

**Ontwerpstudie en
Praktijkproef
Zoutlekbeperving
Volkeraksluizen**



Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbepierking Volkeraksluizen

**Deeltaak 1: Numerieke simulatie van uitwisselingsstromingen
en van uitwisselingsbepierkende maatregelen**

dr. ir. R.E. Uittenbogaard
dr. ir. G.H. Keetels

1201226-001

Titel

Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbepierking Volkeraksluizen

Opdrachtgever

RWS Waterdienst

Project

1201226-001

Pagina's

71

Trefwoorden

Volkerak, zoutwaterintrusie, schutsluizen, luchtbel scherm, dichtheidsstromen, numerieke modellering





Samenvatting

Dit rapport presenteert de resultaten van een numerieke studie naar de effecten van luchtbellenschermen in combinatie met zoetwaterinjectie op de zoutuitwisseling tussen een voorhaven en een sluiskolk. Vooraf is een validatie uitgevoerd van het numerieke stroming- en transportpakket ANSYS-CFX voor deze toepassing. De berekeningen tonen een goede overeenkomst met de resultaten van een proef in een schaalmodelopstelling. Diverse combinaties van lucht- en waterdebieten zijn in het numerieke model onderzocht. De simulaties dienen ter ondersteuning van de praktijkproeven in de Stevinsluis bij Den Oever. Tevens geven deze simulaties fundamenteel inzicht in de werking van het luchtbellenscherm om de zoutuitwisseling tussen de voorhaven en de kolk te beperken.

This report presents the results of a numerical analysis to the effect of a pneumatic barrier or bubble screen in conjunction with a water jet on the intrusion of salt water into a shipping lock. The numerical techniques have been validated for this purpose by a detailed comparison with laboratory experiments. Several combinations of air and water supplies have been examined on the field scale. These results are important for appropriate choices for the air and water supply at the test facility at the Stevin sluices at Den Oever (Netherlands). Moreover, these simulations provide some fundamental understanding of the reduction mechanism of a bubble screen on the exchange of salt and fresh water between approach harbour and lock chamber.

Referenties

Zie referentielijst

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	feb. 2010	Dr.ir. G.H. Keetels					
		Dr.ir. R.E. Uittenbogaard					
1.1	april 2010	Dr.ir. G.H. Keetels		Ir. R.J. de Jong		Ir. T. Schilperoort	
		Dr.ir. R.E. Uittenbogaard					

Status

definitief

Inhoud

1	Uitgebreide samenvatting	1
2	Introductie	5
2.1	Algemeen	5
2.2	Beknopt overzicht van het project	5
2.3	Activiteiten en deeltaken	8
2.4	Overzicht van producten van het project	9
2.5	Dit rapport	10
3	Doelstelling numerieke detailberekeningen	11
3.1	Introductie	11
3.2	Relatie tussen experimenten en numerieke detailsimulaties	12
3.3	Specifieke doelstellingen deeltaak 1	14
3.4	Indeling rapport	14
4	Opzet van numerieke detailsimulaties	15
4.1	Beschrijving van de geometrie van het laboratorium- en praktijkproeven	15
4.2	Relevante modelleertechnieken in ANSYS-CFX	18
4.3	Opzet van het CFX model	19
5	Numerieke simulatie van dichtheidsstroming op lab-en prototypeschaal	21
5.1	Theorie voor dichtheidsstromingen in een lock-exchange experiment	21
5.2	Validatie van numeriek model van lock-exchange stroming op laboratoriumschaal	23
5.3	Simulatie van een ongehinderde lock-exchange op prototypeschaal	29
5.4	Conclusie met betrekking tot de modellering van dichtheidstroming op lab- en prototypeschaal	31
6	Numerieke modellering van een luchtbellenscherm	33
6.1	Validatie van numeriek model van een luchtbellenscherm in homogeen water	33
6.1.1	Literatuur over luchtbellenschermen in homogeen water	33
6.1.2	Validatie numeriek model luchtbellenscherm in homogeen water op laboratoriumschaal	33
6.1.3	Validatie numeriek model luchtbellenscherm in homogeen water op prototypeschaal	41
6.2	Numerieke simulatie van een luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoetwater	43
6.2.1	Validatie numeriek model luchtbellenscherm bij een overgang van zout naar zoet op labschaal	43
6.2.2	Numerieke analyse luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoet op prototypeschaal	45
		46
7	Numerieke bepaling van effectiviteit maatregelen tegen zoutindringing	49
7.1	Definitie van de reductiefactor	49
7.2	Theorie voor de reductiefactor bij een luchtbellenscherm zonder waterscherm	50
7.3	Validatie numerieke modellen van maatregelen op laboratoriumschaal	54
7.4	Numerieke analyse effect maatregelen op prototypeschaal	57

8 Conclusies	63
8.1 Validatie van de numerieke modellen	63
8.2 Analyse luchtbellenscherm in combinatie met zoetwaterscherm	63
8.3 Schatting reductiefactor bij diverse combinaties van lucht- en waterdebiet	63
8.4 Advies bij de uitvoering van het veldexperiment in de Stevinsluis	64
9 Literatuur	67
 Bijlagen:	
Bijlage A Quasistationaire wervels	A-1

Begrippenlijst zoutlekbeperving bij schutsluizen

- 1 De zoutindringing (of het zoutbezwaar) is de totale hoeveelheid zout (zoutmassa in kg) die gedurende een bepaalde tijdsduur (bijv. een dag) tijdens het schutproces door de schutsluis van de voorhaven naar de zoetwaterzijde is gestroomd.
- 2 Het zouttransport (in kg/s) is de hoeveelheid zout die de schutkolk indringt gemiddeld over een zekere tijdsduur (bijv. de opentijd). Een negatief zouttransport betekent dat het zout de kolk uitstroomt naar de zoete voorhaven. Bij een gemiddelde over een langere periode met verschillende schutcycli wordt i.p.v. over zouttransport gesproken over de zoutlek (bijv. uitgedrukt in ton/dag of omgerekend naar kg/s).
- 3 De zoutuitwisseling (uitgedrukt in een percentage %) is de hoeveelheid zout die vanuit de voorhaven de sluis kolk gedurende een bepaalde tijdsduur in is gestroomd gerelateerd aan de hoeveelheid zout in de sluis kolk als die geheel gevuld zou zijn met het zoute water van de voorhaven. De definitie geldt ook voor een zoute kolk en een zoete voorhaven (stoomrichting zout omgekeerd).
- 4 De reductiefactor (factor η) is gedefinieerd als het opgetreden zouttransport bij de sluis met zoutlekbepervende maatregelen, gedeeld door het transport bij een lock-exchange flow (dus zonder zoutlekbepervende maatregelen) met hetzelfde dichtheidsverschil.
- 5 Een kolkuitwisselingsstroming (lock-exchange flow) is gedefinieerd als de dichtheidsstroming die optreedt bij het openen van de sluisdeur ten gevolge van alleen een dichtheidsverschil van het water, dus zonder de effecten van nivellering en/of zoutlekbepervende maatregelen.
- 6 Het zoutfront is een onderdeel van de kolkuitwisselingsstroming: het zoute water stroomt in een laag (zouttong) onder het zoete water door (soms intrusie genoemd) en beide stromen vertonen een front, het zoet- of zoutfront. In en nabij de fronten vindt relatief veel menging plaats.
- 7 De lengte van de zoute onderlaag, gerekend vanaf de kolkingang, wordt de intrusielengte genoemd.

1 Uitgebreide samenvatting

Een belangrijk aspect bij het besluit om het Volkerak-Zoommeer te verzilten ter bestrijding van blauwalg en ter verbetering van de waterkwaliteit, is de optredende zoutlek door de Volkerak scheepvaartsluizen. De zoutlek door deze schutsluizen naar het Hollandsch Diep, dat behouden dient te blijven als zoetwaterreservoir, is onaanvaardbaar groot zonder toepassing van voldoende effectieve maatregelen. Een deel van de zoutlek is een gevolg van de verplaatsing van scheepsvolumes van het zoete naar het zoute pand en van het nivelleren van de kolken als het zoute pand hoger staat dan het zoete pand. Dit deel is niet met beperkte maatregelen te compenseren. Een ander belangrijk deel van de zoutlek is het gevolg van de kolkuitwisselingsstroming bij openstaande sluisdeuren. Deze kolkuitwisselingsstroming is wel met beperkte maatregelen te beïnvloeden. Gedacht wordt nu aan een combinatie van zoutlekbeperkende maatregelen die de schutcyclus niet verlengen, zoals een luchtbellens- en een waterscherm (of zoutlekbeperkend scherm). Deltares is gevraagd door RWS hiernaar een studie uit te voeren.

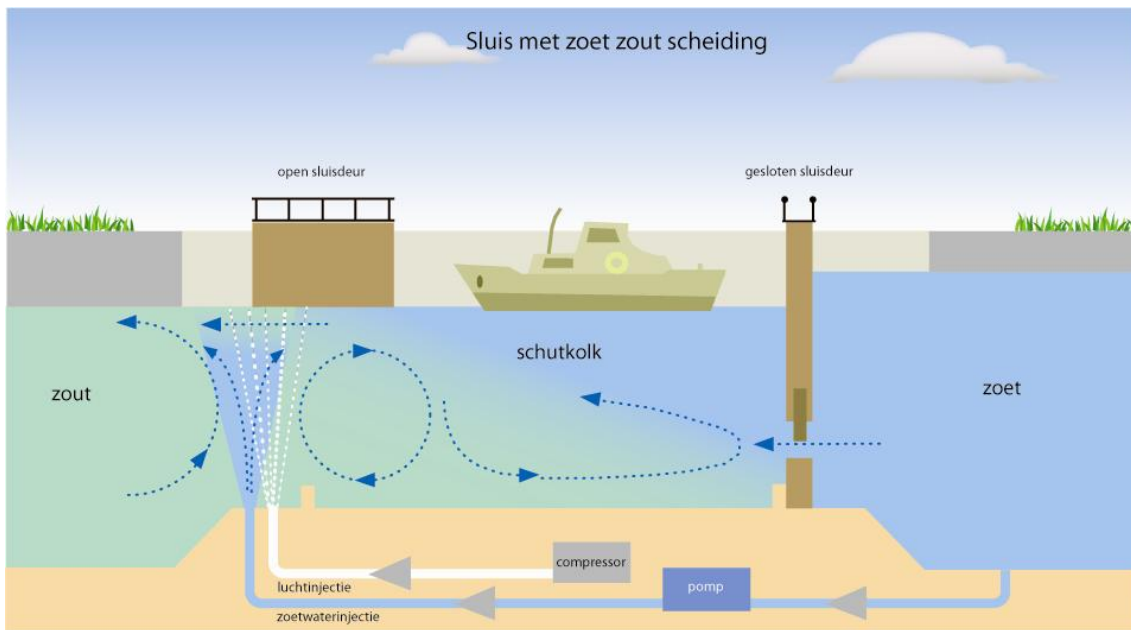
De verschillende maatregelen zullen getest worden met praktijkproeven bij de Stevinsluis in de Afsluitdijk (Deeltaak 3) alvorens te worden toegepast bij de Volkerak schutsluizen. Voorafgaand aan deze praktijkproeven zijn numerieke berekeningen (Deeltaak 1) en laboratoriumproeven (Deeltaak 2) uitgevoerd.

De verschillende maatregelen zullen eerst getest worden met praktijkmetingen bij de Stevinsluis in de Afsluitdijk (Deeltaak 3). Voorafgaand aan deze praktijkmetingen zijn numerieke berekeningen (Deeltaak 1) en laboratoriumproeven (Deeltaak 2) uitgevoerd. Dit rapport beschrijft de resultaten uit Deeltaak 1.

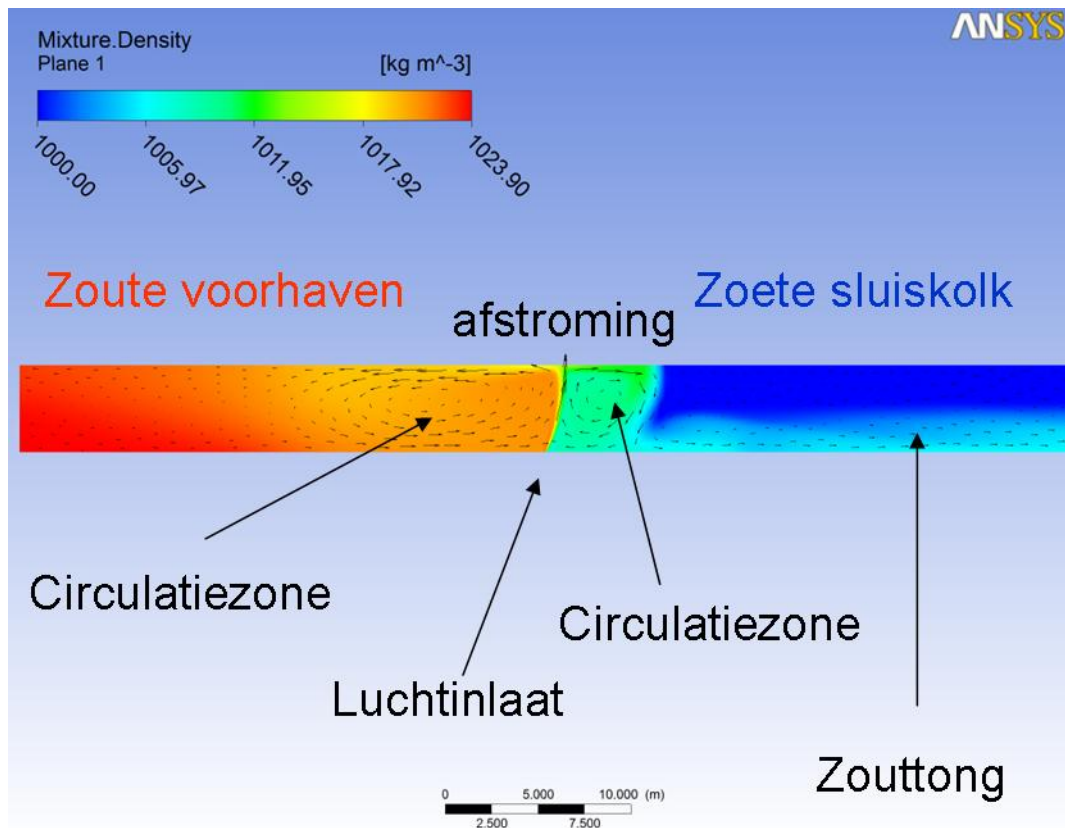
Numerieke of computer berekeningen van stromingen kunnen een waardevolle aanvulling zijn op laboratorium- en praktijkproeven. Het is mogelijk om in een relatief korte tijd veel informatie over de stroming te verkrijgen op zowel laboratorium- als prototypeschaal. Er zijn echter diverse onzekerheden bij het opzetten van numerieke berekeningen, waardoor de autonomie beperkt is. Het is daarom van groot belang dat de rekenmodellen eerst goed vergeleken worden met beschikbare metingen. In deze studie dienen de laboratoriumproeven uit Deeltaak 2 en een aantal veldproeven met luchtbellenschermen van Bulson (1962) als referentie. Op basis daarvan worden keuzes gemaakt voor bepaalde modellen en rekentechnieken. Daarna is een analyse gemaakt van de stroming- en transportprocessen bij een luchtbellenscherm met een zoetwaterinjectie op de overgang van zout- naar zoet water op prototypeschaal.

