

# **Vorstudie: Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen**

**Model voor Zoutvrachtberekeningen**

dr.ir. R.E. Uittenbogaard

1201226-011



# **Vorstudie: Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbepierking Volkeraksluizen**

**Model voor Zoutvrachtberekeningen**

dr.ir. R.E. Uittenbogaard

1201226-011



**Titel**

Vorstudie: Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen

**Opdrachtgever**

Rijkswaterstaat Waterdienst

**Project**

1201226-011

**Kenmerk**

1201226-011-ZKS-0002

**Pagina's**

87

**Trefwoorden**

Volkeraksluizen, zoutlek, zoutvrachtmodel, luchtbellenscherm, waterscherm

**Samenvatting**

Het voornemen is om het Volkerak-Zoommeer tot 20 ppt zoutgehalte te verzilten teneinde de bloei van giftige blauwalgen te onderdrukken en daarmee de waterkwaliteit te verbeteren. Wanneer het Volkerak-Zoommeer tot 20 ppt zoutgehalte is verzilt zullen schuttingen met de Volkerak-schutsluizen zout naar het zoetwaterbekken Hollandsch Diep transporteren. Deze zg. zoutvracht, uitgedrukt als daggemiddelde kg zout/s, dient zo veel als mogelijk te worden beperkt o.a. omdat diverse locaties voor inname van landbouw, industrieel water en van drinkwater in open verbinding staan met het Hollandsch Diep. Analyses van transport en menging vanaf de sluizen tot de innamepunten en eisen aan het maximale zoutgehalte leiden tot een maximale daggemiddelde zoutvracht van 60 kg zout/s vanuit het Volkeraksluizencomplex.

Dit rapport presenteert ons model voor de zoutvracht door de Volkeraksluizen en toetst dit model aan veldmetingen in de periode 1969-1980. Met dit zoutvrachtmodel en de prognose van scheepvaart in 2020 worden diverse zoutlekbepervende maatregelen beschouwd waaruit blijkt dat het gestelde maximum van 60 kg zout/s haalbaar is met verhoogde drempels, maximaal 25 m<sup>3</sup>/s verbruik van zoet water voor spuien in en door de kolken en met verbeterde werking van luchtbellenschermen o.a. door de toevoeging van waterschermen.

We bevelen aan deze maatregelen in de Stevinsluis te Den Oever experimenteel te onderzoeken, op details aangevuld met numerieke simulaties en laboratoriumexperimenten en tenslotte de resultaten met het verder getoetste zoutvrachtmodel te vertalen naar de toekomstige werking van de Volkeraksluizen als op het Volkerak-Zoommeer weer zout water wordt toegelaten.

| Versie | Datum     | Auteur                 | Paraaf                  | Review           | Paraaf                         | Goedkeuring     | Paraaf                         |
|--------|-----------|------------------------|-------------------------|------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 1.0    | Jan. 2010 | dr. R.E. Uittenbogaard | <i>b/a</i><br><i>MV</i> | T.H.G. Jongeling | <i>[Handwritten Signature]</i> | T. Schilperoort |                                |
| 2.0    | June 2010 | dr. R.E. Uittenbogaard | <i>b/a</i><br><i>MV</i> | T.H.G. Jongeling | <i>[Handwritten Signature]</i> | T. Schilperoort | <i>[Handwritten Signature]</i> |

**Status**

definitief



## Inhoud

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding en doelstelling</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>De Volkeraksluizen en de scheepvaart</b>                                       | <b>5</b>  |
| 2.1      | De Volkeraksluizen  | 5         |
| 2.2      | Scheepvaart door de Volkeraksluizen   | 6         |
| <b>3</b> | <b>Stromingsprocessen en zoutvracht</b>   | <b>9</b>  |
| 3.1      | Overzicht stadia in schutcyclus en zoutvracht                                     | 9         |
| 3.2      | Zoutvracht door lock-exchange flow  | 12        |
| <b>4</b> | <b>luchtbellenschermen en verbeteringen</b>                                       | <b>15</b> |
| 4.1      | Zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen                                 | 15        |
| 4.2      | Versterken van de zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen               | 19        |
| 4.3      | Voorlopige conclusie zoutlekbeperkende werking luchtbellenschermen                | 23        |
| <b>5</b> | <b>Zoutvrachtmodel</b>  | <b>25</b> |
| 5.1      | Inleiding   | 25        |
| 5.2      | Stadia in schutcyclus en definities   | 26        |
| 5.3      | Toetsing zoutvrachtmodel aan analytische oplossing en inzicht in afhankelijkheden | 29        |
| 5.4      | Toepassing zoutvrachtmodel op Volkeraksluizen: inzicht in afhankelijkheden        | 33        |
| <b>6</b> | <b>Toetsing zoutvrachtmodel aan historische gegevens (1969-1980)</b>              | <b>37</b> |
| 6.1      | Inleiding   | 37        |
| 6.2      | Historische gegevens  | 37        |
| 6.3      | Toetsing zoutvrachtmodel aan zoutvrachten 1969-1980                               | 42        |
| 6.4      | Conclusies  | 44        |
| <b>7</b> | <b>Maatregelen tegen zoutvracht bij verzilting van het VZM</b>                    | <b>45</b> |
| 7.1      | Overwegingen  | 45        |
| 7.1.1    | Voorwaarden zoutvracht en zoetwaterverlies  | 45        |
| 7.1.2    | Waterverplaatsing door scheepvaart in 2020  | 45        |
| 7.1.3    | Open-tijd kolken  | 45        |
| 7.1.4    | Beroepskolk in twee delen   | 46        |
| 7.1.5    | Operationele condities luchtbellenschermen  | 46        |
| 7.1.6    | Zoetwaterinjectie bij luchtbellenscherm achter VZM-sluisdeur                      | 46        |
| 7.1.7    | Zoetwaterinjectie bij luchtbellenscherm achter HD-sluisdeur                       | 47        |
| 7.1.8    | Invloed goed werkend luchtbellenscherm op kolkvulling en stratificatie            | 47        |
| 7.1.9    | Spuidebiet en/of lekkende ebdeuren en zoetwaterinjectie naast schermen            | 48        |
| 7.1.10   | Verhoogde drempels voor sluisdeuren   | 48        |
| 7.1.11   | Ondiepere voorhavens  | 48        |
| 7.1.12   | Het Hollandsch Diep als natuurlijke en tijdelijke zoutvang                        | 49        |
| 7.2      | Onderzoek maatregelen beperking zoutvracht in 2020 bij verzilt Volkerak-Zoommeer  | 49        |
| 7.3      | Maatregelen beoordeeld als variaties op gemeten zoutvracht 1977-1979              | 51        |
| <b>8</b> | <b>Algemene conclusies</b>  | <b>53</b> |
| <b>9</b> | <b>Referenties</b>  | <b>57</b> |

## Bijlage(n)

|   |            |
|---|------------|
| <b>A Luchtdebiet en compressorvermogen luchtbellenscherm</b>              | <b>A-1</b> |
| A.1 Inleiding   | A-1        |
| A.2 Theorie reductie zoutvracht door luchtbellenschermen                  | A-1        |
| <b>B Zoutvrachtmodel</b>  | <b>B-1</b> |
| B.1 Grondslagen van het zoutvrachtmodel                                   | B-1        |
| B.2 Definitie doorlaatfractie van zouttransport door geopende sluisdeuren | B-6        |
| B.3 Stadia in schutcyclus en definities                                   | B-6        |
| B.4 Vergelijkingen en oplosmethode voor de zoutvracht                     | B-9        |
| <b>C Theorie invloed doorlaatfracties op zoutvracht</b>                   | <b>C-1</b> |
| C.1 Inleiding   | C-1        |
| C.2 Theoretische uitgangspunten   | C-1        |
| C.3 De oplossing  | C-3        |
| C.4 Grenswaarden zoutvracht en benaderingen                               | C-5        |



## 1 Inleiding en doelstelling

Het voornemen is om het Volkerak-Zoommeer (afgekort: VZM) tot 20 ppt (*parts per thousand*) zoutgehalte te verzilten teneinde de bloei van de giftige blauwalgen te onderdrukken en daarmee de waterkwaliteit te verbeteren. Wanneer deze maatregel wordt doorgevoerd voeren schuttingen met de schutsluizen van het Volkeraksluizencomplex (Figuur 1.1) zout naar het zoetwaterbekken Hollandsch Diep (afgekort: HD). Deze zg. zoutvracht, uitgedrukt in kg zout/s, dient zo veel als mogelijk te worden beperkt o.a. omdat diverse locaties voor inname van industrieel water en van drinkwater in open verbinding staan met het Hollandsch Diep.

Analyses van transport en menging vanaf de sluizen tot de innamepunten en eisen die aan het maximale zoutgehalte van het ingewonnen water worden gesteld leiden tot een maximale zoutvracht van 60 kg/s vanuit het Volkeraksluizencomplex. Deze en andere eisen zijn overgenomen in (Stuurgroep Zuidwestelijke Delta, 2009) echter referenties naar hun grondslag ontbreken.

De volgende voorwaarden zijn gesteld aan zoutlekbeperkende maatregelen voor het bereiken van deze zoutvracht door de Volkeraksluizen:

- Maximaal 25 m<sup>3</sup>/s zoet water uit het Hollandsch Diep mag worden benut als zoutlekbeperkende maatregel.
- Majeure en ook zeer kostbare ingrepen dienen te worden vermeden zoals een minder zout-transporterende maar meer tijd vergende methode van het vervangen van zout door zoet water in de sluiskolken via pompen, zie Krammersluizen, waardoor ook minder schutcycli per dag verricht kunnen worden.
- Het aantal schutcycli per dag is mogelijk nu al of zal in 2020 maximaal zijn zodat de verwachte toename in scheepslading vooral door grotere schepen met grotere diepgang gerealiseerd moet worden. Er moet dus rekening gehouden worden met dieper stekende schepen zodat de eventuele overdiepte van de sluis niet al te sterk kan worden beperkt zoals met hogere drempels bij de sluisdeuren.

Dit rapport gaat uit van deze 60 kg zout/s bovengrens aan zoutvracht en het gebruik van maximaal 25 m<sup>3</sup>/s zoet water voor de beperking van de zoutvracht en dit rapport overweegt alleen een beperkte verhoging van drempels bij sluisdeuren.

Dit rapport analyseert welke zoutvracht het Volkeraksluizencomplex in de huidige configuratie én operationeel beheer (anno 2009) zonder luchtbellenschermen en zonder spuien van zoet water zal leveren bij de verwachte toename van scheepvaart in 2020. Wij schatten dat in ongewijzigde configuratie maar met de verwachte toename in scheepvaart de zoutvracht door de Volkeraksluizen ca. 480 kg zout/s zal gaan bedragen. Dit laatste getal stemt goed overeen met eerdere schatting van 500 kg zout/s (Jongeling, 2007). Dit rapport dient dus te analyseren welke haalbare maatregelen genomen kunnen worden om deze verwachte zoutvracht van 480 kg zout/s te beperken tot de gestelde bovengrens van 60 kg zout/s.

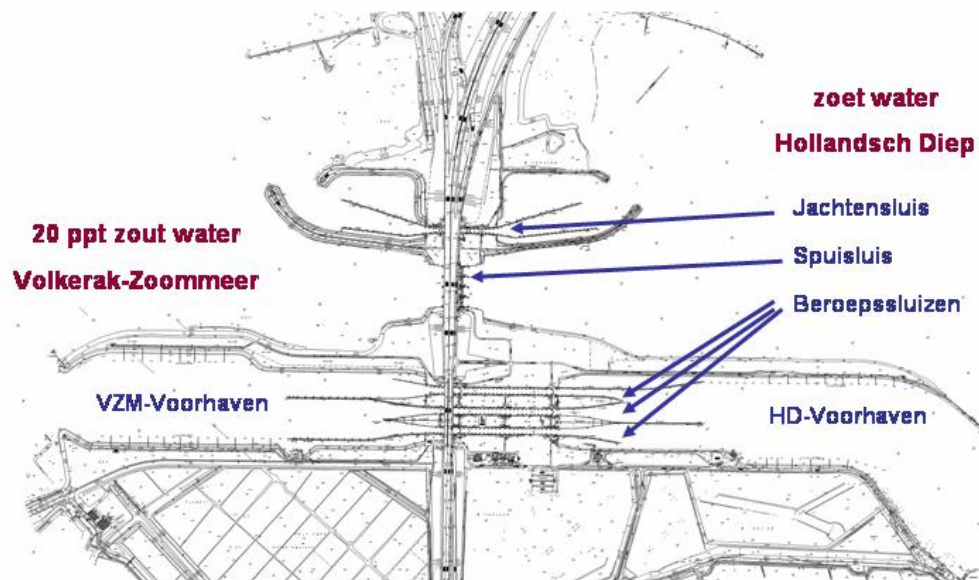
Gelukkig is deze vraag in het verleden ook gesteld nl. toen het VZM dichtbij de Volkeraksluizen ook ca. 20 ppt zout bevatte. Destijds is met grote vaardigheid in veldmetingen en in het operationeel beheer van de Volkeraksluizen met succes de zoutvracht gemeten en aanmerkelijk gereduceerd. Dit rapport analyseert metingen en analyses over de periode 1969-1980 ondanks het ontbreken van rapport(en) over het ontwerp en werking van

de geïnstalleerde luchtbellenschermen en het ontbreken van vooral gedigitaliseerde informatie. Door het toepassen van hierna genoemde maatregelen werd in de periode 1969-1980 de zoutvracht door de Volkeraksluizen van ca. 220 kg zout/s tot ca. 30 kg zout/s beperkt, zie Figuur 2.1.

Eerst werden alleen luchtbellenschermen (ook wel lijnbeluchters of bellengordijnen genoemd) bij de sluisdeuren toegepast en deze luchtbellenschermen reduceerden de zoutvracht met 50%. De zoutlekbeperkende werking van deze luchtbellenschermen is in het verleden uitgebreid onderzocht zowel in het laboratorium als in het veld (Abraham & V.d. Burgh, 1962), (Abraham, 1972) en (Abraham e.a., 1973).

Tevens is in de periode 1969-1980 met zoet water gespuid zoals door gedeeltemeetijk geopende rinketschuiven in de gesloten sluisdeuren, kortweg lekkende ebdeuren genoemd, of via de spuisluis naast de schutsluizen, zie Figuur 1.1. Door het transport van zoet water door de sluiskolken via openingen in gesloten sluisdeuren wordt de indringing van zout in de kolken tegengewerkt en het zoutgehalte in de kolk verlaagd wat het zouttransport naar de zoete voorhavens vermindert.

Door het spuien van zoet water via de spuisluis naast de schutsluizen wordt het zoutgehalte van het water aan de zoute zijde van de sluisen, de zg. voorhavens, beperkt en daarmee ook het zouttransport naar de sluiskolken. Tevens werd door spuien ook een deel van het verzilte water uit het HD naar het VZM terug gevoerd. De toegepaste zoetwaterdebieten bedroegen destijds maximaal 75 m<sup>3</sup>/s.



Figuur 1.1 Volkeraksluizencomplex met drie beroepssluisen en één jachtensluis, allen met zg. voorhavens, en daartussen de spuisluis.

Nadat het VZM voldoende zoet werd zijn de luchtbellenschermen buiten werking gesteld, zijn de compressoren verwijderd en is het spuien van zoet water achterwege gelaten. Dat is de huidige situatie anno 2009 van de Volkeraksluizen welke naar verwachting in 2020 met een 20 ppt zout VZM zal leiden tot een zoutvracht van ca. 480 kg zout/s.

In principe kunnen dezelfde maatregelen die in het verleden zijn genomen weer worden hersteld om de zoutvracht te beperken, zij het dat de beperking in gebruik van zoet water tot maximaal 25 m<sup>3</sup>/s stringenter is dan in het verleden werd toegepast. Deze laatste eis verzwaart het belang van de zoutlekbeperkende werking van de luchtbellenschermen bij de sluisdeuren teneinde de zoutvracht van 480 kg zout/s tot 60 kg zout/s te beperken. Een essentiële vraag luidt dus of dit een haalbare optie is omdat alternatieve en/of aanvullende maatregelen zoals een andere methode van vervangen van zout door zoeter water van de kolken zoals in de Krammersluizen of het verhogen van drempels bij sluisdeuren óf als zeer kostbaar worden geacht óf de verwachte toename van scheepslading door de sluisen per tijdseenheid niet toelaten.

Om de effectiviteit van de maatregelen te kunnen bepalen is een rekenkundig model, kortweg zoutvrachtmodel, ontwikkeld dat de zoutvracht door de Volkeraksluizen voldoende nauwkeurig beschrijft voor diverse combinaties van zoutlekbeperkende maatregelen. Dit rapport presenteert het zoutvrachtmodel en toetst dit model aan metingen en maatregelen die in de periode 1969-1980 in de Volkeraksluizen zijn genomen. Het zoutvrachtmodel wordt besproken in Hoofdstuk 5 en de toetsing in Hoofdstuk 6. In Appendix B wordt de wiskundige basis voor dit zoutvrachtmodel gegeven en Appendix C biedt een analytische oplossing voor een eenvoudige sluis waarmee de oplosmethode van het zoutvrachtmodel kan worden gevalideerd.

Daarnaast is tenminste nodig uitzicht op haalbare verbeteringen van de zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen ten opzichte van wat in het verleden is bereikt. Helaas zijn de ontwerpcondities van de luchtbellenschermen die in 1969 in de Volkeraksluizen zijn geïnstalleerd ons niet bekend en zijn inmiddels alle compressoren en leidingen verwijderd. De ruimte voor de compressoren is wel aanwezig evenals de openingen in de sluiswanden voor de luchtbellenschermen. Over de concrete werking van de luchtbellenschermen destijds is wel persoonlijk overleg gevoerd met medewerkers bij de RWS-Dienst Infrastructuur.

### *Leeswijzer*

In Hoofdstuk 2 presenteren we de kenmerkende afmetingen van de Volkeraksluizen en de veranderingen in belasting door scheepvaart.

In Hoofdstuk 3 beschrijven we de essentiële stromingsprocessen en zouttransport door deze sluisen; de deskundige lezer kan dit hoofdstuk overslaan.

De beperkingen in de maatregelen tot het reduceren van de verwachte zoutvracht door de Volkeraksluizen dwingen ons eerst en vooral de aandacht te richten op het opnieuw inrichten van luchtbellenschermen in de Volkeraksluizen en wel met hogere eisen aan hun zoutlekbeperkende werking. Daarom gaat Hoofdstuk 4 in op de werking van luchtbellenschermen en bespreekt mogelijkheden hun zoutlekbeperkende werking te verbeteren.

Deze mogelijke verbeteringen in de zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen en andere maatregelen leidt tot de formulering van een voldoende flexibel zoutvrachtmodel welke we in Hoofdstuk 5 en Appendix B beschrijven.

In Hoofdstuk 6 toetsen we dit zoutvrachtmodel aan de metingen van de sterk variërende zoutvracht door de Volkeraksluizen in de periode 1969-1980.

Vervolgens schatten we in Hoofdstuk 7 de zoutvracht voor de prognose van scheepvaart en schutcycli door de Volkeraksluizen in 2020. Tevens berekenen we met dit model de zoutvracht voor diverse varianten van luchtbellenschermen en een beperkt debiet aan zoet water.

Hoofdstuk 8 concludeert onze studie en geeft aanbevelingen vnl. voor onderzoek naar de verbeterde zoutlekbeperkende werking van de luchtbellenschermen in de Stevinsluis te Den Oever en het gebruik van diepe geulen in het Hollandsch Diep als natuurlijke en tijdelijke zoutvang.

De wiskundige onderbouwing van het schatten van luchtdebiet en compressorvermogen wordt in de Appendix A gegeven.

### *Dankwoord*

Bij de overwegingen en analyses voor dit rapport heb ik veel steun gekregen van Deltares collega's ir. R. de Jong, ir. T.H.G. Jongeling en drs. I. de Vries maar ook van mijn al lang gepensioneerde WL-collega dr.ir. G. Abraham. Tevens waardeer ik zeer de inbreng van deskundigheid van dr.ir. A. Vrijburcht (Dienst Infrastructuur van RWS), ir. H. van Pagee (Waterdienst) en ir. R. Boeters (Dir. Zeeland) en de genoten gastvrijheid door sluismeesters en ander personeel tijdens werkbezoeken aan de Volkeraksluizen en de Stevinsluis.

## 2 De Volkeraksluizen en de scheepvaart

### 2.1 De Volkeraksluizen

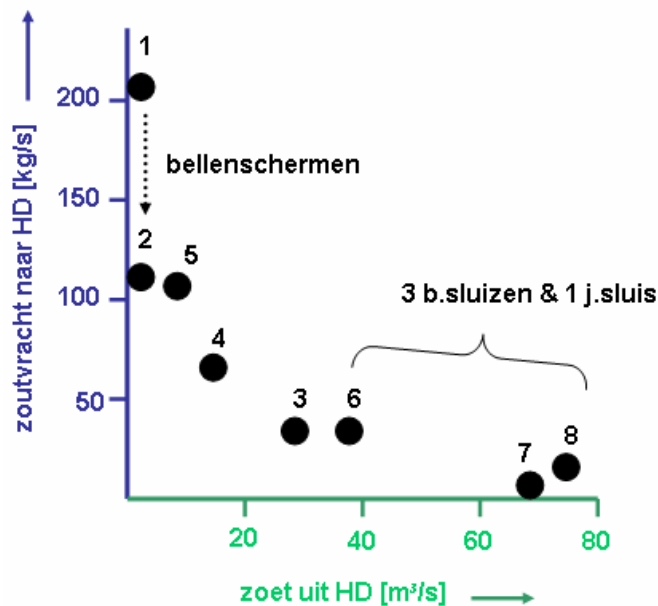
Sinds 28 april 1969 werkt het Volkeraksluizencomplex als scheiding van getij en zoutgehalte tussen het Volkerak en Hollandsch Diep en werden er twee beroepssluizen in werking gesteld. Op 2 november 1970 werd ook het Haringvliet afgesloten en verdween grotendeels het getij aan de noordzijde van de Volkeraksluizen. Door toenemende scheepvaart zijn vanaf januari 1977 drie beroepssluizen van het Volkeraksluizencomplex in werking en vanaf juni 1977 de jachtensluis. Vanaf 2 november 1978 kwam de spuisluis van het Volkeraksluizencomplex in bedrijf, zie Figuur 1.1. Aan Volkerakzijde heerste er aanvankelijk nog het getij (getijslag 2-4m) maar de jaargemiddelde waterstand in het HD was en is tot op heden ca. 0,5m hoger dan aan de Volkerak-zijde.

Elke beroepskolk is 345m lang, 24m breed en 7,5m diep (bij waterstand NAP) met drempels bij elke sluisdeur op 6,5m diepte. Halverwege de beroepskolken zijn ook sluisdeuren geplaatst zodat met een halve kolk lengte kan worden geschut. De mondingen van de 7,5m diepe voorhavens van de beroepssluizen zijn ca. 200m breed. De kolk van de jachtensluis is 154,5m lang, 16m breed, 6,75m diep met drempels op 6,25m diepte.

In de sluisdeuren bevinden zich zg. rinketschuiven bestaande uit vertikaal bewegende schuiven voor het grotendeels nivelleren van de kolk met de waterstand aan de te openen zijde.

Bij alle sluisdeuren werkten destijds luchtbellenschermen die werden gevoed vanuit een centrale compressorruimte gelegen tussen de beroepskolken. Verdere gegevens van de luchtbellenschermen ontbreken, anno 2009 zijn deze verwijderd en is de compressorruimte een lege hal. De persluchtleidingen lijken nog aanwezig te zijn.

Snel na ingebruikname van de Volkeraksluizen bleek de zoutvracht te groot en zijn sinds 2 nov. 1970 luchtbellenschermen bij alle toen aanwezige sluisdeuren in werking gesteld. Sinds juli 1971 is zoetwater via de kolken geloosd en van maart 1977-1979 is er ook gespuid via de spuisluis. In Hoofdstuk 6 gaan we dieper in op de metingen van zoutvracht maar we tonen alvast Figuur 2.1 waaruit blijkt dat de zoutvracht destijds sterk kon worden gereduceerd.



Figuur 2.1 Afname zoutvracht via de Volkeraksluizen naar Hollandsch Diep (HD) in de periode 1969-1980 door luchtbellenschermen en door spuien van zoet water. De getallen bij de punten refereren naar testcases die in Hoofdstuk 6 worden besproken.

## 2.2 Scheepvaart door de Volkeraksluizen

In 1979 waren er per week 230 schutcycli voor de beroepssluizen dus bijna 11 cycli per beroepssluis per dag; in de zomer waren er in de jachtensluis ca. 120 schutcycli per week. In 2007 passeerden per jaar in 2 vaarrichtingen 112.072 beroepsschepen met gemiddeld 2093 ton laadvermogen. De verwachting voor 2020 loopt op tot totaal 113.880 beroepsschepen met gemiddeld 2440 ton laadvermogen. Het aantal schutcycli zal dan ca. 20 per kolk per dag bedragen wat de maximale capaciteit is omdat één schutcyclus ca. 1 uur duurt.

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

Verdere details en referenties worden in Hoofdstuk 6 gegeven. Uit Tabel 2.1 blijkt dat het aantal scheepsbewegingen per kolk afneemt maar het laadvermogen aanzienlijk toeneemt.

Tabel 2.1 Beroepsscheepvaart en lading door de Volkeraksluizen

| Jaar (kolken) | beroepsvaart in<br>2-vaarrichtingen<br>aantal | gemiddeld<br>laadvermogen<br>(ton) | beroepsvaart in<br>1-vaarrichting<br>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 cycli per dag met tweerichtingsverkeer en 2,6 schepen per kolk, volgens (Jongeling, 2007) gebaseerd op RWS prognoses.

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





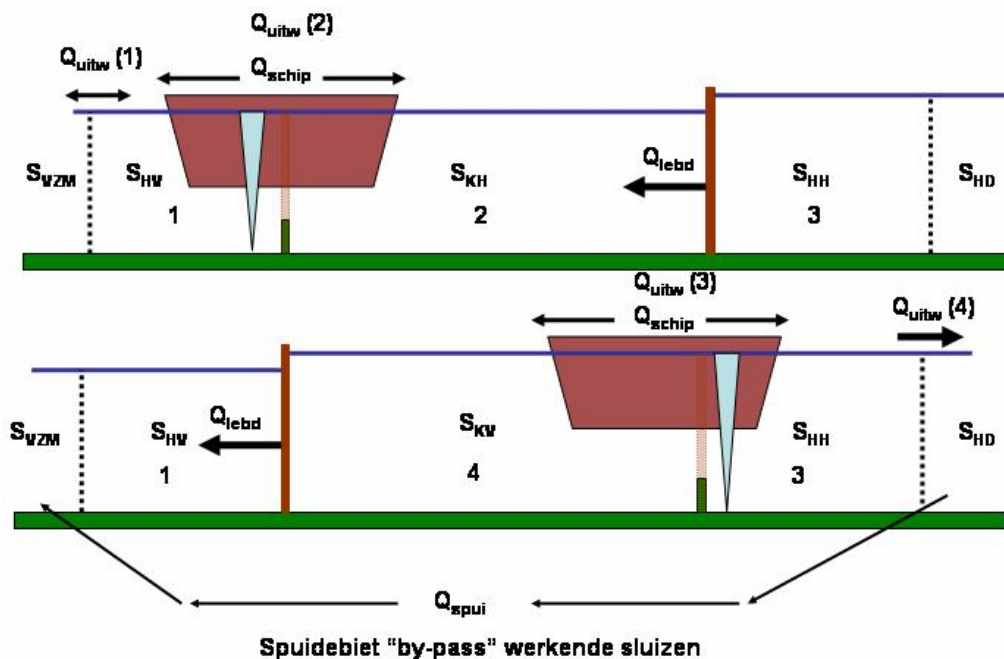
### 3 Stromingsprocessen en zoutvracht

#### 3.1 Overzicht stadia in schutcyclus en zoutvracht

Voordat we in dit hoofdstuk de stromingsprocessen bespreken willen we in dit onderdeel de lezer eerst inzicht bieden in de algemene werking van de Volkeraksluizen, de naamgeving van onderdelen van de sluizen, de schutcyclus en de zoutvracht door de sluizen. Hieruit zal volgen dat kennis over zg. dichtheidsgedreven uitwisselingsstromen de grondslag vormt in het ontwerp van een zoutvrachtmodel dat we in Hoofdstuk 5 en Appendix B presenteren.

##### *Stadia in schutcyclus*

Figuur 3.1 geeft een schematische langdoorsnede door de kolk van een schutsluis, de voorhavens en hun verbindingen met het HD en het VZM. Links in deze figuur bevindt zich het VZM dat voldoende dichtbij de monding van de voorhaven (gestippeld in Figuur 3.1) een zoutgehalte  $S_{VZM}$  [kg/m<sup>3</sup>] heeft. Naar gelang het spuiregime kan dit zoutgehalte al lager zijn dan meer zuidwaarts van het sluisencomplex. In de voorhaven aan VZM-zijde bedraagt het zoutgehalte  $S_{HV}$  waar het eerste subscript slaat op Haven en het tweede op VZM. Analoog is  $S_{HH}$  het zoutgehalte in de voorhaven aan HD-zijde en in het HD dichtbij de monding van de voorhaven definiëren we het zoutgehalte  $S_{HD}$  wat groter dan nul zou kunnen zijn bij grote zoutvracht naar het HD. Voorgaande zoutgehalten in VZM en HD en voorhavens nemen we aan als constant d.w.z. onafhankelijk van de stadia in de schutcyclus. De reden is dat het volume van de voorhavens vele malen groter is dan van de sluiskolken en variaties in zoutlevering vanuit de kolken naar de voorhavens hooguit gedempt merkbaar zullen zijn.



Figuur 3.1 Opdeling voorhavens en kolken in Volkeraksluizencomplex met in- en uitgaande scheepvaart en definitie van zoutgehalten en debieten. Het aangegeven spuidebiet wordt via de spuilsuis vanuit het HD voor de monding van de VZM-voorhaven geleid.

Het bovenste deel van Figuur 3.1 geeft het stadium van de schutting naar het VZM op het moment dat de relevante sluisdeuren worden geopend. Onder de sluisdeuren bevindt zich een drempel (groene verticale balken in Figuur 3.1), het gedeelte tussen de sluisdeuren wordt sluiscolk of colk genoemd. De Volkeraksluizen bevatten nog sluisdeuren halverwege de kolken (niet getekend) zodat een halve colk kan worden gebruikt bij gering scheepvaartverkeer.

### *Zoutvracht door nivelleringsdebiet*

Gemiddeld is de waterstand in het HD ca. 0,5m hoger dan in het VZM en dit verschil in waterstand over de sluisen moet worden genivelleerd met de zijde waarnaar de colk geopend zal worden. Dit volume water wordt ook wel de schuttschijf genoemd. In de Volkeraksluizen vindt dit nivelleren plaats door het openen van zg. rinketschuiven in de sluisdeuren. Het benodigde debiet noemen we nivelleringsdebiet en dit is gelijk aan het product van het colkoppervlak met het verschil in waterstand (de zg. schuttschijf) en het aantal schutcycli per tijdseenheid. Door de hogere waterstand in het HD wordt met het nivelleringsdebiet zoet water via de kolken naar het VZM getransporteerd. Echter onderweg wordt dit zoete water met zouter water gemengd waardoor het nivelleringsdebiet zorgt voor een retour-zouttransport naar het VZM.

### *Zoutvracht door dichtheidsgedreven uitwisselingsstromen bij sluisdeuren*

Bij geopende deuren en met verschillen in zoutgehalte tussen colk en voorhaven treden zg. dichtheidsgedreven uitwisselingsstromen op die in onderdeel 3.2 worden uitgelegd. Met uitwisselingsstromen bedoelen we een uitwisseling van water tussen colk en voorhaven zonder dat er netto water wordt verplaatst i.t.t. het nivelleringsdebiet. De uitwisselingsstromen transporteren zout vanuit de VZM-voorhaven via de kolken naar de HD-voorhaven. Maatgevend voor dit zouttransport zijn het verschil in zoutgehalte tussen voorhaven en colk op het moment van opening, de colkbreedte en de diepte van de drempel bij de sluisdeuren en het aantal schutcycli per tijdseenheid.

De tijd dat de sluisdeuren geopend zijn, kortweg open-tijd genoemd, voor in- en uitgaand scheepvaart kan zo kort zijn dat de sluiting van de deuren de dichtheidsgedreven uitwisselingsstromen afbreekt voordat het colkwater volledig is vervangen door het water in de relevante voorhaven. Echter, een restant van ca. 20%, kan als dunne toplaag of onderlaag achterblijven en dit restant blijkt zeer traag tussen voorhaven en colk uit te wisselen. Uiteraard heeft de open-tijd een ondergrens door veilige passage en het afmeren van in- en uitgaande schepen. Uit mondeling overleg blijkt dat tijdens slecht zicht (mist, regen) tot éénrichtingsverkeer door een colk wordt besloten om nabije passage van schepen te vermijden.

### *Zoutvracht door uitwisselingsstromen van scheepvaart*

Door de geopende sluisdeuren varen schepen in en uit, hoewel bij gering scheepsaanbod of slecht zicht éénrichtingsverkeer kan worden overwogen (zie boven). De waterverplaatsing van de schepen draagt waarschijnlijk bij aan het uitwisselingsdebiet: een uitvarend schip trekt water uit de voorhaven de colk in, omgekeerd verdringt een invarend schip water uit de colk. Deze uitwisseling van water tussen voorhavens en colk draagt dan bij aan het zouttransport.

Overigens de wijze van opstarten en stoppen van de schepen in de colk, waarbij door hun krachtige schroefwerking water wordt verplaatst, gemengd en golven ontstaan en water wordt meegenomen in het kielzog, heeft waarschijnlijk invloed op het uitwisselingsdebiet.

### *Zoutvracht door dichtheidsgedreven uitwisselingsstromen bij de mondingen van de voorhavens*

De mondingen van de voorhavens aan VZM- en HD-zijde (stippellijnen in Figuur 3.1) vatten we ook op als overgangen in zoutgehalte want hierdoor treden ook dichtheidsgedreven uitwisselingsstromen op met nog een geringe bijdrage aan de uitwisseling door de waterverplaatsing van scheepvaart.

### *Reductie zoutvracht door verhoogde drempels*

De dichtheidsgedreven uitwisselingsstroom en de daarmee verbonden zoutvracht neemt af bij het verhogen van de drempels bij de sluisdeuren. De huidige drempeldiepte is destijds bepaald door de diepgang van de schepen met een veiligheidsmarge en door de getijslag (2-4m) zodat ook tijdens eb kan worden geschut. In de huidige situatie is er nauwelijks sprake van getij in het VZM. Met een verzilt VZM wordt een getijslag van 30-50 cm voorzien maar nog steeds aanmerkelijk geringer dan ten tijde van het ontwerp van de Volkeraksluizen. Kortom, een verhoging van de drempels voor de kolken is mogelijk hoewel dit begrensd wordt door de te verwachten grotere diepgang van de schepen teneinde meer lading door de sluisen te vervoeren, zie ook onderdeel 2.2 en Tabel 2.1. Het criterium voor de Schelde - Rijn verbinding is max. 4,5m diepgang.

### *Reductie zoutvracht door luchtbellenschermen*

In het verleden werkten bij de geopende sluisdeuren zg. luchtbellenschermen (blauwe driehoeken in Figuur 3.1) over de breedte van een kolk. De opstijgende bellen nemen omgevingswater mee en ondanks hun mengende eigenschap blijken luchtbellenschermen effectieve scheidingsmiddelen van zoet en zout water te zijn. We noemen dit de zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen. In Hoofdstuk 4 leggen we de zoutlekbeperkende werking van de luchtbellenschermen uit.

