkelijk. Beroepsscheepvaart zal nauwelijks hinder ondervinden van de water- en luchtbellenschermen. De recreatievaart kan hinder ondervinden van de luchtbellenschermen maar daarvoor bestaan wel oplossingen of compromissen.

Luchtbellenschermen verminderen de zout-zoet uitwisseling tussen de sluis en de ermee in open verbinding staande voorhaven. Binnen een afstand van maximaal tweemaal de waterdiepte en tot maximaal 2 m waterdiepte veroorzaken luchtbellenschermen aanmerkelijke stroming aan het wateroppervlak. Echter, tijdens geopende sluisdeuren zijn buiten de invloedzone van de schermen de stroomsnelheden en golfbewegingen in de kolk geringer dan zonder schermen (Vrijburcht, 1989). Hierdoor verlagen luchtbellenschermen en waterschermen de troskrachten van in de kolk afgemeerde schepen en verbeteren de schermen de handelbaarheid van de schepen in de kolk.

Binnen hun invloedzone veroorzaken luchtbellenschermen aan het wateroppervlak stromingen tot ruwweg de kenmerkende lage vaarsnelheid van schepen in een kolk. Roer en schroef werken minder als deze van achteren worden aangestroomd. Tot 2 m diepte nemen de snelheden evenredig met de diepte af. Dieper dan 2 m zijn de snelheden van de schermen verwaarloosbaar en dan beïnvloeden de schermen de werking van roer en schroef niet meer.

In de praktijk van de Stevinsluis blijken de schippers voldoende snelheid te nemen om over de luchtbellenschermen te varen. Bij zowel in- als uitvaren is dan wel voldoende afstand voor versnellen of stoppen nodig. Bij volle kolk kan deze lengte voor aanloop of uitloop ontbreken.

Bij serieuze problemen met recreatievaart zien we de volgende oplossingen:

1. Waarschuwen via mededelingborden;
2. Een geringere vulling van de kolk met jachten wat uiteraard langere wachttijden geeft en meer schuttingen noodzakelijk maakt en daardoor tot meer zoutlek leidt;
3. Inschakelen van de luchtbellenschermen zolang de kolk nog niet volledig met schepen is gevuld. In de resterende periode wordt het bellenscherm dan uitgezet en is de zout-zoet uitwisseling dan ongeremd en
4. Toepassen van minder krachtige luchtbellenschermen ten koste van meer zout-zoet uitwisseling.

De jachtensluis draagt ca. 18% bij aan de zoutlek van 60 kg/s. Door de seizoensafhankelijke recreatie is jaargemiddeld de bezetting van de jachtensluis minder dan de helft van de bezetting van de beroepskolken. Men kan er voor kiezen de zoutlek door de jachtensluis minder strikt beperkt te houden. Echter, juist in de zomer bij geringe rivierafvoer maar met maximaal gebruik van de jachtensluis is het beperken van de zoutlek belangrijk.

5.3 De robuustheid van de onderzochte methoden.

Uitspraak 9: Een zoutvang biedt waarschijnlijk de beste reservemogelijkheid voor de capaciteit om de zoutlek - indien gewenst - wanneer hogere eisen aan de beperking van de zoutlek gesteld worden dan 60 kg/s zoutlek en 25 m³/s watergebruik.

5.3.1 Inleiding

De uitkomsten van ons onderzoek bevatten onzekerheidsmarges voor de werkelijk optredende zoutlek. De conclusies van Hoofdstuk 4 tonen de (on)zekerheden. Hier bespreken we deze marges en we concluderen dat met 45-53 % reductie van de ingestelde zoutlek moet worden gerekend teneinde de bovengrens van 60 kg/s zoutlek zeker te stellen.

Vervolgens beantwoorden we de vraag welke van de overwogen zoutlekbeperkende middelen deze zekerheid zullen bieden. Ons antwoord luidt (1) Δ -luchtbellenschermen gecombineerd met de methode van lekkende ebdeuren én met 1 m hogere drempels of (2) Δ -luchtbellenschermen gecombineerd met een goede zoutvang.

Tenslotte bieden we een stappenplan waarbij na elke stap de zoutlek daalt bij gegeven bovengrens van watergebruik en voorzover we schatten met de minste kosten en geringste hinder van scheepvaart. We concluderen dat op de eerste plaats optimaal ingestelde en goed ontworpen luchtbellenschermen komen. Als extra zoutlekbeperkend middel komt de methode van lekkende ebdeuren, gevolgd door óf aangevuld met verhoogde drempels. Een zoutvang is dan de op één na laatste optie en als laatste het toepassen van waterschermen als ondersteuning van luchtbellenschermen.

5.3.2 Schatten van onzekerheidsmarges

We bevelen aan om de zoutlek en het watergebruik door de Volkeraksluizen bij de monding van de voorhaven naar het Hollandsch Diep te bewaken. In de volgende beschouwingen veronderstellen we dat deze monitoring gebeurt zodat de beheerder weet dat er maatregelen moeten worden getroffen. Welk van de operationele parameters heeft de beheerder dan tot zijn beschikking om bij te sturen?

We nemen aan dat de beheerder:

- De luchtbellenschermen optimaal instelt op verschillen in zoutgehalten over de schermen en met voldoende flexibele compressoren en schermen;
- De kierstand van de rinketschuiven bij de methode van lekkende ebdeuren kan instellen;
- Het waterdebiet uit de eventuele zoutvang naar de VZM-voorhaven meet en kan instellen en
- Het waterdebiet naar de eventuele waterschermen wordt gemeten en kan worden ingesteld.
- De vaardiepte boven de drempels kent wanneer drempels met instelbare hoogte worden overwogen.

Dan luidt de vraag of de beheerder binnen de gestelde bovengrens van 25 m³/s watergebruik voldoende speelruimte heeft om de zoutlek onder 60 kg/s te houden? En wanneer dat niet (meer) mogelijk is: welke aanvullende maatregelen moet de beheerder treffen om wél aan de gestelde bovengrenzen te gaan voldoen?

In onderstaande inleidende beschouwingen nemen we deze vraagpunten door.

Zoutlekmodel: Op basis van onze toetsing (Uittenbogaard, 2010) van het Zoutlekmodel aan waarnemingen schatten we ca. 20% onzekerheidsmarge in de voorspelling van de zoutlek. De realisatie van het ontwerp kan correct zijn maar gebaseerd op een met 20% onderschatte zoutlek.

In de volgende overwegingen veronderstellen we dat de realisatie van het ontwerp niet voldoet. We menen dat de luchtbellenschermen de meest gevoelige maar ook moeilijk meetbare of corrigeerbare schakel vormen. De onzekerheid in de doorlaatfractie van een luchtbellenscherm vormt het centrale thema in het volgende gevoeligheidsonderzoek.