Een belangrijke observatie is dat er verschillende stromingspatronen ontstaan afhankelijk van de hoeveelheid lucht die per tijdseenheid wordt ingeblazen (luchtdebiet). Het blijkt dat er mogelijk een lager luchtdebiet gebruikt kan worden dan waar aanvankelijk vanuit werd gegaan. Hierbij wordt maximaal een reductie van circa 80 procent gerealiseerd in de totale hoeveelheid zout die de kolk indringt ten opzichte van situatie zonder maatregelen gedurende de tijd dat de deuren aan één zijde geopend zijn. Het waterscherm dat getest kan worden in de veldstudie bij de Stevinsluis heeft een beperking in de hoeveelheid zoetwater dat aangevoerd kan worden met de ingehuurde pompen. Uit de berekeningen blijkt dat dit waterdebiet te klein is om een significante reductie te realiseren. Dit sluit uiteraard niet uit dat het waterscherm bij een hoger waterdebiet wel een verdere reductie mogelijk kan maken.

Een andere kansrijke optie om een verdere indringing van zoutwater tegen te gaan is de kolk door te spoelen met een extra zoetwater instroom vanuit het zoete pand terwijl de deur aan de zoute zijde geopend is, zie Figuur 1.1. Het zout in de circulatiezone aan de kolkzijde van het luchtbellenscherm wordt op deze manier uitgespoeld. Hierdoor verdwijnt de drijvende kracht achter de zoutindringing en krijgt het zoute water veel minder kans om de kolk in te stromen. De praktijkproeven moeten uitwijzen of dergelijke maatregelen op prototypeschaal daadwerkelijk goed werken. De rol van scheepvaart is hierbij een belangrijk aandachtspunt.



Figuur 1.1 Schematische weergaven van zoutlekbeperkende maatregelen in een scheepvaartsluis met zoet-zout scheiding: luchtbellenscherm in combinatie met zoetwaterinjectie en zoetwater instroom via de sluisdeuren. (Bron: Rijkswaterstaat)



Figuur 1.2 Voorbeeld van een numerieke simulatie van een luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoetwater. De rode kleuren geven aan dat het water een hoge dichtheid of hoog zoutgehalte heeft. De blauwe kleuren geven aan dat het water een lagere dichtheid heeft of een laag zoutgehalte. Uit de circulatiezone aan de kolkzijde van het luchtbellenscherm ontsnapt een sterk verdunde en tevens sterk vertraagde zouttong. Merk op dat van dit effect alleen goed gebruik gemaakt kan worden als de deuren niet langer dan gebruikelijk geopend blijven (ca. 0,5 uur).

2 Introductie

2.1 Algemeen

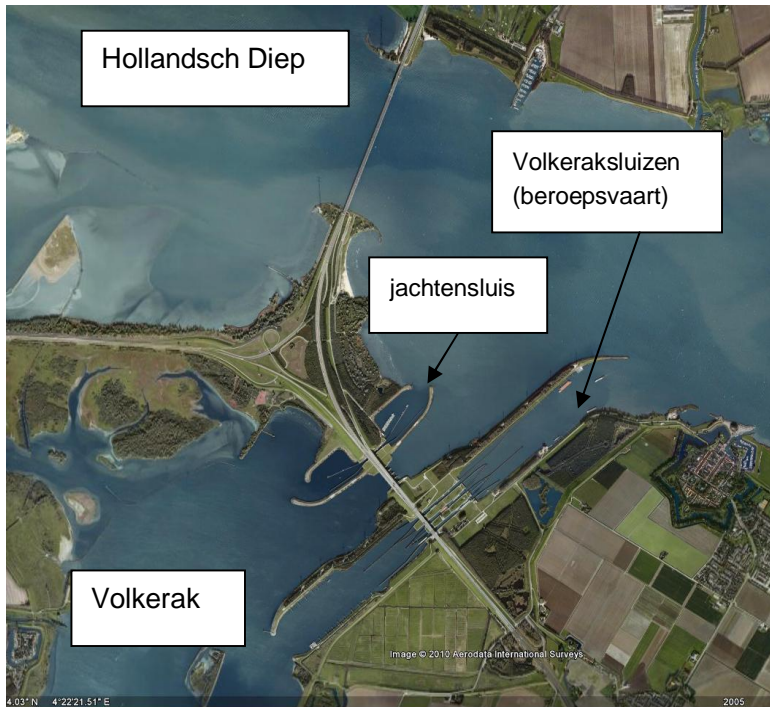
De Waterdienst van Rijkswaterstaat heeft op 3 november 2009 opdracht gegeven aan Deltares voor de uitvoering van de Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen (zaaknummer 31030032). Deze studie wordt uitgevoerd onder de voorwaarden van de raamovereenkomst met nummer WD-4924 betreffende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

Het onderzoek is ondersteund door een begeleidingsgroep welke is samengesteld uit vertegenwoordigers van de Waterdienst (voorzitter), Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, Dienst Zuid-Holland, Dienst Zeeland, en Dienst IJsselmeergebied.

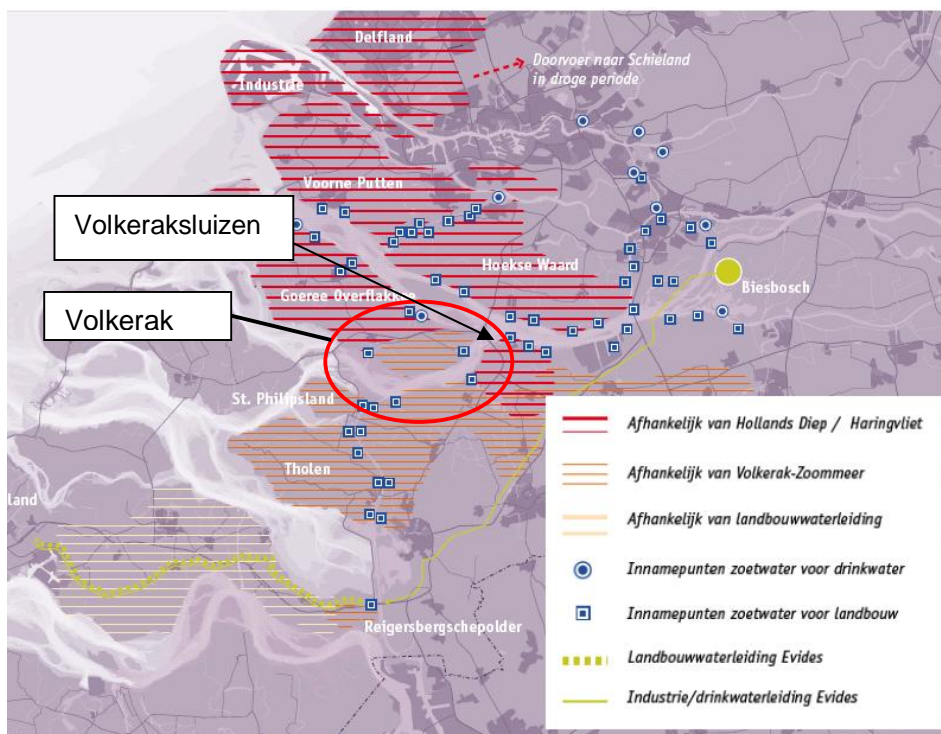
2.2 Beknopt overzicht van het project

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

Wanneer het Volkerak zout wordt, lekt tijdens het schutten zout water via de Volkeraksluizen vanuit het Volkerak-Zoommeer naar het Hollandsch Diep, waar het zich vervolgens zal verspreiden naar het Haringvliet en Spui (zie figuren 1.1 en 1.2). De stroming van zout van het Volkerak-Zoommeer naar het Hollandsch Diep noemen wij in dit rapport: de zoutlek. In het Hollandsch Diep, Haringvliet en Spui bevinden zich meerdere waterinnamepunten voor de drink- en industriewatervoorziening, voor het peilbeheer en voor de watervoorziening ten behoeve van land- en tuinbouw (zie figuur 1.2). Verkennend onderzoek heeft aangegeven dat indien de zoutlek beperkt blijft tot 60 kg/s, het chloridegehalte bij waterinnamepunten voldoende laag blijft, zodat ingrijpende mitigerende maatregelen dan niet hoeven te worden uitgevoerd.

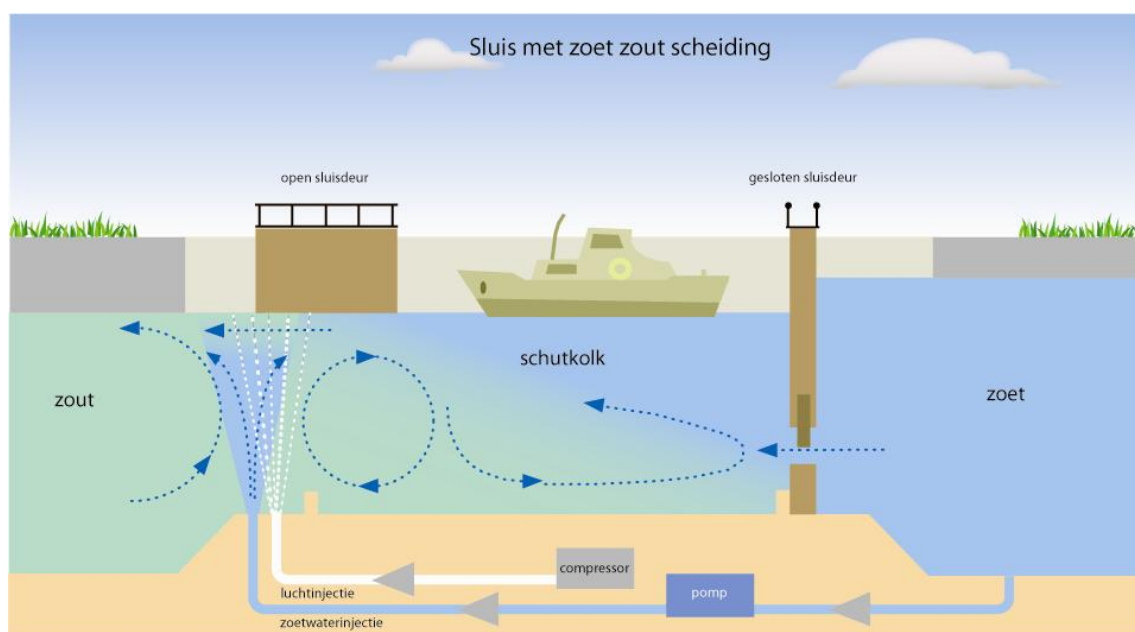


Figuur 2.1 De Volkeraksluizen vormen de verbinding tussen het Volkerak en het Hollandsch Diep. De scheepvaartsluizen bestaan uit 3 beroepsvaartsluizen en 1 jachtensluis. (Bron: Google Earth)



Figuur 2.2 Zoetwater innamepunten in en rondom het Volkerak (Bron: Zoet Water Zuidwestelijke Delta, juni 2009)

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



Figuur 2.3 Schematische weergaven van zoutlekbeperkende maatregelen in een scheepvaartsluis met zoet-zout scheiding: luchtbellenscherm in combinatie met zoetwaterinjectie en zoetwater instroom via de sluisdeuren (lekkende eb-deuren). (Bron: Rijkswaterstaat)

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

Na een verkenning door Rijkswaterstaat en Deltares is de Stevinsluis in de Afsluitdijk bij Den Oever gekozen als locatie voor de praktijkproef. De Stevinsluis is als geschikt aangemerkt vanwege de daar aanwezige zoet-zout overgang, de afmetingen van de sluis en de beschikbare infrastructuur en voorzieningen ter plaatse. In vergelijking met de Volkeraksluizen geeft de combinatie van geringere diepte en hoger zoutgehalte in de Stevinsluis een nagenoeg gelijke voortplanting van de zouttong. De overige aan dichtheid gerelateerde effecten en de werking van het luchtbellenscherm kunnen over en weer goed worden vertaald. Verder wordt de Stevinsluis op identieke manier gevuld als de Volkeraksluizen, namelijk via rinketschuiven in de sluisdeuren.