### *Reductie zoutvracht door spuien van zoet water via de kolken*

Een effectieve methode voor het beperken van het zouttransport door de sluisen is het spuien van zoet water via de kolken door gedeeltelijk geopende rinketschuiven in de gesloten sluisdeuren. Het daggemiddelde debiet  $Q_{\text{lebd}}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] vormt het te beperken verlies van zoet water uit het HD. Door menging van dit debiet aan zoet water met het zoutere kolkwater zal dit debiet zout terugvoeren naar het VZM, het zoutgehalte van kolkwater verlagen en daarmee de zoutvracht reduceren. De effectiviteit van deze maatregel neemt toe met de sterkte van de menging van de waterstraal uit de rinketschuiven.

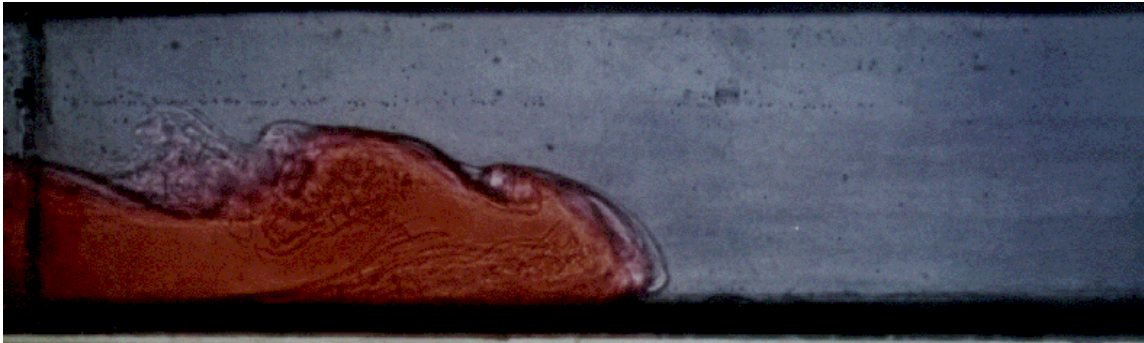
### *Reductie zoutvracht door spuien van zoet water via de spuisluis*

Een andere methode is het spuien van zoet water via de spuisluis (Figuur 1.1) wat na menging het zoutgehalte voor de monding van en in de VZM-voorhaven verlaagt en daarmee de aandrijving van de dichtheidsgedreven uitwisselingsstroom naar de voorhaven en dus het zouttransport verkleint.

Analyse van de debieten door nivelleren, scheepvaart en dichtheidsgedreven uitwisseling toont dat de laatste domineert maar kleiner wordt door zoutlekbeperkende maatregelen, door de te verwachten toename in het aantal schutcycli én de waterverplaatsing van schepen. In het volgende onderdeel beschrijven we eerst de dichtheidsgedreven uitwisseling.

### 3.2 Zoutvracht door lock-exchange flow

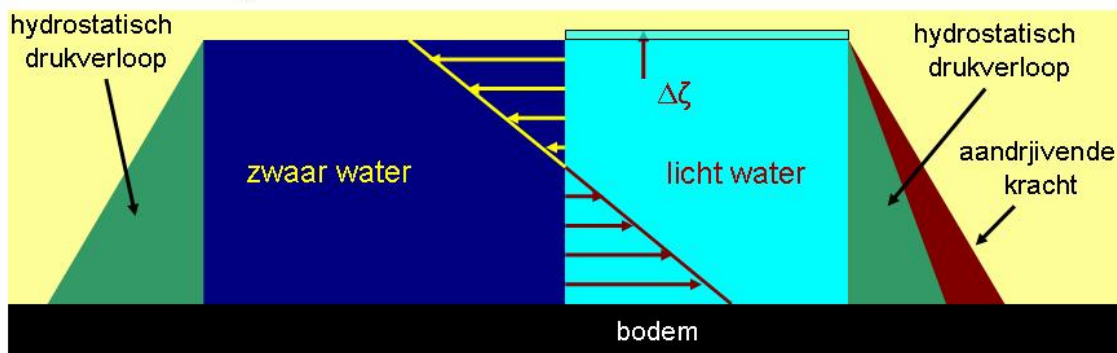
Wanneer aan weerszijden van een gesloten sluisdeur er sprake is van een verschil in zoutgehalte en daarmee een verschil in specifieke dichtheid ( $\text{kg/m}^3$ ) heerst en vervolgens de sluisdeur wordt geopend ontstaat er een zg. dichtheidsgedreven uitwisselingsstroming zoals in onderstaand Figuur 3.2 weergegeven.



Figuur 3.2 Voortplanting van de (rode) zouttong naar rechts over een bodem, niet zichtbaar is de retourstroming van lichter water naar links en boven de zouttong.

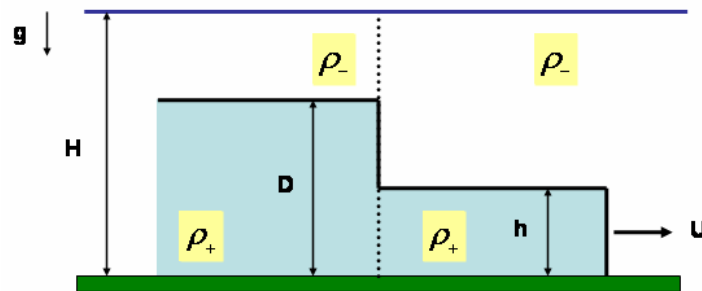
Dit verschijnsel wordt in Engelstalig literatuur *lock-exchange flow* genoemd en is een veel bestudeerd en goed begrepen stromingsverschijnsel, zie bv. (Benjamin, 1968), (Turner, 1973); de Nederlandstalige term is dichtheidsgedreven uitwisselingsstroming. Hierbij ontstaat een zg. zouttong die de kolk instroomt wanneer de voorhaven zouter is of de kolk uitstroomt als de voorhaven zoeter is. De aandrijvende kracht is het gewicht van water dat toeneemt met hoger zoutgehalte. Bij een *lock-exchange flow* is er nauwelijks sprake van een verschil in waterstand: het stromingsverschijnsel wordt gedomineerd door verschillen in gewicht van water met verschillen in zoutgehalte. Er is wel een kleine waterstandsverhoging ( $\Delta\zeta$  in Figuur 3.3) aan de zoetere zijde nodig als balans tegen de zwaardere waterkolom aan de zoutere zijde.

Verskil in hydrostatische druk door dichtheidsverschil:



Figuur 3.3 Links in het zwaarder wegend (zout) water neemt de waterdruk (groene driehoek) sneller toe dan rechts in het lichtere (zoet) water. Voor evenwicht is rechts een geringe waterstandverhoging nodig. Het verschil tussen de waterdrukken (bruine driehoek) geeft een hogere kracht bij de bodem dan aan het oppervlak welke de geschetste uitwisselingsstroming (pijlen) aandrijft.

Bij de bodem is de waterdruk van stilstaand water, hydrostatische druk genoemd, aan de zoute zijde groter dan aan de zoete zijde en dit drukverschil versnelt water bij de bodem waardoor een stroming ontstaat die zout meeneemt welke de zouttong wordt genoemd (rode massa in Figuur 3.2). De kracht door het drukverschil geeft niet voortdurend versnelling van de zouttong immers deze wordt voortdurend gevoed met watermassa dat versneld moet worden. Er ontstaat een evenwichtssnelheid die nauwkeurig bekend is en experimenteel is getoetst.



Figuur 3.4 Schematische variant op de lock-exchange flow (Shin, 2004) nu met een dunnere waterlaag over diepte  $D$  i.p.v. de waterdiepte  $H$  welke een dunnere zouttong met dikte  $h$  ( $h=0,5D$ ) geeft; het blauwe deel geeft schematisch het zwaardere water met dichtheid  $\rho_+$  t.o.v. lichter water met dichtheid  $\rho_-$ .

Figuur 3.4 geeft de schematische situatie weer waarbij in waterdiepte  $H$  een laag zwaardere water met hoogte  $D$  uitstroomt als een zouttong met hoogte  $h$  en constante snelheid  $U$ . De situatie  $D < H$  kan optreden wanneer bij de start van de dichtheidsstroming er nog een laag lichter water drijft op het zwaardere water als gevolg van eerdere schutcycli of vulling van de kolk of stratificatie voor de monding van de VZM-voorhaven.



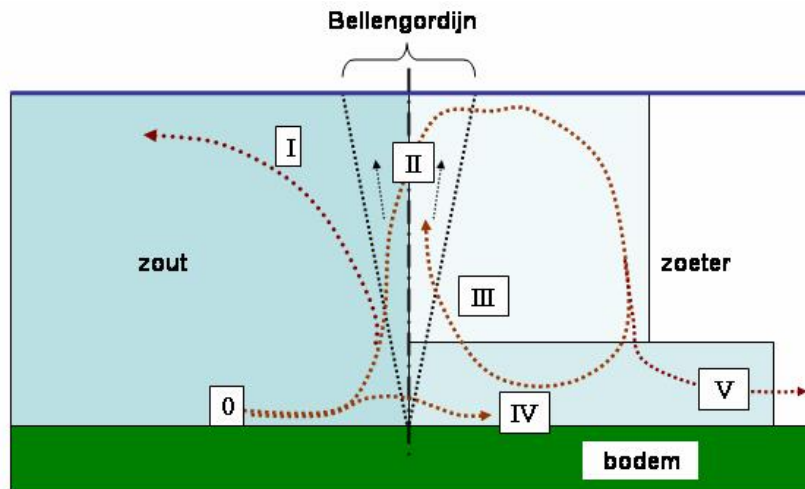
## 4 luchtbellenschermen en verbeteringen

### 4.1 Zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen

Een luchtbellenscherm wordt gevormd door, vanuit een leiding over de breedte van de kolk en vanaf de kolkbodem, kleine luchtbellens zo gelijkmatig mogelijk verdeeld in het water te blazen. Door de introductie van lucht in de vorm van bellens wordt effectief een opdrijven waterstraal gecreëerd die over ca. 75% van de waterdiepte veel omgevingswater meesleurt (Engels: *entrainment*). Over voldoende grote reisafstand benaderen de opstijgende bellens hun evenwichtsgrootte en eindsnelheid van ca. 0,25-0,3 m/s t.o.v. het omringende water. Over ca. 25% van de waterdiepte stroomt het meegesleurd water zijdelings af en vormt een beperkte recirculatiezone waarin het water weer bij de teen van het luchtbellenscherm wordt mee gesleurd. Deze eigenschappen zijn uitvoerig en voor kolken geldende waterdiepten gemeten (Bulson, 1961).

De luchtbellens blijven in een verticale en licht divergerende bundel of straal waarin de gemiddelde dichtheid van het lucht-water mengsel geringer is dan van het omgevingswater vergelijkbaar met de werking van stralen van lichter (warmer, zoeter) water. In stralen van lichter water neemt de dichtheid door menging snel toe en verliest de waterstraal zijn aandrijvende werking en wordt een zg. pluim. Daarentegen zorgen de opstijgende luchtbellens in een luchtbellenscherm voor een niet afnemende aandrijving. De luchtbellens nemen in hun kielzog water met zich mee waarbij het verschil in stijgsnelheid van de bellens en omringend water voortdurend als aandrijvende kracht blijft bestaan. Tevens expanderen de luchtbellens terwijl ze opstijgen wat een grotere verlaging van de dichtheid van het lucht-water mengsel in het luchtbellenscherm levert. Deze laatste twee mechanismen zorgen voor een niet-afnemende en eerder toenemende aandrijvende kracht bij grotere hoogte boven de bodem waardoor luchtbellenschermen effectieve transporteurs van water zijn. Luchtbellenschermen worden nog effectiever bij toenemende waterdiepte door de toenemende hoeveelheid meegesleurd water (m<sup>3</sup>/s) over 75% van de waterdiepte. Het begrip effectiviteit dient wel nauwkeuriger te worden gedefinieerd immers voor een constant uittredend luchtdebiet bij grotere waterdiepte is een hogere luchtdruk en dus ook meer compressorvermogen nodig.

Een onlosmakelijke eigenschap van een luchtbellenscherm is dat deze niet alleen het omringende water een verticale impuls geeft maar ook water uit beide zijden in het scherm mengt. Het is deze laatste inherente eigenschap die *a priori* luchtbellenschermen niet de zoutlekbeperkende werking geeft ! Het zijn de circulatiepatronen in het verticale vlak ter weerszijden van het luchtbellenscherm dat aanstromend zouter water terug naar de zoute zijde van het scherm stuurt en aan de zoete zijde het doorgemengde zoute water in een circulatiepatroon "vangt". Dat laatste circulatiepatroon is lek d.w.z. er treedt menging op zodat daaruit zout water verder de zoete zijde in dringt, zij het trager dan zonder luchtbellenscherm. Figuur 4.1 en de toelichting presenteert de complexe hydrodynamische processen die er voor zorgen dat een luchtbellenscherm de vorming van een zouttong vertraagt. Meteen vermelden we dat de vertragende werking van een luchtbellenscherm dus tijdelijk effectief zal zijn immers uiteindelijk wordt de kolk gevuld met zouter water, zij het trager dan zonder luchtbellenscherm.



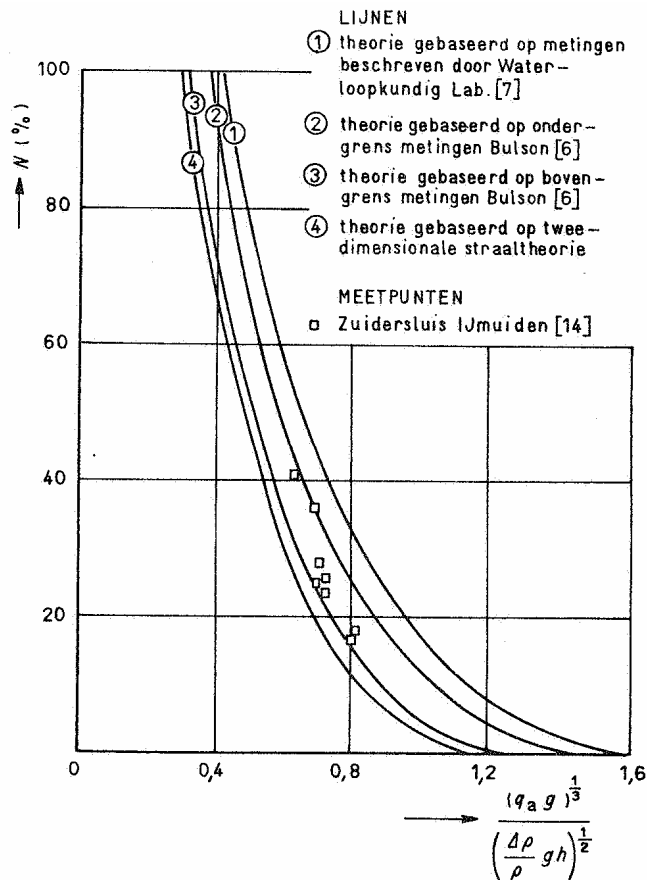
Figuur 4.1 Zoutlekbepurende werking luchtbellenscherm op zout-zoet overgang (geopende sluisdeur) in verticale langsdoorsnede van een kolk. (0) Aanstromend zout aangedreven door baroclien drukverschil, zie ook Figuur 3.4. (I) Opwaarts transport van zout en loslating naar de zoute zijde. (II) Menging van zout in zoeter water in het luchtbellenscherm en gedeeltelijk transport van zout naar de zoetere zijde. (III) Recirculatie van inkomend zout en aangedreven door het luchtbellenscherm. (IV) Binnendringen van zout aan de teen van het luchtbellenscherm. (V) De vorming van een zwakkere lock-echange flow met gereduceerde voeding van zout.

Experimenten in sluisen bij IJmuiden, ondersteund met semi-empirische theorie (Abraham & V.d. Burgh, 1962), tonen aan dat op voorgaande wijze de zoutvracht van een zouttong tot minimaal 20% van zijn oorspronkelijke grootte beperkt kan worden, zie Figuur 4.2. Hiervoor zijn aanmerkelijke hoeveelheden lucht nodig die worden uitgedrukt per eenheid van kolkbreedte d.w.z. als specifiek luchtdebiet  $q_l$  ( $\text{Nm}^2/\text{s}$ ) waarbij N refereert naar de atmosferische omstandigheden waaronder lucht door een compressor wordt ingezogen.

Uit theorie (Abraham & V.d. burgh, 1962) blijkt de verhouding tussen de verticale snelheid van het meegesleurde water en de horizontale snelheid van de zouttong maatgevend te zijn voor de scheidende werking van een luchtbellenscherm. Dit verhoudingsgetal noemen we het Froude-lucht getal  $Fr_l$ , zie appendix A voor de wiskundige definities.

Langs de horizontale as in Figuur 4.2 is het Froude-lucht getal uitgezet en verticaal de fractie van het zouttransport zonder luchtbellenscherm dat mét een luchtbellenscherm nog wordt doorgelaten. We zullen dit verhoudingsgetal de *doorlaatfractie* noemen om geen misverstand op te roepen met begrippen zoals reductiefactor. Merk op dat een verdubbeling van het Froude-lucht getal een achtvoudige verhoging van het luchtdebiet vergt.





Figuur 4.2 Langs verticale as de doorlaatfractie afhankelijk van het Froude-lucht getal langs horizontale as; meetpunten voor een 7,5m diepe sluis te Ijmuiden (Abraham & V.d. Burgh, 1962).

Figuur 4.2 toont dat de doorlaatfractie zelfs minder dan 20% kan bedragen. Echter, uit de praktijk komen mondeling vermoedens, zonder concrete meetgegevens, dat een doorlaatfractie van 20% te optimistisch is en dat veelal 50% wordt bereikt, zie ook Figuur 2.1.

De mogelijke oorzaken voor dit verschil in zoutlekbepurende werking lijken te zijn: onderhoud en vervuiling van de gatenpatronen in de leidingen op de kolkbodem maar ook de realisatie van het oorspronkelijk correct werkende prototype of ontwerp. Met dit laatste doelen we op visuele waarnemingen die suggereren dat de luchtbellenscherms onvoldoende gelijkmatig over de breedte van de kolk verdeeld worden en dat er soms grote luchtbellenscherms aan het oppervlak komen. Hierdoor ontstaan "gaten" bij de teen van het luchtbellenscherms waardoor zout water aangedreven door de verschillende gewichten van zoet/zout water redelijk ongehinderd naar de zoetere zijde kan stromen, zie mechanisme IV in Figuur 4.1.

Moderne technieken met luchtdebiet-regulerende ventielen en luchtverdelers/diffusers garanderen wél een constante uitstroming van lucht met nauwkeuriger beheerste initiële belgrootte en met gelijkmatige verdeling van het luchtdebiet over de breedte. Verder geven nieuwere materialen (metaallegeringen en kunststoffen) minder vervuiling hoewel regelmatige inspectie en onderhoud een serieus aandachtspunt zal blijven.

Om deze reden houden we voorsnog vast aan de experimentele waarnemingen dat goedwerkende luchtbellenscherms in staat kunnen zijn het zouttransport van een onbelemmerde *lock-exchange flow* tot 25% van de oorspronkelijke waarde te verkleinen terwijl de gemeten

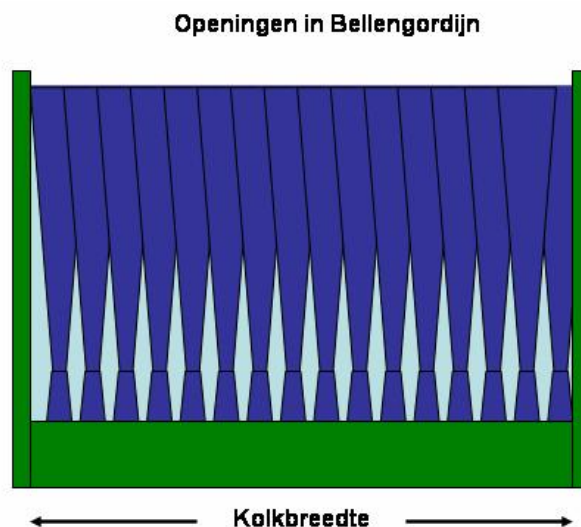
ondergrens minder dan 20% is, zie Figuur 4.2. Uiteraard dient nader experimenteel (veld-) onderzoek deze nog redelijke ondergrens (25%) t.o.v. de uiterste ondergrens (minder dan 20%) opnieuw te bevestigen op basis van een robuust en weinig onderhoud en energie vergend ontwerp geschikt voor de druk bezette Volkeraksluizen.

Ook al zou het luchtbellenscherm correct gerealiseerd worden dan nog blijft de teen van het luchtbellenscherm een punt van sterke lekkage van zouter water naar de zoete zijde, mechanisme (IV) in Figuur 4.1. We noemen de volgende oorzaken. Het zal moeilijk blijven om de verdeling van luchtbellen bij de teen van het luchtbellenscherm zo gelijkmatig te houden dat er geen openingen vallen, zie Figuur 4.3. Een stromingseigenschap van parallel gerichte stralen die elkaar kunnen overlappen is hun voorkeur om te groeperen tot een geringer aantal stralen. Daarnaast is het een stromingseigenschap van luchtbellenpluimen dat deze eerst een contractie (in dikte of diameter) ondergaan door het versnellen van de bellen in het aangezogen water, zie Figuur 4.3, en pas daarna licht divergerend worden.

Tenslotte, de aandrijvende werking van de bellen voor het meesleuren van water begint bij de teen van een luchtbellenscherm waar het aangezogen water nog geen verticale impuls bezit en daarom sneller horizontaal kan worden verdrongen onder een verschil in hydrostatische druk, zie Figuur 3.3. Pas hoger in de waterkolom verkrijgt het meegesleurde water een aanmerkelijke verticale snelheid voornamelijk door het aangroeien van het meegesleurde waterdebiet. Merk op dat de belsnelheid altijd opgeteld wordt bij de verticale watersnelheid omdat de luchtbellen altijd willen opdrijven.

Hoger in de waterkolom wordt het luchtbellenscherm een krachtiger barrière tegen de druk van het zoutere water, zie Figuur 3.3, omdat meegesleurd water met de toegenomen verticale snelheid trager van baan verandert onder de horizontale krachten (bruine driehoek in Figuur 3.3).

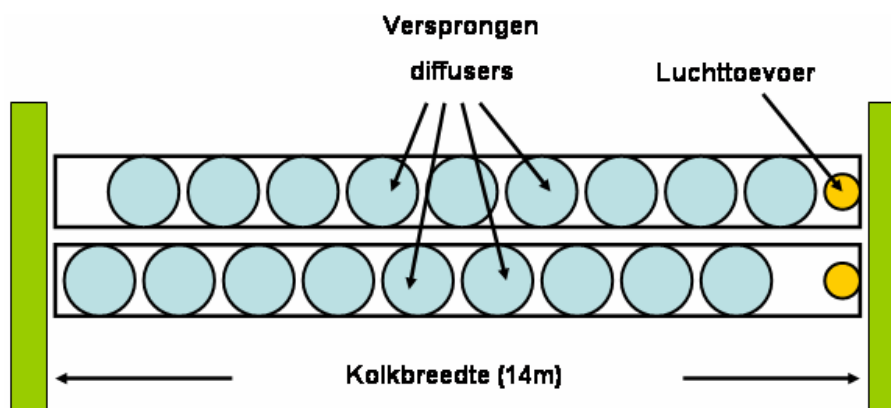
Het volgende onderdeel bespreekt de mogelijke vermindering van de lekkage van zout bij de teen van het luchtbellenscherm (mechanisme IV) en ook van minder menging van zout door het luchtbellenscherm heen (mechanisme II).



Figuur 4.3 Openingen bij de teen van het luchtbellenscherm o.a. door contractie van luchtbellenpluimen, zie Figuur 4.4, waardoor zout water ongehinderd naar de zoetere zijde kan stromen.



Figuur 4.4 Contractie in de verdeling van lucht van een bellenpluim (met dank aan Ken O'Hara/Flowthrough).



Figuur 4.5 Bedekken van eventuele openingen in bellengordijn door contractie pluim, zie Figuur 4.3, door versprongen rijen luchtverdelers/diffusers, zie Figuur 4.4.

## 4.2 Versterken van de zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen

Het vorige onderdeel 4.1 besprak dat in het verleden mogelijk luchtbellenschermen door ontwerp, vervuiling en beschadiging door o.a. scheepvaart onvoldoende goed de dwarsdoorsnede van een kolk bedekten. Hierdoor ontstonden openingen die zouter water naar de zoetere zijde doorlaten.

In dit onderdeel noemen we mogelijke verbeteringen in het luchtbellenscherm om de door ons gestelde grenswaarde van 25% van het ongeremde zouttransport (zonder

luchtbellenscherm) te bereiken d.w.z. een doorlaatfractie van 25% zijnde een reductie van 75%.

### Betere ruimtelijke verdeling luchtinjectie

Door een meervoudige en verspringende rij van gatenpatronen en/of diffusers (Figuur 4.4) kunnen de openingen zoals geschetst in Figuur 4.3 beter tegen het doordringen van zout water worden beschermd.

### Drempel voor de teen van een luchtbellenscherm.

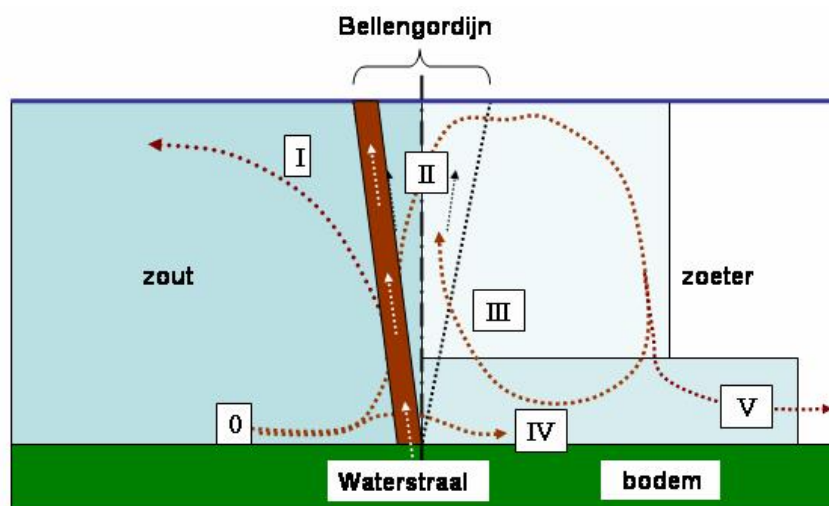
Stroming door de teen van een luchtbellenscherm (mechanisme IV, Figuur 4.1) kan worden verhinderd door een voldoende hoge drempel aan de zoute zijde en dichtbij de luchtinjectie te plaatsen. Uiteraard is het wenselijk dat deze drempel niet hoger ligt dan de drempel voor de sluisdeur. Mogelijk kan het luchtbellenscherm ook dicht voor óf achter de drempel van de sluisdeur worden geplaatst, eventueel in combinatie met een verhoogde drempel. De werking van deze drempel is onzeker omdat deze het meesleuren van water door het luchtbellenscherm uitstelt tot boven de drempelhoogte waar dan alsnog de zwakke plek voor mechanisme IV ontstaat.

### Verticale zoutwaterstraal, ev. met geringer zoutgehalte, bij de teen van een luchtbellenscherm

In plaats van een drempel kan een voldoende sterke waterstraal (watergordijn) over de gehele kolkbreedte aan de zoute zijde van het luchtbellenscherm, zie Figuur 4.6, twee mechanismen van zoutvracht door het gordijn beperken:

1. Verhinderen zoutpenetratie door de teen van het luchtbellenscherm (mechanisme IV).
2. Verminderen van menging van zout in het luchtbellenscherm (mechanisme II).

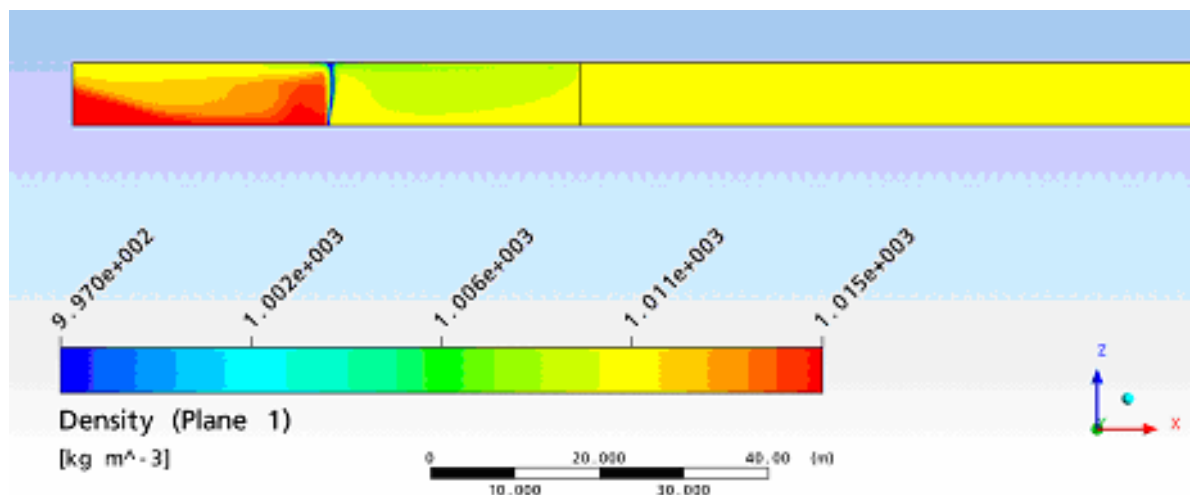
Een voldoende krachtige waterstraal zal het aangezogen water door opstijgende luchtballen versnellen waardoor meer water in mechanisme I wordt gevangen en minder voor mechanisme IV. In die zin werkt de waterstraal als een drempel.



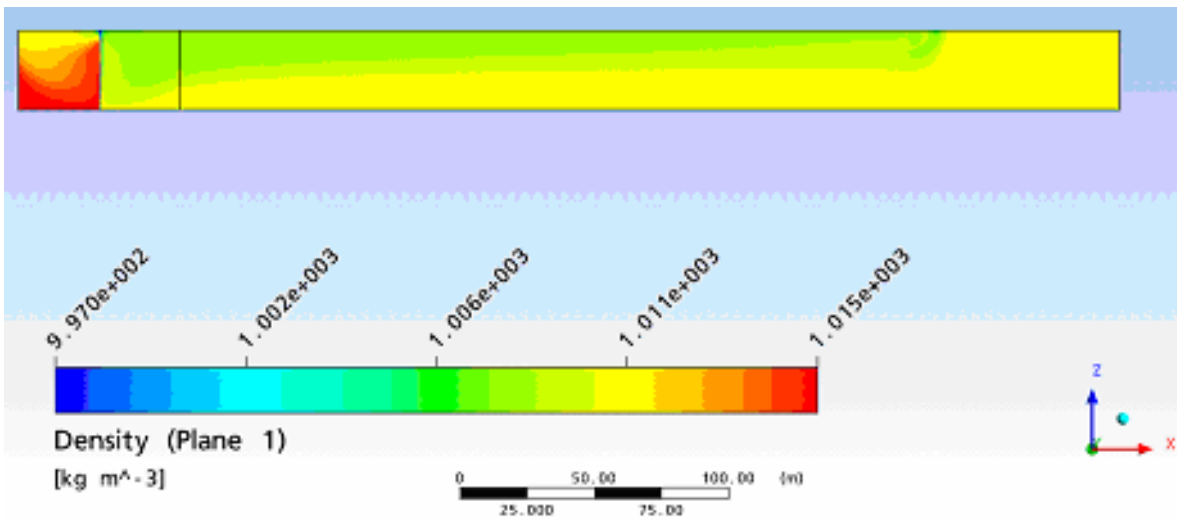
Figuur 4.6 Waterstraal (watergordijn) over kolkbreedte aan zoute zijde (bruine band) als extra-zoutlekbeperkende werking van luchtbellenscherm op zout-zoet overgang (geopende sluisdeur) in verticale doorsnede in lengterichting kolk. Rechts is de kolk en aan de andere zijde gesloten. De waterstraal vervangt het meesleuren van zout water vanaf de zoute zijde, vervangt water in de menging (II) door het luchtbellenscherm en verhindert de indringing van zout water (IV) bij de teen van het luchtbellenscherm.

Ten tweede, wanneer het debiet van de waterstraal naast en parallel met het luchtbellenscherm, zie Figuur 4.6, ruwweg gelijk is aan het debiet in mechanisme I wordt het water komende vanaf de zoute zijde (zie "0" in Figuur 4.6) buiten de invloedzone van het luchtbellenscherm gehouden. Vervolgens wordt eerder dan het zoute omgevingswater het zoetere water uit de waterstraal in het luchtbellenscherm gemengd (mechanisme II) en ten dele naar de recirculatiezone (III) gebracht. Wanneer het zoutgehalte van de waterstraal geringer is dan van het zoute water (links van het gordijn in Figuur 4.6) zal er minder zout via mechanisme II naar de zoetere zijde worden getransporteerd wat de aandrijving van de zouttong (V) verder zal beperken. Wanneer het zoutgehalte in de waterstraal geringer is dan in de zoetere zijde neemt het zoutgehalte aan de zoetere zijde zelfs af door transport van zoeter water uit de waterstraal via mechanisme II. Omgekeerd zal water uit de kolk (volume III in Figuur 4.2) via menging binnen het luchtbellenscherm de kolk weer verlaten. Tenslotte zal een zoetere waterstraal opdrijven en minder snel zijn snelheid verliezen en dus een krachtige verticale aandrijving van de verticale circulatiepatronen blijven geven.

Oriënterende simulaties onderbouwen voorgaande werking en hydrodynamische processen, voor details zie (Keetels en Uittenbogaard, 2010). De simulaties betreffen de gehele lengte van 345m van een kolk voor de beroepsscheepvaart. Figuur 4.7 toont dat het zoete water uit de waterstraal geplaatst aan de zoute zijde van het luchtbellenscherm zowel de directe penetratie (mechanisme IV) van zout water bij de teen van het luchtbellenscherm verhindert als de menging van zoet water (mechanisme II) naar de kolk.



Figuur 4.7 *luchtbellenscherm gecombineerd met een krachtige zoetwaterstraal (Figuur 4.6) geplaatst tussen 20 ppt zout water buiten en 15 ppt water in de kolk, 150 s na openen kolk bij luchtbellenscherm. De dunne blauwe lijn toont de baan van de luchtballen en de groene wolk is water zoeter dan in de kolk aanwezig. De verticale zwarte lijn is niet relevant maar de locatie waar het onderliggende rekenrooster verspringt, een deel van de kolk lengte van 345m is getoond.*



*Figuur 4.8 Luchtbellenscherm gecombineerd met een krachtige zoetwaterstraal geplaatst tussen 20 ppt zout water buiten en 15 ppt water in de kolk, 30 minuten na openen kolk bij luchtbellenscherm. Merk op de uitbreiding van zoeter water in de kolk (groene toplaag). De verticale zwarte lijn is niet relevant maar de locatie waar het onderliggende rekenrooster verspringt, de totale kolk lengte van 345m is getoond.*

Het resterende deel van de zoetwaterstraal stroomt aan het wateroppervlak van de zoute zijde weg van de horizontale positie van het scherm en verlaagt ter plekke het gewicht van het water en belast zodoende het luchtbellenscherm minder dan zonder waterstraal.

### 4.3 Voorlopige conclusie zoutlekbeperkende werking luchtbellenschermen

In Nederland is in 1960-1970 veel onderzoek verricht naar de zoutlekbeperkende werking van luchtbellenschermen. Experimenten bij de sluizen van IJmuiden tonen dat een doorlaatfractie van 25% van de oorspronkelijke zoutvracht haalbaar is d.w.z. maximaal 75% van de oorspronkelijke zoutvracht kan door een luchtbellenscherm worden tegengehouden.