Doorlaatfractie luchtbellenscherm: De praktijkproef in de werkende Stevinsluis leverde goed haalbare lage doorlaatfracties van 0,25 maar met de nodige variaties in de uitkomsten. Geïdealiseerde laboratoriumproeven, gedetailleerde computerberekeningen en geïdealiseerde veldmetingen leverden lagere waarden. Uit de verschillen tussen de ideale en reële doorlaatfracties vermoeden we dat storende invloeden in een werkende schutsluis leidden tot de hogere doorlaatfractie van 0,25 en de voornaamste reden is van de gevonden marges. In een werkende schutsluis en in een biologisch actief watermilieu kunnen de luchtbellenschermen beschadigd en vervuild raken waarna de schermen meer zout doorlaten. De nadelige effecten van vervuiling en beschadiging op de zoutlek moeten worden afgewogen tegen de kosten en intervallen van onderhoud.

Dit alles overwegende voegden we in de besproken figuren ook de zoutlek toe bij een tegenvallende doorlaatfractie van 0,30. Dit zijn de rode lijnen in de relevante figuren.

Een systematische verhoging van de doorlaatfracties van alle luchtbellenschermen aan alle kolkeinden van 0,25 tot 0,30 geeft een toename van de zoutlek met ca. 21%. Echter luchtbellenschermen alleen zijn onvoldoende voor de gestelde bovengrens in zoutlek. Daarom betrekken we hierna de variaties in doorlaatfractie in combinatie met de overige zoutlekbeperkende middelen. Anderzijds is de hier geschatte 21% toename wél geldig met verhoogde drempels.

Doorlaatfractie luchtbellenscherm in combinatie met lekkende ebdeuren: De systematische verhoging van de doorlaatfracties van 0,25 naar 0,30 voor alle luchtbellenschermen bij 20 m³/s watergebruik voor lekkende ebdeuren (blauwe naar rode lijn in Figuur 5.7) geeft 30% verhoging van de zoutlek.

Vervolgens luidt de vraag of de beheerder deze 30% te hoge zoutlek samen met een eventueel 20% onderschatte zoutlek kan verlagen met meer watergebruik via de methode van lekkende ebdeuren? Immers de beheerder zou de kierstand van de rinketschuiven in de sluisdeuren verder kunnen vergroten. Het antwoord is helaas ontkennend, voor doorlaatfracties van 0,30 en 60 kg/s zoutlek overschrijdt het benodigde watergebruik zijn bovengrens van 25 m³/s voor totaal 50% hogere zoutlek.

Doorlaatfractie luchtbellenscherm in combinatie met zoutvang: We houden constant de onttrekking van 4 m³/s brak water uit de zoutvang die was ingesteld om bij 0,25 doorlaatfractie de zoutlek tot 60kg/s te beperken (blauwe lijn Figuur 5.11 na aftrek van 3,2 m³/s schutverlies). We menen dat het gewenste debiet uit de zoutvang bewaakt wordt en bereikt kan worden, ook als de tunnels vanuit de zoutvang ten dele geblokkeerd worden.

Wel veronderstellen we een toename van de doorlaatfractie van de luchtbellenschermen van 0,25 naar 0,30. Dan neemt de zoutlek met 33% toe, zie Figuur 5.11, uitgaande van 60 kg/s zoutlek. Deze grootste toename in zoutlek komt doordat luchtbellenschermen niet alleen zout doorlaten maar ook een debiet aan brak kolkwater. Dat debiet wordt opgevangen in de zoutvang. Bij dezelfde onttrekking van water uit de zoutvang (met 4 m³/s) wordt het meerdere water dat een slechter luchtbellenscherm doorlaat niet meer uit de zoutvang onttrokken. Dit brakke water stroomt over de zoutvang naar het HD en vergroot de zoutlek. De beheerder kan wel besluiten het debiet van brak water uit de zoutvang te verhogen. In termen van watergebruik heeft hij daar ruimschoots de mogelijkheid toe voordat deze de 25 m³/s bovengrens bereikt.

Langere deuropentijd: We veronderstelden 20 schutcycli/dag voor alle kolken waarmee o.i. de maximale capaciteit van de huidige Volkeraksluizen is bereikt. Als bovengrens is aangenomen dat in de jachtensluis even vaak en met dezelfde deuropentijd wordt geschut als in de beroepskolken. Enerzijds zal de jachtensluis 's winters minder gebruikt worden. Anderzijds vermoeden we dat 's zomers, bij grote drukte, de jachtensluis werkt met (veel) langere deuropentijden. Uit het Zoutlekmodel volgt dat de jachtensluis ca. 18% bijdraagt tot de zoutlek van 60 kg/s.

Theorie en Zoutlekmodel tonen dat, uitgaande van 25 minuten deuropentijd, per 1 minuut verlenging van de deuropentijd de zoutlek met 5% toeneemt. Bij een systematische verlenging van de deuropentijd voor alle kolken met 5 minuten (10 minuten langere tijd van een schutcyclus geeft 200 minuten meer dag) neemt de zoutlek van 60 kg/s met 25% toe naar 75 kg/s.

5.3.3 Gewenste overcapaciteit en begrenzingen

Voorgaande afwijkingen op de zoutlek verlangen een overcapaciteit in de werking van de zoutlekbeperkende middelen zodat deze bij tegenvallende zoutlek een lagere zoutlek kunnen leveren. We verwaarlozen de marginale invloed van variaties in de operationele condities van de jachtensluis op de zoutlek. We menen dat met 20 schutcycli per kolk en per dag de deuropentijd van 25 minuten systematisch niet langer kan worden tenzij het aantal schuttingen per kolk en per dag afneemt.

Op basis van voorgaand stellen we dat een overcapaciteit gewenst is voor een verhoging van de doorlaatfracties met 0,05 (b.v. 0,20 wordt 0,25 óf 0,25 wordt 0,30). En hierbij tellen we op 20% onderschatting van de zoutlek door het Zoutlekmodel.

Uit voorgaande concluderen we dat zonder zoutvang ca. 41-50% overcapaciteit in het beperken van de zoutlek is gewenst door 20% onderschatting van de zoutlek en 21-30% toename van de zoutlek bij toenemende doorlaatfractie van 0,25 naar 0,30 zonder of in combinatie met de methode van lekkende ebdeuren. We ronden deze schatting af op 45% overcapaciteit.

Tevens volgt uit voorgaande dat met zoutvang 53% overcapaciteit in het beperken van de zoutlek met zoutvang is gewenst door 20% onderschatting van de zoutlek en 33% toename van de zoutlek bij toenemende doorlaatfractie van 0,25 naar 0,30 in combinatie met een zoutvang.

Het verder verlagen van de zoutlek door hogere (verstelbare) drempels is technisch mogelijk maar de toegestane maximale drempelhoogte beperkt de gewenste verlaging van de zoutlek. Figuur 5.10 toont dat met doorlaatfracties verhoogd van 0,20 tot 0,25 en met 20% onderschatte zoutlek de drempelhoogte slechts 3,0 m bedraagt. We lezen deze hoogte uit Figuur 5.10 af door uit te gaan van 50 kg/s zoutlek (als 20% onderschatting van 60 kg/s) en de groene lijn voor 0,25 doorlaatfractie.