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

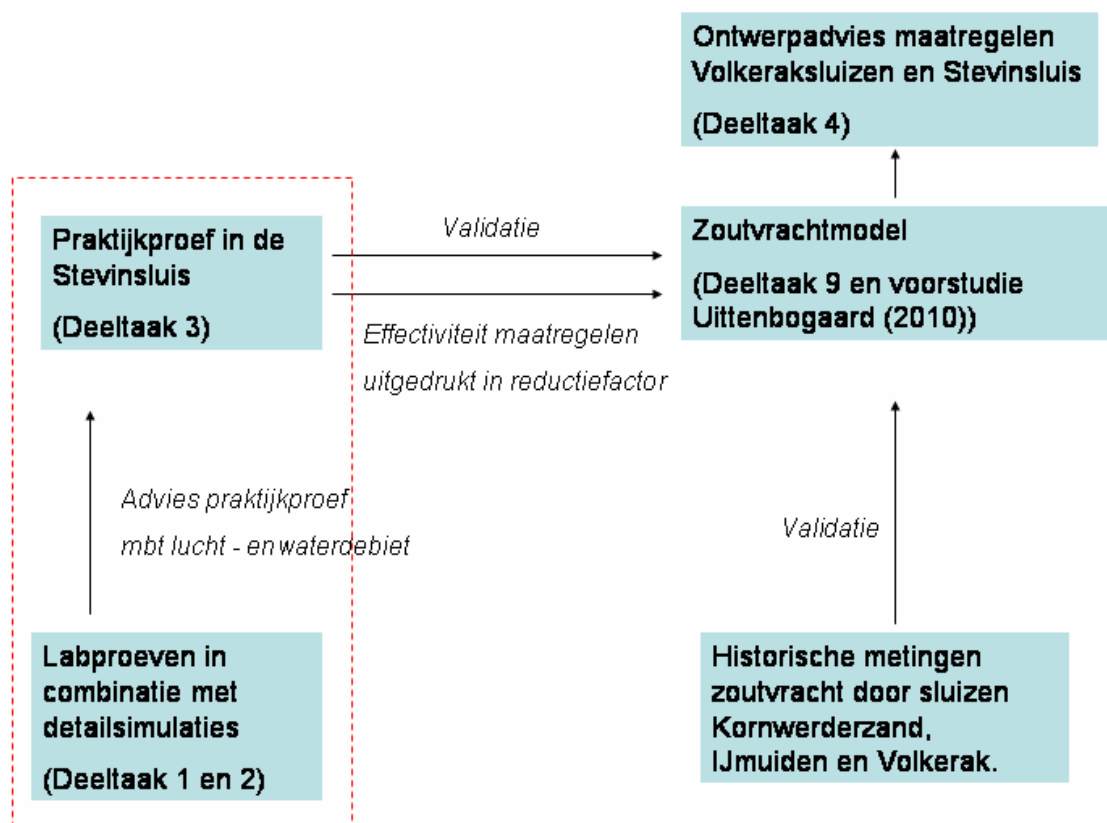
- 8 Numerieke modellering, onder te verdelen in
 - a Gedetailleerde modellering van uitwisselings-stromingen in de Stevinsluis;
 - b Berekening van de zoutlek door de Stevinsluis en de Volkeraksluizen met behulp van het zogenaamde Zoutvrachtmodel (Uittenbogaard, 2010);
 - c Modellering van zoutverspreiding in het Noordelijk Deltabekken;
- 9 Laboratoriumproeven van de combinatie uitwisselings-stroming, luchtbellenscherm en waterinjectie op kleine schaal; en
- 10 Praktijkproeven in de Stevinsluis.

2.3 Activiteiten en deeltaken

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

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

Als voorbereiding van de praktijkproeven in de Stevinsluis zijn twee deeltaken uitgevoerd om vooraf een kwantitatieve schatting te hebben van het effect van een luchtbellenscherm in combinatie met een waterinjectie tegen zoutinrusie in een sluisolk. Deeltaak 1 betreft een serie gedetailleerde computerberekeningen en Deeltaak 2 betreft een laboratoriumstudie op kleine schaal. In beide deeltaken wordt het proces van de zoutuitwisseling in een scheepvaartsluis bij opening van de sluisdeur aan één zijde bij gelijke waterstand in kolk en voorhaven bestudeerd, al dan niet in combinatie met een luchtbellenscherm en/of een zoetwaterinjectie. In deze studies wordt geen aandacht gegeven aan andere fysische processen die van belang zijn in een schutcyclus, zoals nivellering, de door scheepvaart geforceerde waterbeweging en het effect van het openen van de deuren bij voltooiing van de schutcyclus. Het effect van deze processen wordt alleen beschouwd in de praktijkproeven bij de Stevinsluis (deeltaak 3). De resultaten van de praktijkproeven worden vervolgens gebruikt in het Zoutvrachtmodel (deeltaak 9). In deeltaak 4 wordt het Zoutvrachtmodel gebruikt om tot optimale zoutlekbeperkende maatregelen voor de Volkeraksluizen te komen en om de daggemiddelde zoutlek bij de Volkeraksluizen te berekenen. Figuur 2.4 geeft deze werkwijze schematisch weer.



Figuur 2.4 Overzicht van deeltaken in de Ontwerpstudie en Praktijkproeven Zoutlekbeperving Volkeraksluizen.

2.4 Overzicht van producten van het project

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

Product	Deeltaak
1. Bespreekverslag van startoverleg met de opdrachtgever	
2. Rapport detailsimulaties Stevinsluis inclusief vergelijking labproef	1
3. 1 ^e versie Zoutvrachtmodel	1
4. Rapport labproeven	2
5. Digitale datasets meetgegevens labproeven	2
6. Meetplan en meetprotocol voor het uitvoeren van de praktijkproeven Stevinsluis	1 & 2
7a. Verslag tussenresultaten praktijkproeven Stevinsluis	3
7b. Rapport beschrijving en resultaten praktijkproeven Stevinsluis	3
8. Digitale datasets meetgegevens praktijkproeven	3
9. Rapport evaluatie maatregelen Stevinsluis	4a
10. Rapport evaluatie maatregelen Volkeraksluizen	4b

Product	Deeltaak
11a. Concept Eindrapport	alle
11b. (Definitief) Eindrapport	alle
12. Richtlijnen operationeel beheer Volkeraksluizen	5
13. Rapport evaluatie visintrek	6
14. Rapport kalibratie 3D zoutmodellering Noordelijk Deltabekken	7
15. Rapport scenarioberekeningen zoutverspreiding zoutlek Volkeraksluizen	7
16. Rapport mogelijkheden andere sluizen	8
17. Model zoutvracht sluizen inclusief handleiding	9

2.5 Dit rapport

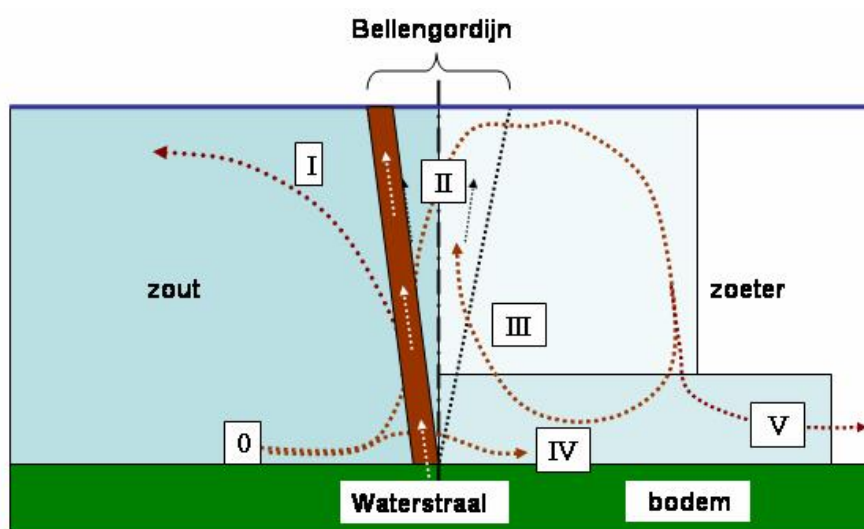
Het voorliggende rapport, getiteld 'Ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperving Deeltaak 1: Numerieke simulatie van beperkende maatregelen tegen zoutuitwisseling tussen voorhaven en schutsluis' is product nummer 2 uit de bovenstaande serie producten van de 'Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperving Volkeraksluizen'.

Dit rapport presenteert de resultaten van een numerieke studie naar de effecten van luchtbellenschermen en waterinjectie op de door dichtheidsverschillen aangedreven uitwisselingsstromingen tussen een voorhaven en een sluiscolk. Vooraf is een validatie uitgevoerd van het numerieke stroming- en transportpakket ANSYS-CFX voor deze toepassing. De berekeningsresultaten komen goed overeen met de resultaten van een proef in een schaalmodelopstelling. Diverse combinaties van lucht- en waterdebieten zijn in het numerieke model onderzocht. De simulaties dienen ter ondersteuning van het uit te voeren praktijkproef in de Stevinluis bij Den Oever. Tevens geven deze simulaties fundamenteel inzicht in de werking van het luchtbellenscherm om de uitwisseling van zout water tussen de voorhaven en de colk te beperken.

3 Doelstelling numerieke detailberekeningen

3.1 Introductie

Ter ondersteuning van de praktijkproef in de Stevinsluis zijn er twee voorbereidende studies uitgevoerd om voor aanvang van de praktijkproef een indicatie te hebben van de beperkende werking van een luchtbellenscherm in combinatie met een waterscherm tegen zoutintrusie in een sluiscolk. De eerste studie, Deeltaak 1, betreft een serie computerberekeningen. De tweede studie, Deeltaak 2, betreft laboratoriumproeven. In beide studies wordt een belangrijk deelproces bestudeerd namelijk de zoutuitwisseling langs een luchtbellenscherm met waterscherm bij opening van de sluisdeur aan één zijde bij gelijke waterstand in kolk en voorhaven. De typische stroombanen van zoutwater langs het luchtbellenscherm met waterscherm die na opening van de sluisdeur aan de zoute zijde kunnen optreden worden weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Waterscherm aan zoute zijde (bruine band) als aanvullende zoutwerende werking van een luchtbellenscherm op de zout-zoet overgang (bij geopende sluisdeur) in verticale doorsnede in lengterichting schutcolk. Het waterscherm vangt het meesleuren van zoutwater vanaf de zoute zijde (I), vervangt water in de mengzone (II) door het bellenscherm en verhindert de indringing van zoutwater (IV) bij de teen van het luchtbellenscherm.

Andere deelprocessen van een schutcyclus worden alleen beschouwd in de praktijkproef bij de Stevinsluis en daarna verwerkt in het Zoutvrachtmodel van Uittenbogaard (2010) zoals besproken in sectie 2.3.

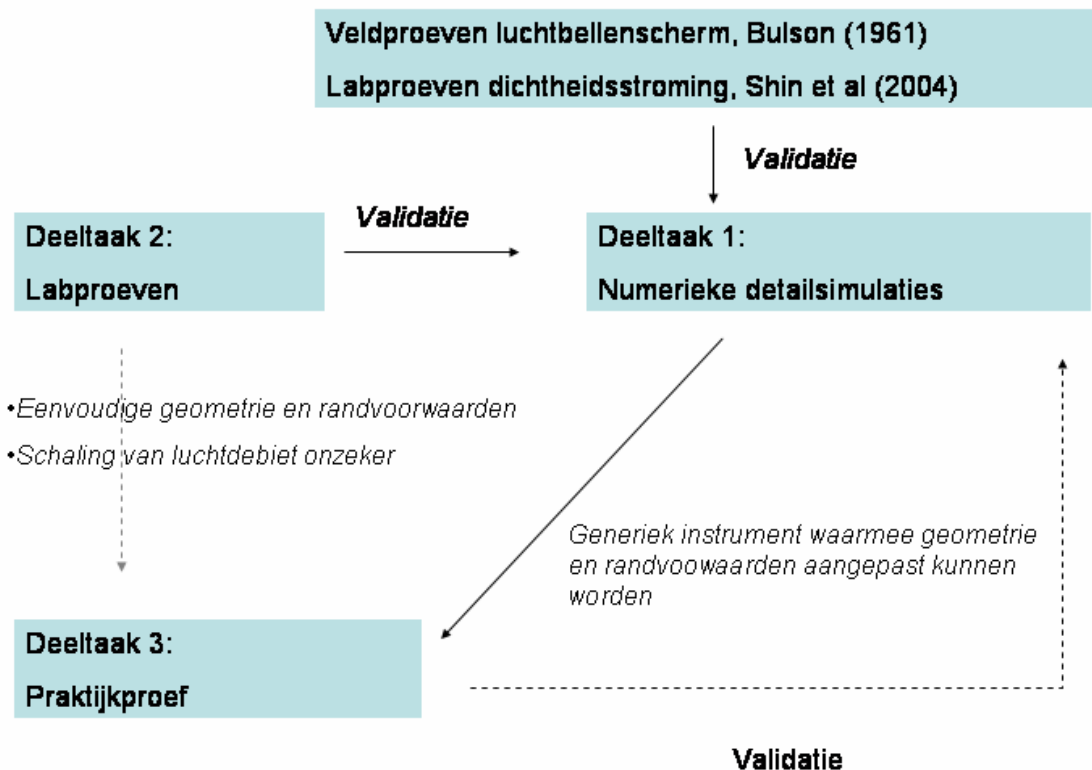
3.2 Relatie tussen experimenten en numerieke detailsimulaties

Numerieke detailsimulaties kunnen zeer nuttig zijn bij een hydraulische ontwerpstudie. De autonomie van numerieke detailsimulaties is echter beperkt. De rekenmodellen moeten daarom eerst getest worden, zie onderstaand intermezzo. De procedure die in deze studie is gehanteerd is schematisch weergegeven in Figuur 3.2.