Desalniettemin blijkt uit diverse analyses waarop we later nog terugkomen, zie ook Figuur 2.1, dat de zoutlekbeperkende werking tot ca. 50% beperkt is gebleven. De oorzaken zijn niet goed bekend maar vermoed wordt dat de realisatie van het ontwerp en/of onderhoud en/of door vervuiling en beschadigingen minder robuust is waardoor ongelijkmatige verdeling van luchtbellen over de kolkbreedte en minder effectieve werking van het luchtbellenscherm is ontstaan. De rol van invloedsfactoren zoals de passage van schepen door de luchtbellenschermen en het nivelleren van de kolk op de zoutwerkende werking is in het verleden niet expliciet onderzocht. Voor het bedienend personeel van de sluizen is het zoutlekbeperkende effect van luchtbellenschermen moeilijk zichtbaar en meetbaar.

Om een betere luchtinjectie te krijgen zijn nieuwe methoden voor luchtverdelers (diffusers), luchtventielen en materialen ontwikkeld. Deze nieuwe methoden garanderen de levering van een gewenst luchtdebiet, met een betere bedekking van de kolkdwarsdoorsnede, met de juiste belgrootte en met minder last van vervuiling bij geringere energiekosten. Deze en meer recent inzicht in en ervaring met luchtbellenschermen in plassen en meren wijzen ons op de haalbaarheid van het hierboven gestelde doorlaatfractie van 25% van de zoutvracht door luchtbellenschermen bij openstaande sluisdeuren en door verschillen in zoutgehalte.

Het gebruik van een drempel bij de teen van een luchtbellenscherm zal lokaal de directe doordringing van zout water tegenwerken maar mogelijk het meesleuren van water door een luchtbellenscherm hinderen of tot boven de drempelhoogte uitstellen.

Daarnaast presenteerden we in dit hoofdstuk inzicht, onderbouwd met numerieke simulaties, dat door een optimale gebruik van water, zoeter dan aanwezig in de kolk en geïnjecteerd als een waterstraal bij de teen van een luchtbellenscherm, de zoutvracht nog verder gereduceerd kan worden en mogelijk zelfs kan opheffen.

Voor dergelijke waterstralen is het benodigde debiet waarschijnlijk groot terwijl de wens is zo weinig mogelijk zoet water uit het HD te gebruiken. Een mogelijkheid is de waterstraal te voeden met verzilt water uit een nog te realiseren diepe zoutvang in de voorhaven van het HD. Het zoutgehalte van dit water zal geringer zijn dan van het kolkwater op het moment van schutten naar het VZM. Met het verzilte water uit de zoutvang kan de waterstraal bij de sluisdeuren naar het VZM opdrijven en krachtiger blijven dan zonder verschillen in zoutgehalte tussen waterstraal en zijn omgevingswater.

Al deze mogelijkheden dienen nog door gerichte veldexperimenten te worden onderzocht. Inmiddels is besloten daartoe de Stevinsluis bij Den Oever (westelijk eind van Afsluitdijk) te gebruiken. De Stevinsluis is al voorzien van luchtbellenschermen en ook daar heerst de vraag wat hun huidige effectiviteit is zodat deze veldproeven meerdere doelen dienen.

In het volgende hoofdstuk gaan we eerst uit van de minder dan gewenste werking van de luchtbellenschermen in de Volkeraksluizen zoals uit calibratie van de zoutvracht over de periode 1969-1980 blijkt en wat leidt tot Figuur 2.1 en 50% reductie in zoutvracht. Vervolgens

zullen we op basis van voorgaande overwegingen veronderstellen dat de zoutlekbeperkende werking van de luchtbellenschermen, eventueel uitgebreid met drempels en waterstralen, tot 25% van de oorspronkelijke zoutvracht kan worden gebracht. Zowel de veldexperimenten bij de sluizen van IJmuiden van alleen luchtbellenschermen als onze simulaties met waterstralen tonen dat een doorlaatfractie van 25 % voor het zouttransport door geopende sluisdeuren een reële doelstelling is.



## 5 Zoutvrachtmodel

### 5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft ons zoutvrachtmodel als samenvatting van fysische processen van zouttransport door sluisen, eventueel met deelskolken, gebaseerd op nivelleren via rinkschuiven en met de invloed van scheepvaart op het zouttransport. De wiskundige grondslagen en methoden worden in Appendix B uitgelegd.

Het zoutvrachtmodel berekent de netto zoutvracht gemiddeld over veel schutcycli en de zoutgehalten in de voorhavens en tijdens twee schutstadia in de (deel)kolken. Het zoutvrachtmodel vat een reeks modellen samen voor fysische processen bij uitwisseling door dichtheidsverschillen, scheepvaart en door luchtbellenschermen. Elke modelbijdrage heeft zijn eigen theorie en toetsing.

Dit zoutvrachtmodel berekent de invloed op de zoutvracht door drempels, spuien met spuisluis of via de kolken (lekkende ebdeuren) en door luchtbellenschermen en eventueel waterinjectie naast de schermen.

Door opgave van de doorlaatfractie van de oorspronkelijke zoutvracht dat een luchtbellenscherm doorlaat kan de gebruiker inschatten of een gesteld maximum in zoutvracht te bereiken is en met welke luchtdebieten en compressorvermogens, voor details zie appendix A.

Voorgaande hoofdstukken bieden een overzicht van de mechanismen en maatregelen (luchtbellens- en watergordijnen, verhoogde drempels, spuien via spuisluis en lekkende ebdeuren) die de zoutvracht door de Volkeraksluizen kunnen reduceren.

Ondanks de enorme vooruitgang in (3D) numerieke simulaties blijkt het anno 2010 niet mogelijk om de combinatie van zouttransport door *lock-exchange*, scheepsbewegingen van en naar de kolk, bellen- en watergordijn, lekkende ebdeuren (spuien door schuiven in sluisdeuren) in één omvattend numeriek simulatie-systeem te beschrijven. Voor elk proces/mechanisme of een beperkt aantal combinaties hiervan zijn er zeker wel numerieke simulaties mogelijk maar moeilijk te combineren met andere wiskundige methoden en rekentechnieken voor de overige fysische processen. De kwaliteit van dergelijke simulaties voor (een samenstel van) onderdelen, hoewel indrukwekkend, is momenteel nog niet of onvoldoende met experimenten getoetst. Onze ervaring met dergelijke numerieke simulaties toont ook wat we noemen *problem-transfer* d.w.z. het streven om door expliciete simulatie van meer (details van) fysische processen minder afhankelijk te worden van probleem-specifieke modelparameters wordt gefrustreerd door de introductie van moeilijk meetbare fysische detailparameters of modelinstellingen hoewel deze meer generiek d.w.z. minder model-specifiek beogen te zijn.

Een relevant voorbeeld is het berekenen van het debiet van water meegesleurd door een straal of luchtbellenscherm. Op een zeker aggregatie-niveau van de onderliggende fysische/turbulente processen, zoals in modellen die alleen de gemiddelde snelheid en afmetingen van de straal beschrijven, blijkt dit debiet alleen afhankelijk te zijn van een tiental jaren onderzoek robuust gebleken *entrainment*-coëfficiënt voor impulsuitwisseling tussen straal en omringend water. Gaan we een stap lager in aggregatie-niveau dan

ontmoeten we in 3D-simulaties rekentechnieken (b.v. advectionsschema's) en turbulentiemodellen met hun keuzes en modelcoëfficiënten die moeilijk verifieerbaar blijken te zijn maar wél een grotere onzekerheid leveren dan genoemde *entrainment* coëfficiënt.

Gezien voorgaande overwegingen en het grote belang van dit project voor de beslissing tot het verzilten van het Volkerak-Zoommeer gebruiken we een methode welke op een geschikt aggregatie-niveau de netto effecten van fysische processen samenvat en onderling koppelt. De methode is gebaseerd op de dominante eis dat gemiddeld over alle stadia in een schutcyclus en in elke dwarsdoorsnede van de sluiscolken en van de voorhavens dezelfde zoutvracht geldt. We noemen dit model het zoutvrachtmodel.

Dit hoofdstuk presenteert ons zoutvrachtmodel dat genoemde mechanismen en maatregelen gemiddeld over veel schutcycli tenminste redelijk kwantitatief moet kunnen beschrijven in termen van zoutvracht (uitgedrukt in kg/s). Het zoutvrachtmodel zien wij als een verzameling van modellen waarvan de netto effecten van complexe stromingsprocessen op de zoutvracht zijn samengevat met hun globale interactie d.w.z. op het niveau van de netto effecten. Elk model/onderdeel van het zoutvrachtmodel is gebaseerd op theorie, veldwaarnemingen, numerieke simulaties etc.. In specifiek onderzoek (laboratorium, veld en numeriek) kan van elk onderdeel de nauwkeurigheid in het relevante bereik aan parameters worden vastgesteld, hetgeen we ook aanbevelen.

Dit hoofdstuk begint in onderdeel 5.2 met de definitie en naamgeving van schutcycli en relevante waterdebieten en zoutgehalten. In Appendix B formuleren we in wiskundige vergelijkingen voor verschillende stadia van een schutcyclus en in diverse al of niet fictieve scheidingsvlakken het zouttransport als sommatie en als functie van de stromingsprocessen zoals gegeven in voorgaande hoofdstukken. Wij eisen dat gemiddeld over veel schutcycli de zoutvrachten door alle scheidingsvlakken aan elkaar gerelateerd zijn, gecorrigeerd voor lozingen door b.v. spuien en watergordijnen. Deze eisen verlangen een zekere verdeling van het gegeven verschil in zoutgehalten tussen HD en VZM over de voorhavens en in de kolken, afhankelijk van het stadium van de schutcyclus. Deze zoutverdeling van HD via voorhavens en kolken naar het VZM, gemiddeld in de tijd maar onderverdeeld over stadia binnen een schutcyclus, vormt de oplossing van het probleem waaruit de gezochte zoutvracht naar het HD volgt.

## 5.2 Stadia in schutcyclus en definities

Figuur 5.1 geeft een schematische langsdoorsnede door een beroepskolk met voorhavens en hun verbindingen met HD en VZM.

Links in deze figuur bevindt zich het VZM dat voldoende dichtbij de monding van de voorhaven (gestippeld in Figuur 5.1) een zoutgehalte  $S_{VZM}$  [kg/m<sup>3</sup>] heeft. Naargelang het spuiregim kan dit zoutgehalte al lager zijn dan meer zuidwaarts van het sluisencomplex. In de voorhaven aan VZM-zijde bedraagt het zoutgehalte  $S_{HV}$  waar het eerste subscript slaat op Haven en het tweede op VZM. Analooft is  $S_{HH}$  het zoutgehalte in de voorhaven aan HD-zijde.

In het HD dichtbij de monding van de voorhaven definiëren we het zoutgehalte  $S_{HD}$  wat groter dan nul zou kunnen zijn bij grote zoutvracht naar het HD. Voorgaande zoutgehalten in VZM en HD en voorhavens nemen we aan als constant d.w.z. onafhankelijk van de stadia in de schutcyclus.

Het bovenste deel van Figuur 5.1 geeft het stadium van de schutting naar het VZM op het moment dat de relevante sluisdeuren worden geopend. Formeel onderscheiden we deelkolken aan noordzijde (HD-zijde) en zuidzijde (VZM-zijde). De bijbehorende zoutgehalten krijgen eerst het subscript "K" van Kolk gevolgd door de "H" voor de situatie nadat de kolk van de HD-zijde is afgesloten of "V" nadat de kolk van het VZM is afgesloten. Dus  $S_{KH}$  is het zoutgehalte in de kolk nadat deze van het HD is afgesloten en in open verbinding komt met het VZM door het openen van de sluisdeuren met het VZM. Analoog is  $S_{KV}$  het zoutgehalte in de kolk nadat deze van het VZM is afgesloten en in open verbinding komt met het HD door het openen van de sluisdeuren met het HD. Tenslotte wijst het derde subscript op het zoutgehalte in de noordelijke (N) of zuidelijke (Z) deelkolken.

Samenvattend:

1.  $S_{VZM}$  : gegeven tijdsafhankelijk zoutgehalte van VZM voldoende dichtbij de monding van de voorhaven aan VZM-zijde;
2.  $S_{HV}$  : tijdsafhankelijk zoutgehalte in VZM-voorhaven;
3.  $S_{HH}$  : tijdsafhankelijk zoutgehalte in HD-voorhaven;
4.  $S_{HD}$  : gegeven tijdsafhankelijk zoutgehalte van HD voldoende dichtbij de monding van de voorhaven aan HD-zijde;
5.  $S_{KHN}$  : zoutgehalte in noordelijke kolk nadat deze van HD is afgesloten;
6.  $S_{KHZ}$  : zoutgehalte in zuidelijke kolk nadat deze van HD is afgesloten;
7.  $S_{KVN}$  : zoutgehalte in noordelijke kolk nadat deze van VZM is afgesloten;
8.  $S_{KVZ}$  : zoutgehalte in zuidelijke kolk nadat deze van VZM is afgesloten.

Zes van deze acht zoutgehalten zijn onbekend en dienen te worden opgelost uit vergelijkingen voor het zouttransport door de aangegeven barrières van mondingen van voorhavens en langs geopende sluisdeuren eventueel beschermd met luchtbellenschermen. In Appendix B wordt de procedure gegeven om deze zes onbekende zoutgehalten op te lossen. In dit onderdeel beperken we ons tot de definitie van de relevante variabelen.

In Figuur 5.1 zijn de volgende drie waterdebieten gegeven. Door de kolken kan HD-water worden gespuid via ten dele geopende rinketschuiven wat kortweg "lekkende ebdeuren" wordt genoemd; het relevante totale waterdebiet door lekkende ebdeuren is  $Q_{lebd}$  [ $m^3/s$ ] gesommeerd over alle sluizen en gemiddeld over veel schutcycli.

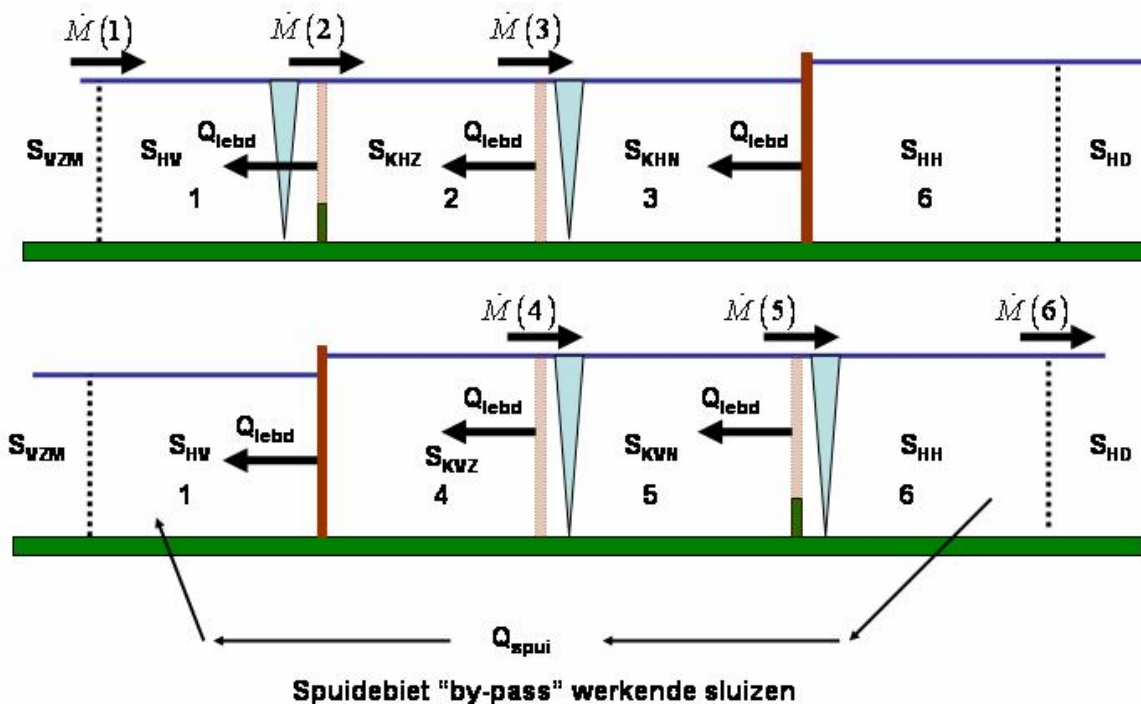
Via de spuisluis (zie Figuur 1.1) kan buiten de kolken om ook water uit het HD voor de monding van de VZM-voorhaven worden gebracht: het relevante waterdebiet is  $Q_{spui}$  [ $m^3/s$ ].

Tenslotte zijn er de netto zoutvrachten van het VZM naar het HD aangegeven met  $\dot{M}(n)$  in [ $kg/s$ ] waarbij integer "n" slaat op de verticale doorsnede zijnde een scheidingsvlak tussen twee naast elkaar gelegen volumina (voorhavens of kolken). Gemiddeld over veel schutcycli dienen deze zoutvrachten gelijk te zijn wat vijf vergelijkingen oplevert voor zes onbekende zoutgehalten. De zesde vergelijking is gebaseerd op de verandering van het zoutgehalte in een (deel-)kolk tijdens één stadium van een schutcyclus.

Niet getoond maar wel relevant is het zg. nivelleringsdebiet  $Q_{niv}$  [ $m^3/s$ ] door het vullen of legen van de kolken tot de waterstand aan de zijde waarnaar geschut wordt. Bij het nivelleren speelt de zg. schuttschijf, dit is het watervolume verplaatst door het aanpassen van de waterstand in de kolk aan dat van de relevante voorhaven; het kolkvolume speelt hierbij dus geen rol.

Het nivelleringsdebiet is gelijk aan het volume van de schutscijf vermenigvuldigd met aantal schuttingen per dag. Bij hogere waterstand in het HD dan in het VZM is het nivelleringsdebiet zoet water dat aan HD-zijde de kolk instroomt en bij nivelleren met VZM aan VZM-zijde weer als verzilt water de kolk verlaat. In dergelijke situaties waar de waterstand aan de zoute zijde lager is dan aan de zoete zijde wordt wel gesproken over een zg. ebdebiet. Dit ebdebiet vormt een verlies van zoet water uit het HD dat het zoutgehalte in de kolk verlaagt en waardoor de aandrijving van het zouttransport bij geopende sluisdeuren naar het VZM geringer wordt dan zonder de verzoetende werking van het ebdebiet.

Er zijn nog twee debieten nl. een uitwisselingsdebiet veroorzaakt door de waterverplaatsing van in- en uitgaande scheepvaart wat gemiddeld over veel schutcycli leidt tot  $Q_{\text{schip}}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] zijnde het debiet in één vaarrichting veroorzaakt door scheepsbewegingen. Verder speelt nog de statische rol van de waterverplaatsing van schepen afgemeerd in een kolk, immers het kolkvolume wordt met deze waterverplaatsing vermindert.



Figuur 5.1 Opdeling voorhavens en kolken in Volkeraksluizencomplex en definitie van zoutgehalten en debieten.

Tenslotte is er een bijzonder waterdebiet  $Q_{\text{jet}}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] van de waterstralen bij de teen van de luchtbellenschermen, ter versterking van de zoutlekbeperkende werking van de luchtbellenschermen (blauwe driehoeken in Figuur 5.1). Volgens Hoofdstuk 4 verwachten we dat dit watergordijn het meest effectief zal zijn bij en terwijl het luchtbellenscherm werkt gedurende de open-tijd van de sluisdeuren naar de VZM-voorhavens. We nemen aan dat het benodigde zoetwater debiet wordt onttrokken aan het HD hoewel we onttrekking uit een zoutvang nog als optie kunnen implementeren.

**Samenvattend:**

1.  $Q_{lebd}$  in [m<sup>3</sup>/s]: debiet van HD-water dat via de kolken wordt gespuid naar het VZM;
2.  $Q_{spui}$  in [m<sup>3</sup>/s]: debiet van HD-water dat buiten de kolken om via de spuisluis naar het VZM wordt getransporteerd;
3.  $Q_{niv}$  in [m<sup>3</sup>/s]: nivelleringsdebiet voor het vullen of legen van de kolken over nominaal 0,5m waterstandsverschil tussen HD en VZM;
4.  $Q_{schip}$  in [m<sup>3</sup>/s]: het uitwisselingsdebiet door in- en uitgaande scheepvaart;
5.  $Q_{jet}$  in [m<sup>3</sup>/s]: het debiet van waterstralen aan de teen van de luchtbellenschermen;
6.  $\dot{M}(n)$  in [kg/s]: de zoutvracht van VZM naar HD door de relevante verticale doorsneden in Figuur 3.1 van sluisdeuren of monding van voorhavens.

Alle voorgaande fluxen zijn gemiddelden van debieten of van zoutvrachten over veel schutcycli. Van belang daarbij is de eenzijdige open-tijd  $T_{open}$  in seconden van een kolk en het aantal schutcycli  $N_{schut}$  per kolk per dag. Uitgaande van enig debiet dat alléén tijdens een geopende kolk optreedt wordt dit debiet vermenigvuldigd met de fractie van de tijd dat de kolk is geopend volgens:

$$\text{fractie opening} = \frac{T_{open} N_{schut}}{86400} \quad [-] \quad (5.1)$$

waarbij 86.400 het aantal seconden per dag is. Vervolgens worden deze debieten, zoals die door lekkende ebdeuren, over alle kolken van de beroeps- en jachtensluizen gesommeerd. Deze zg. open-tijd van sluisdeuren is van grote invloed op de zoutvracht, des te korter de sluisdeuren geopend zijn des te minder zout wordt uitgewisseld met de kolk en voorhavens. Uiteraard vereist veiligheid voor scheepvaart en van de sluisdeuren een minimale open-tijd. De open-tijd van de kolken in de Volkeraksluizen bedraagt nu ca. 25 minuten.

De essentie van de op te stellen vergelijkingen is het formuleren van het zouttransport door elk van de vijf verticale dwarsdoorsneden in Figuur 5.1. Dit zouttransport is afhankelijk van de uitwisselingsstroming aangedreven verschillen in dichtheid van water over deze doorsneden. Het zouttransport wordt beperkt door de zoutlekbeperkende werking van de luchtbellenschermen en begrensd door de maximale berging van zout in de kolken.

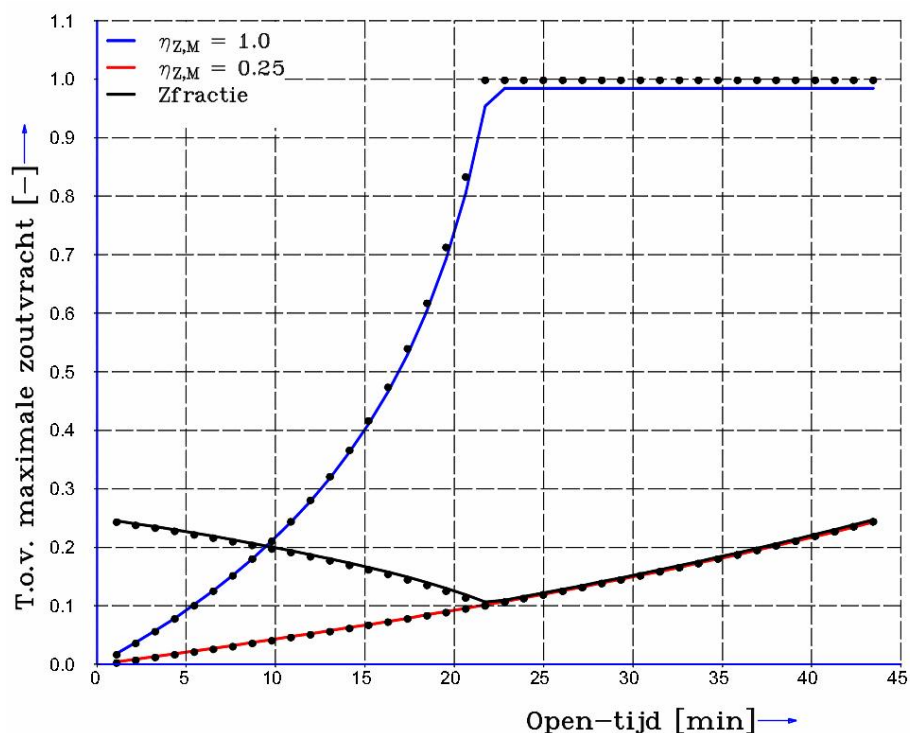
Zoals aangekondigd in Hoofdstuk 4 stellen we in deze methode de doorlaatfractie van zoutindringing door een luchtbellenscherm in het bereik van 0 t/m 100%, zie Figuur 4.2. Na oplossing van het in Appendix B beschreven stelsel vergelijkingen zijn alle relevante dichtheidsverschillen bekend en uiteraard ook de zoutvracht. Vervolgens wordt voor elke locatie met luchtbellenschermen (blauwe driehoeken in Figuur 5.1) en bij gekozen doorlaatfractie het bijbehorende luchtdebiet berekend volgens (Abraham & V.d. Burgh, 1962), zie ook Figuur 4.2. Met de gegeven kolkbreedten worden de luchtdebieten en de theoretische compressorvermogens berekend, voor details zie Appendix A; al deze informatie staat in de uitvoer van het zoutvrachtmodel.

### 5.3 Toetsing zoutvrachtmodel aan analytische oplossing en inzicht in afhankelijkheden

In Hoofdstuk 6 zullen we het zoutvrachtmodel toetsen aan uit waarnemingen afgeleide zoutvracht door de Volkeraksluizen. Hier besluiten we dit hoofdstuk met een validatie van de oplosmethode van het zoutvrachtmodel aan de hand van analytische oplossingen. Appendix C presenteert de analytische oplossing van een enkelvoudige kolk zonder voorhavens, zonder scheepvaart, zonder drempels, zonder lekdebiet en bij gelijke waterstanden in de

voorhavens. Deze abstracte schutsluis werkt louter als scheiding tussen zout en zoet water. De analytische oplossing staat wél toe dat aan beide kolkeinden zoutlekbeperkende middelen worden ingezet met een gegeven doorlaatfractie dat we het symbool  $\eta$  geven. De doorlaatfractie aan de zoute zijde of zee zijde, bij de Volkeraksluizen de VZM-zijde, noteren we als  $\eta_Z$  en aan meerzijde  $\eta_M$ , bij de Volkeraksluizen is dat de HD-zijde. De analytische oplossing is echter symmetrisch in beide doorlaatfracties dus onderling verwisselen is toegestaan.

De doorlaatfractie vergelijkt het zouttransport door geopende sluisdeuren t.o.v. een fictieve onbeschermd kolk met hetzelfde initiële verschil in zoutgehalten. Echter, zodra een luchtbellenscherm het zouttransport beperkt wordt het initiële verschil in zoutgehalte over de sluisdeur ook geringer dan zonder beschermende werking doordat de zoutmassa in de kolk minder snel toe of afneemt. Dit laatste heeft de volgende twee gunstige effecten. Het zouttransport door geopende sluisdeuren is het product van de snelheid van de zouttong met het verschil in zoutgehalten tussen kolk en voorhaven. De snelheid van de zouttong is evenredig met de wortel uit het verschil in zoutgehalten zodat het zouttransport evenredig is met het verschil in zoutgehalten tot de macht 1,5. Daarom is de beperking in het zouttransport door geopende sluisdeuren en zoutvracht sterker dan de doorlaatfractie.



Figuur 5.2 Langs de verticale as: de zoutvracht t.o.v. de maximale zoutvracht als functie van de open-tijd van de kolk met afmetingen gelijk aan de beroepskolk van de Volkeraksluizen en met 20 ppt verschil in zoutgehalte tussen de voorhavens. De zwarte lijn is de verhouding tussen de zoutvracht met doorlaatfracties  $\eta = 0,25$  en zoutvracht zonder zoutlekbeperkende middelen (doorlaatfracties  $\eta=1$ ). De zwarte punten zijn volgens de analytische oplossing en de getrokken lijnen van het zoutvrachtmodel.

Figuur 5.2 vergelijkt het zoutvrachtmodel met de analytische oplossing voor verschillende open-tijden van de sluisdeuren van een 345m lange, 24m brede en 7,5m diepe beroepskolk van de Volkeraksluizen, maar zonder enige drempel, en met 20 ppt verschil in zoutgehalten van de voorhavens. Na ca. 23 minuten is de onbeschermd kolk (blauwe lijn in Figuur 5.2)

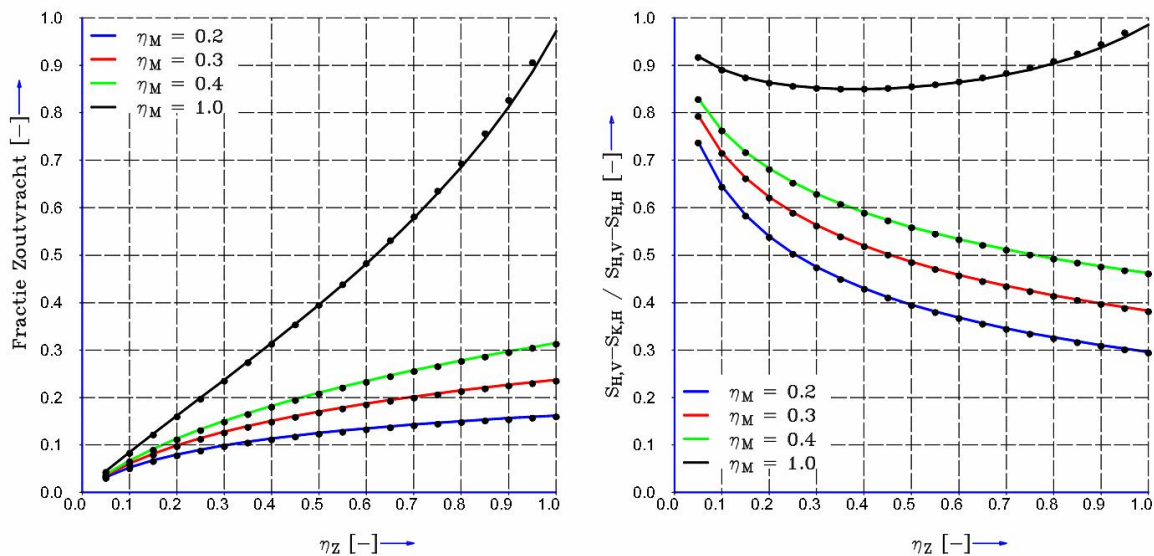
volledig gevuld met het water van de relevante voorhaven. Het zoutvrachtmodel bereikt juist niet de volledige kolkvulling maar eindigt met maximaal 98,5%. De maximale zoutvracht door deze enkele beroepskolk is gelijk aan het product van kolkvolume met het verschil in zoutgehalten en het aantal schuttingen per dag, de zoutvracht bedraagt dan 287,5 kg zout/s bij 20 schuttingen per dag. Voor kortere open-tijden is het kolkwater niet volledig vervangen door het water van de relevante voorhaven en neemt de zoutvracht af, de relatie is ruwweg kwadratisch d.w.z. 11,5 minuten open-tijd geeft ca. 25% van de maximale zoutvracht. Echter, kortere open-tijden lijken niet haalbaar voor de Volkeraksluizen.

Overigens deze nagenoeg kwadratische relatie tussen zoutvracht en open-tijd van de sluisdeuren is gebaseerd op een model waarbij de zoutmassa in de kolk lineair in de tijd verandert (toe- of afneemt) vanaf het moment dat de sluisdeuren openen. De snelheid waarmee de zoutmassa in de kolk verandert neemt toe met het initiële dichtheidsverschil op het moment dat de sluisdeuren worden geopend. Bij langere open-tijden stijgt het initiële dichtheidsverschil over de sluisdeuren, wat de uitwisseling van zout-zoet sneller laat verlopen. Daarom neemt de verandering van zoutmassa in de kolk en daarmee de zoutvracht meer dan proportioneel toe met de open-tijd totdat maximale kolkvulling wordt bereikt.

De rode lijn in Figuur 5.2 toont de stijgende zoutvracht voor grotere open-tijden terwijl beide kolkeinden tijdens geopende sluisdeuren worden beschermd door b.v. luchtbellenschermen met elk 25 % doorlaatfractie. Doordat de luchtbellenschermen het zouttransport door de geopende sluisdeuren remmen zal de kolk minder snel met zout worden gevuld of geledigd. En zoals hiervoor al toegelicht daalt ook het verschil in zoutgehalten tussen kolk en voorhaven waardoor het zouttransport ook nog eens afneemt. De rode lijn in Figuur 5.2 levert minder dan 25% zoutvracht op t.o.v. de situatie dat het kolkwater volledig is vervangen (bij 23 minuten open-tijd).

Het verhoudingsgetal tussen de zoutvracht mét en zónder bescherming van de kolkeinden noemen we de zoutvrachtfractie ( $Z_{\text{fractie}}$ ) en dit is de zwarte lijn in Figuur 5.2. Bij gegeven doorlaatfracties is de zoutvrachtfractie minimaal bij de open-tijd waar het volume van de onbeschermd kolk precies is vervangen door water uit de relevante voorhaven, in dit voorbeeld na 23 minuten open-tijd. Voor kortere open-tijden neemt de zoutvracht van de onbeschermd kolk sneller af dan van de beschermd kolk en voor langere open-tijden neemt de zoutvracht door een onbeschermd kolk niet meer toe.

Figuur 5.3 toont de rol van de doorlaatfracties op de zoutvrachtfractie voor de open-tijd waarna het water van een onbeschermd kolk juist volledig is vervangen door het water uit de voorhaven.

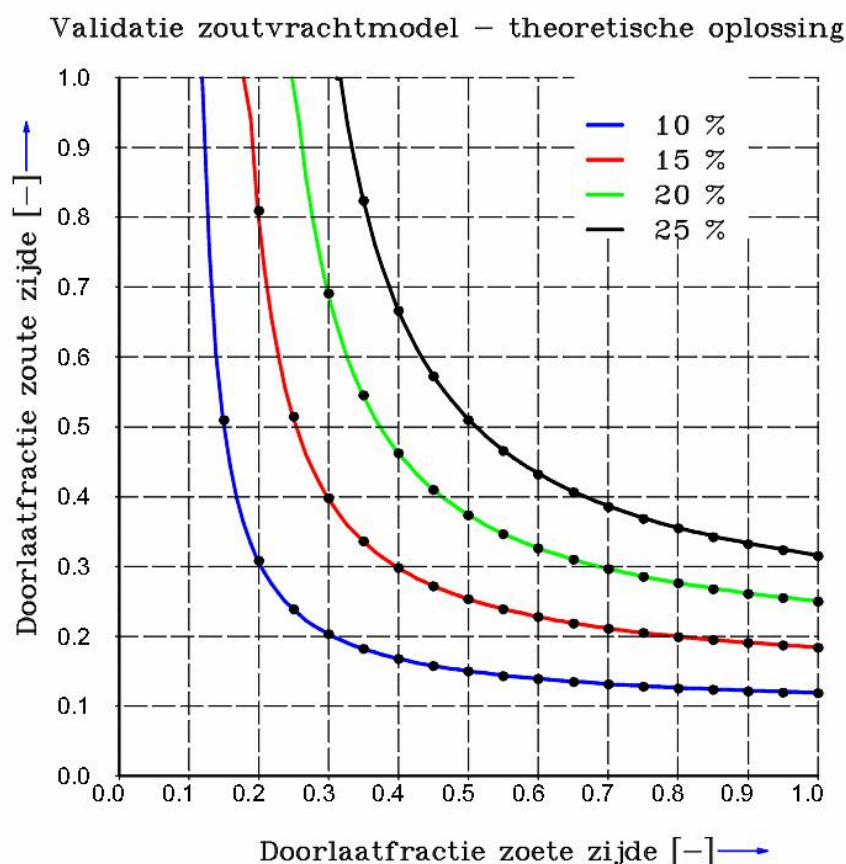


**Figuur 5.3** De invloed van combinaties van doorlaatfracties van zoutremmende middelen aan zeezijde en meerszijde op de fractie van de ongeremde zoutvracht door de kolk (linker figuurdeel) en het relatieve verschil in zoutgehalte  $S_{VZM}$  tussen de VZM-voorhavens en zoutgehalte  $S_{KH}$  kolk na schutten naar HD (rechter figuurdeel). Getrokken lijnen zijn van het zoutvrachtmodel, zwarte stippen volgens analytische oplossing (App. C), beiden met lineaire relatie tussen zoutgehalte en specifieke dichtheid.. Resultaten voor een schutsluis zonder voorhavens, zonder verschil in waterstand, geen scheepvaart en zonder drempels en bij open-tijd gelijk aan die van volledige vervanging van kolkwater door water uit de voorhavens.