Bij een tegenvallende doorlaatfractie van 0,30 in combinatie met de methode van lekkende ebdeuren toont de rode lijn in Figuur 5.7 dat 60 kg/s zoutlek juist niet gehaald wordt bij 25 m³/s maximale watergebruik. In termen van watergebruik is er geen ruimte meer voor compensatie van een eventueel met 20% onderschatte zoutlek. Die speelruimte wordt wél verkregen door de methode van lekkende ebdeuren te combineren met 1 m hogere drempels. De doorlaatfractie van de Δ -luchtbellenschermen geplaatst naast deze drempels wordt dan nl. verlaagd van 0,25 naar 0,20 (zwarte lijn in Figuur 5.7). Een tegenvallende doorlaatfractie van 0,25 i.p.v. 0,20 en met 1 m verhoogde drempels levert de groene lijn in Figuur 5.7. Deze optie biedt ruimschoots de mogelijkheid om een met 20% onderschatte zoutlek te compenseren met meer watergebruik door het vergroten van de kierstand van de rinketschuiven. Het watergebruik is dan opgelopen tot ca. 18 m³/s. We leiden deze schatting uit Figuur 5.7 af door het watergebruik bij de groene lijn te nemen voor 50 kg/s zoutlek als 20% onderschatting van de beoogde 60 kg/s zoutlek.

Met een zoutvang is het watergebruik om 60 kg/s zoutlek te bereiken aanmerkelijk kleiner dan het watergebruik voor de methode van lekkende ebdeuren. Bij een doorlaatfractie van 0,30 is ca. 9 m³/s watergebruik nodig voor 60 kg/s zoutlek (Figuur 5.11, rode lijn). Verlagen we de zoutlek met een onderschatting van 20% dan is er ca. 2 m³/s méér watergebruik via de zoutvang nodig. We leiden deze schatting uit Figuur 5.11 af door het watergebruik te nemen bij 50 kg/s zoutlek d.w.z. 20% onderschatting van 60 kg/s en met tegenvallende doorlaatfractie van 0,30. Het watergebruik van 11 m³/s blijft nog ruim onder het maximale watergebruik van 25 m³/s.

We concluderen dat zoutvangen in de HD-voorhavens de grootste zekerheid bieden om bij tegenvallende zoutlek de zoutlek te verlagen tot onder de gestelde bovengrens van 60 kg/s. Gezien de geringe invloed van de jachtensluis op de zoutlek is een zoutvang in de HD-voorhavens van de drie beroepskolken het meest effectief om de gestelde bovengrens in zoutlek zeker te stellen.

Opgemerkt zij dat met de methode van lekkende ebdeuren in combinatie met drempels en bellengordijnen ook binnen de maximale grens voor het waterlek een oplossing bereikt kan worden, maar met minder marge voor verdere verlaging van de zoutlek.

Het watergebruik van ca. 11 m³/s uit de zoutvang kan met lage watersnelheid van 1 m/s via zes tunnels van elk ca. 1*1 m² dwarsdoorsnede naar de VZM-voorhaven worden afgevoerd. Bij voldoende groot peilverschil tussen HD en VZM kan deze watergebruik onder vrij verval afgevoerd worden, zekerheidshalve zijn pompen nodig als het peilverschil ontoereikend is, zoals bij een getij in het VZM.

5.4 Stappenplan

Teneinde de zoutlek en watergebruik binnen de gestelde grenzen te houden zou het volgende stappenplan gehanteerd kunnen worden. De volgorde in dit stappenplan is onze keuze waarbij met de geringste aanpassingen en/of belemmeringen per stap de grootste reductie in zoutlek en watergebruik wordt bereikt. Deze stappen kunnen worden gekozen om bij tegenvallende zoutlek de maximaal toelaatbare zoutlek en watergebruik te bereiken. De aanleg van een zoutvang is een majeure stap welke voorafgegaan dient te worden door een ontwerpstudie naar de afmetingen en menging vanuit de zoutvang, zie ook (Roelfzema, 1977), en de benodigde watertunnels.

Ons voorstel voor een stappenplan luidt als volgt:

1. De beste ontworpen én adaptieve Δ -luchtbellenschermen plaatsen achter of voor de huidige drempels van alle kolken van de Volkeraksluizen. Hierbij rekening houden met een uitbreiding met waterschermen (zie stap 4);
2. Toepassen van de methode van lekkende ebdeuren met verstelbare positie van de rinketschuiven en aangepast bedieningsprotocol;
3. Uitbreiden van de methode van lekkende ebdeuren met 1 m hogere drempels die eventueel instelbaar zijn voor incidentele scheepvaart met grote diepgang en/of een kolk beschikbaar houden voor schepen met grote diepgang;
4. Bij de optimaal werkend Δ -luchtbellenschermen (zie ook stap 1) aan alle kolkeinden waterschermen installeren en toepassen. Deze waterschermen worden gevoed via tunnels en pompen uit de HD-voorhaven zonder zoutvang. Eventueel kunnen de waterschermen bij de kolkeinden aan HD-zijde worden vervangen door 1 m hogere drempels die dan ook aan VZM-zijde worden geplaatst. In deze optie is de methode van lekkende ebdeuren niet nodig maar kan wel toegepast worden totdat het maximale watergebruik is bereikt.
5. In plaats van de methode van lekkende ebdeuren en zónder verhoogde drempels en zónder waterschermen: een zoutvang in de HD-voorhaven met tot maximaal zes voldoende grote tunnels langs de drie beroepskolken. Bij voorkeur onder vrij verval, zonder energieverbruik, werkend.
6. Bij de optimaal werkend Δ -luchtbellenschermen waterschermen installeren en toepassen; de waterschermen worden via tunnels en pompen uit de zoutvang gevoed.

6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

6.1 Samenvatting

In de praktijkproef in de Stevinsluis onderzochten we traditionele en innovatieve luchtbellenschermen zowel afzonderlijk als in combinatie met een waterscherf of met een extra 1,2 m hoge drempel en de methode van lekkende ebdeuren. Inclusief invloeden van scheepvaart en van een werkende schutsluis (nivelleren kolken) vonden we goede mogelijkheden om de zoutlek te beperken. De praktijkproef werd ondersteund door inzichten verkregen uit laboratoriumproeven en uit gedetailleerde computerberekeningen. Deze nieuwe informatie werd in de context van eerdere metingen in het laboratorium en in schutsluizen geplaatst.

We onderzochten niet:

- waterschermen aan de zoete zijde;
- extra, verhoogde drempel aan de zoute zijde;
- de methode van lekkende ebdeuren in combinatie met extra 1,2 m hoge drempel;
- de optimale water-lucht mengverhouding bij de combinatie van luchtbellenschermen en waterschermen;
- de werking van een zoutvang.

Het Zoutlekmodel vat een reeks complexe stromingsprocessen samen en berekent de zoutlek onder invloed van genoemde en ook niet onderzochte zoutlekbeperkende middelen en methoden. De grondslag van het Zoutlekmodel en de zoutremmende werking van drempels en schermen zijn uitgebreid getoetst aan genoemde proeven en correct gevonden. Tevens is inzicht verworven in de marges van onzekerheden van de samenstellende componenten van het Zoutlekmodel.