De resultaten van de laboratoriumproeven in Deeltaak 2 leveren zeer relevante informatie over de beperkende werking van luchtbellenschermen in combinatie met een waterscherm, zie Mastbergen (2010). Om de resultaten van een laboratoriumproef te vertalen naar de prototypeschaal moeten er schaaltechnieken gebruikt worden. Dat betekent dat de laboratoriumproeven zodanig opgezet moeten worden dat de verhouding tussen de verschillende krachten op het water in de laboratoriumproeven en de praktijkproeven hetzelfde is. Dit is bijvoorbeeld goed mogelijk voor de proeven met alleen een dichtheidsstroming zonder maatregelen. Voor de proeven met een luchtbellenscherm is dit echter niet mogelijk. De schaalbaarheid van het luchtdebiet is mogelijk een probleem. In het numerieke model wordt geen gebruik gemaakt van schaaltechnieken. Na validatie van het numerieke model kan het stroombeeld en zouttransport nabij een luchtbellenscherm met waterscherm op prototypeschaal berekend worden zonder tussenkomst van schaalwetten. Daarna kunnen randvoorwaarden en eventueel de geometrie eenvoudig gevarieerd worden. In deze studie is bijvoorbeeld het lucht- en waterdebiet gevarieerd om de maatregelen te bestuderen op de prototypeschaal. Op basis van de resultaten van de praktijkproeven kan eventueel later een extra validatie uitgevoerd worden.

Bovengenoemde procedure is alleen gevolgd voor een analyse van de stroming en het zouttransport langs een luchtbellenscherm in combinatie met een waterscherm bij opening van de sluisdeur aan één zijde van de kolk. Deze procedure kan ook toegepast worden om andere deelprocessen van een schutcyclus te modelleren. Er is echter een afweging gemaakt op basis van noodzaak, moeilijkheidsgraad, rekentijden en de mate waarin informatie over deze deelprocessen verkregen kan worden in praktijkproeven. Hierop is besloten dat nadere analyse van het effect van de andere deelprocessen op de zoutinrusie uitgevoerd zal worden op basis van de praktijkproeven, zonder voorbeschouwing met gedetailleerde rekenmodellen en laboratoriumproeven.

Modellering van de geforceerde waterbeweging door scheepvaart in een sluisdeur en het zouttransport dat daar mee gepaard gaat kan zeer relevante informatie opleveren. Dit is echter niet uitgevoerd omdat de moeilijkheidsgraad en benodigde rekentijden met standaardmethoden hier naar verwachting te beperkend zijn. In Deeltaak 1 is er wel een verkennende studie uitgevoerd naar de mogelijkheid om dit proces numeriek te benaderen met een relatief nieuwe rekentechniek.



Figuur 3.2 Geeft een overzicht van de relatie tussen de laboratoriumproeven (Deeltaak 2), de numerieke detailsimulatie (Deeltaak 1) en de praktijkproeven in de Stevinsluis (Deeltaak 3). De numerieke detailsimulaties worden gevalideerd met behulp van de resultaten van de laboratoriumproeven en proeven uit de literatuur.

Intermezzo:

Numerieke stromingsleer of Computational Fluid Dynamics (CFD) kan van zeer grote waarde zijn bij een hydraulische ontwerpstudie. In een vroeg stadium van het ontwerpproces kunnen CFD berekeningen inzicht verschaffen in de relevante stromings- en transportfenomenen. De autonomie van numerieke stromingsberekeningen is echter beperkt indien er geen validatie met (schaal)experimenten is uitgevoerd. Laboratoriumproeven en prototypeproeven blijven daarom van groot belang. In veel gevallen is de laboratoriumproef niet volledig fysisch gelijkvormig te schalen dwz de verhoudingen tussen de verschillende krachten zoals de zwaarte, traagheid en viskeuze krachten is dat geval anders in de laboratoriumproef dan in de praktijkproeven. De stroming in een laboratoriumproef kan zich in dat geval anders gedragen dan de stroming op de prototypeschaal. CFD berekeningen maken geen gebruik van schaalwetten en kunnen daarom als extra hulpmiddel gebruikt worden om laboratoriumresultaten te vertalen naar de prototypeschaal. Daarnaast kunnen CFD berekeningen relatief eenvoudig worden aangepast voor variaties in het hydraulische ontwerp en leveren extra informatie op die moeilijk te verkrijgen is tijdens de laboratorium- en prototypeproeven bijvoorbeeld de snelheidsverdelingen. Indien CFD op bovengeschetste manier wordt ingezet kan er in veel gevallen een aanzienlijke tijd- en kostenbesparing

gerealiseerd worden in de proeven op laboratorium- en prototypeschaal door vooraf de kansrijke ontwerpen te selecteren.

3.3 Specifieke doelstellingen deeltaak 1

De numerieke detailstudie bestaat uit de volgende onderdelen

1. Validatie van de numerieke berekeningen aan de hand van relevante literatuur en laboratoriumproeven uit Deeltaak 2
2. Analyse van het stroombeeld en zouttransport bij toepassing van een luchtbellenscherm in combinatie met een waterschermbaan op de schaal van de Stevinsluis
3. Schatting reductiefactor bij diverse combinaties van lucht- en waterdebiet
4. Schatting reductiefactor bij gebruik van een luchtbellenscherm en waterschermbaan in combinatie met een zg. 'lekkende' ebdeur
5. Advies bij de uitvoering van de praktijkproeven in de Stevinsluis
6. Verkenning van de mogelijkheid om het effect van scheepvaart op de intrusie van zout in een dichtheidsgedreven uitwisselingsstroom te berekenen

Onderdeel 1 tot en met 5 zijn uitgevoerd worden door Deltares met ANSYS-CFX en onderdeel 6 is uitgevoerd worden door Paul Groenenboom van de ESI-group met behulp van Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) in combinatie met Finite Elements (FE) . Deze resultaten zijn beschreven in een apart rapport (Groenenboom, 2010).

3.4 Indeling rapport

Het rapport is als volgt opgebouwd. In Hoofdstuk 4 wordt het probleem gespecificeerd en tevens de opzet van het model beschreven. In Hoofdstuk 5 wordt een lock-exchange experiment¹ gemodelleerd zonder beperkende maatregelen op zowel de laboratorium- als de prototypeschaal. De berekeningen worden vergeleken met de relevante literatuur en de laboratoriumproeven van Deeltaak 2. In Hoofdstuk 6 wordt het model van het luchtbellenscherm in homogeen water en van een luchtbellenscherm op een scheiding van zout en zoet water beschreven. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt met de metingen die beschreven zijn in de literatuur van de stroomsnelheid nabij het wateroppervlak als functie van het luchtdebiet. Deze vergelijking is op te vatten als een extra validatie van de modellering van een luchtbellenscherm in ANSYS-CFX op prototypeschaal. In Hoofdstuk 7 worden de berekende resultaten gepresenteerd van de totale uitwisselingstroom en het zouttransport bij toepassing van een luchtbellenscherm in combinatie met een waterschermbaan. De resultaten worden samengevat in de Conclusie waarbij een aanbeveling gedaan wordt voor de uitvoering van de praktijkproeven.

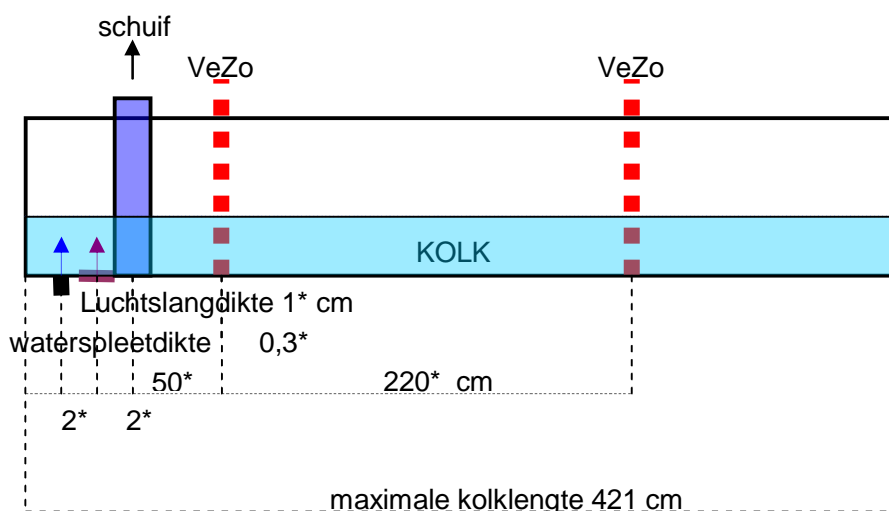
1. In het lock-exchange experiment wordt de uitwisselingstroming tussen twee reservoirs met vloeistof met verschillende dichtheden beschouwd.

4 Opzet van numerieke detailsimulaties

4.1 Beschrijving van de geometrie van het laboratorium- en praktijkproeven

Figuur 4.1 geeft een overzicht van de laboratoriumopstelling uit Deeltaak 2. In de proeven is de voorhaven over de hele diepte zout en de kolk geheel zoet. Het lucht- en waterdebiet wordt gevarieerd. De deur-open-tijd² is circa 90 seconden. Het zoutgehalte wordt langs twee verticalen (VeZo) gemeten op 12 hoogtes. Foto 4.1 geeft een impressie van het luchtbellenscherm in de laboratoriumproef. Voor meer gegevens over de laboratoriumproeven, zie Mastbergen (2010)

In Figuur 4.2 wordt de geometrie van het praktijkproeven in de Stevinsluis schematisch weergegeven. Merk op dat de opstelling veranderd kan worden tijdens de uitvoering van de praktijkproeven. De analyse in dit rapport is bedoeld voor een advies met betrekking tot lucht- en waterdebiet. Details van de opstelling in het veld zullen aangepast worden op basis van de ervaring die opgedaan wordt tijdens praktijkproeven en de voorbereidende testen in een goot met een diepte van circa 2 m. Hierbij wordt bijvoorbeeld gekeken of het scherm voldoende gesloten is in de dwarsrichting. Foto 4.2 geeft een impressie van de opstelling die in de praktijkproeven gebruikt wordt.



Figuur 4.1 Weergave van de laboratoriumproeven uit Deeltaak 2. Aan de linkerkant bevindt zich de voorhaven aan de rechterzijde de kolk. Daar tussen ligt van links naar rechts de waterspleet, luchtslang en de deur. Positie

2. Met de deur-open-tijd wordt de tijd bedoeld tussen het begin van openen van de sluisdeuren tot het moment dat de deuren weer volledig gesloten zijn. Met openingstijd wordt de tijd bedoeld tussen het begin van openen tot dat de deur volledig geopend is.

vezo's, lengte kolk en dikte waterspleet verschilt per proef. De waterdiepte is 29 cm en de breedte van de kolk is 50 cm.

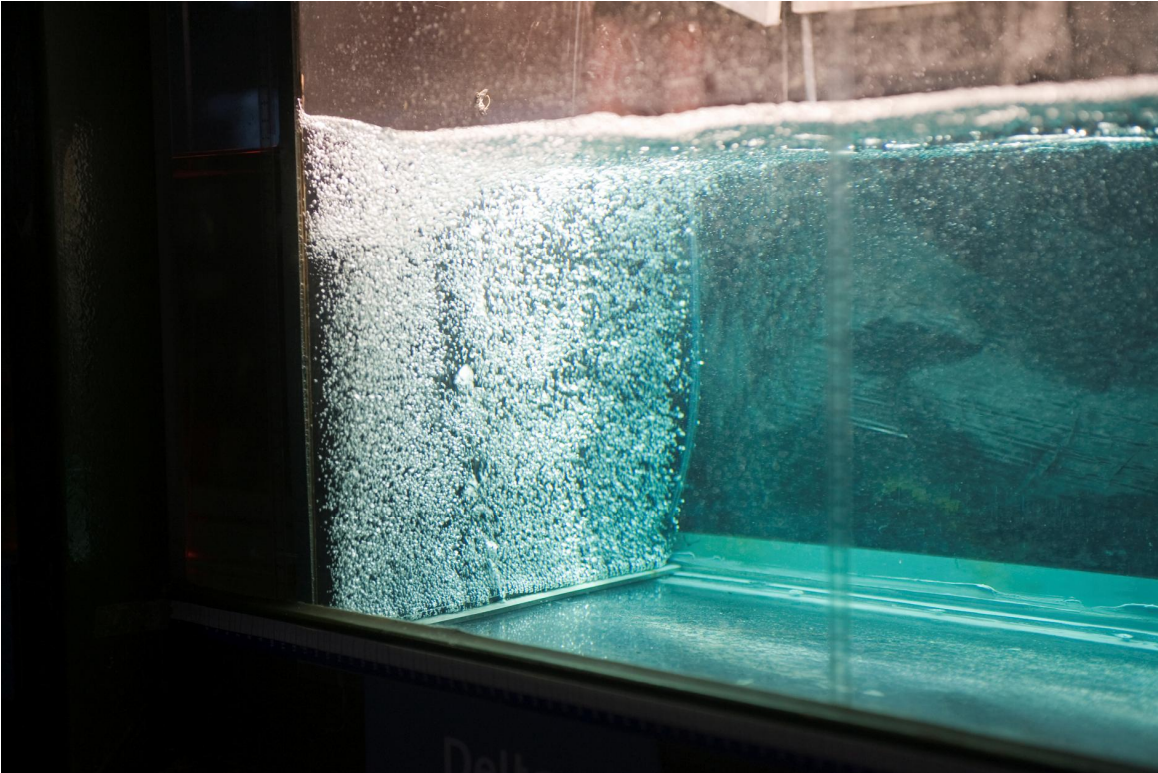
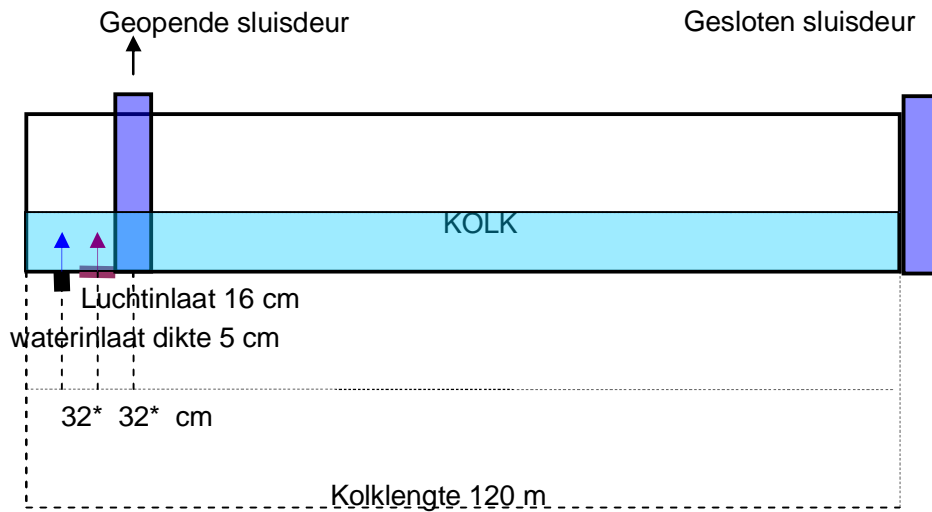


Foto 4.1 Het luchtbellenscherm in een laboratoriumproef uit Deeltaak 2. Aan de linkerzijde bevindt zich de voorhaven (verduisterd) aan de rechterzijde van het luchtbellenscherm de kolk (verlicht).