Mogelijk contra-intuïtief is de uitkomst in Figuur 5.3 nl. dat de zoutvrachtfractie niet gelijk is aan het product van de doorlaatfracties van zoutlekbeperkende middelen aan beide kolkeinden. Appendix C toont dat de minimale zoutvrachtfractie groter of gelijk is aan 35% van de kleinste doorlaatfractie en kleiner of gelijk is aan de kleinste doorlaatfractie. Deze uitspraken gelden alleen voor een geabstraheerde kolk zonder drempels, zonder voorhavens, zonder scheepvaart en zonder verschillen in waterstanden tussen de voorhavens. Bij gelijke en zeer kleine doorlaatfracties nadert het zoutgehalte in de kolk het gemiddelde van de zoutgehalten in beide voorhavens. In reële situaties zal het zoutgehalte in de kolk na een schutting naar de zoete zijde zoeter zijn dan het gemiddelde van de zoutgehalten van de voorhavens.

Figuur 5.4 herhaalt Figuur 5.3 maar nu uitgaande van een gewenste zoutvrachtfractie waarvoor de bijbehorende combinaties van doorlaatfracties worden getoond.





Figuur 5.4 Combinatie van doorlaatfracties van zoutremmende middelen aan zoute zijde ( $\eta_z$ ) en zoete zijde of meerzijde ( $\eta_M$ ) teneinde de gewenste fractie t.o.v. de ongeremde zoutvracht te bereiken; de combinaties zijn symmetrisch in  $\eta_M$  en  $\eta_z$ . In alle gevallen is de open-tijd gelijk en zo dat het water in de onbeschermde kolk volledig door water uit de voorhavens is vervangen. Getrokken lijnen zijn volgens het zoutvrachtmodel en zwarte stippen volgens de analytische oplossing (App. C) beiden met lineaire relatie tussen zoutgehalte en specifieke dichtheid.

Tot zover de presentatie van de toetsing van het zoutvrachtmodel voor een enkelvoudige kolk zonder drempel, zonder voorhavens etc. aan de analytische oplossing die in Appendix C is afgeleid.

In het volgende presenteren we opnieuw voorgaande figuren maar dan voor de Volkeraksluizen onder reële omstandigheden van drempels, voorhavens en uitwisseling door waterverplaatsing van scheepvaart.

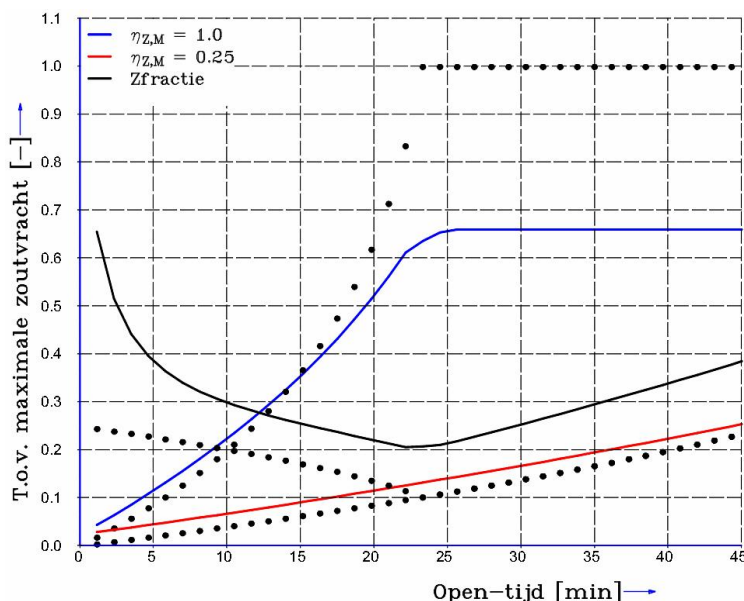
#### 5.4 Toepassing zoutvrachtmodel op Volkeraksluizen: inzicht in afhankelijkheden

Hier presenteren we opnieuw voorgaande figuren maar dan voor de Volkeraksluizen met zijn voorhavens en drempels en onder reële omstandigheden van 0,5m hogere waterstand in HD t.o.v. VZM en de prognose van scheepvaart in 2020. We lopen hiermee vooruit op de toetsing van het zoutvrachtmodel aan historische gegevens van de zoutlek maar kunnen nu alvast melden dat deze toetsing zeker bevredigend genoeg is om het volgende te kunnen vertrouwen. Verder presenteren we hier vooral verhoudingsgetallen zoals de zoutvrachtfractie in plaats van absolute zoutvrachten.

Figuur 5.5 toont dat de zoutvracht door de Volkeraksluizen zonder zoutlekbeperkende middelen al geringer is dan van de geabstraheerde kolk in het vorige onderdeel. Met name door de 200m brede monding van de VZM-voorhaven (zie Figuur 1.1) wordt het zoutgehalte daarin ca. 16,6 ppt i.p.v. 20 ppt in het VZM. Evenzo heeft de HD-voorhaven een gemiddeld zoutgehalte van ca. 3,2 ppt i.p.v. 0 ppt van het zoete HD. Het verschil tussen de zoutgehalten van beide voorhavens is 33 % minder dan tussen VZM en HD. De zoutvracht van de onbeschermden Volkeraksluizen is zodoende geringer dan zonder voorhavens en bedraagt nu 480 kg zout/s voor alle kolken samen. Hierbij helpt de verzoetende werking van het daggemiddelde nivelleringsdebiet van ca. 3,2 m<sup>3</sup>/s zoet water dat na iedere schutting met het VZM telkens de kolk met HD-water op peil moet brengen. De maximaal toelaatbare zoutvracht van 60 kg zout/s bedraagt ca. 12% van 480 kg zout/s. De vraag luidt of deze lage zoutvrachtfractie van 12% te bereiken is met haalbare doorlaatfracties van 25% door goed werkende luchtbellen/waterschermen aan beide kolkeinden?

Figuur 5.5 toont dat in de reële situatie van de Volkeraksluizen de zoutlekbeperkende werking van b.v. luchtbellenschermen minder effectief is: bij doorlaatfracties van 25% bedraagt de minimale zoutvrachtfractie nu ca. 20 % i.p.v. ca. 10% in Figuur 5.2. De oorzaak is niet alleen de lagere zoutvracht van de onbeschermden kolken als referentie maar ook de wat grotere zoutvracht door de beschermden kolken (rode lijn in Figuur 5.5 ligt boven de zwarte punten, zie ook de rode lijn in Figuur 5.2). De oorzaak voor deze laatste bevinding is dat met zoutlekbeperkende middelen in/rond de kolk de zoutvracht geringer wordt waardoor de mondingen van de voorhavens minder een barrière vormen. Dan stijgt het zoutgehalte in de VZM-haven naar dat van VZM en daalt in de HD-voorhaven naar het zoete HD en wordt de aandrijving voor de uitwisselingsstroming door geopende sluideuren groter dan zonder beschermende middelen.

Na een onbeschermden schutting met de HD-zijde bedraagt het zoutgehalte  $S_{K,H}$  in de kolken ca. 3,8 ppt en het zoutgehalte  $S_{K,V}$  na schutten met VZM-zijde ca. 14,3 ppt.

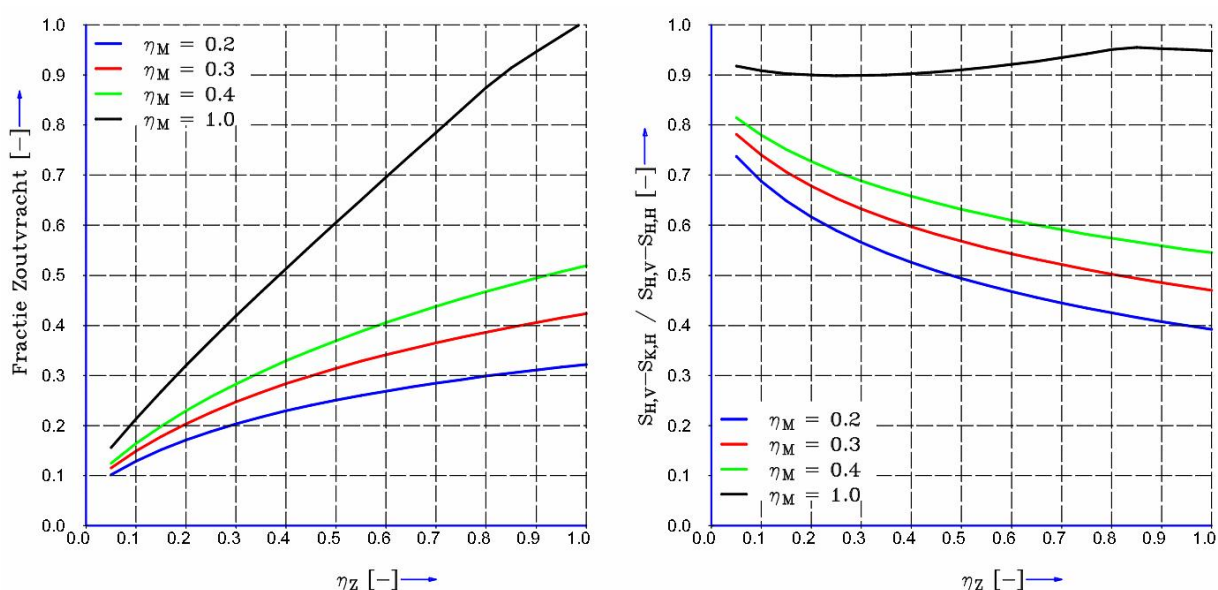


Figuur 5.5 Toepassing op Volkeraksluizen met 0,5m hogere waterstand in HD t.o.v. VZM, 20 ppt verschil in zoutgehalte van de voorhavens, scheepvaart volgens prognose 2020 en 20 schuttingen per dag per kolk. De zwarte punten refereren naar de analytische oplossing, zie verder de legenda van Figuur 5.2.

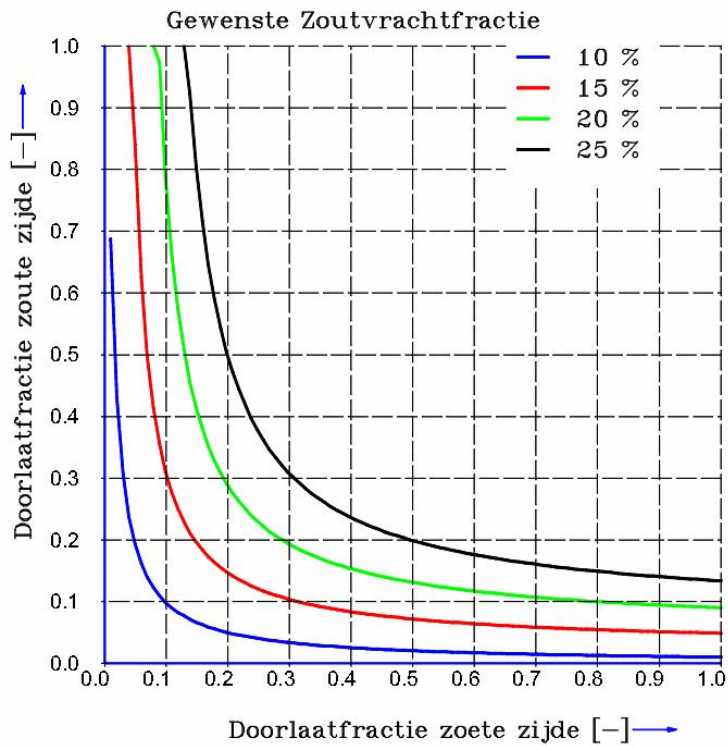
In overeenstemming met Figuur 5.3 toont Figuur 5.6 nu de afhankelijkheid van de zoutvrachtfraction van de doorlaatfracties van zoutlekbeperkende middelen aan beide kolkeinden van de Volkeraksluizen. Het rechter figuurdeel van Figuur 5.6 toont maximaal 95 % kolkvulling betrokken op het zoutgehalte  $S_{H,V}$  in de VZM-voorhavens, zoutgehalte  $S_{H,H}$  in de HD-voorhavens en het zoutgehalte  $S_{K,H}$  in de kolk na een schutting met de HD-voorhavens.

Analoog Figuur 5.4 toont Figuur 5.7 de relatie tussen de zoutvrachtfraction onder invloed van combinaties van de doorlaatfracties van zoutlekbeperkende middelen aan beide kolkeinden van de Volkeraksluizen met zijn drempels, voorhavens, waterstanden en prognose scheepvaart 2020. Ook Figuur 5.7 toont dat de zoutvrachtfraction ca. 20 % bedraagt voor gelijke doorlaatfracties van 25 %.

Uit voorgaande concluderen we dat zoutlekbeperkende middelen zoals luchtbellenschermen met klein geschatte doorlaatfracties van 25 % onvoldoende zijn om de gewenste zoutvrachtfraction van 12 % d.w.z. maximaal 60 kg zout/s te bereiken. In Hoofdstuk 7 moeten we daarom ook andere bijdragen tot de reductie van de zoutvrachtfraction onderzoeken zoals ondiepere voorhavens, hogere drempels, zoetwaterdebiet (methode lekkende ebdeuren) etc..



Figuur 5.6 Toepassing zoutvrachtmodel op Volkeraksluizen met 0,5m hogere waterstand in HD t.o.v. VZM, 20 ppt verschil in zoutgehalte van de voorhavens, scheepvaart volgens prognose 2020 en 20 schuttingen per dag per kolk, zie verder de legenda van Figuur 5.3.



Figuur 5.7 Toepassing zoutvrachtmodel op Volkeraksluizen met 0,5m hogere waterstand in HD t.o.v. VZM, 20 ppt verschil in zoutgehalte van de voorhavens, scheepvaart volgens prognose 2020 en 20 schuttingen per dag per kolk, zie verder de legenda van Figuur 5.4.

## 6 Toetsing zoutvrachtmodel aan historische gegevens (1969-1980)

### 6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het zoutvrachtmodel (Hoofdstuk 5) gebaseerd op relevante fysische processen (Hoofdstuk 3) en maatregelen tegen zoutindringing (Hoofdstuk 4) getoetst aan bepalingen van de zoutvracht door de Volkeraksluizen in de periode 1969-1980.

Daartoe is eerst nodig een overzicht van de variaties die destijds zijn toegepast om de aanvankelijk grote zoutvracht door deze sluizen te beperken. Daar is men destijds zeer goed in geslaagd, getuige de reductie van ca. 210 kg/s tot ca. 10-40 kg/s door toepassen van luchtbellenschermen en het spuien van zoet water uit HD via spuisluizen en door de kolken naar het VZM. Dit overzicht presenteren we in onderdeel 6.2. Gelukkig bevatten de onderliggende RWS nota's voldoende grafieken met bewerkte meetgegevens aangezien de oorspronkelijke en primitieve gegevens niet meer gearhiveerd blijken te zijn. Ook de archivering van deze RWS nota's is een punt van zorg, zie de ontbrekende gegevens in de referentielijst. Teneinde deze restanten aan informatie niet verder verloren te laten gaan presenteren we onze analyse van de historische gegevens in dit rapport.

Gebaseerd op voorgaande samenvatting met sterk uiteenlopende operationele omstandigheden van de Volkeraksluizen selecteren we een aantal kenmerkende testcases waarmee we onderzoeken of het zoutvrachtmodel gelijke veranderingen in de zoutvracht kan weergeven mogelijk door goed begrepen veranderingen in enkele modelparameters. Dit wordt in onderdeel 6.3 beschreven.

### 6.2 Historische gegevens

Voor een toetsing van de beschikbare modellen voor zouttransport gebruiken we de operationele condities voor de periode 1977-1979 beschreven in (RWS, 1983) en deze vatten we als volgt samen onder verwijzing naar tabellen en figuren in (RWS, 1983).

- Op 28 april 1969 zijn de Volkerak-sluizen in werking getreden d.w.z. het Volkerak werd via een dam met twee beroepssluizen 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 (zie Rak Noord, fig. 2).
- Vanaf januari 1977 zijn drie beroepssluizen van het Volkeraksluizencomplex in werking.
- Vanaf juni 1977 is de jachtensluis van het Volkeraksluizencomplex in werking.
- Vanaf 2 november 1978 kwam de spuisluis naast het Volkeraksluizencomplex in bedrijf.
- Aan Volkerakzijde (Rak Zuid, fig. 2) heerst nog het getij ; jaargemiddeld is de waterstand in HD 0,50m hoger dan aan Volkerak-zijde.
- Voorgaand levert een zg. nivelleringsdebiet van ca. 1,5 m<sup>3</sup>/s door het sluizencomplex.
- Tabel 3 en figuur 10 tonen de meetposities van chloride aan Volkerak-zijde (Z1, Z2, en Z3) en aan de HD-zijde (meetpalen) en meetposities *a* t/m *d* in de HD-voorhaven van het sluizencomplex met "*d*" het dichtst bij de sluisdeuren.

Bijlagen 3.9 t/m 3.11 in (RWS, 1983) tonen over de jaren 1969 t/m 1979 het chloridetransport uitgedrukt in kg/s (zoutgehalte=1,8 \* chloridegehalte) door de Volkeraksluizen zoals afgeleid uit lokale metingen van chloride en waterdebieten. Daartoe zijn metingen verricht in dwarsdoorsneden ten westen van de Volkeraksluizen in de Haringvliet en ten oosten in het Hollandsch Diep. Tussen deze dwarsdoorsneden zijn er geen opvallende inlaten van zout of zoet water zodat de enige resterende bijdrage van de Volkeraksluizen moet komen. Uit het verschil van deze zoutfluxen volgt de bijdrage in zout vanuit de Volkeraksluizen. Enerzijds lijkt deze indirecte bepaling van de zoutvracht via de Volkeraksluizen met grote onzekerheden behept te zijn, immers de fluxen door genoemde doorsneden zijn erg groot én variabel én gebaseerd op puntmetingen. Anderzijds tonen de grafieken in genoemde nota regelmatige en begrijpelijke patronen in zoutflux door de sluizen welke nimmer een irreële tekenomkering vertonen of onbegrijpelijke uitschieters.

Onderstaande Tabel 6.1 toont de resultaten bij in gebruikname van luchtbellenschermen (bijna altijd ingeschakeld), lekkende ebdeuren en spuien via de spuisluizen. De vraagtekens in de kolom van schutcycli in Tabel 6.1 geven aan dat getallen over schutcycli ontbreken, de vraagtekens in de kolom van luchtbellenschermen geven aan dat deze weliswaar werkten maar met onbekend luchtdebiet. Het gemis aan informatie over luchtdebiet is ernstig omdat we nu genoodzaakt zijn de werking van de luchtbellenschermen, uitgedrukt in de doorlaatfractie  $\eta$  (Hoofdstuk 4 en 5), op de meetgegevens af te regelen. Overigens zal in onderdeel 6.3 blijken dat de doorlaatfractie ca. 0,5 (50%) bedraagt wat een te verwachten verhouding is gezien de mondelinge berichten over de ervaring met luchtbellenschermen, zie verder Hoofdstuk 4.

Tabel 6.1 Meting chloride/zouttransport door Volkeraksluizencomplex (RWS, 1983)

| jaar                            | kg/s zout | beroep & jacht sluis | schut cycli /week    | bellen scherm | lekkende ebdeuren m <sup>3</sup> /s | spui via schutsluis m <sup>3</sup> /s | spui via inlaatsluis m <sup>3</sup> /s |
|---------------------------------|-----------|----------------------|----------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 1969                            | 216       | 2b 0j                | ?                    | 0             | -                                   | 0                                     | 0                                      |
| 1970 < nov.                     | 216       | 2b 0j                | ?                    | 0             | -                                   | 0                                     | 0                                      |
| 1970 > 2 nov.                   | 126       | 2b 0j                | ?                    | Aan           | -                                   | 0                                     | 0                                      |
| 1971 < juli > april             | 108       | 2b 0j                | ?                    | Aan<br>Aan    | -                                   | 0<br>19.2                             | 0                                      |
| 1971 < juli                     | 32        | 2b 0j                | ?                    | Aan           | 10                                  | 19.2                                  | 0                                      |
| 1972                            | 32        | 2b 0j                | ?                    | Aan           | 10                                  | 19.6                                  | 0                                      |
| 1973 < mei                      | 32        | 2b 0j                | ?                    | Aan           | 10                                  | 14.7                                  | 0                                      |
| 1973 > mei                      | 72        | 2b 0j                | ?                    | Aan           | 0                                   | 14.7                                  | 0                                      |
| 1974                            | 79        | 2b 0j                | ?                    | Aan           | 0                                   | 14.2                                  | 0                                      |
| 1975                            | 65        | 2b 0j                | ?                    | Aan           | 0                                   | 15.4                                  | 0                                      |
| 1976 > sept.                    | 50        | 2b 0j                | ?                    | Aan           | 0<br>10                             | 12.9<br>0                             | 0                                      |
| 1977 < maart > jan.             | 45        | 3b 0j                | 210 (3b)             | Aan           | 11.9                                | 0<br>26.5                             | 0                                      |
| 1977 > maart > juni juli & aug. | 27        | 3b 0j<br>3b 1j       | 230 (3b)<br>120 (1j) | Aan           | 11.9                                | 26.5                                  | 0                                      |
| 1978 mei - nov                  | 40        |                      | 250 (3b)<br>120(1j)  | Aan           | 13.5                                | 25.6                                  | 0                                      |
| 1979 < dec mei - nov nov & dec  | 34        |                      | 230 (3b)<br>120 (1j) | Aan           | 17.9                                | 15.5                                  | 0<br>51                                |

In tabel: 3b 1j : 3 beroepssluisen en 1 jachtensluis.

Aan : luchtbellenscherm aan maar onbekend luchtdebiet

? : onbekend aantal schutcycli.

Na het sluiten van de Volkerak-Hollandsch Diep verbinding op 28 april 1969 en dus met het in werking treden van de Volkeraksluizen bedroeg het zouttransport ca. **216 kg zout/s**.

Na het inschakelen van (provisorische) luchtbellenschermen per 2 nov. 1970 reduceerde het zouttransport tot **108 - 126 kg zout/s**. Bijl. 3.2 (RWS, 1983) toont duidelijk de afname in zoutvracht na het inschakelen van de luchtbellenschermen per 2 nov. 1970. De operationele gegevens over de luchtbellenschermen (locatie en luchtdebieten) zijn helaas onbekend.

Volgens bijl. 3.10 en 3.11 (RWS, 1983) is in korte tijd (enkele dagen tot 1 week) in 1978 en 1979 het luchtbellenscherm uitgeschakeld, het effect is niet duidelijk merkbaar hoewel eind maart-begin april 1978 wel de zoutvracht naar ca. **50 kg zout/s** oploopt en weer terugvalt als de schermen weer in werking treden.

Naast het gebruik van de luchtbellenschermen werd per juli 1971 spuien via de kolken (zg. lekkende ebdeuren) toegepast die de zoutvracht verder tot **32 kg zout/s** reduceren.



Na mei 1973 werd het spuien via lekkende ebdeuren gestaakt wat de zoutvracht niet geheel terug bracht tot de oorspronkelijk vracht van vóór juli 1971 maar deze verhoogde na mei 1973 wel tot **65 - 80 kg zout/s**.

Vervolgens is er vanaf maart 1977 tot nov. 1979 het zg. 50 m<sup>3</sup>/s spuiprogramma ingezet waarmee het zouttransport reduceerde tot ca. **27 - 40 kg zout/s**. De afname in zouttransport na maart 1977 is goed zichtbaar in bijl. 3.9 (RWS, 1983). Kenmerkende jaargemiddelden zijn ca. 40-50 m<sup>3</sup>/s transport/verlies van water met ca. 100-150 mg/l chloride (0.18-0.27 ppt zout) uit het HD door het sluzencomplex naar het Volkerak.

Volgens bijl. 3.9 t/m 3.11 in (RWS, 1983) liep de zoetwatervracht naar het Volkerak januari. 1977 op van 10 m<sup>3</sup>/s tot ca. 40-50 m<sup>3</sup>/s.

### *Zoutgehalte Volkerak in periode 1969-1980*

Begeman (1982) presenteert chloridewaarden over de periode 1972-1978 gemeten in station Galathea ten zuiden van de Volkerak-sluzen, zie Figuur 6.1. Kenmerkende chloridewaarden zijn ca. 11 g Cl<sup>-</sup>/l oftewel ca. 20 ppt zout. De registraties van chloride in Galathea vertonen soms scherpe en kortdurende dalen naar enkele g Cl<sup>-</sup>/l wat mogelijk duidt op spuien van zoet water uit o.a. de Volkerak-sluzen of een hoge afvoer van de Brabantse rivier de Dintel en/of uit de Galathese sluis (oeverzijde Overflakkee). Voor het toetsen van het zoutvrachtmodel zullen we aan de Volkerak-zijde van het sluzencomplex 20 ppt zout veronderstellen voor de periode 1969-1980.



Figuur 6.1 Locatie meetstation Galathea voor chloridewaarden (Begeman, 1982).



### *Scheepvaart, uitwisselingsdebiet door schepen*

Tabellen en figuren van het laadvermogen en aantallen beroepsvaart en recreatievaart vanaf 1969 t/m 2007 zijn bekend (Verkeers- en vervoersgegevens 2006) maar nog onbekend blijft het aantal schutcycli/dag in de periode 1969-1977.

Wel kan voor de gehele periode 1969-1980 afgeleid worden wat de waterverplaatsing per tijdseenheid moet zijn geweest van alle schepen door alle werkende beroepssluizen en wat leidt tot de schatting van  $Q_{\text{schip}}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) in één schutrichting, zie onderstaande Tabel 6.2. We lichten dit als volgt toe.

Uit (Jongeling, 2007) volgt een omzetting van laadvermogen (ton) naar gemiddelde waterverplaatsing ( $\text{m}^3$ ). De waterverplaatsing ( $\text{m}^3$ ) van lege schepen bedraagt 28% van het laadvermogen (ton). De gemiddelde belading (lege en geladen schepen) bedraagt 44% zodat de gemiddelde waterverplaatsing ( $\text{m}^3$ ) gelijk is aan 72% van het laadvermogen (ton). Deze verhoudingsgetallen zijn gebruikt teneinde het laadvermogen om te zetten in een gemiddelde waterverplaatsing en met de aantallen schepen (twee vaarrichtingen) het equivalente uitwisselingsdebiet  $Q_{\text{schip}}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] voor één vaarrichting uit te rekenen, dat is de laatste kolom in Tabel 6.2 en dient als invoergrootheid voor het zoutvrachtmodel.

De voorlaatste kolom in Tabel 6.2 toont het afnemende aantal schepen per dag dat in één vaarrichting één kolk passeert. In recente jaren neemt het aantal passerende schepen aanmerkelijk af en gezien hun toenemend laadvermogen worden de schepen dus groter. De vraag is in hoeverre de diepgang van deze schepen ook toeneemt wat mogelijk strijdig wordt met één van de besproken maatregelen nl. het verhogen van de drempels bij de sluisdeuren en eventueel het ondieper maken van de voorhavens?

Tabel 6.2 Waterverplaatsing/s  $Q_{\text{schip}}$  van schepen via beschikbare kolken, per vaarrichting

| Jaar            | beroepsvaart in 2-vaarrichtingen aantal | gemiddeld laadvermogen (ton) | beroepsvaart in 1-vaarrichting aantal/dag/kolk | $Q_{\text{schip}}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) betrokken op 1-vaarrichting |
|-----------------|---|------------------------------|--|--|
| 1969 (2 kolken) | 163.268                                 | 702                          | 112  | 1,31   |
| 1970 (2 kolken) | 152.074                                 | 711                          | 104  | 1,23   |
| 1971 (2 kolken) | 156.046                                 | 731                          | 107  | 1,30   |
| 1972 (2 kolken) | 135.931                                 | 665                          | 93   | 1,13   |
| 1973 (2 kolken) | 148.894                                 | 733                          | 102  | 1,25   |
| 1974 (2 kolken) | 151.388                                 | 718                          | 104  | 1,27   |
| 1975 (2 kolken) | 128.569                                 | 749                          | 88   | 1,10   |
| 1976 (2 kolken) | 141.666                                 | 807                          | 97   | 1,31   |
| 1977 (3 kolken) | 139.021                                 | 802                          | 63   | 1,27   |
| 1978 (3 kolken) | 143.717                                 | 843                          | 66   | 1,38   |
| 1979 (3 kolken) | 130.516                                 | 865                          | 60   | 1,29   |
| 1980 (3 kolken) | 129.862                                 | 877                          | 59   | 1,30   |
| 2007 (3 kolken) | 112.072                                 | 2093                         | 51   | 2,68   |
| 2020            | 113.880 (*)                             | 2440                         | 52   | 3,17   |

(\*) Hierbij gelden 20 cycli per dag met tweerichtingsverkeer en 2,6 schepen per kolk, volgens (Jongeling, 2007) gebaseerd op RWS prognoses.

De genoemde tabellen geven voor 1979 ca. 33.869 passerende recreatievaartuigen dus jaargemiddeld 92,8 recreatieschepen/dag en in de periode mei-november 120 schutcycli/week voor de recreatievaart. Dit aantal schutcycli en het aantal schepen/dag lijkt wel overeen te stemmen. Wanneer de gemiddelde waterverplaatsing per recreatieschip 3 - 5 ton bedraagt dan is de verwaarloosbare bijdrage van recreatievaart tot  $Q_{\text{schip}}$  ca. 0,002 m<sup>3</sup>/s.

Uiteraard blijft het zouttransport door het uitwisselingsdebiet via de jachtensluis wel relevant en wordt dit transport in de berekening meegenomen door bijtelling van kolkbreedte en -volume van de jachtensluis, het kolkvolume van de jachtensluis bedraagt ca. 25% van elk van de drie beroepsluizen.

Ondanks enige onzekerheid over de wijze waarop in- en uitvarende schepen het water tussen kolk en voorhaven uitwisselen zullen we  $Q_{\text{schip}}$  bij elk uitwisselingsdebiet tussen kolk en voorhaven en tussen voorhaven en waterbekkens optellen. Wel moet deze enigszins onzekere rol van  $Q_{\text{schip}}$  worden vergeleken met het kenmerkende grotere uitwisselingsdebiet in de kolken van orde-grootte 10-15 m<sup>3</sup>/s zoals volgt uit schattingen met vgl. (B.1.4) in Appendix B.

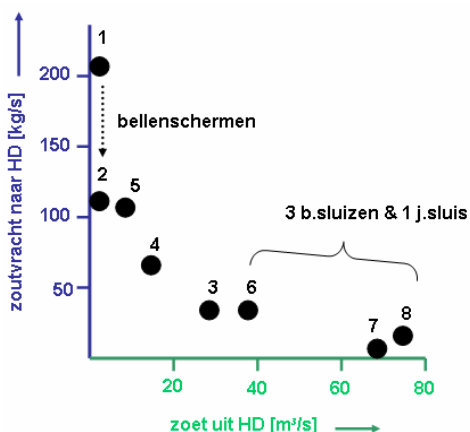
### Invloed getij op zoutvracht

Ondanks diverse sluitingen in de Grevelingen en Haringvliet heerste er in de periode 1969-1980 in het Volkerak een aanmerkelijke getijslag van 2 - 4m. Berekeningen met verschillende waterstandsverschillen tussen HD en Volkerak tonen dat de zoutvracht nagenoeg gelijk is aan die volgens dezelfde getijgemiddelde waterstand; de afwijking tussen getijgemiddelde zoutvracht en gemiddelde van intragetij-zoutvracht is geringer dan tussen model en uit metingen afgeleide zoutvracht.

Kortom, de zoutvracht wordt berekend met een getijgemiddeld waterstandsverschil tussen HD en VZM.

## 6.3 Toetsing zoutvrachtmodel aan zoutvrachten 1969-1980

Voorgaande informatie vatten we samen tot Figuur 6.2 dat een consistente afname in zoutvracht door de Volkeraksluizen vertoont door inschakeling van luchtbellenschermen en met toenemend spuidebiet aan zoet water uit het HD.



Figuur 6.2 Afname zoutvracht via de Volkeraksluizen naar Hollandsch Diep (HD) in de periode 1969-1980 door luchtbellenschermen en door spuien van zoet water. De getallen bij de punten refereren naar testcases van Tabel 6.3.

Voor het toetsen van het zoutvrachtmodel zijn de vele variaties in operationele omstandigheden van de Volkeraksluizen (Tabel 6.1 en 6.2) geordend tot acht cases volgens onderstaand Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Overzicht testcases (periode 1969-1980) en laatste kolom modelresultaten

| Case | Zout VZM [ppt] | schut-cycli per dag per sluis | Qschip [m <sup>3</sup> /s] | *NBK beroep [-] | *NBJ jacht [-] | Etta bel. scherm [-] | Qlebd (ebdeur) [m <sup>3</sup> /s] | Qspui (schutsluis) [m <sup>3</sup> /s] | Sprong monding VZM-haven [-] | Zout vracht meting [kg/s] | Zout Vracht Model [kg/s] |
|------|----------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------|----------------|----------------------|------------------------------------|--|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1    | 20             | 10                            | 1,31                       | 2               | 0              | 1,0                  | 0                                  | 0                                      | 1.0                          | 216                       | 179                      |
| 2    | 20             | 10                            | 1,23                       | 2               | 0              | 0,5                  | 0                                  | 0                                      | 1.0                          | 108                       | 79                       |
| 3    | 20             | 10                            | 1,13                       | 2               | 0              | 0,5                  | 10                                 | 19,4                                   | 0.7                          | 32                        | 23                       |
| 4    | 20             | 10                            | 1,20                       | 2               | 0              | 0,5                  | 0                                  | 15,0                                   | 0.7                          | 70                        | 55                       |
| 5    | 20             | 10                            | 1,30                       | 2               | 0              | 0,5                  | 10                                 | 0                                      | 1.0                          | 102→42                    | 40                       |
| 6    | 20             | 11.9                          | 1,32                       | 3               | 1              | 0,5                  | 13,5                               | 25,6                                   | 0.7                          | 27 - 40                   | 49                       |
| 7    | 20             | 11.9                          | 1,29                       | 3               | 1              | 0,5                  | 20,5                               | 49,5                                   | 0.7                          | 0 - 10                    | 21                       |
| 8    | 20             | 11.9                          | 1,29                       | 3               | 1              | 0,5                  | 19,5                               | 56,3                                   | 0.7                          | 10 - 40                   | 22                       |

\* NBK= aantal beroepssluizen

\* NBJ= aantal jachtensluis

De twee laatste kolommen in Tabel 6.3 vergelijken de wekelijks uit veldmetingen afgeleide zoutvrachten met die volgens het zoutvrachtmodel. Hierbij is Tabel 6.2 gebruikt voor het uitwisselingsdebiet door schepen. Echter het aantal schutcycli/dag is voorafgaand aan 1977 (t/m Case 5) niet bekend maar lager geschat dan in de jaren 1977-1980 (Cases 6-8).