Met het Zoutlekmodel berekenden we voor de Volkeraksluizen de zoutlek en het watergebruik. We streefden naar combinatie van zoutlekbeperkende middelen die leiden tot de gestelde bovengrenzen van 60 kg/s zoutlek en 25 m³/s watergebruik, inclusief 3,2 m³/s schutverliezen. We gingen uit van de prognose van RWS voor de scheepvaart in 2020. Deze prognose leidt tot 20 schutcycli per dag per kolk wat o.i. de maximale capaciteit van de sluisen is. Verder gingen we uit van een Volkerak-Zoommeer met een saliniteitsgehalte van 20 ppt (20 kg/m³). Het gemiddelde peilverschil tussen het Hollandsch Diep en het Volkerak-Zoommeer is gelijk aan de huidige 0,5 m.

We vonden diverse mogelijkheden om onder de gestelde bovengrenzen in zoutlek en watergebruik te blijven. De methode met lekkende ebdeuren lijkt o.i. de goedkoopste methode met de geringste hinder voor scheepvaart. Onze theoretische analyse toont dat een goed ontworpen zoutvang tot de geringste zoutlek zou kunnen leiden. In de praktijkproef onderzochten we niet een zoutvang; de diepe zuidelijke voorhaven van de Stevinsluis biedt wel de mogelijkheid voor dergelijke aanvullend onderzoek. Deze conclusies lichten we hierna toe.

6.2 Conclusies

De resultaten van ons onderzoek kunnen we op diverse wijzen rangschikken. We kiezen hier voor twee ordenende regels, conform onze primaire taakstelling. In de eerste ordening beschouwen we opties waarbij de zoutlek juist aan zijn bovengrens van 60 kg/s voldoet en het watergebruik hooguit 25 m³/s bedraagt (Figuur 6.1). In de tweede ordening nemen we opties die voldoen aan het maximaal toegestane watergebruik van 25 m³/s, inclusief 3,2 m³/s schutverlies, en waarbij de zoutlek het geringst is (Figuur 6.2).

Behoudens wat we uit mondeling overleg leerden, kennen we niet formeel de criteria en hun weging leidende tot de optimale keuze van zoutlekbeperkende middelen en methoden. Wel weten we dat hinder voor scheepvaart zwaar weegt en de mogelijkheden van implementatie (aanlegkosten) en de kosten voor onderhoud en energie van de maatregelen.

Daarnaast speelt ook de garantiestelling dat aan de gestelde bovengrenzen van zoutlek en watergebruik voldaan kan worden, ook wanneer de resultaten tegenvallen b.v. door beschadiging of vervuiling. Hierbij gelden kosten-baten overwegingen van regelmatig onderhoud, met mogelijk buiten gebruikstelling van een kolk, het monitoren van de zoutlek en van het watergebruik en de mogelijkheden voor de beheerder om de zoutlek en het watergebruik aan te passen.

Daarom beschouwen we verhoogde drempels maar met waterdiepte boven de drempel zeker groter dan 4,5 m. Hiermee houden we wel globaal rekening met hinder voor scheepvaart maar nog zonder nadere analyse van de mate van hinder. Hetzelfde geldt voor de kosten: we verwachten dat de aanleg van een zoutvang met waterleidingen of -tunnels de duurste investering zal zijn, gevolgd door waterpompen en waterleidingen voor de waterschermen.

We presenteren geen optimalisaties van verschillende maatregelen per kolk, ook deze hangen samen met voornoemde onbekendheid met de weging van criteria. Een voorbeeld is de keuze voor zwakkere luchtbellenscherm in de jachtensluis met minder hinder voor de recreatievaart. Of voor hogere drempels in alle kolken maar niet in de beroepskolk onder de beweegbare brug voor de hoogste en mogelijk ook diepste scheepvaart.

Als inleiding tot verdere optimalisatie tonen we in paragraaf 6.5 twee voorbeelden waarvan het tweede voorbeeld op voorstel van opdrachtgever is toegevoegd.

Figuur 6.1 biedt een overzicht van de varianten waarmee de zoutlek juist of bijna gelijk is aan de bovengrens van 60 kg/s terwijl het watergebruik onder zijn bovengrens blijft. Alle varianten gaan tenminste uit van optimaal ingestelde en optimaal werkende Δ -luchtbellenschermen met doorlaatfractie van maximaal 0,25. De optimale instelling van de luchtbellenschermen wordt bereikt met continue zoutmetingen waarop een regelsysteem het luchtdebiet van compressoren instelt. Figuur 5.12 geeft o.a. hun energieverbruik. Met deze figuur concluderen we dat het energieverbruik minimaal is bij een verschil in zoutgehalte over de luchtbellenschermen van 10 ppt d.w.z. de helft van het totale verschil in zoutgehalte tussen VZM en HD. In principe kan de sluismeester het schutproces zó sturen dat deze optimale situatie (weer) wordt bereikt.

In combinatie met waterschermen of drempels wordt de doorlaatfractie van deze combinaties verlaagd tot resp. 0,15 en 0,20. Deze verlaging vergt niet méér compressorvermogen voor

het luchtdebiet. Wanneer waterschermen worden ingezet moet hun energieverbruik hierbij wél worden opgeteld, zie Figuur 5.13. Als referentie naar onze proeven hanteren we het maximale watergebruik van 1,6 m³/s van de beide waterpompen voor één kolk tijdens de praktijkproef in de Stevinsluis. Dit debiet vertalen we in o.a. daggemiddelde debieten van ca. 6 m³/s voor waterschermen in de Volkeraksluizen en ca. 500 kW geïnstalleerd pompvermogen.

Uitgaande van Δ-luchtbellenschermen met doorlaatfractie van maximaal 0,25 wordt het gestelde doel bereikt met de methode van lekkende ebdeuren. Hiervoor zijn beperkte aanpassingen nodig voor controle op de positionering van de rinketschuiven en van hun bedieningsprotocol. In verhouding tot het debiet tijdens nivelleren van een kolk is het debiet door de kolken voor de methode van lekkende ebdeuren veel geringer (kierstand 0,11). We verwachten dat de methode van lekkende ebdeuren de scheepvaart niet hindert. Indien gewenst kan gekozen worden voor het toepassen van de methode van lekkende ebdeuren alleen tijdens nivelleren; het momentaan hogere debiet moet en kan hierop worden aangepast met grotere kierstand van de rinketschuiven in de sluisdeuren.

In de tweede variant is er geen extra watergebruik d.w.z. niet méér dan het watergebruik van ca. 3,2 m³/s door schutverliezen. In deze tweede variant moeten de drempels met 1,5 m worden verhoogd d.w.z. in de beroepskolk tot 5 m diepte en moeten de Δ-luchtbellenschermen daarnaast geplaatst worden om hun doorlaatfractie tot 0,20 te verlagen. De 1,5 m hogere drempels beperken de diepgang van de scheepvaart. Incidenteel gebruik van lagere, beweegbare drempels voor uitzonderlijk diepe schepen is mogelijk zonder systematisch de zoutlek en het watergebruik te vergroten.