Figuur 4.2 Schematisatie van de praktijkproeven in de Stevinssluis. Aan de linkerkant bevindt zich de voorhaven aan de rechterzijde de kolk. Daar tussen ligt van links naar rechts de waterinlaat, de, luchtinlaat en de deur. De waterdiepte is 4.7 m de breedte van de sluis is 14 m.



Foto 4.2 Het luchtbellenscherm dat in de praktijkproef gebruikt wordt. Links een visualisatie van het luchtbellenscherm dat gegenereerd wordt door een enkele sproeikop. In de praktijkproeven kan zowel een dubbele rij sproeikoppen ingezet worden zoals rechts is weergegeven of een enkele rij.

4.2 Relevante modelleertechnieken in ANSYS-CFX

De numerieke detailsimulaties zijn uitgevoerd met het numerieke softwarepakket ANSYS-CFX (CFX). Dit is een eindig-volume rekenpakket dat voornamelijk toegepast wordt voor industriële stromingen. Het heeft de mogelijkheid om zowel stroming door dichtheidsverschillen (verschillen in zoutgehalte) als meefasenstroming (luchtbellenschermen) te berekenen.

Luchtbellenscherm

Een luchtbellenscherm kan geïmplementeerd worden door een gedispergeerde fase te definiëren. Hierbij moet de belgrootte a priori gegeven worden. De volumefractie lucht wordt met behulp van een transportvergelijking berekend. De impulsuitwisseling tussen de luchtbellen en de vloeistof wordt met een vereenvoudigd model bepaald (Grace model). Aan het oppervlak kan een ontgassingsconditie worden opgelegd, zodat de lucht het rekendomein kan verlaten.

Stroming en turbulentie

Er zijn diverse mogelijkheden om de stroming te beschrijven in CFX. In deze studie worden de "Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes (URANS) vergelijkingen" gebruikt. Hierbij worden de turbulente fluctuaties statistisch bepaald en het (ensemble gemiddelde) stromingsveld deterministisch beschreven met behulp van een serie vergelijkingen die massa- en impulsbehoud garanderen. Het model dat algemeen wordt toegepast voor diverse civiele en industriële toepassingen is het standaard- $k-\epsilon$ model. Met behulp van twee extra vergelijkingen voor de turbulente kinetische energie (k) en de dissipatie (ϵ) wordt een turbulente viscositeit berekend. Het tweede model dat is toegepast is het RNG- $k-\epsilon$ model dat beoogt beter rekening te houden met het multischaal karakter van turbulente bewegingen in vergelijking tot het standaard $k-\epsilon$ model. In een homogeen medium bepalen beide modellen de turbulente viscositeit op basis van de snelheidsgradiënten. Luchtbellen kunnen de turbulente viscositeit verhogen. Dit effect wordt vereenvoudigd weergegeven door het Sato-enhanced-eddy-viscosity model. A priori is het helaas niet mogelijk om te bepalen welke keuze voor de turbulentiemodellering het meest voor de hand ligt voor een bepaalde applicatie. De resultaten van de laboratoriumproeven uit Deeltaak 2 zijn gebruikt om de keuze voor de turbulentiemodellen te bepalen.

Dichtheidsverschillen

Dichtheidsverschillen kunnen op twee verschillende manieren gemodelleerd worden met CFX. Bij de eerste methode wordt er een transportvergelijking opgelost voor de massafractie zout water. De dichtheid wordt dan bepaald door weging met behulp van de massafracties zout- en zoetwater met vaste dichtheden per materiaal. Bij de tweede methode wordt een nieuwe toestandsvergelijking gedefinieerd waarbij de dichtheid een functie is van het zoutgehalte. Voor het zoutgehalte wordt vervolgens een extra transportvergelijking opgelost.

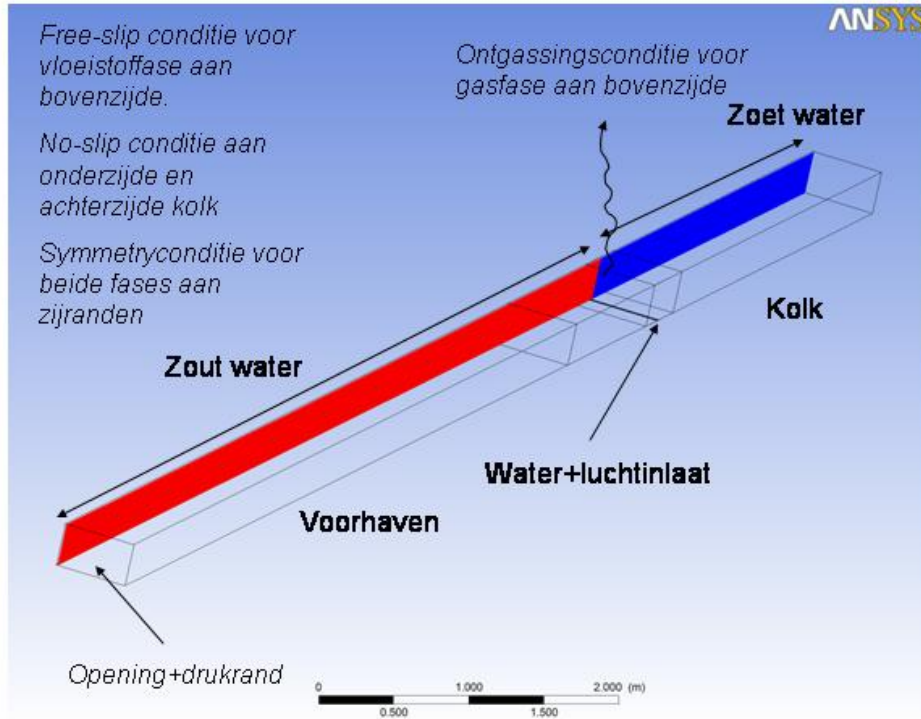
Randcondities

Er kunnen diverse randcondities gebruikt worden in CFX. In deze studie zijn drukranden, free-slip en no-slip randen toegepast. Bij een drukrand wordt de druk voorgeschreven. Bij een free-slip rand is er geen stromingscomponent loodrecht op de rand, maar kan de vloeistof vrij bewegen langs de rand. Bij een no-slip rand zijn beide componenten van de stroomsnelheid gelijk aan nul.

4.3 Opzet van het CFX model

Figuur 4.3 geeft een overzicht van het rekendomein dat gebruikt wordt in de simulaties van de laboratoriumproeven en de praktijkproeven. Strooming in de breedte van de kolk en voorhaven worden verwaarloosd (2DV). Aan de linkerzijde wordt met een drukrand zoutwater ingelaten, terwijl tegelijkertijd zoetwater het domein kan verlaten door een openingsconditie. Aan de onderkant is een no-slip randconditie gebruikt. Aan de bovenzijde is er een free-slip randconditie toegepast waarmee het vrije oppervlak wordt gerepresenteerd. Waterstandsverschillen tussen de kolk en voorhaven worden in deze studie buiten beschouwing gelaten³. Daarnaast wordt aangenomen dat oppervlaktevervorming door het luchtbellenscherm geen grote rol speelt. De gasfase kan door middel van een ontgassingsconditie het rekendomein verlaten. De zout-zoet scheiding bevindt zich initieel ter hoogte van de locatie van de deur. Ter weerszijden van de scheiding worden initieel uniforme zoutconcentraties en dichtheden voorgeschreven. Voor de modellering van de maatregelen in de praktijkproeven wordt een zelfde aanpak gevolgd.

3. Merk hierbij op dat dit een conservatieve keuze is, omdat in de praktijk de sluisdeuren pas geopend worden op het moment dat de kracht aan weerszijde van de sluisdeuren nagenoeg gelijk is. Bij het openen van de sluisdeur aan de zoute zijde is de waterstand in de kolk iets hoger dan in de zoute voorhaven. Hierdoor is het drukverschil kleiner dan in de situatie met een gelijke waterstand in kolk en voorhaven.



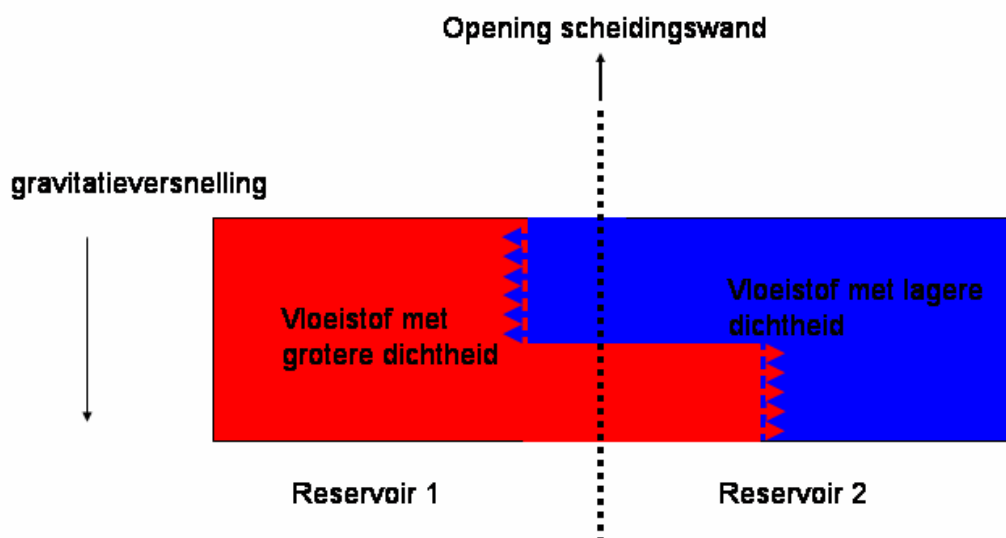
Figuur 4.3 Overzicht van het CFX model van de laboratoriumproeven uit Deeltaak 2. Aan de linkerzijde bevindt zich de voorhaven aan de rechterzijde de kolk. Van links naar rechts bevindt zich de zoute voorhaven, de waterinlaat, de luchtinlaat, de zout-zoet scheiding en de kolk. De initiële zout-zoet scheiding bevindt zich op de positie van de deur. Stroming in de breedterichting wordt niet gemodelleerd (2DV). De celdikte in de breedterichting is gelijk aan de breedte van de goot in het laboratorium. Het rooster nabij het bellenscherm is zeer fijnmazig: circa 1.5 mm. Verder in de kolk- en uitstroombsectie worden de cellen geleidelijk vergroot tot circa 8 mm.

5 Numerieke simulatie van dichtheidsstroming op lab-en prototypeschaal

In dit hoofdstuk wordt gekeken of het mogelijk is om een dichtheidsstroming in een sluisolk voldoende nauwkeurig te modelleren met CFX. Er wordt een vergelijking gemaakt met laboratorium- en veldproeven uit de literatuur en laboratoriumproef 4 uit Deeltaak 2.

5.1 Theorie voor dichtheidsstromingen in een lock-exchange experiment

In het lock-exchange experiment wordt de uitwisselingstroming tussen twee reservoirs met vloeistof met verschillende dichtheden beschouwd, waarbij de scheiding tussen de twee reservoirs in een korte tijd wordt verwijderd. De vloeistof met de hoogste dichtheid kruipt dan in de vorm van een (zout)tong onder de lichtere vloeistof in het reservoir met lichtere vloeistof. Tegelijkertijd gaat de lichtere vloeistof via de bovenlaag in het reservoir met zware vloeistof stromen. Er vindt dus een uitwisseling plaats van vloeistof tussen de twee reservoirs.



Figuur 5.1 Schematische weergave van het lock-exchange experiment. Vloeistof met een hogere dichtheid gaat in de vorm van een (zout) tong stromen in reservoir 2 met lichtere vloeistof. Tegelijkertijd is er een retourstroom via de bovenlaag van lichtere vloeistof richting reservoir 1.