Voor Case 1, zonder zoutlekbeperkende middelen, wordt het kolkwater volledig met het water uit de relevante voorhavens uitgewisseld. Het blijkt dat alleen in deze Case 1 de statische waterverplaatsing van de schepen een rol speelt, zie vgl. (B.1.10b), welke de uitwisseling van zout-zoet van 209 kg/s beperkt tot de 179 kg/s uit de tabel. In deze en overige cases stellen we het maximaal uitwisselbaar watervolume gelijk aan het kolkvolume. In alle overige cases wordt deze limiet niet bereikt waardoor het scheepsvolume in de kolk geen invloed op de resultaten heeft. Echter, Jongeling (2007) nam aan 70% vulling door uitwisseling wat wel uit metingen in een sluis (Directie Noord-Holland, 1972) bevestigd lijkt te worden. Saliniteitsmetingen in de Volkeraksluizen ontbreken om voorgaande calibratie (100% vulling) te controleren.

Voor Case 2 is het uitwisselingsdebiet door luchtbellenschermen tot 50% gereduceerd (doorlaatfractie  $\eta=0,5$ ) en dat stuurt het modelresultaat voor Case 2. Door het ontbreken van luchtdebieten van de luchtbellenschermen is voor deze 50% reductie helaas geen objectieve schatting mogelijk. Echter 50% is een te verwachten beperking van de uitwisselingsdebieten door luchtbellenschermen zoals die destijds leken te functioneren.

In (RWS, 1970) wordt vermeld dat eind 1976 de schutsluis van de Volkeraksluizen sterk lekte waardoor van sept. tot dec. 1976 tijdens vloedperioden de zoutvracht sterk opliep. Dit slaat op de condities waarop Case 5 is gebaseerd en de grote zoutvracht van 102 kg zout/s gemiddeld over sept.-dec. 1976. Na reparatie van de lekkende schutsluis (medio dec. 1976) viel de zoutvracht terug tot de in Tabel 2 genoemde 42 kg zout/s. Deze laatste zoutvracht kunnen we als maatgevend voor de condities van Case 5 aannemen.

*Het is een expert-schatting om de verhouding spronglaaghoogte/waterdiepte bij de monding van de VZM-voorhaven tot 0,7 te beperken zodra aanmerkelijk meer dan 10 m<sup>3</sup>/s zoet water wordt gespuid.*

Gedetailleerde 3D simulaties kunnen deze aanname over wel/geen stratificatie bij de monding van de VZM-voorhaven afhankelijk van het spuidebiet toetsen.

Tabel 2 toont dat het zoutvrachtmodel de sterke en uiteenlopende variaties in maatregelen om de zoutvracht te beperken goed kan volgen en de afwijkingen zijn ruwweg gelijk aan de onzekerheden in de uit veldmetingen afgeleide zoutvrachten.

## 6.4 Conclusies

We concluderen dat het zoutvrachtmodel de invloed van maatregelen op de zoutvracht goed volgt en voor het merendeel van de gevallen zelfs in absolute zin correcte zoutvrachten waarbij is aangenomen dat geldt:

- 100% vullingsgraad en/bij 25 minuten open-tijd van de sluisdeuren ;
- 50% doorlaatfractie van luchtbellenschermen en
- de schatting van de hoogte van de spronglaag door stratificatie in de monding van de VZM-voorhaven bij voldoende hoge spuidebieten.

In het volgende hoofdstuk zullen we het zoutvrachtmodel toepassen voor de vraagstelling of een zoutvracht van maximaal 60 kg zout/s haalbaar is voor een tot 20ppt verzilt Volkerak-Zoommeer met prognose voor scheepsvaart in 2020. Het zoutvrachtmodel zullen we op twee manieren toepassen nl. in absolute zin maar ook door vanuit een gemeten situatie variaties aan te brengen en hun effecten in relatieve zin te beschouwen.

## 7 Maatregelen tegen zoutvracht bij verzilting van het VZM

### 7.1 Overwegingen

Rekening houdende met de in Hoofdstuk 6 getoonde kwaliteit van ons zoutvrachtmodel worden in dit hoofdstuk diverse maatregelen besproken teneinde de zoutvracht door de Volkeraksluizen te beperken. Naar aanleiding van diverse discussies tijdens deze studie geven we hierna een overzicht van de maatregelen om de zoutreductie redelijkerwijs te beperken, waarbij we grote ingrepen zoals het verbouwen van de sluizen *a priori* uitsluiten. De reductie in zoutvracht door de overige maatregelen worden in het volgende onderdeel 7.2 met het zoutvrachtmodel in absolute zin geschat en in onderdeel 7.3 als variaties op de metingen van de zoutvrachten in 1969-1980 (Tabel 6.2 en 6.3).

#### 7.1.1 Voorwaarden zoutvracht en zoetwaterverlies

Ons streven is om de zoutvracht tot maximaal 60 kg zout/s te beperken bij een maximaal verlies van 25 m<sup>3</sup>/s zoet water uit het Hollandsch Diep (HD) bij verondersteld zoutgehalte van 20 ppt van het Volkerak-Zoommeer (VZM).

De zoutvrachten van 30-40 kg zout/s met 3 beroepsluizen en een jachtensluis zijn in 1977-1980 bereikt met 40 m<sup>3</sup>/s verlies aan zoet water, zie Tabel 6.1. Deze zoutvrachten onder destijds heersende condities suggereren dat tenminste een herstel van eerder toegepaste ingrepen nodig is om ook in de toekomstige situatie de zoutvracht tot onder 60 kg zout/s te brengen.

Zowel het aantal schutcyli/dag als de waterverplaatsing door scheepvaart wordt tot 2020 opgevoerd wat de zoutvracht zal vergroten t.o.v. de situatie in de periode 1977-1980. De zoutconcentratie in het voorgestelde verzilte VZM zal gelijk blijven aan de situatie 1969-1980 volgens meetstation Galathea (Begeman, 1982), zie ook onderdeel 6.2.

#### 7.1.2 Waterverplaatsing door scheepvaart in 2020

Voor de toekomstige situatie schatte Jongeling (2007) in 20 schutcycli per dag met 4500 m<sup>3</sup> waterverplaatsing van schepen per kolk wat voor 3 kolken geeft  $Q_{\text{schip}} = 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$  in één richting (zie Tabel 6.2).

Uit (Verkeers- en vervoersgegevens 2006) blijkt dat per beroepskolk van de Volkerak-sluizen er ca. 15000 schuttingen naar zoute en zoete zijden per jaar worden gemaakt en dus  $15000/(2 \cdot 365) = 20,5$  schutcycli/dag.

Samen met de prognose van de scheepvaart in 2020 stellen we dat er in elke beroepssluis 20 schutcycli/dag plaats vinden wat de maximale capaciteit van de sluizen zal naderen.

#### 7.1.3 Open-tijd kolken

Na overleg met ir. Jongeling (Deltares) hanteren we 23 minuten open-tijd voor de kolken (sluisdeuren geopend) als een gemiddelde van zijn schatting van 20-25 minuten.

#### 7.1.4 Beroepskolk in twee delen

Met uitzondering van rustige perioden wordt gezien de hoge schutcycli en de grote lengte van schepen het opdelen van een kolk in twee kolken met een extra sluisdeur niet als veelvuldig toepasbare optie gezien. We nemen altijd de totale kolk lengte van een kolk.

#### 7.1.5 Operationele condities luchtbellenschermen

Aanvankelijk werden luchtbellenschermen in de monding van de voorhavens nog als optie beschouwd (Uittenbogaard, 2008). Deze mogelijkheid is weliswaar in het zoutvrachtmodel opgenomen maar zal niet bij de eerste opties worden overwogen vanwege de kwetsbaarheid van deze schermen en hun grote lengte nl. 200m brede monding van een voorhaven.

Blijft over luchtbellenschermen bij de sluisdeuren aan kolkzijde en eventueel een luchtbellenscherm halverwege de kolk lengte.

Ten opzichte van het verleden kan de kwaliteit van deze luchtbellenschermen worden verbeterd door gebruik te maken van een injectiesysteem dat een gelijkmatig verdeeld en gegeven luchtdebiet garandeert.

Opgemerkt moet worden dat een grotere reductie in uitwisselingsdebiet leidt tot een groter dichtheidsverschil over het luchtbellenscherm in het sluizencomplex wat nadelig is voor de effectiviteit van het luchtbellenscherm: de reductie zal in de praktijk met aanpassende zoutconcentraties in de kolken minder zijn dan uit experimenten wanneer deze uitgevoerd worden met onaangepaste initiële dichtheidsverschillen.

Oriënterende simulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010) en onze inschatting tonen dat verticale injectie van zoet water aan de meest zoute zijde van een luchtbellenscherm of luchtgordijn de zoutindringing sterk reduceert doordat:

1. de verticale zoetwaterstraal de penetratie van de zouttong door de teen van het scherm belemmert én
2. de menging van zoet water via het luchtbellenscherm naar de kolk een grotere uitgaande stroming aan het oppervlak van de kolk geeft én
3. de menging van zoeter water met kolkwater.

We nemen aan dat de zoetwaterinjectie vanuit de HD-voorhaven gebeurt wat tevens de mogelijkheid biedt een nog te overwegen zoutvang in de HD-voorhaven te plaatsen. Het aldus onttrokken water is niet geheel zoet maar zal enkele ppt zout bevatten (zie  $S_{HH}$  in Figuur 5.2), we noemen deze stroming in het vervolg nog steeds zoetwaterinjectie.

Overigens het gebruik van watergordijnen wordt reeds in par. 4.3 van (Abraham e.a., 1973) genoemd en enig voor-onderzoek met gebruikmaking van zout water is gerapporteerd in (WL-M799, 1963).

Uit experimenten in sluizen bij IJmuiden, o.a. (Abraham & V.d. Burgh, 1962), blijkt dat een minimale doorlaatfractie van 20% bereikt wordt in de ondiepste kolk van 7,5m en bij gegeven maximaal luchtdebiet. Bij gegeven maximaal luchtdebiet en 10m waterdiepte neemt de minimale doorlaatfractie toe tot 25% en tot 40% bij 15m waterdiepte.

#### 7.1.6 Zoetwaterinjectie bij luchtbellenscherm achter VZM-sluisdeur

De zoetwaterinjectie vóór het luchtbellenscherm bij de geopende VZM-sluisdeuren zal een verlies van zoet water geven naar het VZM, zie punt 2 in 7.1.5.

Tevens moet onderzoek aantonen of de injectie van zoet water nodig is en of dit verlies aan zoet water uit HD kan worden vermeden door de (re-)circulatie van brak kolkwater; merk op dat dan de derde bijdrage tot reductie in zoutvracht niet van toepassing zal zijn. Overigens dit brakwaterdebiet is begrensd omdat anders de kolk te snel wordt leeg gezogen.

#### 7.1.7 Zoetwaterinjectie bij luchtbellenscherm achter HD-sluisdeur

In het geval van zoetwaterinjectie vóór het luchtbellenscherm bij de geopende HD-sluisdeuren naar het HD zal deze injectie extra uitstroming van de kolk naar het HD geven, zie punt 2 in 7.1.5. Dit is geen verlies van zoet water, anderzijds zal het mechanisme genoemd onder punt 2 in 7.1.5 een verhoogde druk op de uitstroming door de teen van het luchtbellenscherm leveren wat het gunstige effect van de injectie op het uitwisselingsdebiet tenminste ten dele teniet zal doen. Tevens zorgt deze extra uitwisseling voor mogelijk meer zouttransport vanuit de kolk naar de HD-voorhaven.

Deze tegengestelde effecten van zoetwaterinjectie bij het luchtbellenscherm aan de HD-sluisdeur moeten door onderzoek worden afgewogen.

Desalniettemin kan het gebruik van een brakwaterstraal in de kolk en geplaatst aan de zoute zijde van de luchtbellenschermen bij de HD-sluisdeuren de efficiëntie van deze schermen verhogen. Daartoe kan brakwater halverwege de kolk lengte en op drempelhoogte uit de kolk worden onttrokken zodat een interne circulatie in de kolk (geopend naar HD-zijde) ontstaat zonder het nadelige effect op te roepen van een extra uittrekkend debiet zoals bij zoetwaterinjectie vanuit de HD-voorhaven.

#### 7.1.8 Invloed goed werkend luchtbellenscherm op kolkvulling en stratificatie

De reductie van het oorspronkelijke uitwisselingsdebiet door een goed werkend luchtbellenscherm gedurende de openingstijd van een kolk kan leiden tot een uitgewisseld volume dat kleiner is dan het uitwisselbare deel van het kolkvolume. In dit geval zal er een spronglaag in de kolk ontstaan die beperkend is voor het uitwisselingsdebiet bij de daaropvolgende schutfase wanneer de sluisdeur aan de andere zijde wordt geopend. Met andere woorden, de spronglaag ontstaat door beperkte uitwisseling tijdens het schutten naar VZM reduceert het uitwisselingsdebiet in de daarop volgende fase bij schutten naar het HD. Dergelijke reducties van uitwisselingsstromen in de kolk geven lagere troskrachten van daarin afgemeerde schepen, zie (Vrijburcht, 1989) voor experimenten in de jachtensluis van het Volkeraksluizencomplex.

De hoogte van de spronglaag boven de sluisdrempel is minimaal gelijk aan de verhouding tussen uitgewisseld volume en het redelijk maximaal uitwisselbare kolkvolume welke door calibratie gelijk is aan het kolkvolume boven de drempelhoogte. Uiteraard zal door interne menging en menging van schepen de spronglaag ondieper komen te liggen d.w.z. “ergens” tussen de ideale spronglaaghoogte en het wateroppervlak. De invloed van een spronglaag op het uitwisselingsdebiet is wiskundig afgeleid en getoetst, zie (Shin e.a., 2004) en deze invloed is in het zoutvrachtmodel opgenomen.

We hanteren een vaste initiële spronglaaghoogte (D/H, zie Appendix B) van 1,0 bij het begin van de uitwisseling tussen kolk en VZM-voorhaven vanwege de uitwisselingsprocessen tijdens het vullen van de kolk met het HD. Deze waarden (100% maximale vulling en 1.0 voor relatieve spronglaaghoogte) zijn gekozen op basis van de toetsing van het zoutvrachtmodel met waarnemingen in 1969-1980.

#### 7.1.9 Spuidebiet en/of lekkende ebdeuren en zoetwaterinjectie naast schermen

De maximale zoetwatervracht vanuit HD naar VZM is gesteld op 25 m<sup>3</sup>/s, zie 7.1.1. Uit de toetsing 1969-1980 blijkt geen opvallend verschil tussen spuien via lekkende ebdeuren dan wel via een spuisluis gelegen naast en buiten de voorhavens.

Bij het combineren van zoetwaterinjectie met luchtbellenschermen moet een deel van de toegestane 25 m<sup>3</sup>/s zoetwatervracht gebruikt worden en dit geeft een derde variant nl. zoetwaterinjectie bij een luchtbellenscherm gedurende de periode dat de sluisdeuren open staan.

Stromingssimulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010) onderbouwen de verwachting dat een deel van de zoetwaterinjectie dóór het luchtbellenscherm bij de VZM-sluisdeur naar de kolk wordt gemengd. We nemen aan dat dit ca. 50% van het debiet van de zoetwaterinjectie zal bedragen. Deze flux wordt in het zoutvrachtmodel als een zoetwaterbron in de kolk gemodelleerd, zie Hoofdstuk 5. De overige 50% van het debiet van de zoetwaterinjectie zal door het luchtbellenscherm worden meegenomen en naar de VZM-voorhaven stromen: in het zoutvrachtmodel modelleren we deze laatste aftakking als een zoetwaterbron in de VZM-voorhaven.

Merk op dat 0,5m verandering in waterstand in de drie beroepssluisen van elk 24m breed en 350m lengte gedurende 8,4 min. overeenkomt met 25 m<sup>3</sup>/s. Met andere woorden, de gehanteerde zoetwaterdebieten zijn weliswaar groot maar beperkt in verhouding tot de momentane nivelleringsdebieten naar de kolken.

Een 0,5m hogere waterstand in HD t.o.v. VZM en 20 schutcycli/dag geeft een daggemiddeld nivelleringsdebiet van 3,2 m<sup>3</sup>/s zoet water uit het HD. Dit nivelleringsdebiet blijkt over een te komen met het uitwisselingsdebiet door de waterverplaatsing van de scheepvaart.

#### 7.1.10 Verhoogde drempels voor sluisdeuren

Uit experimenten volgt dat het maximale watervolume wat door de uitwisseling wordt verplaatst ca. 70% van het netto kolkvolume bedraagt, zie de referenties in (Jongeling, 2007). Het netto kolkvolume is gelijk aan het kolkvolume boven de drempels bij de sluisdeuren.

Door het ontbreken van een grote getijslag kunnen de drempels in alle kolken hoger geplaatst worden. Deze drempels verminderen het netto kolkvolume (boven de drempel) dat voor uitwisseling in aanmerking komt. Jongeling (2007) noemt een verhoging van de vaste drempel aan HD-zijde met 1,3m als maximum, daarnaast kan aan een beweegbare drempel worden gedacht met een extra hoogte van 1,3m. Overigens, de grootste binnenvaart-containerschepen steken maximaal 4m diep. Met een kielspeling van 0,75m en laagste waterstand van -0,2m NAP geeft dit -4,95m NAP drempeldiepte terwijl deze thans 1,55m dieper ligt nl. -6,5m NAP.

De gunstige mogelijkheid bestaat dat verhoogde drempels kunnen worden gecombineerd met de nieuwe installatie van luchtbellenschermen met zoetwaterinjectie.

#### 7.1.11 Ondiepere voorhavens

Analoog aan het verhogen van de drempels bij de sluisdeuren zullen ondiepere voorhavens eveneens een reductie in uitwisselingsdebiet en zoutvracht geven.



### 7.1.12 Het Hollandsch Diep als natuurlijke en tijdelijke zoutvang

In de paragraaf "*Het Hollandsch Diep als natuurlijke zoutopvang van de Volkeraksluizen*" van (RWS, 1983) wordt besproken dat in diepe geulen o.a. bij de Moerdijkbruggen en in scheepvaartgeulen in 1970-1971 een hoger zoutgehalte is gemeten. Bij voldoende sterke rivierafvoer werd het zout uit deze geulen verwijderd door pontons die op de diepste locaties lucht inblazen en daarmee het zout hoger in de waterkolom brachten waarna dit met het spuidebiet door de Haringvlietdam naar zee werd afgevoerd. Momenteel is onbekend in hoeverre deze oplossingsrichting nog van toepassing vanwege de route van het opgewoelde zoute water langs innamepunten van zoet water naar de Haringvlietdam. Dergelijke mogelijkheden zullen onderzocht worden met een 3D stroming- en transportmodel van het Noordelijk Deltabekken.

In het volgende onderdeel onderzoeken we de invloed van deze maatregelen op de zoutvracht door de Volkeraksluizen bij gegeven prognose van de scheepvaart in 2020.

## 7.2 Onderzoek maatregelen beperking zoutvracht in 2020 bij verzilt Volkerak-Zoommeer

In Hoofdstuk 5 presenteerden we de invloed van doorlaatfracties van luchtbellenschermen op de zoutvrachtfractie d.w.z. de verhouding tussen de zoutvracht mét en zónder deze schermen. In Hoofdstuk 5 concludeerden we dat een reductie van de verwachte 480 kg zout/s (Case 10 in Tabel 7.1) naar hooguit 60 kg zout/s, een zoutvrachtfractie van 12%, niet haalbaar is met doorlaatfracties van minimaal 25%. Er zijn meer zoutlekbepurende middelen nodig zoals die in het vorige onderdeel ter sprake kwamen.

Onderstaand en Tabel 7.1 toont welke combinaties van ingrepen nodig zijn om de zoutvracht door het Volkeraksluizencomplex tot onder 60 kg zout/s te brengen bij maximaal 25 m<sup>3</sup>/s verlies aan zoet water uit het HD. Zoals eerder beschreven stellen we de doorlaatfracties van het zouttransport door luchtbellenschermen in en we kiezen daartoe een bereik dat o.i. met een nieuw ontwerp van luchtbellenschermen en ev. ondersteund met waterschermen mogelijk zou kunnen zijn.

Uitgaande van de hierboven beschreven prognose van scheepvaart in 2020, 20 ppt zoutconcentratie in VZM en maximaal 25 m<sup>3</sup>/s zoetwater transport uit HD naar VZM zijn onderstaande variaties doorgerekend waaraan is toegevoegd het 3m ondieper maken van de VZM- en HD- voorhavens tot de eventuele diepte (4,5m) van de 2m verhoogde drempels bij de sluisdeuren van de beroepssluisen.

Gezien (Jongeling, 2007) zijn deze variaties in drempelhoogte en bodemligging te drastisch maar bieden de mogelijkheid van interpolatie naar mildere varianten. Voor dat laatste vergelijk Cases 20-22 met de uitgangssituatie Case 10 uitgaande van de Volkeraksluizen zoals ze thans werken, zie onderstaande Tabel 7.1. Evenals bij Case 1 in Tabel 6.3 beperkt ook in Case 10 de statische waterverplaatsing van de schepen in de kolk de uitgewisselde zoutmassa omdat zonder zoutlekbepurende middelen de inhoud van de kolk volledig met het water uit de relevante voorhavens wordt uitgewisseld. Uit de validatie met de analytische oplossing (Hoofdstuk 5) bleek een kleine verandering in de instelling van het zoutvrachtmodel nodig. Deze aanpassing betreft dat wanneer er met één kolk wordt gewerkt, in plaats van met twee deelkolken, het antwoord nauwkeuriger is als het gehele kolkvolume in de massabalans (B.4.8) gebruikt wordt. Deze correctie verandert de zoutvracht van 450 kg/s in eerdere concepten van dit rapport naar ca. 480 kg/s voor Case 10 in Tabel 7.1.

Tabel 7.1 Maatregelen voor reductie zoutvracht Volkeraksluizen met prognose scheepvaart 2020 (Tabel 6.2).

| Case      | doorlaatfractie<br>luchtbellen/<br>waterschermb<br>VZM & HD<br><br>[%] | lekkende<br>ebdeuren<br><br>[m <sup>3</sup> /s] | spuidebiet<br><br>[m <sup>3</sup> /s] | zoet-<br>waterjet<br>VZM-<br>deur<br><br>[m <sup>3</sup> /s] | diepte<br>drempels<br>*B & J<br>sluizen<br><br>[m] | diepte<br>VZM&HD<br>Voorhaven<br><br>[m] | zout-<br>vracht<br><br>[kgz/s] |
|-----------|--|---|---------------------------------------|--|--|--|--------------------------------|
| <b>10</b> | <b>100 &amp; 100</b>   | <b>0</b>  | <b>0</b>                              | <b>0</b>   | <b>6,5 &amp; 6,25</b>                              | <b>7,5 &amp; 7,5</b>                     | <b>480</b>                     |
| 11        | 50 & 100   | 0   | 0                                     | 0  | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 306                            |
| 12        | 100 & 50   | 0   | 0                                     | 0  | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 309                            |
| 13        | 50 & 50  | 0   | 0                                     | 0  | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 212                            |
| 14        | 50 & 100   | 25  | 0                                     | 0  | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 174                            |
| 15        | 50 & 50  | 25  | 0                                     | 0  | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 92                             |
| 16        | 50 & 50  | 0   | 25                                    | 0  | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 138                            |
| 17        | 50 & 50  | 0   | 0                                     | 25   | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 92                             |
| 18        | 25 & 50  | 0   | 12,5                                  | 12,5   | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 69                             |
| <b>19</b> | <b>25 &amp; 50</b>   | <b>12,5</b>                                     | <b>6,25</b>                           | <b>6,25</b>  | <b>6,5 &amp; 6,25</b>                              | <b>7,5 &amp; 7,5</b>                     | <b>60</b>                      |
| <b>20</b> | <b>25 &amp; 25</b>   | <b>0</b>  | <b>12,5</b>                           | <b>12,5</b>  | <b>6,5 &amp; 6,25</b>                              | <b>7,5 &amp; 7,5</b>                     | <b>44</b>                      |
| <b>21</b> | <b>25 &amp; 25</b>   | <b>12,5</b>                                     | <b>6,25</b>                           | <b>6,25</b>  | <b>6,5 &amp; 6,25</b>                              | <b>7,5 &amp; 7,5</b>                     | <b>37</b>                      |
| 22        | 100 & 100  | 0   | 0                                     | 0  | 6,5 & 6,25   | 4,5 & 4,5                                | 361                            |
| 23        | 100 & 100  | 0   | 0                                     | 0  | 4,5 & 4,25   | 7,5 & 7,5                                | 312                            |
| 24        | 100 & 100  | 0   | 0                                     | 0  | 4,5 & 4,25   | 4,5 & 4,5                                | 251                            |
| <b>25</b> | <b>25 &amp; 50</b>   | <b>12,5</b>                                     | <b>6,25</b>                           | <b>6,25</b>  | <b>4,5 &amp; 4,25</b>                              | <b>4,5 &amp; 4,5</b>                     | <b>27</b>                      |
| <b>26</b> | <b>25 &amp; 50</b>   | <b>12,5</b>                                     | <b>6,25</b>                           | <b>6,25</b>  | <b>5,0 &amp; 4,75</b>                              | <b>7,5 &amp; 7,5</b>                     | <b>48</b>                      |
| 27        | 25 & 25  | 0   | 0                                     | 0  | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 106                            |
| 28        | 15 & 15  | 0   | 0                                     | 0  | 6,5 & 6,25   | 7,5 & 7,5                                | 69                             |
| <b>29</b> | <b>25 &amp; 25</b>   | <b>12,5</b>                                     | <b>0</b>                              | <b>0</b>   | <b>6,5 &amp; 6,25</b>                              | <b>7,5 &amp; 7,5</b>                     | <b>59</b>                      |

\*Beroepssluizen (B) en jachtensluis (J)

De volgorde waarin de maatregelen worden genomen of hun onderlinge afhankelijkheid wordt in Tabel 7.1 gedemonstreerd. Uit Cases 11 en 12 blijkt geen onderscheid in het effect van één luchtbellenscherm aan VZM-zijde of aan HZ-zijde. De toevoeging van een tweede luchtbellenscherm met 50% doorlaatfractie aan één van 50% vermindert de zoutvracht (Case 13) met 32% en niet met 50% ; in Hoofdstuk 5 bespreken we deze verminderde bijdragen van een tweede luchtbellenscherm. Het is zeker effectief om een zoetwaterdebiet via de methode van lekkende ebdeuren toe te passen (Cases 14 en 15).

Spuien van HD-voorhaven water via een niet-werkende schutsluis lijkt volgens het zoutvrachtmodel minder effectief dan via lekkende ebdeuren (Case 15 en 16) hoewel dit onderscheid niet uit metingen blijkt. Deze methode van zoetwaterspuien is eigenlijk ook niet meer mogelijk gezien de zware scheepvaartbelasting met 20 schutcycli/dag.

Spuien van water uit de HD-voorhaven in de kolk (in Tabel 3 als zoetwaterinjectie opgenomen) lijkt even effectief als spuien met de methode van lekkende ebdeuren (Case 15 en 17).

Het combineren van de zoetwaterinjectie met een luchtbellenscherm is zeer effectief, hierbij aannemende dat dan het uitwisselingsdebiet tot 25% wordt beperkt (Case 18). Merk op dat deze zoetwaterinjectie 50-50% verdeeld is als bron in de kolk én bron in de VZM-voorhaven.

Marginaal beter lijkt de zoetwaterinjectie bij de luchtbellenschermen (VZM-sluisdeuren) t.o.v. Case 18 te halveren en het restant van de toelaatbare 25 m<sup>3</sup>/s via de procedure van lekkende ebdeuren (Case 19) te spuien.

Het verbeteren van de werking van de luchtbellenschermen aan de HD-sluisdeuren b.v. door injectie/circulatie van brakwater uit de kolken naast deze schermen (Cases 20 en 21) geeft lagere zoutvrachten dan in Cases 18 en 19.

In verhouding tot Case 10 tonen Cases 22-24 met 2m verhoogde drempels en/of 3m ondiepere voorhavens de reducties in zoutvrachten.

Het effect van drempels (Cases 25 en 26) bij sluisdeuren en eventueel ondiepere voorhavens of drempels in de voorhavens op de reductie in zoutvracht t.o.v. Cases 18 en 19 is nog steeds aanmerkelijk wanneer ook luchtbellenschermen goed werken. Of de gekozen diepten haalbaar zijn in relatie tot eisen voor de scheepvaart zal onderwerp van discussie zijn; de lezer kan via interpolatie tussen Cases 18-25 en 19-26 wel een indruk krijgen wat geringere drempelhoogte e.d. aan zoutvracht leveren. Gezien (Jongeling, 2007) lijkt Case 26 wel de reëel haalbare reductie in zoutvracht te tonen door beperkte verhoging van drempels bij sluisdeuren naast alle andere maatregelen in Case 18.

Met Cases 27 en 28 tonen we nogmaals dat de inzet van alleen zeer goed werkende luchtbellenschermen, zelfs met zeer lage en gelijk doorlaatfracties van 15%, onvoldoende zijn. Een combinatie van zoutlekbeperkende maatregelen is dus een vereiste voor het gestelde doel van maximaal 60 kg zout/s.

Mogelijk biedt de laatste Case 29 wel de meeste vrijheid voor diepgang wanneer vertrouwd kan worden op de kleine doorlaatfracties van 25% van luchtbellen- en/of waterschermen aan beide kolkeinden en het gebruik van de helft (12,5 m<sup>3</sup>/s) van maximaal toelaatbare zoetwater verbruik via de methode van lekkende ebdeuren. Anderzijds vergt de methode van lekkende ebdeuren langere nivelleringsstijden en dus wachttijden voor de scheepvaart.

### 7.3 Maatregelen beoordeeld als variaties op gemeten zoutvracht 1977-1979

Voorgaand en Tabel 7.1 geven in absolute zin de zoutvrachten bij een reeks van maatregelen. In relatieve zin bestuderen we hierna variaties uitgaande van een gemeten situatie nl. Case 6 uit Tabel 6.3, de resultaten staan in Tabel 7.2 en de volgorde van variaties luidt als volgt:

- **Case 6** (Tabel 6.3) heeft betrekking op de periode (1977 - nov. 1979) waar de zoutvracht door de Volkeraksluizen 27-40 kg zout/s bedroeg terwijl het zoutvrachtmodel 49 kg zout/s geeft. We gaan uit van dit laatste getal om de relatieve invloed van maatregelen en gewijzigde operationele omstandigheden te doorgronden.
- In **Case 6a** wordt de belasting door scheepvaart gewijzigd tot de prognose voor 2020. Hierdoor neemt de zoutvracht met 82% toe nl. van 49 naar 89 kgzout/s.
- In **Case 6b** (met prognose scheepvaart 2020) wordt het gespuide zoetwaterdebiet van oorspronkelijk 40 m<sup>3</sup>/s verlaagd tot 25 m<sup>3</sup>/s én anders verdeeld nl. via lekkende ebdeuren en zoetwaterinjectie naast een luchtbellenscherm waarvan de efficiëntie nog ongewijzigd wordt genomen. De toename van de zoutvracht t.o.v. Case 6a door

een lager spuidebiet bedraagt slechts ca. 13% door een beter gebruik van het lagere zoetwaterdebiet.

- In **Case 6c** wordt wél verondersteld dat de zoutvrachtreductie door de luchtbellenschermen bij de VZM-sluisdeuren sterker is door de zoetwaterinjectie volgens Case 6b. Hierdoor zou de zoutvracht ca. 22% meer bedragen van die in de referentiesituatie gedurende 1997-1979.
- Tenslotte wordt in **Case 6d** een redelijke verhoging (1.5m) van de drempels bij de sluisdeuren aangebracht wat leidt tot ca. 80% van de zoutvracht ten opzichte van die in de referentie situatie (Case 6) waar 27-40 kg zout/s is gemeten.

Voorgaande stappen en variaties met het zoutvrachtmodel tonen ook in relatieve zin aan dat de voorgestelde maatregelen de zoutvracht voor de prognose 2020 zeker minder kan laten zijn dan de zoutvracht die in 1977-1979 optrad.

We concluderen dat ook door het zoutvrachtmodel in relatieve zin toe te passen t.o.v. gemeten situaties in 1997 - nov. 1979 een zoutvracht van minder dan 60 kg zout/s via het Volkeraksluizencomplex voor 2020 haalbaar is mits combinaties met zoetwaterinjectie van goed functionerende luchtbellenschermen en verhoogde sluisdeurdrempels worden toegepast.

Tabel 7.2 Variaties op Case 6 (Tabel 6.3) met prognose scheepvaart 2020 en maatregelen.

| Case | reductie<br>bel.scherm<br>VZM & HD<br><br>[%] | Cycli/<br>kolk/<br>dag<br><br>[-] | Qschip<br><br>[m <sup>3</sup> /s] | lekkende<br>ebdeuren<br><br>[m <sup>3</sup> /s] | spuidebiet<br><br>[m <sup>3</sup> /s] | zoet-<br>waterjet<br>VZM-<br>deur<br><br>[m <sup>3</sup> /s] | diepte<br>drempels<br>*B&J<br>sluizen<br><br>[m] | diepte<br>VZM&HD<br>voorhaven<br><br>[m] | zout-<br>vracht<br><br>[kgz/s] |
|------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------------|--|--|--|--------------------------------|
| 6    | 50 & 50                                       | 11,9                              | 1,32                              | 13,5  | 25,6                                  | 0  | 6,5 & 6,25                                       | 7,5 & 7,5                                | 49                             |
| 6a   | 50 & 50                                       | 20                                | 3,2                               | 13,5  | 25,6                                  | 0  | 6,5 & 6,25                                       | 7,5 & 7,5                                | 89                             |
| 6b   | 50 & 50                                       | 20                                | 3,2                               | 12,5  | 6,25                                  | 6.25   | 6,5 & 6,25                                       | 7,5 & 7,5                                | 101                            |
| 6c   | 25 & 50                                       | 20                                | 3,2                               | 12,5  | 6,25                                  | 6.25   | 6,5 & 6,25                                       | 7,5 & 7,5                                | 60                             |
| 6d   | 25 & 50                                       | 20                                | 3,2                               | 12,5  | 6,25                                  | 6.25   | 5 & 4,75   | 7,5 & 7,5                                | 39                             |

\* beroepssluizen (B) en jachtensluis (J)

## 8 Algemene conclusies

Variaties in maatregelen bij de Volkeraksluizen in de periode 1969-1980 tonen dat aanmerkelijke reducties in zoutvracht van 216 tot 10-30 kg zout/s naar het Hollandsch Diep (HD) bereikt kunnen worden vnl. met luchtbellenschermen en spuien via kolken (methode van zg. lekkende ebdeuren).

Zonder verdere maatregelen zullen de huidige Volkeraksluizen en een tot 20 ppt verzilt Volkerak-Zoommeer (VZM) met de prognose van scheepvaart in 2020 een zoutvracht van ca. 480 kg zout/s naar het HD leveren.

Gegeven deze verwachte zoutvracht van ca. 480 kg zout/s, het gestelde doel van maximaal 60 kg zout/s én eerdere ervaringen (1969-1980) met maatregelen concluderen we dat alleen met het herstel van eerder toegepaste ingrepen, en bij voorkeur meer en/of effectiever dan in het verleden, het gestelde doel wél bereikt kan worden.

Tabellen 7.1 en 7.2 tonen dat alleen met een combinatie van maatregelen de zoutvracht door het Volkeraksluizencomplex in 2020 bij 20 ppt zout VZM tot onder 60 kg zout/s gebracht kan worden.

De maatregelen zijn:

1. Verhoogde drempels ;
2. Optimaal werkende luchtbellenschermen bij VZM- en HD-sluisdeuren;
3. Zoetwaterinjectie combineren met luchtbellenscherm bij alleen VZM-sluisdeuren;
4. Eventueel brakwaterinjectie/circulatie combineren met luchtbellenschermen bij de VZM-sluisdeuren.