Een compromis is om de 1,5 m verhoging van de drempels te beperken tot 1,0 m zodat de luchtbellenschermen nog steeds goed worden afgeschermd en hun lagere doorlaatfractie van 0,20 behouden. De drempels in de beroepskolken liggen dan op 5,5 m diepte. Door deze 1,0 m hogere drempels te combineren met de methode van lekkende ebdeuren wordt de 60 kg/s zoutlek bereikt met viermaal geringer watergebruik t.o.v. geen verhoogde drempels.



Figuur 6.1 Overzicht van de belangrijkste varianten voor het beperken van de zoutlek door de Volkeraksluizen tot maximaal 60kg/s met hooguit 25 m³/s watergebruik.

Zonder nadere studie schatten we in dat de eerste optie van Figuur 6.1 de goedkoopste is, gevolgd door de 2^e en 3^e optie. Als geen enkele verontdieping van de kolken wordt toegestaan is de 4^e optie te overwegen, weliswaar tegen aanmerkelijke kosten voor installatie en onderhoud van waterschermen aan alle kolkeinden.

We verrichtten hierna een beperkte analyse voor een te grote zoutlek b.v. door een onderschatting van de zoutlek met 20% en door vervuiling en minder dan optimaal functionerende luchtbellenschermen. De vraag luidt dan welke varianten aangepast kunnen worden om de bovengrens van 60 kg/s zoutlek en 25 m³/s watergebruik te waarborgen.

| | | | | | |
|---|--------------------------------------------|---|----------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------|
| 1 | Alle Kolkeinden: Luchtbellenscherm 0,25 | + | Lekkende Ebdeuren Schuifopening 13 % | = | Zoutlek 52 kg/s Watergebruik 25 m ³ /s |
| 2 | Alle Kolkeinden: Luchtbellenscherm 0,20 | + | Drempeldiepten 4,5m | = | Zoutlek 54 kg/s Watergebruik 3,2 m ³ /s |
| 3 | Alle Kolkeinden: Luchtbellenscherm 0,20 | + | Lek. Ebd. Schuifopening 13% Drempeldiepten 5,5m | = | Zoutlek 29 kg/s Watergebruik 25 m ³ /s |
| 4 | Alle Kolkeinden: Luchtbellenscherm 0,25 | + | Zoutvang en Tunnels Onder vrij verval over 0,5m | = | Zoutlek 0 kg/s Watergebruik 14 m ³ /s |

Figuur 6.2 Overzicht van de belangrijkste varianten voor maximale beperking van de zoutlek door de Volkeraksluizen met hooguit 25 m³/s watergebruik. Genoemde drempeldiepte vanaf NAP en toegepast voor alle kolkeinden van alle beroepssluisen, voor de jachtensluis is dezelfde verhoging toegepast (b.v. 4,25 m in jachtensluis komt overeen met 4,5 m beroepssluisen).

De methode van lekkende ebdeuren (1^e optie) valt bij 20% onderschatte zoutlek af omdat deze dan meer dan de toegestane 25 m³/s watergebruik vergt. Dit concluderen we met Figuur 5.7 voor een zoutlek ingesteld op 50 kg/s welke 20% hoger 60 kg/s zou zijn en dan 27 m³/s watergebruik vergt. De 1^e optie is dus kritisch omdat deze kans maakt onvoldoende te zijn. Tevens is 20 m³/s watergebruik weliswaar kennelijk toelaatbaar in zomerse perioden maar mogelijk niet wenselijk. Bij deze overwegingen speelt mogelijk de invloed van het watergebruik van de Volkeraksluizen op de zg. achterwaartse verzilting via het Spui naar het Haringvliet bij afnemende aanvoer van water uit het Hollandsch Diep door dit watergebruik. Overigens, thans wordt achterwaartse verzilting via het Spui veroorzaakt door stormopzet, zie ook (Kaaij, 2011).

De verhoogde drempels in de 2^e optie met tegenvallend doorlaatfractie van 0,25 (was 0,20) komen op een diepte van 3,7 m (groene lijn in Figuur 5.10) of een diepte van 4,1 m met 20% onderschatte zoutlek (rode lijn in Figuur 5.10 bij 50 kg/s). Deze drempelhoogten kunnen op bezwaren stuiten van hinder van scheepvaart, hoewel beweegbare drempels een uitweg bieden.

De 3^e optie in Figuur 6.1 is relatief goedkoop en biedt van de opties 1 t/m 3 de grootste flexibiliteit om de zoutlek te beperken, zie Figuur 6.2. Onder behoud van nader onderzoek en ontwerp van een zoutvang, biedt de 4^e optie van Figuur 6.2 zowel de laagste zoutlek als de meeste zekerheid, zonder dat het toegestane watergebruik volledig wordt benut.

Onze conclusie luidt dat de methode van lekkende ebdeuren met 1 m hogere drempels redelijke zekerheid maar met beperkte mogelijkheid om te corrigeren tot maximaal 60 kg/s zoutlek binnen 25 m³/s watergebruik. Waarschijnlijk biedt een goed ontworpen zoutvang de geringste zoutlek en de meeste zekerheid. Nader onderzoek is nog nodig naar de afmetingen en de verticale menging uit de zoutvang.

6.3 Aanbevolen Stappenplan

We stellen voor het volgende stappenplan te overwegen. De volgorde in dit stappenplan is onze keuze waarbij met de geringste aanpassingen en/of belemmeringen per stap de grootste reductie in zoutlek en watergebruik wordt bereikt. Deze stappen kunnen worden gekozen om de zoutlek tot onder 60 kg/s verder te verlagen gegeven het maximaal toelaatbare watergebruik.

De aanleg van een zoutvang in de voorhaven(s) van de Volkeraksluizen behelst een majeure inspanning vanwege de aanwezige remmingswerken, de aanleg van meerdere watertunnels naar de voorhaven aan het Volkerak-Zoommeer, grondmechanische stabiliteit en onderhoud zoals baggeren. We vermoeden dat de zoutvang alleen een optie is als een 4^e schutkolk zou worden aangelegd. Verder is dan nader onderzoek nodig naar de afmetingen en naar de verticale menging uit de zoutvang. De diepe zuidelijke voorhaven van de Stevinsluis biedt daartoe goede mogelijkheden.

Ons voorstel voor een stappenplan luidt als volgt:

1. De beste én adaptieve Δ -luchtbellenschermen plaatsen achter of voor de huidige drempels van alle kolken van de Volkeraksluizen. Hierbij rekening houden met een uitbreiding met waterschermen (zie stap 4);
2. Toepassen van de methode van lekkende ebdeuren met verstelbare positie van de rinketschuiven en aangepast bedieningsprotocol;
3. Uitbreiden van de methode van lekkende ebdeuren met 1 m hogere drempels die eventueel instelbaar zijn voor incidentele scheepvaart met grote diepgang en/of een kolk beschikbaar houden voor schepen met grote diepgang;
4. Bij de optimaal werkend Δ -luchtbellenschermen (zie ook stap 1) aan alle kolkeinden waterschermen installeren en toepassen. Deze waterschermen worden gevoed via tunnels en pompen uit de HD-voorhaven zonder zoutvang. Eventueel kunnen de waterschermen bij de kolkeinden aan HD-zijde worden vervangen door 1 m hogere drempels die dan ook aan VZM-zijde worden geplaatst. In deze optie is de methode van lekkende ebdeuren niet nodig maar kan wel toegepast worden totdat het maximale watergebruik is bereikt.
5. In plaats van de methode van lekkende ebdeuren en zónder verhoogde drempels en zónder waterschermen: een zoutvang in de HD-voorhaven met tot maximaal zes voldoende grote tunnels langs de drie beroepskolken. Bij voorkeur onder vrij verval, zonder energieverbruik, werkend.
6. Bij de optimaal werkend Δ -luchtbellenschermen waterschermen installeren en toepassen; de waterschermen worden via tunnels en pompen uit de zoutvang gevoed.