Benjamin (1968) heeft een relatie bepaald voor de propagatiesnelheid van een dichtheidsstroming in de 'lock-exchange flow' afhankelijk van de opgetreden laagdikte. De laagdikte wordt niet voorspeld door de theorie. Er kunnen twee karakteristieke oplossingen gedefinieerd worden. De ene oplossing is energiebehoudend en bij de andere is er een maximum in de dissipatie van de kinetische energie. Het relevante dimensieloze kental voor dit probleem is het intern Froude getal

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g(1-\rho_1/\rho_2)H}} \quad (3.1)$$

Hierbij is U de loopsnelheid van de dichtheidsstroming in m/s , g de gravitatieversnelling in m/s^2 , ρ_1 de dichtheid van het lichte vloeistof (zoetwater) in kg/m^3 , ρ_2 de dichtheid van de zware vloeistof (zoutwater) en H de totale waterdiepte in m .

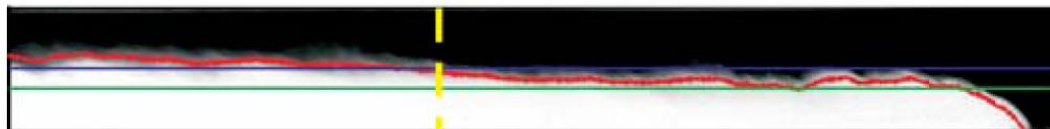
Tabel 5.1 beschrijft de twee karakteristieke oplossingen van het volledige lock-exchange probleem. De laagdikte van de onderlaag is in beide gevallen verschillend, maar de loopsnelheid is nagenoeg gelijk.

Tabel 5.1 Beschrijving van de twee karakteristieke oplossingen van het lock-exchange probleem bij volledige waterdiepte H volgens Benjamin (1968).

Type	Froude	Laagdikte onderlaag
Energie behoud	0.5	0.5 H
Max energiedissipatie	0.52	0.347 H

In Figuur 5.2 is een voorbeeld gegeven van een lock-exchange in een laboratoriumexperiment van Shin et al (2004). Het scheidingsvlak, dat gemarkeerd wordt door een rode lijn, ligt tussen de oplossingen van Benjamin (1968) met maximale energiedissipatie (groen) en energiebehoud (blauw).

Shin et al (2004) hebben de theorie verder uitgebreid voor het geval van een lock-exchange stroming over een gedeelte van de waterdiepte. Een voorbeeld van dit type experimenten is gegeven in Figuur 5.3. Merk op dat de laagdikte afneemt naar het front van de zoetong.



Figuur 5.2 Dichtheidsstroming bij een lock-exchange stroming over de hele waterdiepte. Uit Shin et al (2004) figuur 9. De verticale gele lijn representeert de oorspronkelijke positie van de scheiding. De rode lijn representeert een maat voor de laagdikte, de groene lijn is de oplossing van Benjamin (1968) met maximale energie dissipatie en de blauwe lijn representeert energiebehoudende oplossing.



Figuur 5.3 Dichtheidsstroming bij een lock-exchange stroming over een gedeelte van de waterdiepte. De lichte vloeistof stroomt van links naar rechts in de toplaag, uit Shin et al, (2004) figuur 18. De laagdikte neemt af naar de tip van de zoetong.

De Volkerak- en Stevinsluis hebben een zeer grote aspectratio tussen de lengte van de kolk (L) en de totale waterdiepte (H), $L/H=50$ en $L/H=25$ respectievelijk. De aspectratio in gedetailleerde laboratoriumexperimenten zoals uitgevoerd door Shin et al, (2004) is maximaal 7. Bij de laboratoriumproeven uit Deeltaak 2 is een aspectratio van 14 gebruikt. Het laboratoriumexperiment van een gewone lock-exchange stroming in Deeltaak 2 (proef 4) is daarom een belangrijke aanvulling op de experimenten van Shin et al (2004).

5.2 Validatie van numeriek model van lock-exchange stroming op laboratoriumschaal

Tabel 5.2 geeft een overzicht van de instellingen die gebruikt worden in het CFX model van het lock-exchange experiment uit Deeltaak 2. De enige instelling die niet consistent vertaald is naar het CFX model is de openingstijd van de deur. In de laboratoriumproef is het schot tussen kolk en voorhaven in circa 20-30 seconden verwijderd. In het CFX model is de voorhaven initieel geheel zout en de kolk gevuld met zoet water en wordt het zoutfront op $t=0$ volledig vrijgelaten vanaf de positie van de deur.

Tabel 5.2 Instellingen die gebruikt worden in de CFX schematisatie van het lock-exchange experiment (proef 4) uit Deeltaak 2.

Breedte	50 cm
Diepte	29 cm
Lengte kolk	4.09 m
Lengte voorhaven	10 m
VEZO 1 in kolk (12 zoutmeters verticaal)	1.41 m vanaf de deur
VEZO 2 in kolk (12 zoutmeters verticaal)	2.82 m vanaf de deur
Dichtheid kolk initieel	1000 kg/m³
Dichtheid voorhaven initieel	1023.9 kg/m³
Deur-open-tijd	90 s
Openingstijd in CFX model	0 s
Openingstijd in lab	20-30 s
Afmeting kleinste rekencel	1.5 mm
Afmeting grootste rekencel	8 mm

Figuur 5.4 geeft de verdeling van de berekende dichtheid van een ongehinderde lock-exchange stroming 20 seconden na opening. De dikte van de zouttong komt overeen met de laagdikte van de oplossing van Benjamin (1968) met maximale energiedissipatie. De positie van het zoutfront komt goed overeen met de theorie voor de loopsnelheid. Na ongeveer 35 seconden bereikt de zouttong de achterzijde van de kolk, zie Figuur 5.5. De laagdikte neemt

af naar de tip van de zouttong. De dichtheidsprong ligt onder de lijn die overeenkomt met de laagdikte van de oplossing met maximale energiedissipatie. Na het bereiken van de achterzijde van de kolk wordt de interne golf gereflecteerd. Het zoute water vervangt het zoete water (na een maal heen en weer gaan vvna de interne golf kan 80 procent van de kolk vervangen zijn), zie Figuur 5.6 en Figuur 5.7. In Figuur 5.8 wordt het verloop van de dichtheid gegeven in een verticale reeks zoutopnamepunten (VeZo) op een afstand van 1.41 m van de deur; op de raai liggen 12 equidistante zoutopnamepunten. De nummering van de punten start vanaf het wateroppervlak.

De dichtheid bij de onderste punten 10,11 en 12 neemt bij de eerste passage van het zoutfront zeer snel toe tot de dichtheid van de voorhaven. Bij de punten 7,8 en 9 neemt de dichtheid geleidelijker toe. De dichtheid bij de punten 4,5 en 6 neemt pas toe bij de tweede passage van de zouttong na het bereiken van de achterzijde van de kolk. Bij punt 1,2 en 3 gaat de dichtheid na 60 seconden door een de interne golf sterk fluctueren.

De corresponderende metingen van proef 4 uit Deeltaak 2 worden gegeven in Figuur 5.9. De meetpunten liggen op dezelfde locaties als in het rekenmodel. Het verloop van de dichtheid bij de verschillende sensoren is vergelijkbaar met de CFX berekening in Figuur 5.8. De aankomsttijd van de zouttong bij de verticale meetsectie verschilt echter. Dit is vermoedelijk het gevolg van verschillen in de initialisatieprocedure. De loopsnelheid van de zouttong in het laboratorium is vastgesteld op 0.10 m/s door de metingen bij verticaal 1 en verticaal 2 te vergelijken. Volgens de theorie van Benjamin (1968) zou de loopsnelheid 0.125 m/s moeten bedragen, zie sectie 5.1. Tabel 5.3 geeft een vergelijking van de aankomsttijden van de zouttong op verschillende locaties. De doorkomsttijden die berekend zijn met CFX komen goed overeen met de theorie van Benjamin (1968). De doorkomsttijden van de labproef zijn met circa 16 seconden vertraagd ten opzichte van de theorie. Dit houdt vermoedelijk verband met een verschuiving in de daadwerkelijke starttijd van het zoutfront door de geleidelijke opening van de deur in het experiment in Deeltaak 2.

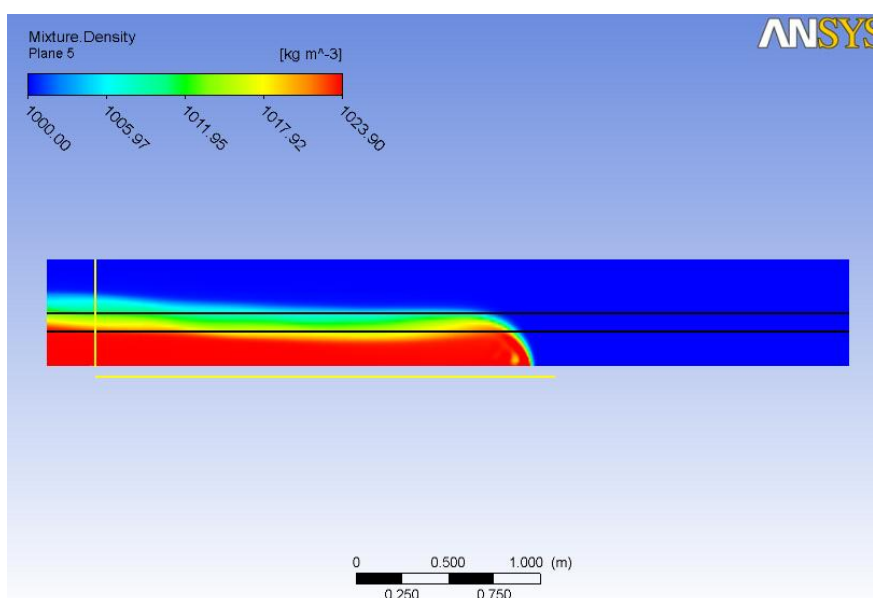
Tabel 5.3 Aankomsttijden van de zouttong op karakteristieke meetpunten in het laboratorium experiment uit Deeltaak 2 van deze studie in vergelijking met de theorie van Benjamin, 1968 gevalideerd door Shin et al 2004 en de CFX berekening. V1 staat voor verticaal 1 op 1.41 m van de kolk ingang en V2 voor verticaal 2 op 2.82 m van de kolk ingang. Sensor 12 bevindt zich onderin het profiel sensor 1 zit bovenin het profiel. Merk op dat de deur in het laboratorium geleidelijk is geopend in 20 a 30 seconden.

	CFX	Lab Deeltaak 2	Theorie
Aankomsttijd V1-12	12 s	27 s	11 s
Aankomsttijd V2-12	24 s	41 s	23 s
Aankomsttijd V1-4	56 s	79 s	56 s

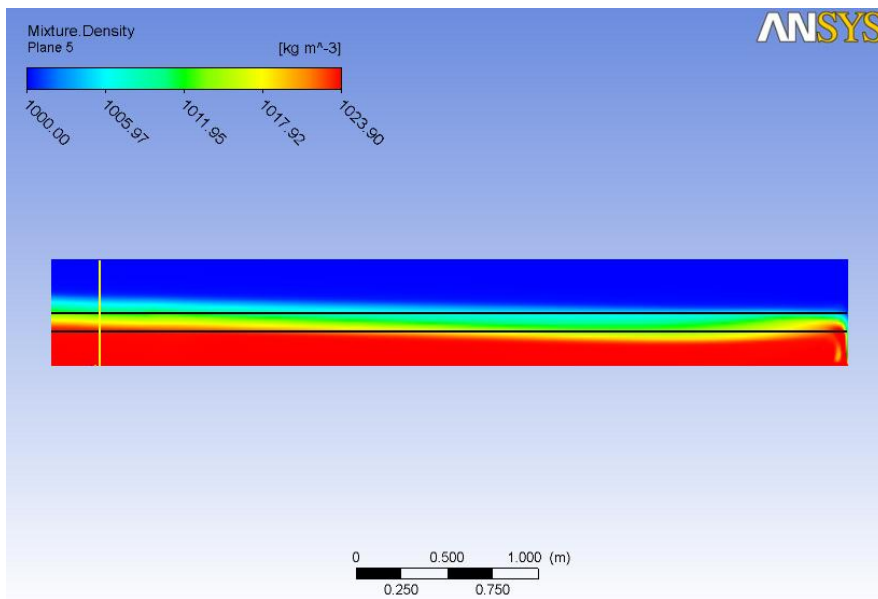
Tabel 5.4 geeft een vergelijking van de totale massa zout die de kolk is binnen gedrongen op twee verschillende tijdstippen. De totale massa zout die berekend is met CFX komt goed overeen met de metingen uit laboratoriumproef 4 uit Deeltaak 2. Merk op dat de theorie van Benjamin (1968) geen uitspraak doet over de massa zoutinrusie, omdat de laagdikte niet voorspeld wordt. Het blijkt dat bij de aankomst van de zouttong aan de achterzijde de schatting op basis van de maximale energiedissipatie oplossing $h=0.347H$ het nauwkeurigst is. Dit kan gerelateerd worden aan de schatting voor de laagdikte die volgt uit de zoutverdeling in Figuur 5.5.

Tabel 5.4 Vergelijking totale zout massa in kg bij aankomst zouttong aan achterzijde van de kolk en na sluiting deur in laboratoriumproef 4 uit Deeltaak 2, theoretische schatting op basis van de twee laagdiktes van Benjamin (1968) en CFX. De zoutmassa in CFX is berekend met behulp van de verticale meetpunten (CFX-punten) en door een numerieke integratie over het totale kolkvolume (CFX-volume).