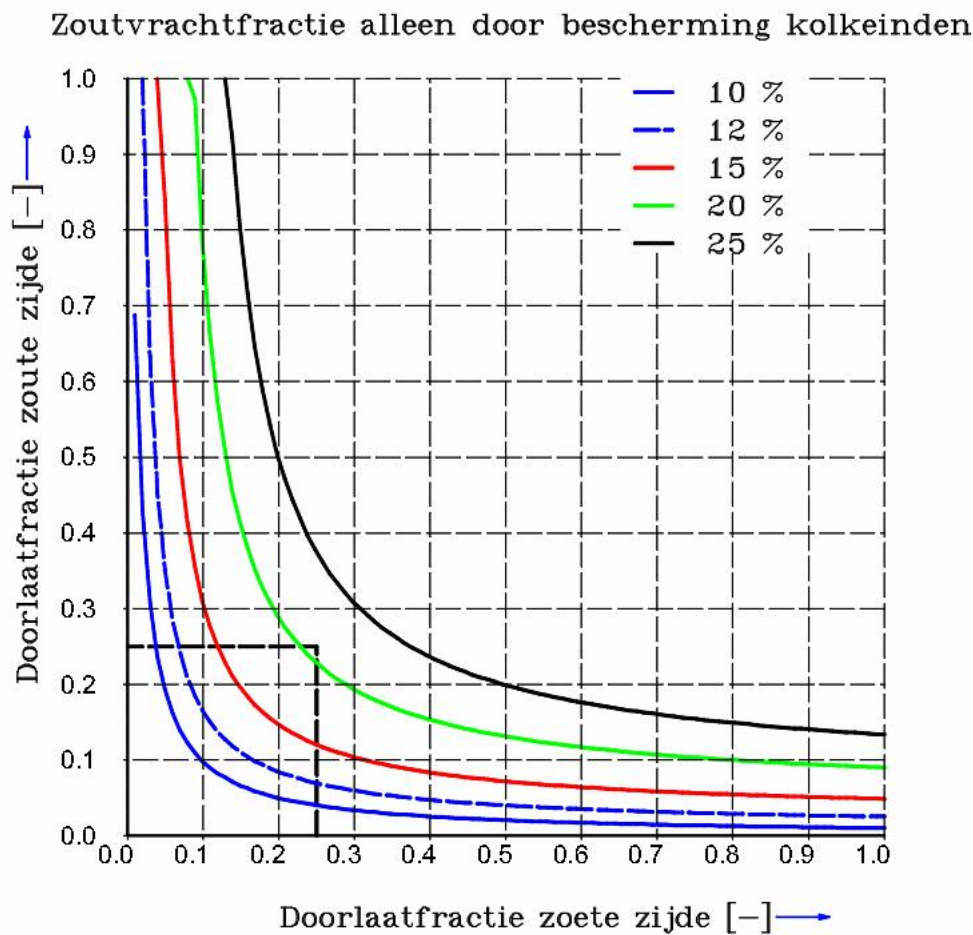
De onttrekking van zoet/brak water uit de HD-voorhaven voor zoetwaterinjectie bij de VZM-sluisdeuren kan het zouttransport vanuit de sluizen via de HD-voorhaven naar het HD onderbreken waarbij deze onttrekking uit een nog te ontwerpen zoutvang in de HD-voorhaven is te overwegen.

De vraag is nog niet beantwoord in hoeverre een luchtbellenscherm bij de HD-sluisdeur een dergelijke zoutopvang zal tegenwerken: een luchtbellenscherm bij de VZM-sluisdeuren is stellig effectief.

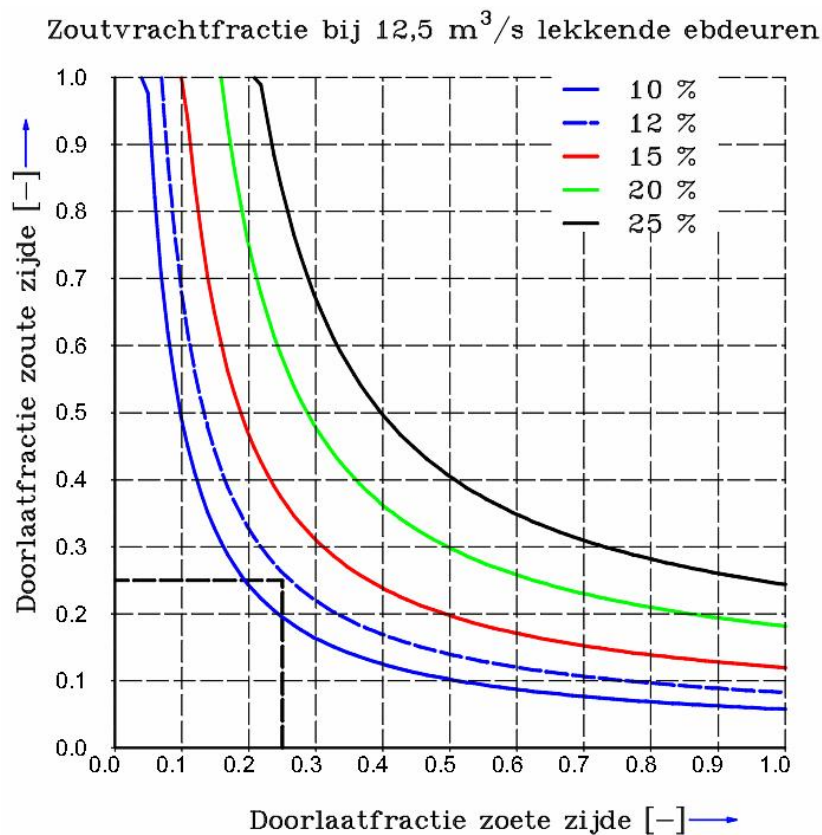
Het combineren van een verhoogde drempel met daarnaast zoetwaterinjectie bij luchtbellenschermen geeft de meest effectieve reductie in zoutvracht.

De effectiviteit van de laatste maatregel en de kosten die ermee zijn gemoeid en de eventuele invloed op scheepvaart is o.i. zeer kritisch voor het bereiken van het gestelde doel en vergt derhalve de meest urgente aandacht.

Wanneer vertrouwd kan worden op kleine doorlaatfracties van 25% van luchtbelen- en/of waterschermen aan beide kolkeinden én de helft (12,5 m<sup>3</sup>/s) van het maximaal toelaatbare zoetwaterdebiet wordt benut via de methode van lekkende ebdeuren dan wordt juist aan de gestelde bovengrens van 60 kg zout/s voldaan zonder verdere ingrepen in de Volkeraksluizen, vergelijk Figuur 8.1 met Figuur 8.2. Mogelijk is deze optie (Figuur 8.2) de optimale keus waarbij indien nodig de bellenschermen met waterschermen ondersteund kunnen worden om de lage doorlaatfracties van hooguit 25% te bereiken en waarvoor nog maximaal 12,5 m<sup>3</sup>/s beschikbaar is. Het debiet van 12,5 m<sup>3</sup>/s via ten dele geopende rinketschuiven geeft gemiddeld over de doorsnede van de kolken ca. 2 cm/s stroomsnelheid door de kolken zodat we verwachten dat scheepvaart hiervan geen hinder zal ondervinden.



Figuur 8.1 Bij gelijke open-tijd van 25 minuten, de zoutvrachtfractie voor getoonde combinaties van doorlaatfracties aan zoute en zoete zijde van luchtbelen/waterschermen. De zwarte stippellijnen geven de doorlaatfracties van Case 27 uit Tabel 7.1 en zoals in de hoofdttekst toegelicht.



Figuur 8.2 Bij gelijke open-tijd van 25 minuten, de zoutvrachtfractie voor getoonde combinaties van doorlaatfracties aan zoute en zoete zijde van luchtbellenschermen en met als aanvullende maatregel een zoetwaterdebiet door de kolken (methode lekkende ebdeuren) van 12,5 m<sup>3</sup>/s. De zwarte stippellijnen geven de doorlaatfracties van Case 29 uit Tabel 7.1 en zoals in de hoofdtekst toegelicht.

De invloed van scheepvaart op de werking van het luchtbellenscherm lijkt beperkt: (Abraham e.a., 1973, foto 10) en (Vos & V.d. Burgh, 1962) melden dat de scheepvaart de werking van het luchtbellenscherm niet hindert. Verder worden de troskrachten van in de kolk afgemeerde schepen gereduceerd door de reductie van uitwisselingsstromen in de kolk door luchtbellenschermen (Vrijburcht, 1989). Echter, ervaringen met de jachtensluis toont dat luchtbellenschermen daar wel voor hinder kunnen zorgen hoewel overkomelijk wanneer men met voldoende snelheid door het luchtbellenscherm vaart.

Het totaal benodigde luchtdebiet voor twee rijen luchtbellenschermen in de kolken van de beroepssluizen en jachtensluis met elk 25% doorlaatfractie bedraagt ca. 2.8 Nm<sup>3</sup>/s en vergt een theoretisch compressorvermogen d.w.z. exclusief leidingverliezen van ca. 270 kW (370 pk) gedurende de tijd dat de luchtbellenschermen bij één sluisdeur werken (ca. 23 min/schutcyclus). De luchtbellenschermen aan VZM-zijde vergen het meeste vermogen nl. 230 kW (van totaal 270 kW) vanwege het grote dichtheidsverschil tussen VZM-voorhaven en de kolken na sluiting van de HD-sluisdeuren. Bij een kWh prijs van 0.08 €/kWh en 20 schutcycli/dag kost het theoretisch compressorvermogen jaarlijks ca. 60 k€ aan elektriciteitskosten, excl. leidingverliezen.

De zoetwaterinjectie naast het luchtbellenscherm bij de VZM-sluisdeur werkt wanneer de VZM-sluisdeur open is en dus bij de waterstand in het VZM dat 0,5m lager is dan in de HD-voorhaven. Theoretisch is dit verval voldoende voor een omzetting in kinetische energie naar ca. 3 m/s zodat afhankelijk van het leidingwerk en leidingverliezen een redelijke waterjet van ca. 2 m/s door dit verval zou kunnen worden gecreëerd. Het daarvoor benodigd waterdebiet is erg groot maar zou via een te graven tunnel vanuit een zoutvang aan HD-zijde naar de sluisdeuren aan VZM-zijde gevoerd kunnen worden. Mogelijk valt dit te combineren met de overwogen aanleg van een vierde beroepssluis.

De vraag of zoetwaterstralen de werking van een luchtbellenscherm bij de VZM-sluisdeuren volledig kunnen vervangen en daarmee installatie- en energiekosten sterk kunnen reduceren is nog niet bestudeerd maar gezien het mogelijke voordeel in energie- en installatiekosten is dit alternatief zeker een (deel)studie waard.

Eerder (1970-1971) werkten de diepe geulen in het Hollandsch Diep als natuurlijke zoutvang die vervolgens bij hoge rivierafvoer met luchtinjectie werden opgewerveld waardoor het zout via de Haringvlietdam naar zee werd afgevoerd. We bevelen aan deze maatregel opnieuw te overwegen en met een geschikt 3D stroming- en transportmodel van het Noordelijk Deltabekken te onderzoeken of onder deze condities deze kunstmatig opgewekte zoutvracht niet de innamepunten van zoet water bereikt.

Numerieke simulaties moeten richting geven aan de inrichting en meetprogramma van oriënterende laboratoriumproeven als opmaat tot doelmatige en succesvolle veldmetingen. Alleen veldexperimenten in een geschikte sluis zullen voorgaand concept en effect kunnen bevestigen. We bevelen aan hiervoor de Stevinsluis bij Den Oever (Afsluitdijk) te nemen vanwege zijn gelijke werking met rinketschuiven en het zoutverschil als bij de Volkeraksluizen.

De studie (Directie Noord-Holland, 1970) voor de Koopvaardersschutsluis bij Den Helder vormt o.i. een fraaie illustratie van hoe destijds via veldmetingen de reductie van de zoutvracht (met 70%) door luchtbellenschermen kon worden vastgesteld.



## 9 Referenties

- Abraham, G. & P. van der Burgh 1962 Reduction of salt water intrusion through locks by pneumatic barriers. *Waterloopkundig Laboratorium*, August.
- Abraham, G. 1972 Theoretische beschouwingen over zoutbestrijding bij schutsluizen door luchtbellengordijnen. *De ingenieur*, jaargang 84, no. 12.
- 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, P. Van der Burgh & P. de Vos 1973 *Pneumatic barriers to reduce salt intrusion through locks*. Rijkswaterstaat Communications, No. 17, Delft Hydraulics, Publ. no. 126.
- Begeman, D. 1982 *Overzicht zoutregistraties 1972-1978 kust zuidelijk deltabekken en Oosterschelde*. Rijkswaterstaat, Deltadienst, Nota DDWT-82.013
- Benjamin, T.B. 1968 Gravity currents and related phenomena. *J. Fluid Mech.*, **31**, pp. 209-238.
- 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
- Directie Noord-Holland 1970 *Onderzoek naar het effect van luchtbellenschermen in de Koopvaardersschutsluis*. Rijkswaterstaat – Studiedienst – Hoorn, Nota 70.2, november.
- Jongeling, T.H.G. 2006 *Memo: Zoutbezwaar van zout Volkerak-Zoommeer*. WL|Delft Hydraulics, Q4244, aug.

- Jongeling, T.H.G. 2007 *Memo: Volkerak-Zoommeer. Effectiviteit zoutbestrijdingsmaatregelen bij sluizen. Effect op capaciteit Volkeraksluizen.* WL|Delft Hydraulics, Q4493, okt.
- 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.
- Stuurgroep Zuidwestelijke Delta 2009 *Zoet water Zuidwestelijke Delta. Een voorstel voor een regionale zoetwatervoorziening.* Stuurgroep Zuidwestelijke Delta, Juni.
- RWS 1970 *Onderzoek naar het effect van luchtbellenschermen in de Koopvaardersschutsluis.* RWS-nota 70.2, (ook Deltares Library C 11985).
- RWS 1983 *Zoutbelasting Haringvliet/Hollandsch Diep najaar 1976.* Concept-nota (20 mei 2009 ontvangen van ir. H. van Pagee, RWS-Waterdienst).
- RWS 1983 *De verziltingstoestand op de wateren van het Noordelijk Deltabekken na de afsluiting van het Haringvliet.* Ontvangen als dzl-p132009050714030.pdf
- RWS 1983 *Chlorideconcentraties op het Haringvliet en Hollandsch Diep.* Meetgegevens 1970-1980. District Zuidwest, notanummer 71.009.01.
- RWS 1983 *Waterafvoeren via het Volkeraksluizencomplex. Periode 1971-1980.* Directie Waterhuishouding en Waterbeweging District Zuidwest, Notanummer 71.008.01, december.
- Shin, J.O., S.B. Dalziel & P.F. Linden 2004 *Gravity currents produced by lock exchange.* *J.Fluid Mech.*, vol. 521, pp. 1-34.
- Turner, J.S. 1973 *Buoyancy effects in fluids.* Cambridge University Press.

Uittenbogaard, R.E. 2008 *Controle op WL-studie (Jongeling, 2007)*. Deltares, september.

Uittenbogaard, R.E. 2009 *Toetsing zoutvrachtmodel (Uittenbogaard,2008)*. Deltares, mei.

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.

Vos, de, P. & P. v.d. Burgh 1961 *Zoutbestrijding door luchtschermen; proeven in de Middensluis te IJmuiden*. DWH-RWS (Ook WL|Delft Hydraulics C 132828), april.

WL-M799 1963 *Zoutbezwaar bij schutsluizen aan zee: oorzaken en mogelijke bestrijdingswijzen*. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M799, 1963, sept.



## A Luchtdebiet en compressorvermogen luchtbellenscherm

### A.1 Inleiding

De berekeningen zoals vermeld in Hoofdstuk 5 gaan uit van een gegeven reductiefactor  $\eta$  waarna de vergelijkingen (B.4.1) t/m (B.4.8) worden opgelost en de zoutgehalten in kolken en voorhavens bekend zijn. Zoals beschreven in Appendix B is deze aanpak omgekeerd van wat gebeurt in een kolk waar nl. bij gegeven compressorvermogen een luchtdebiet ontstaat die bij heersend dichtheidsverschil over een luchtbellenscherm de reductie ( $\eta$ ) in zoutvracht dóór dit scherm zich instelt.

Echter voor onderzoek naar de optimale instelling en locatie van luchtbellenschermen in de Volkeraksluizen geeft de keuze van een reductiefactor  $\eta$  meer inzicht en controle. Deze appendix herhaalt kort de theorie en geeft de omgekeerde procedure om bij gegeven reductiefactor en dimensies van de kolk het daarvoor benodigde luchtdebiet en compressorvermogen te schatten.

### A.2 Theorie reductie zoutvracht door luchtbellenschermen

Volgens (Abraham & v.d. Burgh, 1962) blijkt onderstaande formule de veldmetingen naar de reductie  $\eta$  door een luchtbellenscherm van het zouttransport door uitwisselingsstroom, zie Hoofdstuk 4 en Figuur 4.2, goed te beschrijven:

$$\eta = \frac{0,185}{\varphi} + \varphi^3 - 0,86\varphi \quad (\text{A.1})$$

Merk op dat het min-teken in (A.1) in (Abraham, 1972, vgl. 60) foutief als een + teken is genoteerd. In (A.1) geldt voor  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{C_1}{\sqrt{g'H}} \quad ; \quad g' = \frac{\Delta\rho}{\rho} g \quad (\text{A.2})$$

met dichtheidsverschil  $\Delta\rho$  en waterdiepte  $H$  ter plaatse van de luchtinjectie bij de bodem. Voor de snelheid  $C_1$  in (A.2) wordt geschat

$$C_1 = \frac{4}{3}(0,40 - 0,47) \frac{(g q_\ell)^{\frac{1}{3}}}{(1 + H / H_{atm})^{\frac{1}{3}}} \quad (\text{A.3})$$

waarbij  $H_{atm}$  de waterhoogte is overeenkomend met de atmosferische druk en  $q_\ell$  het specifieke luchtdebiet uitgedrukt in (Nm<sup>2</sup>/s) d.w.z. het luchtdebiet per lengte-eenheid van de buis of slang dat het luchtbellenscherm creëert. De hoofdletter  $N$  refereert naar het luchtdebiet dat door een compressor onder atmosferische omstandigheden wordt ingezogen. Het interval aan coëfficiënten van 0,40 tot 0,47 volgt uit (Bulson, 1961). De laagste waarde (0,40) is gekozen voor het berekenen van het maximaal benodigde luchtdebiet.

In (Abraham & v.d. Burgh, 1962) wordt gewerkt met een zg. lucht-Froude getal:

$$Fr_\ell = \frac{(gq_\ell)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{g'H}} \quad (\text{A.4})$$

*Luchtdebiet  $Q_\ell$  (Nm<sup>3</sup>/s)*

De berekeningen zoals vermeld in Hoofdstuk 5 gaan uit van een gegeven reductiefactor  $\eta$  waarna de vergelijkingen (5.2.1) t/m (5.2.8) worden opgelost en de zoutgehalten in kolken en voorhavens bekend zijn. Nu kan met (A.1) t/m (A.4), bij gegeven  $\eta$ , de waarde van  $\phi$  opgelost waaruit het daarvoor benodigde specifieke luchtdebiet  $q_\ell$  volgt, zie (A.3). Dit specifieke luchtdebiet wordt betrokken op de totale breedte van alle kolken of andere dwarsdoorsneden zoals de monding van de voorhaven wanneer daar een luchtbellenscherm zou worden ingeschakeld. Per opstelling van een luchtbellenscherm in kolken of voorhaven is luchtdebiet  $Q_\ell$  in (Nm<sup>3</sup>/s) nu bekend. Dit luchtdebiet verlangt een compressorvermogen nl. om opgevoerd te worden naar de grotere druk  $p_1$  zijnde de waterdruk ter plaatse van de introductie van lucht verhoogd met 0.5 atm. voor een goede werking van de ventielen en diffusers die de bellen in water introduceren.

Het grootste compressorvermogen  $P_{\text{adiab}}$  is nodig wanneer deze compressie adiabatisch verloopt en dit vermogen bedraagt dan:

$$P_{\text{adiab}} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_{\text{atm}} Q_\ell \left\{ \left( \frac{p_1}{p_{\text{atm}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\} \quad [\text{Watt}] \quad (\text{A.5})$$

waarin voor lucht  $\gamma=1.4$  geldt. Door koeling tijdens de compressie kan een lager vermogen worden bereikt met als ondergrens een isotherme compressie en deze verlangt aan theoretisch compressorvermogen:

$$P_{\text{isoth}} = p_{\text{atm}} Q_\ell \ln \left( \frac{p_1}{p_{\text{atm}}} \right) \quad [\text{Watt}] \quad (\text{A.6})$$

In ons zoutvrachtmodel wordt het maximale compressorvermogen (A.5) uitgevoerd.

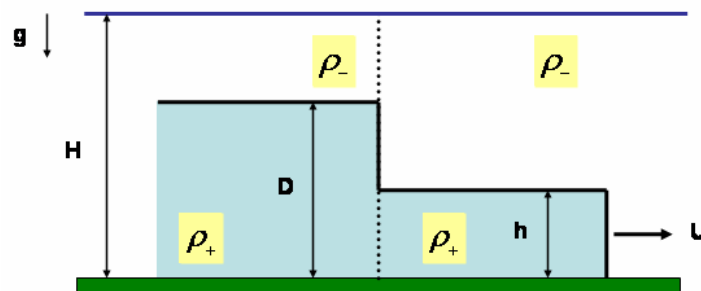
## B Zoutvrachtmodel

### B.1 Grondslagen van het zoutvrachtmodel

De essentiële relatie voor de voortplantingsnelheid  $U$  van de zouttong luidt

$$F_H = \frac{U}{\sqrt{g'H}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{D}{H} \left( 2 - \frac{D}{H} \right)} ; \quad g' = \frac{\Delta\rho}{\rho} g ; \quad \Delta\rho \approx 0,8\Delta S \quad (\text{B.1.1})$$

waarin  $F_H$  het interne Froude-getal,  $H$  de waterdiepte ter plekke van de sluisdeur,  $D$  de hoogte van de initiële dichtheidssprong en  $g$  de zwaartekrachtsversnelling die met relatief dichtheidsverschil  $\Delta\rho/\rho$  tussen zoute en zoete zijde en gemiddelde dichtheid  $\rho$  wordt gereduceerd tot  $g'$  (Shin e.a., 2004).



Figuur B.1 Definitie voor lock-exchange flow (Shin, 2004) met eigenschappen (B.1.1) en (B.1.2); het blauwe deel geeft schematisch het zwaardere water met dichtheid  $\rho_+$  t.o.v. lichter water met dichtheid  $\rho_-$ .

Het dichtheidsverschil  $\Delta\rho$  is ruwweg evenredig met 80% van het verschil in zoutgehalte  $\Delta S$  [kg/m<sup>3</sup>] ter weerszijden van de sluisdeuren maar in geringere mate afhankelijk van de watertemperatuur en de absolute zoutconcentraties.

Verder geldt de bijzondere eigenschap dat de hoogte  $h$  van zouttong gelijk is aan de helft van de initiële hoogte  $D$  van de dichtheidssprong (zie Figuur B.1):

$$h = \frac{1}{2} D \quad (\text{B.1.2})$$

Relatie (B.1.1) met  $D=H$  toont dat bij verdubbeling van het dichtheidsverschil én van de waterdiepte bij de sluisdeur de zouttong zich tweemaal sneller voortplant. Gegeven de hoogte van de zouttong (B.1.2) volgt uit (B.1.1) het zg. specifieke debiet  $q (=U.h)$  d.w.z. het watervolume per seconde en per meter kolkbreedte:

$$\frac{q}{\sqrt{g'H^3}} = \frac{1}{4} \frac{D}{H} \sqrt{\frac{D}{H} \left( 2 - \frac{D}{H} \right)} \quad (\text{B.1.3})$$

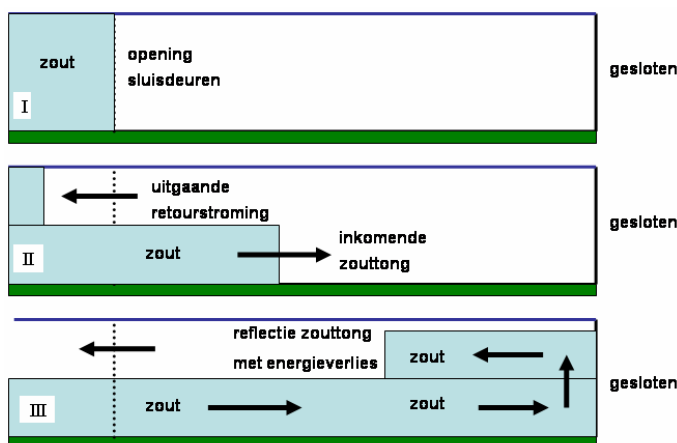
Hoger in de waterkolom ontstaat een retourstroming van minder zout water tegengesteld aan de voortplantingsrichting van zouttong. Door de geopende sluisdeuren treedt er netto nauwelijks uitwisseling van watervolume op maar het verschil tussen de grotere zoutvracht in

de zouttong en de geringere zoutvracht in de retourstroming geeft een netto zoutvracht in de richting van zouter naar zoeter water:

$$\dot{M} = Q \Delta S \quad [\text{kg} / \text{s}] \quad ; \quad Q = q b \quad (\text{B.1.4})$$

met  $b$  de breedte van de kolk. N.a.v. (B.1.4) introduceren we het symbool  $M$  voor de zoutmassa uitgedrukt in [kg]. Verder schrijven we  $\dot{M}$  voor het zouttransport uitgedrukt in [kg/s] met de stip boven  $\dot{M}$  voor “per tijdseenheid” en het verplaatste watervolume  $V$  in [m<sup>3</sup>] en het waterdebiet  $Q$  uitgedrukt in [m<sup>3</sup>/s]. We zullen deze symbolen in dit rapport hanteren, eventueel voorzien van subscript-tekst en met nummering van scheidingsvlakken.

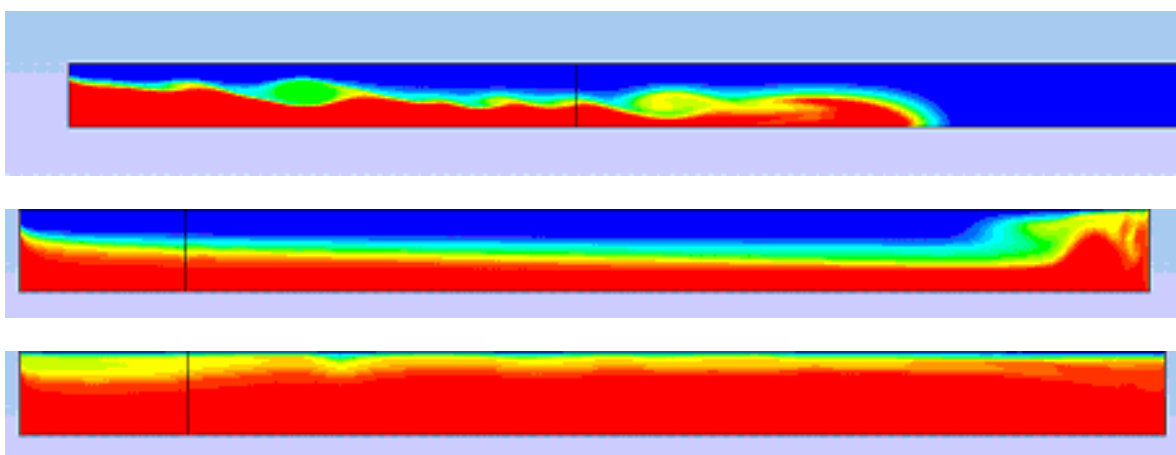
In de meeste gevallen staan de sluisdeuren voldoende lang open en/of is de kolk voldoende kort zodat de zouttong tegen de sluisdeuren aan de andere zijde weerkaatst. De kinetische energie in de zouttong wordt eerst omgezet in potentiële energie d.w.z. de zouttong kruipt tegen de gesloten sluisdeur omhoog. Op dat moment valt een deel van de aandrijvende kracht door een drukverschil ter hoogte van de zouttong weg en bouwt een tegengestelde druk op. Terwijl de zouttong tegen de gesloten sluisdeur botst en omhoog stroomt ontstaat er een baroclien drukverschil tussen sluisdeur en de rest van de kolk en vervolgens wordt deze potentiële energie weer in kinetische energie omgezet. De zouttong kaast dan terug naar de geopende sluisdeur. Interne verliezen tussen zouttong en retourstroming en met de kolkwanden zorgen ervoor dat deze weerkaatsing niet perfect verloopt d.w.z. niet alle kinetische energie van de inkomende zouttong wordt aan de weerkaatste zouttong overgedragen en aan het oppervlak van de kolk blijft nog een laag oorspronkelijk kolkwater over. Dit laatste restant van het kolkwater, een dunne laag, stroomt dermate traag uit de kolk dat dit zouttransport kan worden verwaarloosd bij kenmerkende open-tijden van de kolk. Deze stadia zijn in Figuur B.2 schematisch geschetst.



Figuur B.2 Drie stadia van vulling kolk. (I) Direct na opening sluisdeuren. (II) Lock-echange flow met inkomende zouttong (III) Reflectie met mening en energieverliezen van zouttong bij gesloten sluisdeur, uiteindelijk leidende tot gedeeltelijke vulling van de kolk met zouter water.

De in Figuur B.2 schematisch weergegeven processen kunnen ook worden gesimuleerd, zie Figuur B.3 als voorbeeld.





Figuur B.3 Numerieke simulatie van drie stadia van vulling kolk. Bovenste figuur toont ca. 120m van de 345m lange kolk en de voortplanting van de zouttong (rood) 150 s na openen sluisdeuren links in dit figuur. Centrale figuur toont de weerkaatsing van de zouttong tegen de gesloten sluisdeuren (rechts) na 15 minuten. In de onderste figuur is na 30 minuten de kolk nagenoeg volledig gevuld met zout (rood) water. De zwarte lijn is niet relevant en is de overgang in afmetingen van het onderliggende rekenrooster (Keetels & Uittenbogaard, 2010).

Veelal is een kolk dieper dan zijn drempeldiepte en in dit extra volume blijft zout water achter (werking zoutvang) dat alleen door menging aan het uitwisselingsproces zal deelnemen. Het gedeelte boven de drempels noemen we netto kolkvolume en noteren dit als:

$$V_{\text{kolk, netto}} = \text{kolkoppervlak} * \text{drempeldiepte} \quad (\text{B.1.5})$$

Zoals getoond is het mogelijk dat slechts een deel van dit volume deelneemt aan de dichtheidsgedreven uitwisselingsstroming (zie Figuren B.2 en B.3) en daartoe definiëren we de vullingsgraad  $r$  ( $r \leq 1$ ) van het netto volume  $V_{\text{kolk, netto}}$ . Verder wordt niet alleen het netto kolkvolume verkleint door de waterverplaatsing  $V_{\text{schip}}$  ( $\text{m}^3$ ) van schepen in de kolk maar tevens kunnen de schepen de uitwisselingsstroming hinderen doordat deze de retourstroming in de toplaag ten dele blokkeren (Vrijburcht, 1989) of tijdens het uitvaren met hun schroefstralen een tegendruk leveren. We vatten voorgaande samen door van het gereduceerde kolkvolume  $r \cdot V_{\text{kolk, netto}}$  de statische waterverplaatsing  $V_{\text{schip}}$  ( $\text{m}^3$ ) van de schepen in de kolk af te trekken zodat het effectieve kolkvolume voor de zoutuitwisseling wordt:

$$V_{\text{kolk, eff}} = r V_{\text{kolk, netto}} - V_{\text{schip}} \quad [\text{m}^3] \quad (\text{B.1.6})$$

We zullen later nader toelichten dat we  $r = 1$  stellen omdat de scheepvaart de eventuele achterblijvende toplaag in de kolk volledig zal doormengen door de werking van (boeg-)schroeven en mogelijk ook een beperkt deel van het kolkvolume onder de hoogste drempels afhankelijk van de sterkte van de stromingen en de eroderende werking van schroefstralen op de stratificatie ter hoogte van de drempels.

Met dergelijke expert-keuzes verlaten we de exacte formulering van het stromingsproces en van de menging over de drempel en over de dieper gelegen kolkvloer. In plaats daarvan stellen we een bovengrens aan de netto ingedrongen of uittredende zoutmassa  $M_{\text{zout, uitw}}$  in

[kg] per openstelling van de deuren met invloed van de statische waterverplaatsing door scheepvaart. Deze bovengrens is afhankelijk van de open-tijd van de deuren, de vullingsgraad  $r$  ( $r \leq 1$ ) van het netto volume  $V_{\text{kolk, netto}}$  van de kolk gelegen boven de hoogste drempel:

$$M_{\text{uitw}} = \Delta S \cdot \min \left\{ V_{\text{kolk, eff}}, qbT_{\text{open}} \right\} \quad [\text{kg}] \quad (\text{B.1.7})$$

met kolkbreedte  $B.1$ . In (B.1.5) wordt tussen acculades het uitgewisselde watervolume  $qbT_{\text{open}}$ , gedurende open-tijd  $T_{\text{open}}$ , vergeleken met het effectieve kolkvolume dat verwisseld kan worden en daarvan wordt het minimum genomen. In (B.1.7) geldt (B.1.3) voor het specifieke uitwisselingsdebiet  $q$  dat eventueel nog door luchtbellenschermen en/of door blokkering van de uitwisselingsstroom door scheepvaart kan worden gereduceerd.

Inmiddels hebben we met (B.1.7) al een aantal mechanismen ingevoerd die de zoutvracht door uitwisselingsstromen van en naar de kolk beïnvloeden. Dit zijn:

- de open-tijd van de sluisdeuren;
- het gebruik van deelkolken, zie kolkoppervlak in (B.1.5);
- het verschil in dichtheid door verschil in zoutgehalte over de sluisdeuren, zie (B.1.1);
- de aanwezigheid van een spronglaag aan de aandrijvende zijde, zie D in (B.1.3), door de uitstroom van zoet/brak water op door spuien via spuisluizen;
- de invloed van de drempeldiepte op het (netto) kolkvolume dat aan de uitwisseling deelneemt ;
- de statische waterverplaatsing van schepen die het netto kolkvolume verkleinen.

We gaan hierna nog in op de invloed van de dynamische waterverplaatsing (een debiet) op het zouttransport door de kolken waarvoor de volgende definitie van de schutfrequentie nodig is:

$$f_{\text{schut}} = \frac{N_{\text{schut}}}{86400} \quad [1/s] \quad (\text{B.1.8})$$

met  $N_{\text{schut}}$  het aantal schutcycli/dag. Gemiddeld over een dag verdringt de scheepvaart in één vaarrichting dan een debiet ter grootte van:

$$Q_{\text{schip}} = f_{\text{schut}} V_{\text{schip}} \quad [m^3/s] \quad (\text{B.1.9})$$

Dit debiet, in één vaarrichting, vormt de bijdrage tot het uitwisselingsdebiet door de dynamische waterverplaatsing van schepen. Bij stratificatie in de kolk en/of voorhaven zal er mogelijk een verschil zijn in stromingspatronen tussen invarende en uitvarende schepen zijn en het daar bij betrokken verschil in zoutverschil  $\Delta S$ . Vooralsnog nemen we aan dat hetzelfde verschil in zoutgehalte  $\Delta S$  geldt bij de dynamische waterverplaatsing in afwachting van detailonderzoek met bewegende schepen in kolken, zie b.v. (Vrijburcht, 1989).