6.4 Aanbevelingen voor verdere optimalisatie, geringere zoutlek en constructie

Ondanks de grote onderzoeksinspanning resteren er vraagpunten voor verdere optimalisatie en nog grotere reductie van zoutlek. Redelijkerwijs konden we in dit project niet voorzien welke varianten constructeurs nog zouden overwegen; bijvoorbeeld de positie van luchtbellenschermen voor of achter of zelfs op drempels. Voor de gewenste beperking in zoutlek overwogen we ook enkele varianten die we niet in de praktijkproef konden uitvoeren en/of die tijdens de praktijkproef en in overleg met de begeleidingsgroep ontstonden.

In deze paragraaf herhalen we dat deel van de aanbevelingen uit (Uittenbogaard & Cornelisse, 2010) die we voor de voorliggende studie ook relevant achten.

1. De optimale locatie van een drempel en drempelhoogte voor minimaal zouttransport door een water- en luchtbellenschermen. Thans weten we wél dat de doorlaatfractie van het Δ -luchtbellenscherm van 0,25 naar 0,20 wordt beperkt door tenminste 1 m hoge drempels maar mogelijk kunnen nog lagere doorlaafracties bereikt worden.

2. De invloed op de zoet-zout uitwisseling van de positie van de water- en luchtbellenschermen ten opzichte van de sluisdeuren, rekening houdend met de verschillende zwaairichtingen van vloed- en ebdeuren en de verschillende afmetingen van de recirculatiezones aan beide zijden van de schermen.

3. De optimale water-lucht mengverhouding voor de beste zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen ondersteund met waterschermen. Onze gedetailleerde berekeningen en metingen duiden dat deze mengverhouding afhankelijk lijkt van het verschil in zoutgehalte over deze schermen. Thans weten we wél dat de doorlaatfractie van het Δ -luchtbellenscherm van 0,25 naar 0,15 wordt beperkt door een waterscherm met een debiet (1,6 m³/s verdeeld over 14 m kolkbreedte met ca. 4,5 m diepte) dat in de Stevinsluis haalbaar was met te huren pompen.

4. Experimenteel en theoretisch onderzoek naar de relatieve bijdragen van zouttransport door luchtbellenscherm. Het verkregen inzicht is nuttig voor overwegingen over de precieze werking en positie van drempels op de zoutlek. Uit ons en eerder onderzoek is het integrale zouttransport via een luchtbellenscherm gemeten maar niet de mate van zouttransport door de teen, de laterale menging hoger in de bellenpluim, de zoutlevering uit het naastliggende recirculatiepatroon etc. zoals kwalitatief geschetst in Figuur 3.6.

5. Experimenteel en theoretisch onderzoek naar de dimensieloze grootheden die de doorlaatfractie van luchtbellenschermen ondersteund met waterschermen beschrijft. Deze kennis wordt belangrijk als waterschermen naast luchtbellenschermen worden overwogen en gedimensioneerd.

6. De Stevinsluis biedt gelegenheid tot onderzoek naar de werking van de huidige of verdiepte meerzijde-voorhaven als zoutvang en het ledigen van de zoutvang naar de zeezijde-voorhaven.

7. We verkenden de invloed van invarende en uitvarende schepen met reëel werkende schroeven op de zout-zoet uitwisseling door geopende sluisdeuren; in de voorliggende studie hanteren we een veilige overschatting voor de zoutlek. De beschikbare registraties in de Stevinsluis van zoutindringing, beroepsscheepvaart door de sluismeesters, eigen

dagboekantekeningen én beelden van 3 webcams die we rond de kolk installeerden vormen voldoende materiaal voor nauwkeuriger analyse.

8. Wij ontwierpen het experimentele Δ -luchtbellenscherm voor instelbaar lage tot zeer grote luchtdebieten in combinatie met de eis van homogene verdeling van het luchtdebiet over de kolkbreedte. Daartoe kon elke diffuser (douchekop) met maximaal zes luchtventielen worden uitgerust, tijdens de praktijkproeven in de Stevinsluis zijn er maximaal twee per diffuser toegepast.

Aan de zoute zijde van de Stevinsluis is het luchtbellenscherm in juni 2010 terug geplaatst en in dec. 2010 definitief verwijderd en geïnspecteerd. Deze duurproef en tussentijdse inspectie van het luchtbellenschermen geven op veel details aanleiding tot een verbeterd ontwerp voor snelle inspectie, geringer onderhoud en grotere robuustheid. Bijvoorbeeld, we installeerden de luchtventielen in PVC houders welke in zoutwater bleken te zwellen en met grote moeite weer zijn los te draaien uit de roestvrijstalen luchtkokers. Onze PVC-houders bestonden uit meerdere onderdelen luchtdicht gemaakt met O-ringen een constructie noodzakelijk om het luchtdebiet te kunnen instellen, bij een vast luchtdebiet kan gekozen worden voor een eenvoudiger uitvoering.

We kozen voor speciale luchtventielen vanwege hun kwaliteit om een constant debiet aan lucht te leveren boven een zekere drempelwaarde in druk (1,0 atm.) én voor een homogene verdeling van het luchtdebiet over de kolkbreedte. Voor een regelbaar luchtdebiet op basis van een optimaal Froude-lucht getal zijn mogelijk andere luchtventielen nodig maar die wél homogeen over de breedte lucht in de kolk injecteren. Inmiddels zijn er luchtventielen die boven 0,05 atmosfeer drukval tussen lucht en water een constant luchtdebiet leveren (mondeling overleg Dr. Ken O'Hara/Flowthrough, 2011) wat de compressordruk en zijn energieverbruik zal verminderen. Deze nieuwe ventielen moeten nog worden getest.

Per houder van luchtventielen monteerden we luchtfilters om de ventielen tegen erosie van stof e.d. te beschermen wat de constructie van de houders moeilijker te onderhouden maakt, terwijl de luchtleverende compressoren ook stof- en olievrij moeten werken en /of een centrale luchtfilter een eenvoudiger oplossing kan zijn. De vraag luidt dus of deze luchtfilters nabij de luchtventielen nodig zijn?

Ten slotte, de roestvrijstalen luchtkokers bleken toch vol water te lopen wat geen schade geeft alleen enige extra opstarttijd vergt om het water via de ventielen uit de kokers te blazen. Voor kortere opstarttijden en dus minder energiegebruik kunnen diverse lucht-water afdichtingen verbeterd worden en/of het aantal demontabele lucht-water scheidingen verminderd worden.