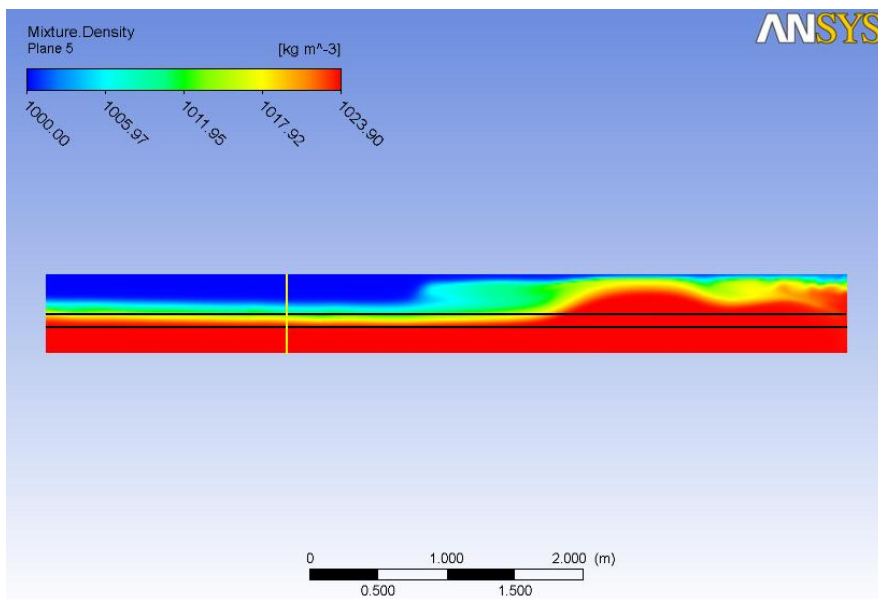
Tijdstip	Lab	h=0.5H	h=0.347 H	CFX-punten	CFX-volume
Bij aankomst achterzijde	8.4	10.9	7.8	8.7	9.0
Na sluiting	18.1	21.8	15.6	19.8	19.2



Figuur 5.4 Verdeling berekende dichtheid na 20 seconden in een CFX simulatie van laboratoriumproef 4 uit Deeltaak 2 van een ongehinderde lock-exchange. De dichtheid in de voorhaven is 1023 kg/m^3 (35 ppt) en de dichtheid van de kolk is 1000 kg/m^3 (0 ppt). De verticale gele lijn is de initiële positie van het zoutfront, de zwarte lijnen representeren de twee oplossingen van Benjamin (1968) met relatieve zouttongdikte $h/H=0.5$ en $h/H=0.347$, de gele balk onder de kolk geeft de theoretische verwachting van de positie van het zoutfront.

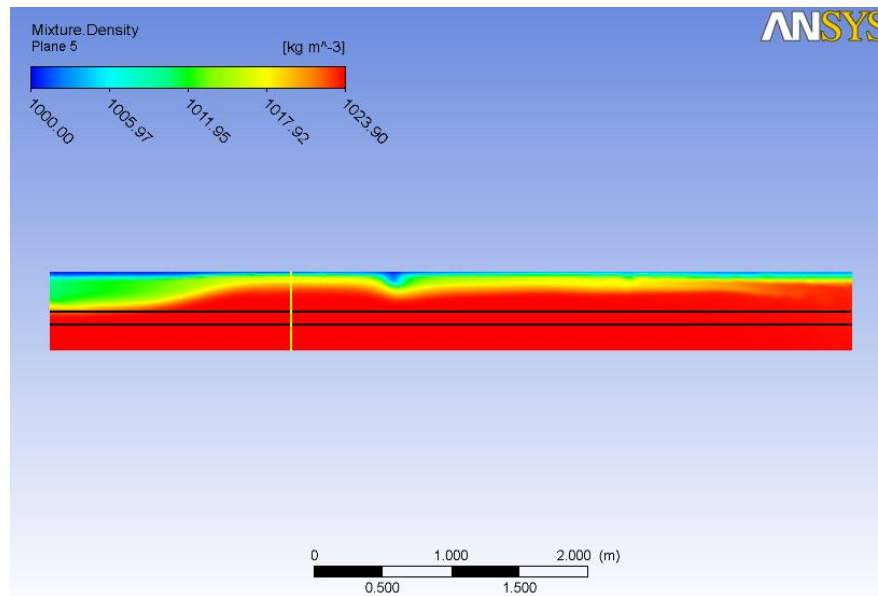


Figuur 5.5 Verdeling berekende dichtheid na 35 seconden in een CFX simulatie van laboratorium proef 4 uit Deeltaak 2 van een ongehinderde lock-exchange. De dichtheid in de voorhaven is 1023 kg/m³ (35 ppt) en de dichtheid van de kolk is 1000 kg/m³ (0 ppt). De verticale gele lijn is de initiële positie van het zoutfront, de zwarte lijnen representeren de twee oplossingen van Benjamin (1968) met relatieve zoutongdikte $h/H=0.5$ en $h/H=0.347$. Volgens de theorie van Benjamin (1968) is de aankomsttijd ongeveer 32 seconden.

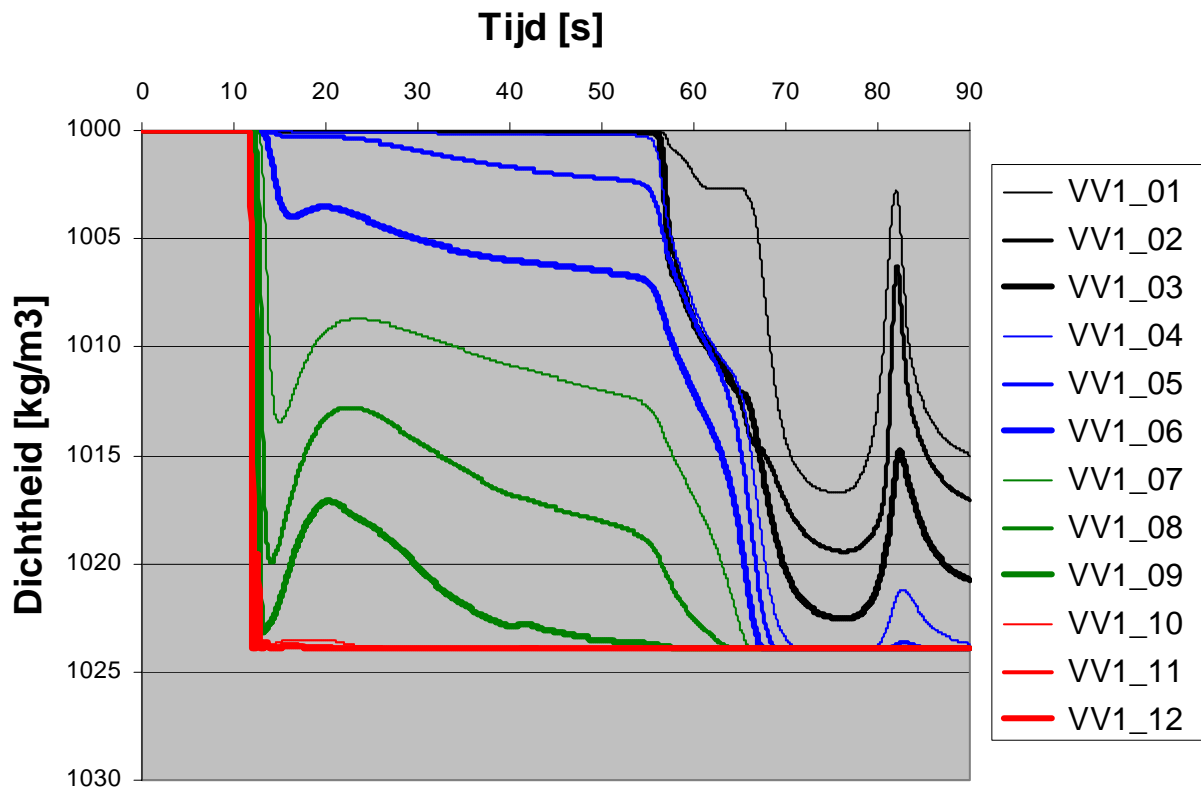


Figuur 5.6 Verdeling berekende dichtheid na 60 seconden in een CFX simulatie van laboratorium proef 4 uit Deeltaak 2 van een ongehinderde lock-exchange. De dichtheid in de voorhaven is 1023 kg/m³ (35 ppt) en de dichtheid van de kolk is 1000 kg/m³ (0 ppt). De verticale gele lijn is de initiële positie van het zoutfront, de zwarte lijnen representeren de twee oplossingen van Benjamin (1968) met relatieve

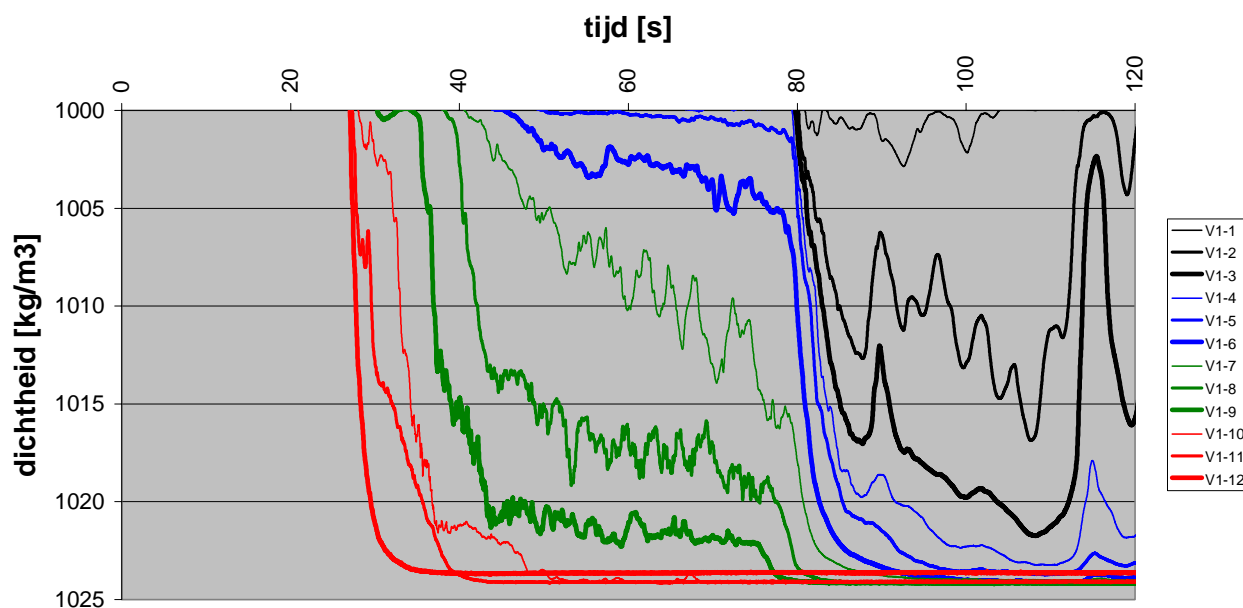
zouttongdikte $h/H=0.5$ en $h/H=0.347$. Volgens de theorie van Benjamin (1968) is de aankomsttijd ongeveer 32 seconden.



Figuur 5.7 Verdeling berekende dichtheid na 90 seconden in een CFX simulatie van laboratorium proef 4 uit Deeltaak 2 van een ongehinderde lock-exchange. De dichtheid in de voorhaven is 1023 kg/m^3 (35 ppt) en de dichtheid van de kolk is 1000 kg/m^3 (0 ppt). De verticale gele lijn is de initiële positie van het zoutfront, de zwarte lijnen representeren de twee oplossingen van Benjamin (1968) met relatieve zouttongdikte $h/H=0.5$ en $h/H=0.347$. Volgens de theorie van Benjamin (1968) is de aankomsttijd aan de achterzijde ongeveer 32 seconden.



Figuur 5.8 Verloop van de berekende dichtheid bij verticaal V1 in een simulatie van laboratorium proef 4 uit Deeltaak 2 van een ongehinderde lock-exchange. Verticaal 1 staat op 1.41 m vanaf de deur. Voor de corresponderende metingen zie Figuur 5.9. V1-12 bevindt zich op 15 mm afstand tot de bodem V1-1 bevindt zich net onder het oppervlak. De intervallen tussen de sensoren is 23.4 mm. Op $t=0$ wordt de deur instantaan geopend.



Figuur 5.9 Verloop van de gemeten dichtheid bij VEZO1 in de labproef 4 uit Deeltaak 2. Sensorlocaties zijn identiek aan Figuur 5.8. V1-12 bevindt zich 12 mm van de bodem en V1-1 net onder het oppervlak. De intervallen tussen de sensoren is 23.4 mm. Op $t=0$ wordt de deur geleidelijk geopend in circa 20-30 seconden.