Deze overwegingen leiden tot de netto zoutvracht (per tijdseenheid) door één kolk en gemiddeld over veel schutcycli:

$$\text{Kolken : } \dot{M}_{\text{uitw}} = f_{\text{schut}} \Delta S \min \left( V_{\text{kolk, eff}}, qbT_{\text{open}} \right) + \Delta S Q_{\text{schip}} \quad (\text{B.1.10a})$$

Deze uitdrukking kunnen we ook met (B.1.6) en (B.1.9) noteren als:

$$\text{Kolken: } \dot{M}_{\text{uitw}} = f_{\text{schut}} \Delta S \left\{ \min \left( rV_{\text{kolk, netto}} - V_{\text{schip}}, qbT_{\text{open}} \right) + V_{\text{schip}} \right\} \quad (\text{B.1.10b})$$

waaruit de verschillen tussen de statische en de dynamische waterverplaatsing van schepen duidelijker wordt. Naarmate het scheepsvolume groter wordt zal deze enerzijds de uitwisselingsstroming in de kolk door dichtheidverschillen en effectief kolkvolume beperken maar anderzijds wél de dynamische uitwisseling aangestuwd door scheepvaart vergroten.

In voorgaand is nog geen aandacht besteed aan meerdere kolken die parallel d.w.z. naast elkaar werken. Voor identieke kolken kan (B.1.10b) met het aantal kolken worden vermenigvuldigd wat een veelvoud geeft van kolkbreedte  $b$  en van (netto) kolkvolume en van scheepsvolume. Van het Volkeraksluizencomplex zijn de drie beroepssluisen wel identiek maar is de jachtensluis korter en ondiepere  $n$  bevat aanmerkelijk minder scheepsvolume in de kolk en heeft gemiddeld minder schutcycli per jaar. Gezien de geringe bijdrage van de jachtensluis tot de totale zoutvracht zullen we deze bijdrage als volgt vereenvoudigd in (B.10b) verwerken zij het met de volgende en geringe overschatting van de zoutvracht door de ondiepere jachtensluis. We zullen nl. (B.1.3) ook voor de jachtensluis toepassen maar met de grotere diepte van de beroepskolken. Vervolgens gebruiken we de totale kolkbreedte van alle kolken (beroep en recreatie) in (B.1.10b) en het totale netto volume als sommatie van de formule (B.1.5). Tenslotte hanteren we dezelfde open-tijd en schutfrequentie van de beroepskolken voor de jachtensluis. Door variatie van wel/geen jachtensluis of zijn dimensies kan de gebruiker zich overtuigen van de geringe bijdrage van de jachtensluis aan de daggemiddelde zoutvracht.

Gezien de veel grotere volumina van de voorhavens t.o.v. de kolken geldt deze beperking (lees minimum-operator) niet voor de uitwisseling tussen de voorhaven en VZM of HD zodat we i.p.v. (B.10b) noteerden:

$$\text{Voorhavens: } \dot{M}_{\text{uitw}} = \Delta S q_{\text{voorhaven}} b_{\text{voorhaven}} + \Delta S Q_{\text{schip}} \quad (\text{B.1.11})$$

waarbij het specifieke uitwisselingsdebiet  $q_{\text{voorhaven}}$  tussen voorhaven en estuarium (VZM of HD) ook door (B.3) wordt geregeerd. In (B.1.3) en (B.1.11) wordt de diepte van de voorhaven en eventueel een spronglaag in het aandrijvende deel (hier VZM of voorhaven aan HD-zijde) nabij de voorhavenmonding ingebracht. Deze doorsneden bij de monding van de voorhavens beschouwen we ook i.v.m. maatregelen voor het smaller en/of ondieper maken van de voorhavens en eventueel het gebruik van luchtbellenschermen. Verder kan een spronglaag vóór de monding van een voorhaven aan de zoute zijde bestaan b.v. bij een groot zoet water debiet door de kolken en voorhaven maar ook veroorzaakt door een voldoende groot spuidebiet naast het sluisencomplex, zie Figuur 1.1. Hoewel deze spronglaaghoogte  $D$  instelbaar is in het zoutvracht vergt de keuze een deskundig oordeel of een detailmodel of waarnemingen van de gelaagdheid buiten de monding van de zoutste voorhaven.

Het zoutvrachtmodel dat we hierna zullen presenteren maakt gebruik van (B.1.10b) en (B.1.11) op de relevante doorsneden van monding voorhaven en sluisdeuren. De verschillen  $\Delta S$  in zoutgehalten over deze doorsneden vormt de onbekenden die moeten worden opgelost. Bij spronglagen (met hoogte  $D$ , in B.1.3) worden de zoutgehalten onder deze spronglagen genomen ter bepaling van  $\Delta S$ . In het volgende onderdeel B.2 worden o.a. de symbolen voor deze zoutgehalte geïntroduceerd waarmee in onderdeel B.3 voorgaande theorie wordt toegepast om deze zoutgehalten op te lossen en daarmee de gezochte zoutvracht door het sluisencomplex.

Voorgaande analyses leiden tot de formulering van de daggemiddelde zoutvracht  $\dot{M}_{\text{uitw}}$  (kg/s) per kolk ten gevolge van uitwisselingsstromen door geopende sluisdeuren met initieel verschil in zoutgehalte  $\Delta S$  en door passage van schepen in twee richtingen. Dit zullen we in onderdeel B.3 presenteren, eerst definiëren we in het volgende onderdeel B.2 de doorlaatfractie van het zouttransport beperkt door o.a. door luchtbellenschermen.

## B.2 Definitie doorlaatfractie van zouttransport door geopende sluisdeuren

Wanneer op de beschouwde doorsnede met sluisdeuren het zouttransport wordt gereduceerd met luchtbellenschermen die  $q_\ell$  specifiek debiet aan lucht leveren dan geldt het zg. -Froude-lucht getal:

$$Fr_\ell = \frac{(gq_\ell)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{g'H}} \quad (\text{B.2.1})$$

waaruit met b.v. Figuur B.2.2 of theorie (Abraham & V.d. Burgh, 1962) de doorlaatfractie  $\eta$  van het oorspronkelijke zouttransport per eenheid van kolkbreedte volgt volgens:

$$q_{\text{eff}} \Delta S = \eta q \Delta S \quad (\text{B.2.2})$$

Vermenigvuldigd met de kolkbreedte  $b$  en open-tijd  $T_{\text{open}}$  volgt hieruit de netto zoutmassa die gedurende de open-tijd uitgewisseld zou worden maar beperkt is tot de zoutmassa die maximaal via uitwisseling van het netto-kolkvolume kan worden uitgewisseld. Deze beperking is vertaald in de minimum-operator in (B.1.10b). Appendix A presenteert de theorie voor de doorlaatfractie als functie van het Froude-lucht getal.

## B.3 Stadia in schutcyclus en definities

Figuur B.4 geeft een schematische langsdoorsnede door een beroepskolk met voorhavens en hun verbindingen met HD en VZM.

Links in deze figuur bevindt zich het VZM dat voldoende dichtbij de monding van de voorhaven (gestippeld in Figuur B.4) een zoutgehalte  $S_{\text{VZM}}$  [kg/m<sup>3</sup>] heeft. Naargelang het spuiregime kan dit zoutgehalte al lager zijn dan meer zuidwaarts van het sluiscomplex. In de voorhaven aan VZM-zijde bedraagt het zoutgehalte  $S_{\text{HV}}$  waar het eerste subscript slaat op Haven en het tweede op VZM. Analoog is  $S_{\text{HH}}$  het zoutgehalte in de voorhaven aan HD-zijde. In het HD dichtbij de monding van de voorhaven definiëren we het zoutgehalte  $S_{\text{HD}}$  wat groter dan nul zou kunnen zijn bij grote zoutvracht naar het HD. Voorgaande zoutgehalten in VZM en HD en voorhavens nemen we aan als constant d.w.z. onafhankelijk van de stadia in de schutcyclus.

Het bovenste deel van Figuur B.4 geeft het stadium van de schutting naar het VZM op het moment dat de relevante sluisdeuren worden geopend. Formeel onderscheiden we deelkolken aan noordzijde (HD-zijde) en zuidzijde (VZM-zijde). De bijbehorende zoutgehalten krijgen eerst het subscript "K" van Kolk gevolgd door de "H" voor de situatie nadat de kolk aan HD-zijde is gesloten of "V" nadat de kolk aan VZM is gesloten. Dus  $S_{\text{KH}}$  is het zoutgehalte in de kolk nadat deze van het HD is afgesloten en in open verbinding komt met het VZM door

het openen van de sluisdeuren met het VZM. Analooq is  $S_{KV}$  het zoutgehalte in de kolk nadat deze van het VZM is afgesloten en in open verbinding komt met het HD door het openen van de sluisdeuren met het HD. Tenslotte wijst het derde subscript op het zoutgehalte in de noordelijke (N) of zuidelijke (Z) deelen.

Samenvattend:

1.  $S_{VZM}$  : gegeven tijdsafhankelijk zoutgehalte van VZM voldoende dichtbij de monding van de voorhaven aan VZM-zijde;
2.  $S_{HV}$  : tijdsafhankelijk zoutgehalte in VZM-voorhaven;
3.  $S_{HH}$  : tijdsafhankelijk zoutgehalte in HD-voorhaven;
4.  $S_{HD}$  : gegeven tijdsafhankelijk zoutgehalte van HD voldoende dichtbij de monding van de voorhaven aan HD-zijde;
5.  $S_{KHN}$  : zoutgehalte in noordelijke kolk nadat deze van HD is afgesloten;
6.  $S_{KHZ}$  : zoutgehalte in zuidelijke kolk nadat deze van HD is afgesloten;
7.  $S_{KVN}$  : zoutgehalte in noordelijke kolk nadat deze van VZM is afgesloten;
8.  $S_{KVZ}$  : zoutgehalte in zuidelijke kolk nadat deze van VZM is afgesloten.

Zes van deze acht zoutgehalten zijn onbekend en dienen te worden opgelost uit vergelijkingen voor het zouttransport door de aangegeven barrières van mondingen van voorhavens en sluisdeuren eventueel met luchtbellenschermen. Deze wiskundige vergelijkingen worden in het volgende onderdeel B.4 opgesteld. In dit onderdeel beperken we ons eerst tot de definitie van de relevante variabelen.

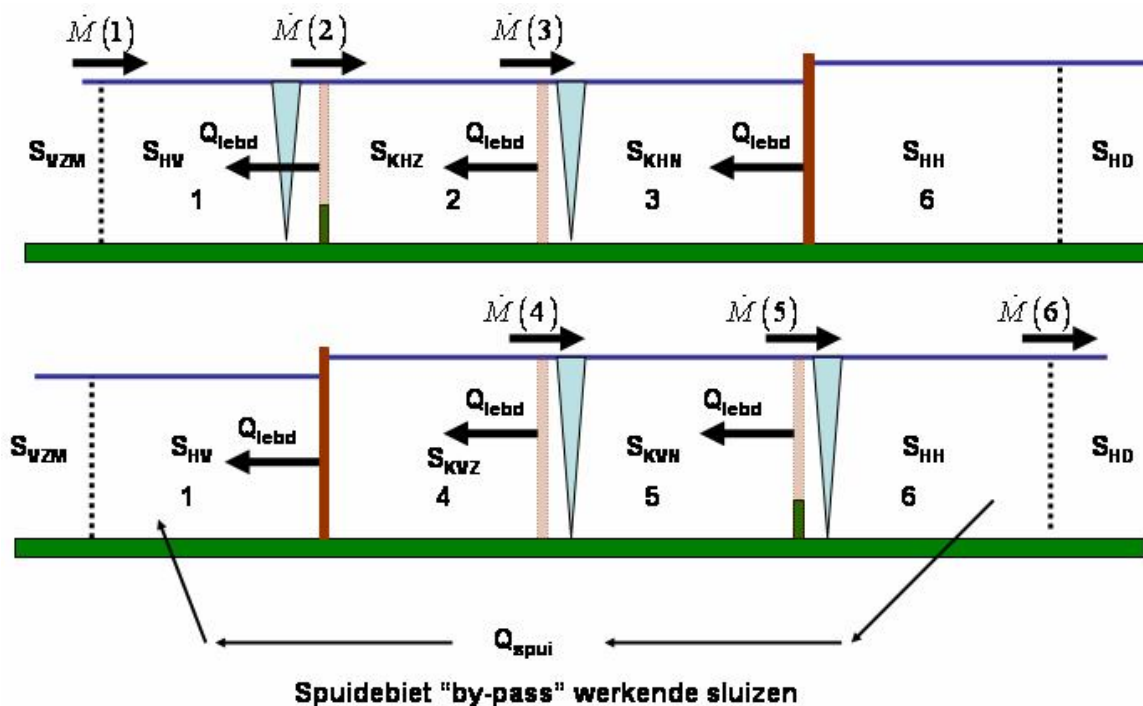
In Figuur B.4 zijn de volgende drie waterdebieten gegeven. Door de kolken kan HD-water worden gespuid via ten dele geopende rinketschuiven wat kortweg "lekkende ebdeuren" wordt genoemd; het relevante totale waterdebiet door lekkende ebdeuren is  $Q_{lebd}$  [ $m^3/s$ ] gesommeerd over alle sluisen en gemiddeld over veel schutcycli.

Via de spuisluis (zie Figuur 1.1) kan buiten de kolken om ook water uit het HD voor de monding van de VZM-voorhaven worden gebracht met spuidebiet  $Q_{spui}$  [ $m^3/s$ ].

Tenslotte zijn er de netto zoutvrachten van VZM naar HD aangegeven met  $\dot{M}(n)$  in [ $kg/s$ ] waarbij integer "n" slaat op de verticale doorsnede zijnde een scheidingsvlak tussen twee naast elkaar gelegen volumina (voorhavens of kolken). Gemiddeld over veel schutcycli dienen deze zoutvrachten gelijk te zijn wat vijf vergelijkingen oplevert voor zes onbekende zoutgehalten. De zesde vergelijking is gebaseerd op de zoutbalans in één stadium van een schutcyclus.

Niet getoond maar wel relevant is het zg. nivelleringsdebiet  $Q_{niv}$  [ $m^3/s$ ] door het vullen of legen van de kolken tot de waterstand aan de zijde waarnaar geschut zal worden. Het nivelleringsdebiet is evenredig met de schutshijf zijnde het product van het kolkoppervlak en de verandering van de waterstand in de kolk; het kolkvolume speelt hierbij dus geen rol. Dit nivelleringsdebiet wordt door diep gelegen rinketschuiven in gesloten sluisdeuren naar of uit de kolken gevoerd.

Er zijn nog twee debieten nl. een uitwisselingsdebiet veroorzaakt door de waterverplaatsing van in- en uitgaande scheepvaart wat gemiddeld over veel schutcycli leidt tot  $Q_{schip}$  [ $m^3/s$ ] zijnde het debiet in één vaarrichting veroorzaakt door scheepsbewegingen. De (statische) invloed van de aanwezigheid van schepen in een kolk en de in- en uitgaande scheepsbewegingen op het zouttransport is al in onderdeel B.3.1, zie vgl. (B.10b) besproken.



Figuur B.4 Opdeling voorhavens en kolken in Volkeraksluizencomplex en definitie van zoutgehalten en debieten.

Tenslotte een bijzonder waterdebiet  $Q_{jet}$  [ $m^3/s$ ] voor ons voorstel om waterstralen bij de teen van de luchtbellenschermen in te leiden ter versterking van de zoutlekbepurende werking van de luchtbellenschermen (blauwe driehoeken in Figuur B.4). Volgens Hoofdstuk 4 verwachten we dat dit watergordijn het meest effectief zal zijn bij en terwijl het luchtbellenscherm werkt gedurende de open-tijd van de sluisdeuren naar de HD-voorhavens. We nemen aan dat het benodigde zoetwater debiet wordt onttrokken aan het HD hoewel we onttrekking uit een zoutvang nog als optie kunnen implementeren.

Samenvattend:

1.  $Q_{lebd}$  in [ $m^3/s$ ]: debiet van HD-water dat via de kolken wordt gespuid naar het VZM;
2.  $Q_{spui}$  in [ $m^3/s$ ]: debiet van HD-water dat buiten de kolken via de spuisluis naar het VZM wordt getransporteerd;
3.  $Q_{niv}$  in [ $m^3/s$ ]: nivelleringsdebiet voor het vullen of legen van de kolken over nominaal 0.5m waterstandsverschil tussen HD en VZM;
4.  $Q_{schip}$  in [ $m^3/s$ ]: het uitwisselingsdebiet door in- en uitgaande scheepvaart;
5.  $Q_{jet}$  in [ $m^3/s$ ]: het debiet van waterstralen aan de teen van de luchtbellenschermen;
6.  $\dot{M}(n)$  in [ $kg/s$ ]: de zoutvracht van VZM naar HD door de relevante verticale doorsneden met nummer  $n$  in Figuur B.1 van sluisdeuren of monding van voorhavens.

Alle voorgaande fluxen zijn gemiddelden van debieten of zoutvrachten over veel schutcycli. Van belang daarbij is de eenzijdige open-tijd  $T_{open}$  in seconden van een kolk en het aantal schutcycli  $N_{schut}$  per kolk per dag. Uitgaande van enig debiet dat alléén tijdens een geopende kolk optreedt wordt dit debiet vermenigvuldigd met de fractie van de tijd dat de kolk is geopend volgens (B.1.8). Vervolgens worden deze debieten, zoals die door lekkende ebeuren, over alle kolken gesommeerd.

De essentie van de op te stellen vergelijkingen is het formuleren van de zoutvracht  $\dot{M}(n)$  in elk van de vijf verticale dwarsdoorsneden in Figuur B.4 en afhankelijk van de uitwisselingsstroming door verschillen in dichtheid van water over deze doorsneden, de zoutlekbepurende werking van de luchtbellenschermen en de beperking door de zoutmassa in het kolkvolume. Het volgende onderdeel bespreekt de relatie tussen de netto zoutvracht  $\dot{M}(n)$  en het verschil in zoutgehalte over een verticale doorsnede. De volgende twee onderdelen vormen dus het generieke onderdeel en het hart van het zoutvrachtmodel.

#### B.4 Vergelijkingen en oplosmethode voor de zoutvracht

In dit onderdeel stellen we vergelijkingen op voor de zoutvracht per fysieke of fictieve scheiding nl. de sluisdeuren of op kenmerkende overgangen voor de monding van voorhavens in HD of in VZM.

We zullen alle vergelijkingen presenteren maar de gehanteerde methodiek verklaren we aan de hand van twee vergelijkingen voor  $\dot{M}(n)$  waarbij deze zoutvracht positief verondersteld is voor zouttransport van VZM naar HD.

De methode voor het oplossen van de zoutvracht die we hier zullen presenteren is vooral nog beperkt tot het vullen en legen van de kolken vanuit of in de relevante voorhavens zonder gebruikmaking van opslagbassins met andere zoutgehalten.

Voor onze oplosmethode drukken we de zoutvracht  $\dot{M}(n)$  in kg/s op een reëel of fictief scheidingsvlak met nummer "n" uit in het product van een verplaatst watervolume  $V$  ( $m^3$ ), of via schutfrequentie  $f_{\text{schut}}$  uitgedrukt als daggemiddeld waterdebiet  $Q$  ( $m^3/s$ ), met het relevante zoutgehalte óf met een verschil in zoutgehalte als de waterverplaatsing een uitwisseling betreft. De wiskundige structuur van dergelijke uitdrukkingen luidt dus als volgt:

$$\dot{M}(n) = Q_{\text{uitw}} (S_+ - S_-) \pm Q_{\text{1-richting}} S_{\mp}$$

met  $S_+$  en  $S_-$  de zoutgehalten ter weerszijden van het scheidingsvlak met nummer "n" en de  $\pm$  afhankelijk van de richting van de waterverplaatsing. Met totaal  $N$  scheidingsvlakken lijken er  $N+1$  zoutgehalten te zijn waarvan 2 gegeven nl. de zoutgehalten aan de mondingen van beide voorhavens. Naast de  $N-1$  onbekende zoutgehalten is ook de zoutvracht onbekend zodat er  $N$  onbekenden lijken te zijn en  $N$  uitdrukkingen voor de scheidingsvlakken en zou het gestelde probleem in onbekende zoutgehalten kunnen worden opgelost.

Echter, voorgaand is niet volledig omdat er twee waarden van het zoutgehalte in de kolken bestaan nl. één lager zoutgehalte op het moment van openen van de deuren naar de zoute zijde en het tweede hogere zoutgehalte nadat deze deuren zijn gesloten. Zie de twee zoutgehalten  $S_{KH}$  en  $S_{KV}$  in Figuur B.4 Het eerstgenoemde lagere zoutgehalte bepaalt de uitwisselingsstroming door de dan geopende deuren aan de zoute zijde. Het tweede hogere zoutgehalte bepaalt de uitwisselingsstroming door de nog te openen deuren aan de zoete zijde. Echter tussen twee opeenvolgende scheidingsvlakken ter plaatse van sluisdeuren kan nog één balansvergelijking worden toegevoegd voor de verhoging van het zoutgehalte in de tussenliggende kolk door de uitwisselingsstroom met de zoute zijde.

Deze balansvergelijking is gebaseerd op de volumina van water dat tijdens een eenzijdige schutting wordt vervangen. Bij voldoende sterke reductie in uitwisseling door luchtbellenschermen en korte open-tijden kan de kolk maar ten dele gevuld raken met zouter water. Hieruit kunnen we ook een vullingsgraad of verhouding tussen spronglaaghoogte  $D$ , zie (B.1.3) en Figuur B.1, en kolkdiepte  $H$  boven de drempel schatten.

Door de toevoeging van deze balansvergelijkingen aan die voor de zoutvrachten door de scheidingsvlakken is het aantal vergelijkingen wél gelijk aan het aantal onbekende zoutgehalten in alle stadia van schutten.

Echter, de watervolumina uitgewisseld door dichtheidsverschillen zijn afhankelijk van de verschillen in zoutgehalten. Deze impliciet afhankelijkheid lossen we op door iteratie met weging (relaxatie) van de vorige oplossing van zoutgehalten voor een nieuwe schatting van de uitgewisselde watervolumina. Tenslotte wordt na convergentie de oplossing verkregen waarbij de uitgewisselde watervolumina gebaseerd zijn op dezelfde (verschillen in) zoutgehalten als de oplossing.

We bespreken nu alle vergelijkingen maar in detail de eerste twee voor de zoutvrachten.

De eerste vergelijking betreft de netto zoutvracht  $\dot{M}(1)$  bepaald op een doorsnede gelegen in het VZM maar vóór de monding van de VZM-voorhaven, zie ook Figuur B.4. Op deze overgang is er sprake van het uitwisselingsdebiet  $Q_{uitw}(S_{VZM}, S_{HV})$  afhankelijk van en aangedreven door het nog onbekende verschil in zoutgehalte  $(S_{VZM} - S_{HV})$  tussen VZM en zijn voorhaven. De complexe bepaling van  $Q_{uitw}(S_{VZM}, S_{HV})$  is in Hoofdstukken 3 en 4 uitgelegd en in onderdeel 5.1 samengevat, zie (B.10b). De afhankelijkheid van  $Q_{uitw}(S_{VZM}, S_{HV})$  voor een reeks van operationele parameters is aanwezig maar in de parameterlijst weg gelaten. Alleen de belangrijkste afhankelijkheid, nl. die van verschillen in zoutgehalten, is zichtbaar in de parameterlijst.

Bij dit uitwisselingsdebiet tellen we op het zouttransport door scheepvaart in beide vaarrichtingen en door alle kolken met  $Q_{schip}$  de gemiddelde waterverplaatsing per tijdseenheid in één vaarrichting. Op deze wijze introduceren we de dynamische invloed en bijdrage van de scheepvaart op de uitwisseling van kolkwater met water uit de voorhaven. Dit verklaart de eerste uitdrukking tussen accolades in het rechterlid van onderstaande vergelijking (B.4.1).

Vervolgens is er ook een effectief waterdebiet dat de VZM-voorhaven verlaat in de richting van het VZM en dat water met het zoutgehalte  $S_{HV}$  vanuit de VZM-voorhaven naar het VZM transporteert. Dit waterdebiet wordt veroorzaakt door:

- $Q_{lebd}$  het debiet van lekkende ebdeuren,
- $Q_{niv,z} + Q_{niv,n}$  het nivelleringsdebiet van alle noordelijke en zuidelijk kolkdelen, onder veronderstelling dat de waterstand in het HD gemiddeld hoger is dan in het VZM,
- $Q_{spui}$  het spuidebiet dat voor de monding van de VZM-voorhaven werkt en
- $Q_{jet}$  het debiet van het watergordijn naast de luchtbellenscherm.

Deze bijdragen verklaren de laatste en negatieve bijdragen in (B.4.1) tot de zoutvracht van VZM naar HD. Zodoende luidt de netto zoutvracht, gemiddeld over veel schutcycli, van het VZM door een dwarsdoorsnede voor de monding van de VZM-voorhaven als volgt:



$$\dot{M}(1) = \{Q_{uitw}(S_{VZM}, S_{HV}) + Q_{schip}\} (S_{VZM} - S_{HV}) - (Q_{lebd} + Q_{niv,z} + Q_{niv,n} + Q_{spui} + Q_{jet}) S_{HV} \quad (B.4.1)$$

Overigens, wanneer de waterstand in het VZM hoger zou zijn dan in het HD dan verandert in (B.4.1) de bijdrage door nivelleren tot:

$$\dot{M}(1) = \{Q_{uitw}(S_{VZM}, S_{HV}) + Q_{schip}\} (S_{VZM} - S_{HV}) + (Q_{niv,z} + Q_{niv,n}) S_{VZM} - (Q_{niv,z} + Q_{niv,n} + Q_{spui} + Q_{jet}) S_{HV}$$

waarbij het zouttransport  $(Q_{vul,z} + Q_{vul,n}) S_{VZM}$  door het nivelleren met zout water uit het VZM nu wél aan het zouttransport naar het HD bijdraagt. De methode van lekkende ebdeuren is bij deze vloedsituatie niet meer toepasbaar maar wel spuien mits door eenemaal. Door de algemene opzet van het zoutvrachtmodel zijn dergelijke variaties mogelijk maar nog niet extern bestuurbaar.

De tweede uitdrukking voor de netto zoutvracht van VZM naar HD wordt opgesteld op de dwarsdoorsnede van de sluisdeuren aan VZM-zijde. Opnieuw spelen twee uitwisselingsdebieten een rol nl.  $Q_{uitw}(S_{HV}, S_{KHZ})$  door de lokale verschillen in zoutgehalte  $(S_{HV} - S_{KHZ})$  tussen VZM-voorhaven en de zuidelijke kolken na schutting met het HD en het debiet  $Q_{schip}$  door scheepvaart in twee vaarrichtingen. Overigens, zoals aangegeven in onderdeel 5.1 tellen we de bijdragen van alle kolken, beroep en recreatie, bij elkaar op tot  $Q_{uitw}(S_{HV}, S_{KHZ})$ . Ten opzichte van (B.4.1) valt de bijdrage van het spuidebiet weg in  $\dot{M}(2)$ . Verder nemen we aan dat het debiet van het watergordijn, geplaatst aan de zoute zijde van het luchtbellenscherm in de kolk komt zoals simulaties (Keetels & Uittenbogaard, 2010) dat tonen.

De netto zoutvracht door de dwarsdoorsnede van de sluisdeuren aan VZM-zijde luidt dus als volgt:

$$\dot{M}(2) = \{Q_{uitw}(S_{HV}, S_{KHZ}) + Q_{schip}\} (S_{HV} - S_{KHZ}) - (Q_{lebd} + Q_{niv,z} + Q_{niv,n} + Q_{jet}) S_{KHZ} \quad (B.4.2)$$

Merk op dat het uitwisselingsdebiet  $Q_{uitw}(S_{HV}, S_{KHZ})$  mede wordt beïnvloed door de werking en efficiëntie van het luchtbellenscherm, eventueel ondersteund door het watergordijn, hoewel deze *modi-operandi* niet in de parameterlijst van  $Q_{uitw}$  zijn aangegeven.

Zonder gedetailleerde toelichting presenteren we de vergelijkingen voor de netto zoutvracht van VZM naar HD in de overige dwarsdoorsneden. Zo is de volgende vergelijking (B.4.3) geldig op de scheiding van de deelkolken met  $(S_{KHZ} - S_{KHN})$  het verschil in zoutgehalte op het moment van schutting vanaf de noordelijke deelkolken naar VZM-zijde. Ten opzichte van (B.4.2) is het netto debiet van HD naar VZM in (B.4.3) nu minder omdat alleen het nivelleringsdebiet van de noordelijke deelkolk door deze doorsnede stroomt.

De vraag is of een tweede (zuidelijke) deelkolk wel gebruikt zal worden omdat in het verleden alleen met deelkolken werd gewerkt als het (geringere) aanbod van scheepvaart dat toe liet.

Anderzijds zou door het werken met twee deelkolken, de indringing van zout door tussentijdse blokkering en door luchtbellenschermen halverwege de kolk kunnen beperken. We hebben deze laatste optie ingebracht hoewel de traditionele mogelijkheid om slechts één noordelijke of zuidelijke deelkolk voor het schutten te gebruiken in de programmatuur kan worden aangebracht.

Door serieel-werkende deelkolken passeren dezelfde schepen zodat de waterverplaatsing en uitwisseling door schepen per deelkolk gelijk blijft aan die voor één niet-opgedeelde kolk. Bij dezelfde schutfrequentie  $f_{\text{schut}}$  en met de waterverplaatsing  $V_{\text{schip}}$  van schepen gereduceerd naar rato van de lengte van de kortste deelkolk zal de daggemiddelde waterverplaatsing  $Q_{\text{schip}}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), met  $Q_{\text{schip}} = f_{\text{schut}} V_{\text{schip}}$ , en dus het totaal aantal geschutte schepen per dag geringer worden dan zonder opdeling van de kolk.

$$\dot{M}(3) = \left\{ Q_{\text{uitw}}(S_{\text{KHZ}}, S_{\text{KHN}}) + Q_{\text{schip}} \right\} (S_{\text{KHZ}} - S_{\text{KHN}}) - (Q_{\text{lebd}} + Q_{\text{niv,n}}) S_{\text{KHN}} \quad (\text{B.4.3})$$

Omgekeerd, bij schutting van de zuidelijke deelkolk naar het HD speelt het nivelleringsdebiet voor de zuidelijke kolk (onderste deel van Figuur 5.1) en de scheepsbewegingen van en naar de zuidelijke kolk. Dit leidt tot de vierde uitdrukking voor het zoutgehalte:

$$\dot{M}(4) = \left\{ Q_{\text{uitw}}(S_{\text{KVZ}}, S_{\text{KVN}}) + Q_{\text{schip}} \right\} (S_{\text{KVZ}} - S_{\text{KVN}}) - (Q_{\text{lebd}} + Q_{\text{niv,z}}) S_{\text{KVN}} \quad (\text{B.4.4})$$

Ook wanneer er geen deelkolken worden gebruikt passen we weliswaar alle vergelijkingen toe maar zijn die betrokken op de dan fictieve scheiding tussen de deelkolken zijn overbodig. Deze overbodigheid wordt ingesteld door voor het geval van geen deelkolken de uitwisselingsdebieten door deze doorsneden (tussen deelkolken) erg groot te maken waardoor de facto er geen zoutverschillen ontstaan tussen de noordelijke en zuidelijke deelkolken.

De volgende vergelijking voor de netto zoutvracht is gebaseerd op de dwarsdoorsnede van de sluisdeuren aan HD-zijde en schutten van de kolk naar HD-zijde:

$$\dot{M}(5) = \left\{ Q_{\text{uitw}}(S_{\text{KVN}}, S_{\text{HH}}) + Q_{\text{schip}} \right\} (S_{\text{KVN}} - S_{\text{HH}}) - (Q_{\text{lebd}} + Q_{\text{niv,z}} + Q_{\text{niv,n}}) S_{\text{HH}} \quad (\text{B.4.5})$$

In (B.4.5) speelt de totale nivelleringsdebiet van beide deelkolken maar wordt de uitwisseling gedreven door het zoutverschil  $(S_{\text{KVN}} - S_{\text{HH}})$  tussen de noordelijke deelkolk en de HD-voorhaven.

De laatste doorsnede die we beschouwen is gelegen buiten de monding van de HD-voorhaven waardoor het onttrokken spuidebiet stroomt maar ook het debiet voor lekkende ebdeuren, voor het watergordijn en voor de nivellering van de kolken met hogere waterstand in het HD. De volgende vergelijking voor de netto zoutvracht is hierop gebaseerd:

$$\dot{M}(6) = \left\{ Q_{\text{uitw}}(S_{\text{HH}}, S_{\text{HD}}) + Q_{\text{schip}} \right\} (S_{\text{HH}} - S_{\text{HD}}) - (Q_{\text{lebd}} + Q_{\text{niv,z}} + Q_{\text{niv,n}} + Q_{\text{spui}} + Q_{\text{jet}}) S_{\text{HD}} \quad (\text{B.4.6})$$

Merk op dat in (B.4.6) de netto waterdebieten (laatste sommatie) gelijk zijn aan die in (B.4.1) wanneer spuien alleen vanuit het HD plaats vindt en niet vanuit andere (externe) bronnen.

Tot zover hebben we zes vergelijkingen geformuleerd voor zes zouttransporten door alle scheidingsvlakken tussen de beschouwde watervolumina (VZM-voorhaven-(deel)kolk-voorhaven-HD). Zoals in onderdeel B.3 benoemd zijn er zes onbekende zoutgehalten én is ook het zouttransport door de sluisen onbekend. We zullen derhalve nog één vergelijking moet toevoegen. Voordat we deze laatste en sluitende vergelijking presenteren elimineren we eerst het onbekende zouttransport door de zouttransporten door elk scheidingsvlak als volgt aan elkaar te relateren of zelfs daggemiddeld gelijk te stellen.

In de VZM-voorhaven komt binnen de zoutvracht  $\dot{M}(1)$  én de zoutvracht door spuien van  $Q_{\text{spui}}$  m<sup>3</sup>/s water uit de HD-voorhaven met zoutgehalte  $S_{\text{HH}}$ . Overigens bij gebruik van een zoutvang in de HD-voorhaven zou dit gespuide zoutgehalte hoger zijn dan het gemiddelde  $S_{\text{HH}}$  door de vorming van een zouttong vanuit de kolk naar de HD-voorhaven. Vooralsnog hanteren we het zoutgehalte  $S_{\text{HH}}$  maar deze kan in het computerprogramma worden vervangen met  $S_{\text{KVN}}$ , het zoutgehalte in de noordelijke kolk na schutting met de VZM-voorhaven.

In de beoogde testlocatie, de Stevinsluis, wordt een spuidebiet in de voorhaven aan de zoute zijde ingebracht met een andere herkomst van het spuiwater dan uit of bij de monding van de voorhaven aan de zoete zijde. Binnen de algemene opzet van dit zoutvrachtmodel kan ook deze variant eenvoudig in het computerprogramma worden ingebracht maar deze optie is nog geen keuze bij invoer.