In de volgende paragraaf besluiten we dit rapport met een inleiding tot verdere optimalisatie van zoutlekbeperkende middelen en methoden in de Volkeraksluizen afhankelijk van de nog nader vast te stellen ontwerpcriteria.

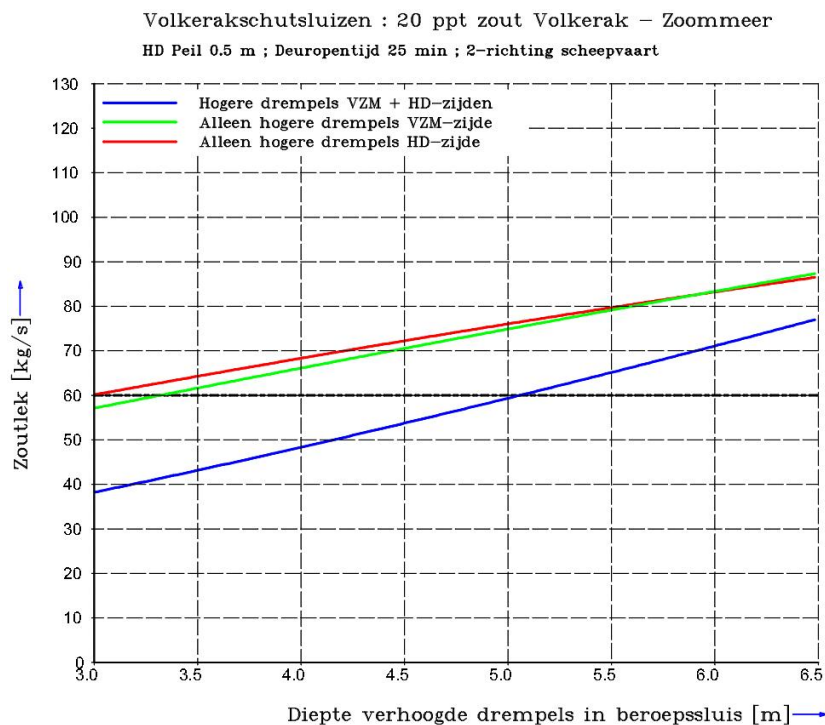
6.5 Voorbeelden van optimalisatie van zoutlekbeperkende middelen

Ter illustratie van de mogelijkheden voor verdergaande optimalisatie presenteren we in deze paragraaf twee voorbeelden. In het eerste voorbeeld (Figuur 6.3) onderzoeken we de rol van

het verhogen van drempels van alle kolken maar hetzij alleen aan VZM-zijde of aan HD-zijde. Langs de horizontale as in Figuur 6.3 staat de drempeldiepte t.o.v. NAP van de verhoogde drempels in de beroepssluizen hoewel die in de jachtensluis met dezelfde verhoging is aangebracht. Figuur 5.10 en 6.3 tonen dat met 1,5 m hogere drempels aan alle kolkeinden, dus in de beroepssluizen bedraagt de drempeldiepte van -5,0 m t.o.v. NAP, de zoutlek 60 kg/s bedraagt. Deze zoutlek neemt met ca. 15 kg/s toe wanneer deze verhoging hetzij alleen aan de VZM-zijde of aan de HD-zijde van alle sluisen wordt toegepast. Hierbij is de doorlaatfractie van het Δ -luchtbellenscherm naast een tenminste 1 m hogere drempel verlaagd naar 0,20.

De totale drempelhoogte in de beroepskolken is dan tenminste 2.5 m en gezien de resultaten van de praktijkproef in de Stevinsluis achten we deze hoogte voldoende voor de reductie van de doorlaatfractie van Δ -luchtbellenschermen van 0,25 tot 0,20. Aan de overige zijden zonder verhoogde drempels blijft de doorlaatfractie 0,25.

De éénzijdige verhoging van de drempels aan HD-zijde (rode lijn in Figuur 6.3) zullen minder hinder voor de scheepvaart geven omdat het peil aan HD-zijde 0,5 m hoger ligt dan van het VZM. Bezien vanuit de situatie met alle drempels verhoogd, komt de toename van de zoutlek door slechts aan één zijde de drempels te verhogen voornamelijk door de verhoging van de doorlaatfractie van 0,20 naar 0,25.



Figuur 6.3 Variatie op Figuur 5.10 met hogere drempels aan alle kolkeinden aan alleen VZM-zijde of alleen hogere drempels aan HD-zijde, met aangepaste doorlaatfracties van 0,20 met hogere drempel, anders 0,25. Getoond wordt de drempeldiepte in de beroepssluis vanaf de oorspronkelijke 6,5 m en dezelfde verhoging is in de jachtensluis toegepast.

Zoals Figuur 5.11 toonde kan de zoutlek verder aanmerkelijk worden verlaagd door een ebdebiet toe te passen volgens de methode van lekkende ebdeuren. Hiermee kan de extra 15 kg/s zoutlek door de éézijdige toepassing van drempels gecompenseerd worden en weer 60 kg/s of lager worden.

Met name kan de verhoging van de drempels in de zogenaamde brugsluis beperkend zijn; de brugsluis is de beroepssluis onder het te openen deel van de verkeersweg over het sluizencomplex. Gegeven de speelruimte in het watergebruik met de methode van lekkende ebdeuren onderzoeken we in Figuur 6.4 of de zoutlek voldoende beperkt blijft als de éézijdige verhoging van de drempels aan HD-zijde niet in de brugsluis wordt toegepast.

Figuur 6.4 geeft deze verdere optimalisatie die we als volgt samenvatten:

- Met uitzondering van de brugsluis (beroepssluis onder de brugdeel snelweg over het sluizencomplex) krijgen alle overige kolken een 1 m hogere drempel aan de HD-zijde d.w.z. 5,5 m drempeldiepte beroepssluisen en 5,25 m in de jachtensluis.
- Alle kolkeinden krijgen optimaal werkende Δ -luchtbellenschermen die naast een 1 m hogere drempel een doorlaatfractie van 0,20 i.p.v. 0,25 bieden. Het resultaat is de blauwe lijn in Figuur 6.4.
- Voor de optie van tegenvallende doorlaatfracties (rode lijn) verhogen we de doorlaatfracties met 0.05.