De in de VZM-voorhaven inkomende zoutvrachten ( $\dot{M}(1) + Q_{\text{spui}} S_{\text{HH}}$ ) dienen gelijk te zijn aan  $\dot{M}(2)$  zijnde de uitgaande zoutvracht vanuit de VZM-voorhaven naar de zuidelijke kolk. Dit levert de volgende gelijkstelling op:

$$\dot{M}(1) + Q_{\text{spui}} S_{\text{HH}} = \dot{M}(2) \quad (\text{B.4.7.1})$$

Op basis van detailsimulaties nemen we aan dat het water  $Q_{\text{jet}}$  (m<sup>3</sup>/s) uit het watergordijn bij het luchtbellenscherm aan de zuidelijke sluisdeuren de zuidelijke kolk indringt, zie het groene patroon in Figuur 4.8 Verder veronderstellen we dat het watergordijn wordt gevoed met water uit de HD-voorhaven met zoutgehalte  $S_{\text{HH}}$ . Het debiet dat de zuidelijke kolk tijdens opening naar de VZM-voorhaven binnen dringt bedraagt dan ( $\dot{M}(2) + Q_{\text{jet}} S_{\text{HH}}$ ) en is daggemiddeld gelijk aan  $\dot{M}(3)$  zodat de gelijkstelling wordt:

$$\dot{M}(2) + Q_{\text{jet}} S_{\text{HH}} = \dot{M}(3) \quad (\text{B.4.7.2})$$

De zoutvracht die daggemiddeld het scheidingsvlak tussen de deelkolken passeert bij schutting naar VZM dient gelijk te zijn aan de daggemiddelde zoutvracht bij schutting naar het HD:

$$\dot{M}(3) = \dot{M}(4) \quad (\text{B.4.7.3})$$

Idem voor de daggemiddelde zoutvracht tussen de noordelijke en zuidelijke deelkolk en tussen de noordelijke deelkolk en de HD-voorhaven:

$$\dot{M}(4) = \dot{M}(5) \quad (\text{B.4.7.4})$$

Tenslotte verlaat zoutvracht  $\dot{M}(6)$  de HD-voorhaven naar het HD en ook het onttrokken zoutflux voor het watergordijn en door spuien  $(Q_{\text{spui}} + Q_{\text{jet}})S_{HH}$  waarvan de som gelijk moet zijn aan de zoutvracht die daggemiddeld door de noordelijke sluisdeuren de HD-voorhaven instroomt zodat geldt:

$$\dot{M}(6) + (Q_{\text{spui}} + Q_{\text{jet}})S_{HH} = \dot{M}(5) \quad (\text{B.4.7.5})$$

Merk op dat de zoutvracht  $(Q_{\text{spui}} + Q_{\text{jet}})S_{HH}$  aan de HD-voorhaven onttrokken gelijk is aan de zoutvracht als watergordijn geloosd in de zuidelijke kolk, zie (B.4.7.2), en als spuidebiet geloosd in de VZM-voorhaven, zie (B.4.7.1).

Weliswaar is in de vijf vergelijkingen (B.4.7) het zouttransport als onbekende verwijderd wat echter resulteert in vijf vergelijkingen voor zes onbekende zoutgehalten; uiteraard zijn met (B.4.7) meer combinaties te maken, echter deze zijn redundant.

Kortom, na (B.4.7) is een zesde vergelijking nodig en deze baseren wij op een zoutbalans op het moment van openen en weer sluiten van een sluisdeur. We kiezen daarvoor de zoutbalans op het moment na schutting met het VZM en de noordelijke deelkolk is genivelleerd voor schutting met het HD. Als er geen sprake is van deelkolken dan nemen we in de volgende balans het volume van de enkele, gehele kolk.

Juist voor het moment van schutten naar HD-zijde, maar na nivelleren, bevat het effectieve kolkvolume  $rV_{KHN} - V_{\text{schip}}$  (zie B.1.10b) het zoutgehalte  $S_{KVN}$  na de schutting naar VZM. Zodra voor de fractie  $r < 1$  wordt gekozen d.w.z. een spronglaaghoogte  $D$  kleiner dan de drempeldiepte (zie Figuur B.1.2) is er onzekerheid over welk deel van de waterverplaatsing  $V_{\text{schip}}$  van de schepen in de kolk water ónder deze spronglaag verdringt. Vooralsnog stellen we dat de totale zoutmassa  $(rV_{KHN} - V_{\text{schip}})S_{KVN}$  bedraagt op het moment dat de deuren naar HD-zijde worden geopend. Wanneer er zonder deelkolken wordt gesloten delen we  $V_{\text{schip}}$  op naar rato van fictieve lengte van elke deelkolk.

Nadat de sluisdeuren naar HD-zijde weer sluiten zal het zoutgehalte in de deelkolk zijn gedaald tot  $S_{KHN}$  vanwege de tussentijdse uitwisselingsstroming die zoeter water uit de HD-voorhaven in de deelkolk brengt. De nieuwe zoutmassa bedraagt per definitie  $(rV_{KHN} - V_{\text{schip}})S_{KHN}$  en het verschil  $(rV_{KHN} - V_{\text{schip}})(S_{KVN} - S_{KHN})$  in zoutmassa tussen moment van openen deuren naar HD-zijde en sluiten van deze deuren komt door het volume uitgewisseld water  $V_{\text{uitw},KVN}$ .

Merk op dat dit uitgewisselde volume water  $V_{\text{uitw},KVN}$  vermenigvuldigd met de schutfrequentie gelijk is aan  $Q_{\text{uitw}}(S_{KVN}, S_{HH})$ , zie (B.4.5). Dit levert de laatste, zesde en sluitende vergelijking op:

$$(rV_{KHN} - V_{\text{schip}})(S_{KVN} - S_{KHN}) = V_{\text{uitw},KVN}(S_{KVN} - S_{HH}) \quad (\text{B.4.8})$$

Als er geen sprake is van deelkolken dan nemen we in (B.4.8) het volume van de enkele, gehele kolk en we koppelen de niet meer bestaande deelkolken aan elkaar met een extreem hoog uitwisselingsdebiet waardoor effectief hun respectievelijke zoutgehalten aan elkaar gesteld worden.

Het stelsel vergelijkingen (B.4.1) t/m (B.4.8) wordt direct opgelost door Gauss-eliminatie. Echter, de belangrijke uitwisselingsdebieten  $Q_{\text{uitw}}(S_{\text{voor}}, S_{\text{achter}})$  zijn sterk afhankelijk van de oplossing van de zoutgehalten voor en achter de sluisdeuren of andere dwarsdoorsneden. Derhalve blijkt iteratie nodig te zijn met 50% onder-relaxatie d.w.z. een 50% weging van de laatste oplossing met de voorlaatste iterand gesubstitueerd in de uitdrukkingen voor de uitwisselingsdebieten. De iteratie stopt bij een maximale relatieve fout van 0.01% in de onbekende zoutgehalten en betrokken op het gemiddelde zoutgehalte mits deze hoger is dan 1 ppt.

Zoals aangekondigd in Hoofdstuk 4 stellen we in deze methode de doorlaatfractie  $\eta$  van het zouttransport door een luchtbellenscherm in het bereik van 0 t/m 100%. Na oplossing van het beschreven stelsel vergelijkingen zijn alle relevante dichtheidsverschillen bekend en uiteraard ook de zoutvracht door het sluzencomplex. Voor elke locatie met luchtbellenschermen (blauwe driehoeken in Figuur B.4) en gegeven de gekozen doorlaatfractie  $\eta$  wordt tenslotte het bijbehorende specifieke luchtdebiet berekend volgens (Abraham & V.d. Burgh, 1962). Met de gegeven kolkbreedten worden de luchtdebieten en de theoretische compressorvermogens berekend, voor details zie Appendix A; al deze informatie behoort tot de uitvoer van het zoutvrachtmodel.



## C Theorie invloed doorlaatfracties op zoutvracht

### C.1 Inleiding

In dit appendix onderzoeken we de invloed van zoutremmende middelen bij de sluisdeuren op de zoutvracht (kg zout/s) door een kolk t.o.v. de zoutvracht door een onbeschermd kolk d.w.z. zonder zoutremmende middelen. We beperken ons tot een schutsluis waarbij de invloed van de scheepvaart op het zouttransport verwaarloosd mag worden. We veronderstellen een goed doorgemengde kolk en evenmin gelaagdheid in beide voorhavens. Verder hanteren we gelijke waterstanden in beide voorhavens zodat de beschouwde schutsluis zuiver als scheiding tussen zout en zoet water werkt.

In dit appendix beantwoorden we ook de vraag of de zoutvracht getransporteerd door een beschermde kolk t.o.v. een onbeschermd kolk, dus de totale doorlaatfractie, evenredig is met het product van de twee afzonderlijke doorlaatfracties van zoutremmende middelen bij elk paar sluisdeuren aan meer- en zeezijde. We zullen met exacte uitdrukkingen aantonen dat de zoutvracht wordt bepaald door de kleinste van de doorlaatfracties. De zoutvrachtfractie is altijd groter dan ca. 35% van de kleinste doorlaatfractie maar blijft kleiner dan deze kleinste doorlaatfractie.

Verder presenteren we in een diagram welke combinaties van doorlaatfracties dezelfde gewenste fractie van de ongeremde zoutvracht leveren. Dit diagram kan een hulpmiddel zijn bij optimalisatie en keuze van de zoutremmende middelen aan beide kolkeinden.

### C.2 Theoretische uitgangspunten

De zoutvracht door geopende sluisdeuren is het product van het verschil  $\Delta S$  tussen zoutgehalten van kolk en voorhaven en het uitwisselende waterdebiet dat door het verschil in specifieke dichtheid  $\Delta\rho$  wordt aangedreven. Het specifieke uitwisselingsdebiet d.w.z. per eenheid van kolkbreedte luidt:

$$q = hU \quad [m^2 / s] \quad (C.1)$$

Met dikte  $h$  en voortplantingssnelheid  $U$  van de zouttong. De theorie over het zg. *lock-exchange* probleem doet uitspraken over de dikte  $h$  van de zouttong t.o.v. de waterdiepte  $H$  in de kolk en over het zg. interne Froude-getal  $Fr$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g'H}} \quad ; \quad g' = \frac{\rho_+ - \rho_-}{\frac{1}{2}(\rho_+ + \rho_-)} g \quad (C.2)$$

gebaseerd op de gereduceerde gravitatieversnelling  $g'$  die wordt bepaald door de initiële verschillen in dichtheid over de te openen sluisdeuren. Met deze theoretische verhoudingsgetallen kan (C.1) worden geschreven als

$$q = \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} H \sqrt{g'H} \quad [m^2 / s] \quad (C.3)$$

waarbij de termen tussen {...} theoretisch bekend zijn, zie b.v. (Shin e.a., 2004).

We maken onderscheid in het zoutgehalte in de kolk op het moment dat de sluisdeuren aan zeezijde of aan meerzijde worden geopend. Daartoe benoemen we  $S_{K,M}$  het zoutgehalte dat de kolk heeft na de vorige schutting met meerzijde en zoutgehalte  $S_{K,Z}$  van de kolk na schutten met zeezijde. Dan noteren we met (C.3) de massaflux van zout vanuit zeezijde de kolk in als:

$$\dot{M}_Z = \eta_Z \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} B.H. (S_Z - S_{K,M}) \sqrt{g'_{ZKM} H} \quad [\text{kg zout/s}] \quad (C.4)$$

met kolkbreedte  $B$ , doorlaatfractie  $\eta_Z$  en zoutgehalte  $S_Z$  in de zeezijde-voorhaven. De gereduceerde gravitatie  $g'_{ZKM}$  is nu gebaseerd op het zoutverschil ( $S_Z - S_{K,M}$ ) ten tijde dat de sluisdeuren aan zeezijde open gaan. Dit verschil in zoutconcentratie hangt dus af van de schutting naar meerzijde en we zullen later deze afhankelijkheid expliciet in rekening brengen.

De verandering van de zoutmassa in de kolk blijkt uit waarnemingen evenredig met de tijd te verlopen én met de flux (C.4) mits de zouttong de kolk nog niet heeft verlaten. In deze analyse veronderstellen we dat de open-tijd  $T$  van de sluisdeuren kleiner of gelijk is aan de looptijd van de zouttong heen en terug door de kolk. Dan volgt uit (C.4) de verandering in zoutmassa in de kolk als:

$$\Delta M_Z = \eta_Z T_Z \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} B.H. (S_Z - S_{K,M}) \sqrt{g'_{ZKM} H} \quad [\text{kg zout}] \quad (C.5a)$$

En analoog voor de verandering in zoutmassa tijdens geopende sluisdeuren aan meerzijde:

$$\Delta M_M = \eta_M T_M \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} B.H. (S_{K,Z} - S_M) \sqrt{g'_{MKZ} H} \quad [\text{kg zout}] \quad (C.5b)$$

We maken de analyse dimensieloos met de snelheid van de zouttong en de kolk lengte  $L$  volgens:

$$\tau = \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} \frac{T \sqrt{g'H}}{L} \quad [-] \quad (C.6)$$

In (C.6) baseren we de gereduceerde gravitatie  $g'$  op het totale verschil in specifieke dichtheden van het water in beide voorhavens. Voor de gebruikelijke verschillen in



dichtheden zijn deze lineair te veronderstellen met hun respectievelijke zoutgehalten zodat de gereduceerde gravitatie in (C.5) als volgt in  $g'$  kan worden uitgedrukt:

$$g'_{ZKM} = \left( \frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M} \right)^{\frac{1}{2}} g' \quad ; \quad g'_{MKZ} = \left( \frac{S_{K,Z} - S_M}{S_Z - S_M} \right)^{\frac{1}{2}} g' \quad (C.7)$$

Verder definiëren we het kolkvolume als:

$$V_{kolk} = B.H.L \quad (C.8)$$

En we definiëren de parameters:

$$\delta_Z = \eta_Z \tau_Z \quad [-] \quad ; \quad \delta_M = \eta_M \tau_M \quad [-] \quad (C.9)$$

zodat met (C.7), A(8) en (C.9) de veranderingen in zoutmassa van de kolk (C.5) genoteerd kan worden als:

$$\Delta M_Z = \delta_Z V_{kolk} \frac{(S_Z - S_{K,M})^{\frac{3}{2}}}{(S_Z - S_M)^{\frac{1}{2}}} \quad [\text{kg zout}] \quad (C.10a)$$

$$\Delta M_M = \delta_M V_{kolk} \frac{(S_{K,Z} - S_M)^{\frac{3}{2}}}{(S_Z - S_M)^{\frac{1}{2}}} \quad [\text{kg zout}] \quad (C.10b)$$

### C.3 De oplossing

Uit (C.10a) volgt dat voor de verandering  $(S_{K,Z} - S_{K,M})$  van het volume-gemiddelde zoutgehalte van de kolk voor en na sluiten van de sluisdeuren aan zeezijde geldt:

$$S_{K,Z} - S_{K,M} = \delta_Z \frac{(S_Z - S_{K,M})^{\frac{3}{2}}}{(S_Z - S_M)^{\frac{1}{2}}} \quad ; \quad \delta_Z \leq 1 \quad (C.11)$$

Dit is de eerste vergelijking voor het bepalen van de beide onbekende zoutgehalten  $S_{K,Z}$  en  $S_{K,M}$ . De bovengrens geeft een volledig met zout water gevulde kolk. We normeren alle zoutgehalten met het totale verschil  $(S_Z - S_M)$  in zoutgehalten tussen beide voorhavens en we noteren deze genormeerde zoutgehalten met een kleine letter  $s$  zodat (C.11) genoteerd wordt als:

$$s_{K,Z} - s_{K,M} = \delta_Z (s_Z - s_{K,M})^{\frac{3}{2}} \quad ; \quad \delta_Z \leq 1 \quad (\text{C.12a})$$

Analoog volgt de verandering  $(S_{K,Z} - S_{K,M})$  van het volume-gemiddelde zoutgehalte van de kolk voor en na sluiten van de sluisdeuren aan meerzijde ook uit (C.10b). Na normeren met  $(S_Z - S_M)$  geeft dit:

$$s_{K,Z} - s_{K,M} = \delta_M (s_{K,Z} - s_M)^{\frac{3}{2}} \quad ; \quad \delta_M \leq 1 \quad (\text{C.12b})$$

Met (C.12a & C.12b) hebben we nu twee vergelijkingen voor de twee onbekende volume-gemiddelde zoutgehaltes die de kolk kan aannemen na schutting met zee- of meerzijde. We lossen deze als volgt op.

Gelijk stellen van (C.12a) aan (C.12b) geeft:

$$s_Z - s_{K,M} = \gamma (s_{K,Z} - s_M) \quad ; \quad \gamma = \left( \frac{\delta_M}{\delta_Z} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{of} \quad \gamma = \left( \frac{\eta_M \tau_M}{\eta_Z \tau_Z} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{C.13})$$

In het rechterlid van (C.13) substitueren we (C.12a) wat geeft:

$$s_Z - s_{K,M} = \gamma (s_{K,M} - s_M) + \gamma \delta_Z (s_Z - s_{K,M})^{\frac{3}{2}} \quad (\text{C.14})$$

Te herschrijven tot

$$\gamma \delta_Z (s_Z - s_{K,M})^{\frac{3}{2}} - (1 + \gamma)(s_Z - s_{K,M}) + \gamma (s_Z - s_M) = 0 \quad (\text{C.15})$$

Vanwege de normering geldt per definitie:

$$s_Z - s_M = 1 \quad (\text{C.16})$$

Wanneer we definiëren dat geldt:

$$X^2 = s_Z - s_{K,M} \quad (\text{C.17})$$

kan (C.15) met (C.16) en (C.17) worden omgezet in de volgende kubische vergelijking:

$$\delta_Z X^3 - (1 + \gamma^{-1}) X^2 + 1 = 0 \quad (\text{C.18})$$

waarvan alle oplossingen bekend zijn. Per schutting volgt uit (C.18) de genormeerde zoutvracht  $Z_{fractie}$  zijnde de zoutvracht genormeerd met de zoutvracht van een onbeschermd schutting met gelijke open-tijden naar meer- en zeezijde ( $\gamma = 1$ ):

$$Z_{fractie} = \delta_Z X^3 \quad (C.19)$$

Figuur C.1 toont grafisch de oplossing (C.19).

#### C.4 Grenswaarden zoutvracht en benaderingen

Hoewel exact is de afhankelijkheid van de oplossing (C.18) voor de doorlaatfracties moeilijk te doorgronden en daarom presenteren we eerst de meer inzichtgevende benadering van de oplossing van (C.18). Uit deze benadering volgt wél exact de ondergrens van de zoutvracht (C.19) voor gelijke doorlaatfracties en gelijke open-tijden aan zee- en meerzijde.

De kubische vergelijking ontstaat door de 3/2-macht in (C.14) en wanneer we deze lineair maken reduceert de benadering van (C.14) tot een lineaire betrekking. Stel daarom de volgende correctie op  $\delta_Z$

$$\delta_Z^* = \delta_Z \sqrt{s_Z - s_{K,M}} \quad (C.20)$$

Dan wordt (C.15):

$$s_Z - s_{K,M} = \gamma (s_{K,M} - s_M) + \gamma \delta_Z^* (s_Z - s_{K,M}) \quad (C.21)$$

En de impliciete oplossing, immers via  $\delta_Z^*$  nog afhankelijk van het antwoord, luidt:

$$s_Z - s_{K,M} = \frac{\gamma}{1 + \gamma (1 - \delta_Z^*)} \quad (C.22)$$

Met (C.22) wordt nu een meer inzichtgevende oplossing voor de zoutfractie (C.19) verkregen:

$$Z_{fractie} = \left\{ \frac{\gamma}{1 + \gamma (1 - \delta_Z^*)} \right\}^{\frac{3}{2}} \delta_Z \quad (C.23)$$

Welke met de definitie van  $\gamma$  uit (C.13) geschreven kan worden als:

$$Z_{fractie} = \frac{\delta_Z \delta_M}{\left\{ \delta_Z^{\frac{3}{2}} + \delta_M^{\frac{3}{2}} (1 - \delta_Z^*) \right\}^{\frac{2}{3}}} \quad (C.24)$$

Als een eerste iteratie kan  $\delta_Z^*$  wel benaderd worden met de oplossing van (C.22) voor  $\delta_Z = 0$

$$\delta_Z^* \approx \delta_Z \sqrt{\frac{\gamma}{1 + \gamma}} \quad (C.25)$$

waarmee de impliciete oplossing wordt doorbroken zodat onze benadering voor (C.24) luidt

$$Z_{fractie} \approx \frac{\delta_Z \delta_M}{\left\{ \delta_Z^{\frac{3}{2}} + \delta_M^{\frac{3}{2}} \left( 1 - \delta_Z \sqrt{\frac{\gamma}{1 + \gamma}} \right) \right\}^{\frac{2}{3}}} \quad (C.26)$$

Voor gelijke doorlaatfracties en open-tijden aan meer- en zeezijde geldt  $\gamma=1$  en voor zeer korte open-tijden en/of kleine doorlaatfracties bereikt (C.22) de ondergrens van  $\frac{1}{2}$  m.a.w. de zoutgehalten in de kolk bereiken het gemiddelde van de zoutgehalten in beide voorhavens zodat als ondergrens geldt:

$$\delta_Z^* \geq \frac{\delta_Z}{\sqrt{2}} \quad (C.27)$$

Met (C.26) bereiken we de absolute ondergrens van (C.24):

$$\delta_Z = \delta_M : Z_{fractie} = \frac{\delta_Z}{\left\{ 2 - \delta_Z^* \right\}^{\frac{2}{3}}} \geq \frac{\delta_Z}{2\sqrt{2}} \quad \text{en} \quad \frac{\delta_Z}{2\sqrt{2}} \approx 0.35 \delta_Z \quad (C.28)$$

Uit (C.23) volgt verder dat als  $\delta_Z < \delta_M$  geldt de ondergrens van (C.28) niet wordt bereikt. Vanwege symmetrie in de formuleringen kan voorgaand ook worden afgeleid met  $Y = (s_{K,Z} - s_M)$  als onbekende en de kubische vergelijking volgt opnieuw uit (C.12) volgens:

$$\delta_M Y^3 - (1 + \gamma) Y^2 + 1 = 0 \quad (C.29)$$

wanneer dezelfde definitie voor  $\gamma$  wordt gehandhaafd of met ook omkering in symbolen voor  $Y$ :

$$\delta_M Y^3 - (1 + \sigma^{-1}) Y^2 + 1 = 0 \quad ; \quad \sigma = \gamma^{-1} \quad (\text{C.30})$$

Uit de analoge afleiding tot (C.28) vinden dezelfde absolute ondergrens, nu uitgedrukt in  $\delta_M$ , zodat we concluderen:

$$Z_{\text{fractie}} \geq \frac{\min(\delta_Z, \delta_M)}{2\sqrt{2}} \quad (\text{C.31})$$

Als bovengrens gelden de primaire relaties (C.12) voor de zoutvracht de kolk in of uit zodat vanwege de bovengrenzen in  $(s_{K,Z} - s_M) \leq 1$  en  $(s_Z - s_{K,M}) \leq 1$  geldt:

$$Z_{\text{fractie}} \leq \min(\delta_Z, \delta_M) \quad (\text{C.32})$$

En de belangrijke conclusie voor de grenzen van de door zoutremmende middelen beperkte zoutvracht t.o.v. de ongehinderde zoutvracht met 100% uitwisseling tussen kolk en resp. voorhavens luidt:

$$\frac{\min(\delta_Z, \delta_M)}{2\sqrt{2}} \leq Z_{\text{fractie}} \leq \min(\delta_Z, \delta_M) \quad (\text{C.33})$$

Verder geldt dat de fractie doorgelaten zoutvracht niet evenredig is met het product van de doorlaatfracties aan zee- en meerzijde maar wordt bepaald door de kleinste doorlaatfractie, zij het met een proportionaliteit die kleiner dan één kan zijn, zie (C.28), maar niet evenredig is met het product van beide doorlaatfracties. Zie daartoe (C.23) en veronderstel dat  $\delta_Z$  de kleinste van de twee doorlaatfracties is zodat  $\gamma > 1$  geldt en dat  $\delta_Z$  naar nul gaat. Dan nadert de term tussen accoladen in (C.23) de evenredigheidswaarde één zodat deze niet evenredig is met de grotere, andere doorlaatfractie ( $\delta_M$ ) want we gingen uit van  $\gamma > 1$ .

Figuur C.1 toont de exacte oplossingen van (C.18) en de benadering voor de fractie van de doorgelaten zoutvracht (C.26) voor gelijke open-tijden van  $\tau = 1$  waarbij er in een onbeschermd kolk volledige vullingsgraad wordt bereikt met zoutgehalten in de kolk gelijk aan die van de resp. voorhavens. De fout in de benadering (C.26) is kleiner dan 10% voor producten van doorlaatfracties en geschaalde open-tijden kleiner dan ca. 0,5.

Meer reële schattingen worden gemaakt door de empirische ervaring te benutten dat binnen redelijk lange open-tijden een sluis kolk niet meer dan ca. 80% van zijn maximale vullingsgraad, symbool  $Z_{\text{fractie}}(1, 1)$ , bereikt voor  $\delta_Z \equiv \delta_M = 1$  zodat we (C.33) door de volgende reële grenzen kunnen vervangen:

$$\frac{\min(\delta_Z, \delta_M)}{2\sqrt{2}} \leq Z_{fractie}(1, 1) \cdot Z_{fractie}(\delta_Z, \delta_M) \leq \min(\delta_Z, \delta_M) \quad (C.34)$$

Door een bijbehorende kortere open-tijd in te voeren verkrijgen we Figuur C.2 met meer beperkte veranderingen in zoutgehalte t.o.v. de maximale verschillen in zoutgehalten tussen beide voorhavens.

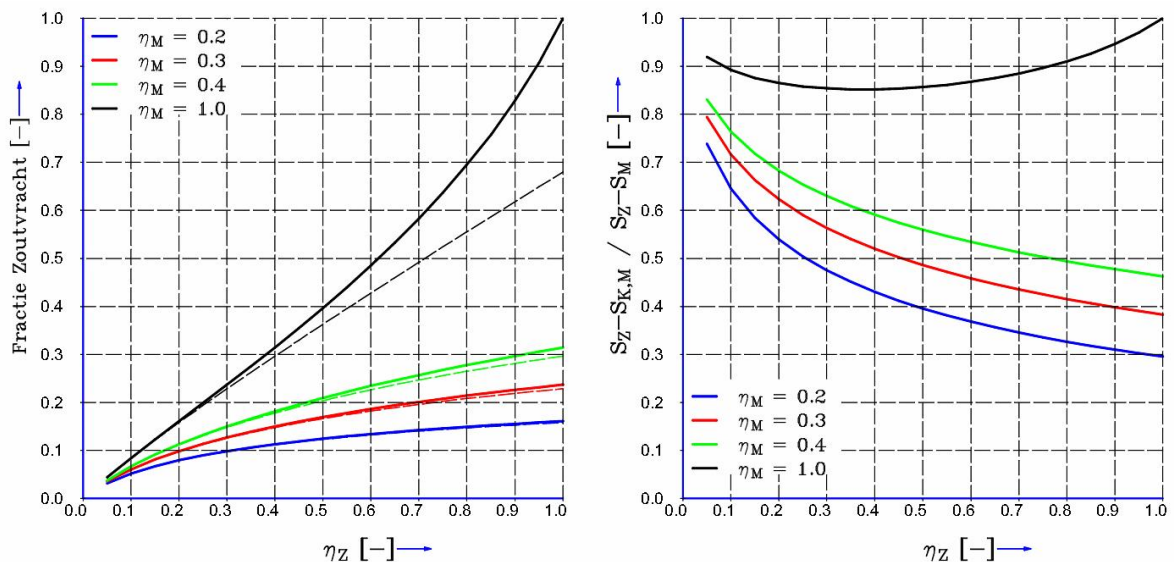
Het voorgaand overziende kunnen we de grenzen (C.34) als volgt onder woorden brengen:

- 1 Door geopende sluisdeuren is het zouttransport evenredig met het verschil in zoutgehalte tussen voorhaven en kolk vermenigvuldigd met de wortel uit dit verschil in zoutgehalten voor het uitwisselingsdebiet dat door de snelheid van de zouttong wordt bepaald.
- 2 Wanneer de kolk onbeschermd is én de open-tijd zo lang is dat zijn maximale uitwisselingsgraad met water uit de resp. voorhavens wordt bereikt dán is het verschil in zoutgehalten tussen kolk en voorhaven maximaal. Dit is de referentie van de zoutvracht door een onbeschermd kolk per schutcyclus d.w.z. één schutting naar zeezijde en daarna naar meerzijde.
- 3 Door een zoutremmend middel wordt per definitie het zouttransport door geopende sluisdeuren met zijn doorlaatfractie  $\eta$  ( $<1$ ) vermenigvuldigd t.o.v. een denkbeeldige onbeschermd kolk met hetzelfde verschil in zoutgehalten als in de beschermde kolk. Merk op dat als regel de zoutverschillen in een werkelijke onbeschermd kolk groter zullen zijn en dat is de essentie van de navolgende correctie op de factor  $\eta$ .
- 4 Door zoutremmende middelen wordt er in dezelfde open-tijd nl. minder zout met de kolk uitgewisseld. Bij gelijke zoutremmende middelen aan beide kolkeinden en door continue schutten met beide voorhavens nadert het zoutgehalte in de kolk de gemiddelde waarde van beide voorhavens. Dit nadert een halvering van het ongeremde verschil in zoutgehalten, zie punt 2. Zijn de zoutremmende middelen ongelijk dan wordt deze halvering niet bereikt.
- 5 Door sterke en gelijke zoutremmende middelen aan beide kolkeinden neemt de zoutvracht niet alleen af met de doorlaatfractie van zoutlekbeperkende middelen aan de kolkeinden maar tevens met een factor groter of gelijk aan  $1/2\sqrt{2} \approx 0,35$  omdat het zoutverschil tot minimaal de helft beperkt kan worden t.o.v. een onbeschermd kolk.
- 6 We concluderen dat bij gelijke doorlaatmiddelen met doorlaatfractie  $\eta$  de ondergrens van de zoutvracht  $\eta/2\sqrt{2} \approx 0,35 \eta$  bedraagt terwijl bij ongelijke doorlaatmiddelen de bovengrens wordt bepaald door de kleinste doorlaatfractie.

Het linkerdeel van Figuur C.1 toont de relatie tussen de zoutvrachtfractie en de doorlaatfractie  $\eta_Z$  aan zeezijde bij gegeven doorlaatfractie aan meerzijde  $\eta_M$  van 0.2, 0.3, 0.4 en 1. We herhalen hier dat de doorlaatfracties betrekking hebben op de beperking van het zouttransport door geopende sluisdeuren zonder zoutlekbeperkend middel maar bij hetzelfde initiële verschil in zoutconcentraties als mét zoutlekbeperkend middel. Door de werking van het zoutlekbeperkende middel neemt echter het initiële verschil in zoutgehalten af en dat geeft een geringere zoutvrachtfractie dan de doorlaatfractie. Op deze uitspraak kunnen we Figuur C.1 controleren b.v. voor  $\eta_M = 0.4$  (groene lijn) zien we dat de zoutvrachtfractie ongeacht de waarde van de doorlaatfractie  $\eta_Z$  kleiner dan 0.4 blijft. Een andere bevestiging zien we in Figuur C.1 dat de zoutvrachtfractie niet gelijk is aan het product ( $\eta_Z \cdot \eta_M$ ) immers dan zou de groene lijn een rechte lijn zijn door de oorsprong en de zoutvrachtfractie van 0.4

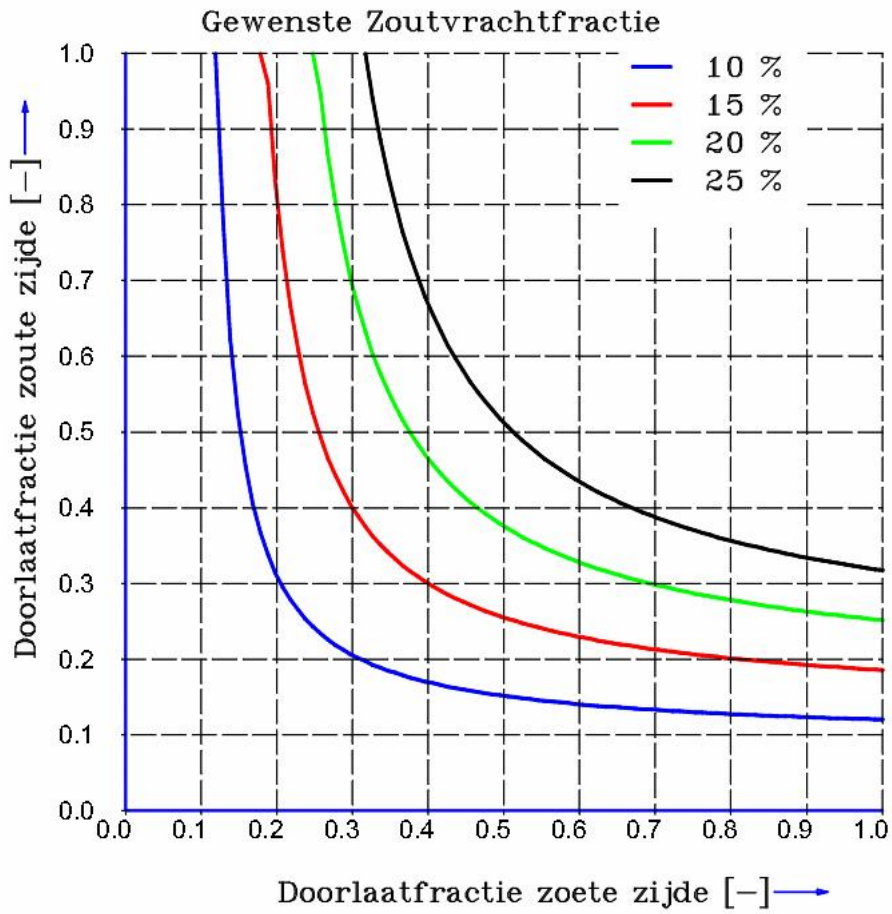
bij  $\eta_Z = 1.0$ . De zoutvrachfractie ligt boven deze rechte lijn en toont dat deze groter is dan het product ( $\eta_Z \cdot \eta_M$ ).

Het rechterdeel van Figuur C.1 toont het verschil in zoutgehalte tussen kolk en zeezijde-voorhaven op het moment dat de kolk naar zeezijde wordt geopend. Het zoutgehalte in de zee-zijde voorhaven is  $S_Z$  en in de kolk naar voorafgaande schutting met meerzijde  $S_{K,M}$ . Dit verschil is in het rechterdeel van Figuur C.1 genormeerd met het maximale verschil in zoutgehalten in beide voorhavens met zoutgehalte  $S_M$  in de meerzijde-voorhaven. Voor punten  $\eta_Z = \eta_M$  en afnemende doorlaatfracties zien we dat dit relatieve verschil in zoutgehalte tussen kolk en zeezijde-voorhaven van bijna 1 naar 0.5 nadert. Deze trend vertegenwoordigt het meewerkende effect van geringe doorlaatfracties nl. een geringer verschil in zoutgehalte tussen kolk en zee-zijde voorhaven en daardoor nóg minder zouttransport door de geopende sluisdeuren aan zeezijde. Voorgaand uitleg is identiek bij verwisseling van meerzijde en zeezijde met verwisselen van bijbehorende subscripten.



Figuur C.1 De invloed van combinaties van doorlaatfracties van zoutremmende middelen aan zeezijde en meerzijde op de fractie van de ongeremde zoutvracht door de kolk (linker figuurdeel) en op het verschil in zoutgehalte ( $S_Z$ ) tussen zeezijde-voorhaven en kolk ( $S_{K,M}$ ) na schutten naar meerzijde (rechter figuurdeel). De stippellijnen geven een eenvoudiger benadering, zie tekst.

Figuur C.2 toont welke combinaties van doorlaatafactoren dezelfde fractie van de zoutvracht t.o.v. de ongeremde zoutvracht bereiken. Dit zou een voorbeeld kunnen zijn voor nuttige ontwerpdigrammen bij afwegingen voor zoutremmende middelen aan beide kolkeinden. Figuur C.2 dient dan met het zoutvrachtmodel te worden opgesteld uitgaande van de afmetingen van de Volkeraksluizen, verschillen in waterstand en zoutconcentratie, prognose voor scheepvaart en in de gewenste situatie mogelijk nog aanvullende zoutlekbepurende middelen zoals drempels en zoetwaterdebietsen.



Figuur C.2 Volgens analytische oplossing de combinatie van doorlaatfracties van zoutremmende middelen aan zeezijde ( $\eta_z$ ) en aan meerzijde ( $\eta_M$ ) teneinde de gewenste zoutvrachtfractie t.o.v. de ongeremde zoutvracht te bereiken; de combinatie is symmetrisch in  $\eta_M$  en  $\eta_z$ .