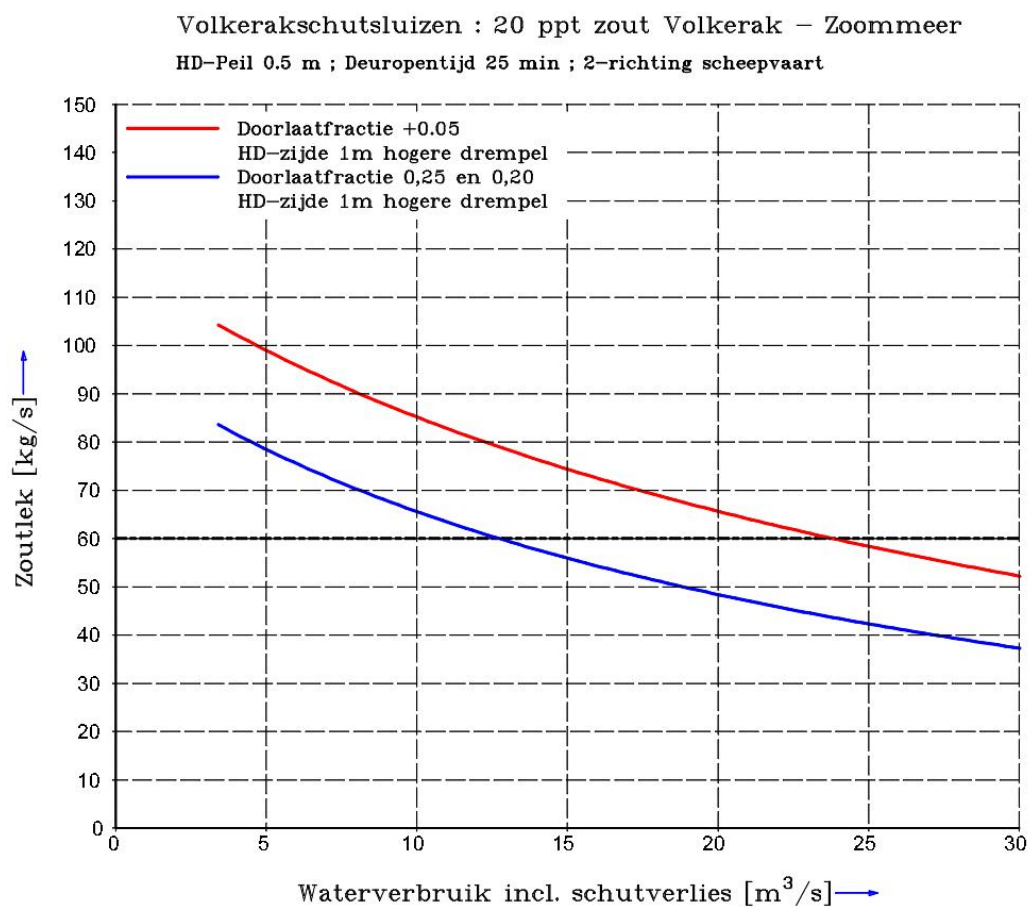
Tabel 6.1 en 6.2 vatten voorgaande instellingen samen en Figuur 6.4 toont de gunstige uitkomsten van deze optimalisatie welke aan de bovengrenzen van zoutlek en watergebruik voldaan ook bij tegenvallende doorlaatfracties.

Tabel 6.1 Overzicht instellingen voor de blauwe lijn in Figuur 6.4 met éézijdige verhoogde drempels aan HD-zijde m.u.v. de brugsluis en met de methode van lekkende ebdeuren.

| Blauwe lijn in Figuur 6.4 | 2 beroepssluisen & 1 jachtensluis VZM-zijde | 2 beroepssluisen & 1 jachtensluis HD-zijde | 1beroepssluis (brugsluis) HD-zijde |
|---------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|
| Verhoging drempel | 0 m | 1 m | 0 m |
| Doorlaatfractie | 0.25 | 0.20 | 0,25 |

Tabel 6.2 Ten opzichte van Tabel 6.1 zijn hier voor eventueel tegenvallende doorlaatfracties de doorlaatfracties met 0,05 verhoogd, zie de rode lijn in Figuur 6.4.

| Rode lijn in Figuur 6.4 | 2 beroepssluisen & 1 jachtensluis VZM-zijde | 2 beroepssluisen & 1 jachtensluis HD-zijde | 1beroepssluis (brugsluis) HD-zijde |
|-------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|
| Verhoging drempel | 0 m | 1 m | 0 m |
| Doorlaatfractie | 0,30 | 0,25 | 0,30 |



Figuur 6.4 De methode van lekkende ebdeuren gecombineerd met 1 m hogere drempels aan HD-zijde maar niet van de brugsluis, ook met tegenvallende doorlaatfracties (+0,05).

7 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.
- Abraham, G. 1972 Theoretische beschouwingen over zoutbestrijding bij schutsluizen door luchtbellengordijnen. *De ingenieur*, jaargang 84, no. 12.
- Bruyn, J. 1963 *Waterschermen ter bestrijding van zoutbezwaar van schutsluizen aan zee; modelonderzoek*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M0799, okt.
- Bulson, P.S. 1961 Currents produced by an air curtain in deep water. *Dock and Harbour Authority*, Vol. 42, No. 487, May 1961, pp. 15-22
- Groeneboom, P. 2010 *Numerical simulation of intrusion of salt water during gate opening of the Stevin lock*. ESI-Group, February.
- Kaaij, Th., v.d. 2011 *Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutlekbeperking Volkeraksluizen ; Scenarioberekeningen verspreiding zoutlek Volkeraksluizen in het Benedenrivierengebied*. Deltares, proj.nr. 1201226-009 (concept-rapport).
- Keetels, G.H. & R.E. Uittenbogaard 2010 *Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen. Deeltaak 1 Numerieke simulatie van uitwisselingsstromingen en van uitwisselingsbeperkende maatregelen*. Deltares, 1201226-001.
- Ligteringen, H. 1973 *Stroomsluis Noordland in de Oosterscheldedam, Selectief afzuigen, Drie-dimensionaal onderzoek, Waterloopkundig Laboratorium M1209, December*
- Mazijk, A. van, 1971 *Reproductie zouttoestand getijrivieren (VIII): invloed luchtbellengordijn op zoutpenetratie*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport nr. M 0896-VIII (juli)
- Mazijk, van, A. 1973 *Stroomsluis Noordland in de Oosterscheldedam, Selectief afzuigen, Twee-dimensionaal onderzoek, Waterloopkundig Laboratorium M1204, Juli 1973*
- Mastbergen, D.R. 2010 *Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen. Deelproject 2 Verkenning effectiviteit zoutlekbeperkende maatregelen op laboratoriumschaal*. Deltares, 1201226-002.
- Milgram, J.H. 1983 Mean flow in round bubble plumes. *J. Fluid Mech.*, vol. 133, pp. 345-376.
- Shin, J.O., S.B. Dalziel & P.F. Linden 2004 Gravity currents produced by lock exchange. *J. Fluid Mech.*, vol. 521, pp. 1-34.
- Roelfzema, A. 1977 *Zoutbestrijding Volkerak schutsluizen; vooronderzoek. Verslag*

modelonderzoek. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M1432, jan.

Uittenbogaard, R.E. 2010 *Vorstudie: Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutbeperking Volkeraksluizen; model voor zoutlekberekeningen*. Deltares 1201226-11.

Uittenbogaard, R.E. & J.M. Cornelisse 2010 *Beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinsluis*. Deltares 1201226-005.

Vrijburcht, A. 1989 *Het vul- en uitwisselingsproces van een schutsluis. Invloed dichtheidsverschillen op de krachten van schepen. Verslag prototypemetingen*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport Q176, deel III, januari.