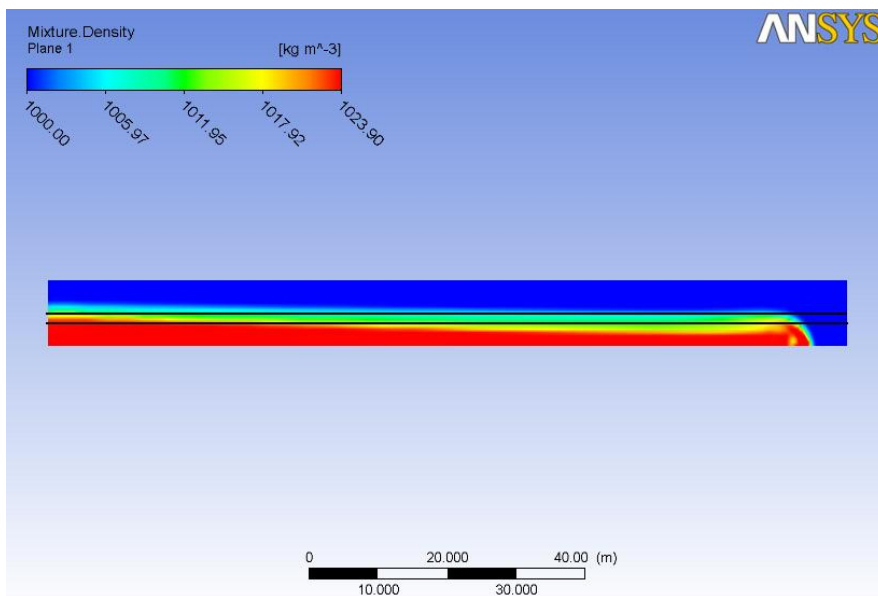
5.3 Simulatie van een ongehinderde lock-exchange op prototypeschaal

Tabel 5.5 geeft een overzicht van de instellingen die gebruikt zijn bij de modellering van een ongehinderde 'lock-exchange flow' in de Stevinsluis. De initiële zout-zoet scheiding ligt op de positie van de deur. Ter weerszijden van deze scheiding is er een uniforme dichtheid en saliniteit. Merk op dat verschillen in waterstand niet worden beschouwd. De zoutindringing is groter dan in de praktijk waarbij wel waterstandsverschillen aanwezig kunnen zijn tussen kolk en voorhaven bij het open van een sluisdeur, zie voetnoot onderaan pagina 19

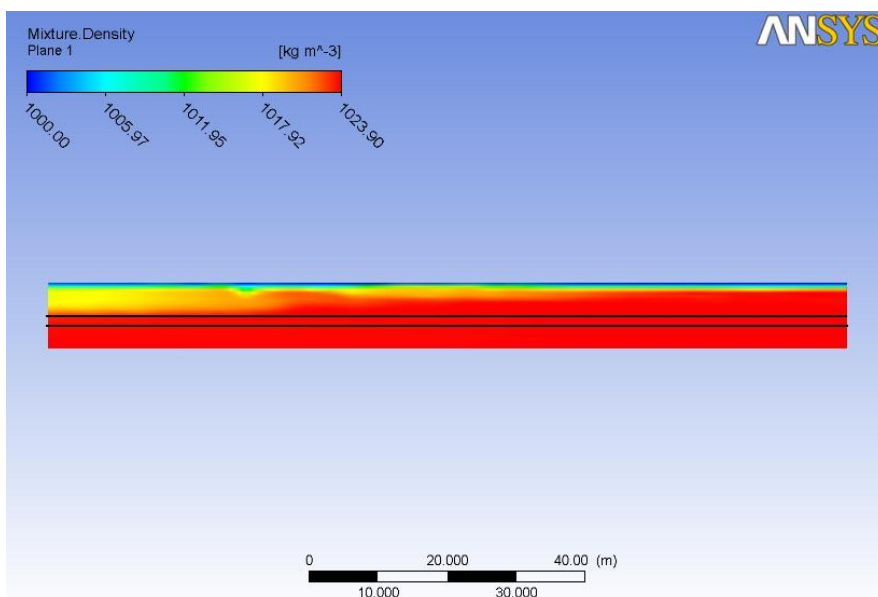
Tabel 5.5 Instellingen die gebruikt zijn bij de numerieke simulatie van een dichtheidsstroom in de Stevinsluis

Breedte	14 m
Diepte	4.7 m
Lengte kolk	120 m
Lengte voorhaven	40 m
Dichtheid kolk initieel	1000 kg/m³ (0 ppt)
Dichtheid voorhaven initieel	1023.9 kg/m³ (35 ppt)
Deur-open-tijd	600 s

Figuur 5.8 en Figuur 5.10 demonstreren de resultaten van de CFX simulatie van de intrusie van zoutwater in de Stevinsluis zonder beperkende maatregelen. Het gedrag van de zouttong is vergelijkbaar met de CFX resultaten in sectie 5.2. De laagdikte neemt ook op deze schaal af naar de tip van de zouttong. Een zoete toplaag blijft achter in de kolk.



Figuur 5.10 Dichtheid na 240 seconden bij een lock exchange in de Stevinsluis. De zwarte lijnen geven de laagdikte bij de twee oplossingen van Benjamin (1968). De zouttong bereikt de achterzijde van de kolk tussen de 240 en 250 seconden. Volgens Benjamin (1968) kan de zouttong verwacht worden tussen de 217 en 229 seconden.



Figuur 5.11 Dichtheid na 600 seconden bij een lock-exchange in de Stevinsluis. De zwarte lijnen geven de laagdikte bij de twee karakteristieke oplossingen van Benjamin (1968).

5.4 Conclusie met betrekking tot de modellering van dichtheidstroming op lab- en prototypeschaal

Er is een goede overeenkomst in de propagatiesnelheid van de zouttong berekend met het CFX model en gemeten in het ongehinderde lock-exchange experiment in Deeltaak 2. De propagatiesnelheden zijn consistent met de theorie van Benjamin (1968) en de theorie en experimenten van Shin et al (2004). Er is een goede overeenkomst tussen de met het CFX model berekende laagdikte en zoutindringing en de gemeten laagdikte en zoutindringing bij het lock-exchange experiment uit Deeltaak 2. Een vergelijking met de theorie van Benjamin (1968) en Shin et al (2004) is niet mogelijk, omdat een verloop van de laagdikte met deze theorieën niet bepaald kan worden. Daarom zijn de resultaten van Deeltaak 1 en 2 een belangrijke aanvulling op de studie van Benjamin (1968) en Shin et al (2004).

6 Numerieke modellering van een luchtbellenschermb

In dit hoofdstuk wordt gekeken of met CFX een luchtbellenschermb gemodelleerd kan worden. De resultaten worden vergeleken met de experimenten van Bulson (1961). Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de keuze van het turbulentiemodel.

6.1 Validatie van numeriek model van een luchtbellenschermb in homogeen water

In deze sectie wordt een validatie besproken van de CFX modellen van een bellenschermb in homogeen water zonder een zout-zoet overgang en waterschermb.

6.1.1 Literatuur over luchtbellenschermen in homogeen water

Bulson (1961) heeft een serie experimenten zijn uitgevoerd van een luchtbellenschermb in homogeen water met een dieptes variërend van circa 2 tot 10 m. Uit de metingen van de snelheid aan het wateroppervlak op één maal de waterdiepte uit het hart van het bellenschermb heeft Bulson (1961) de volgende relatie bepaald,

$$V_{\max,1} = 1.46(gq_a)^{1/3} (1 + H / H_0)^{-1/3} \quad , \quad (4.1)$$

hierbij is $V_{\max,1}$ is de maximale snelheid in m/s aan het oppervlak op één maal de waterdiepte H in m vanaf de positie van het bellenschermb, g is de gravitatieversnelling in m/s^2 , q_a het luchtdebiet in $Nm^3/s/m$, waarbij N staat voor "Normaaldruk" en H_0 is de referentiedruk in meters waterkolom.

In het onderste deel van het verticale profiel wordt water aangezogen door het luchtbellenschermb en het bovenste deel stroomt dit water van het bellenschermb af. De dikte van de laag onder het oppervlak waarbij het water uitstroomt is ongeveer een kwart van de waterdiepte.

6.1.2 Validatie numeriek model luchtbellenschermb in homogeen water op laboratoriumschaal

Tabel 6.1 geeft een overzicht van de instellingen die gebruikt worden bij de berekening van een bellenschermb in homogeen water op de schaal van de laboratoriumproeven in Deeltaak 2.

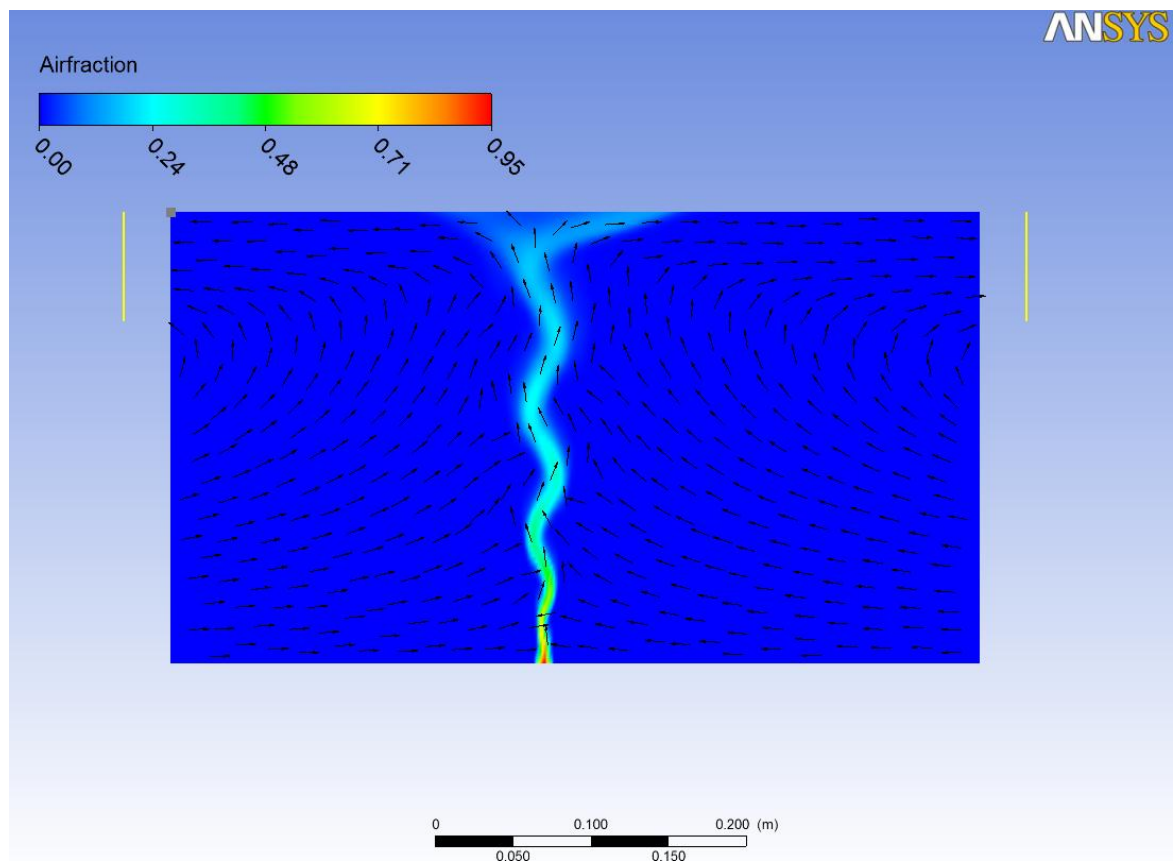
Tabel 6.1 Overzicht van de instellingen die gebruikt worden bij de berekening van een luchtbellenscherm in homogeen water op de schaal van de laboratoriumproeven in Deeltaak 2. De beldiameter is geschat met behulp van beeldopnamen tijdens de proef.

Luchtdebiet	92 normaal l/min
Breedte luchtinlaat	1 cm
Schatting beldiameter	3 mm
Breedte	50 cm
Diepte	29 cm
Lengte kolk	4.09 m
Lengte voorhaven	10 m

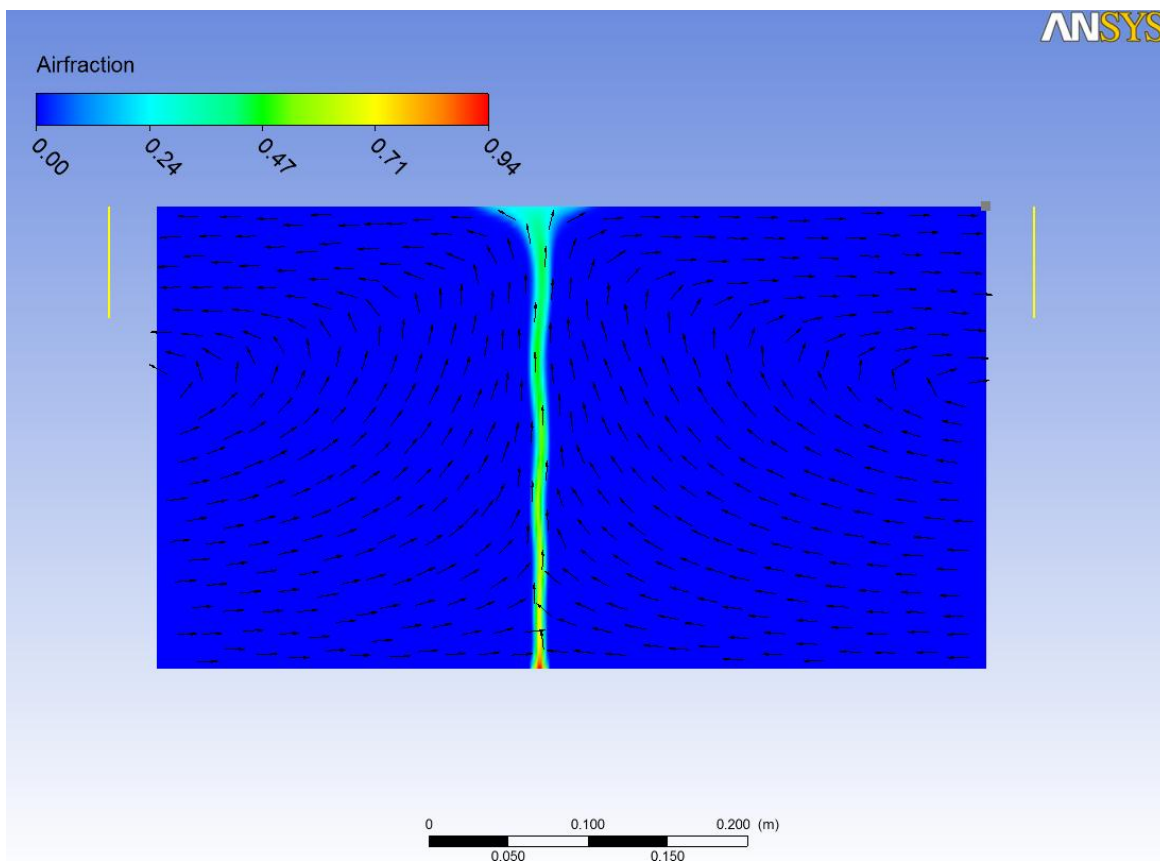
Figuur 6.1 geeft een weergave van de berekende stroomrichting en volumefractie lucht nabij het luchtbellenscherm. In deze simulatie is gebruik gemaakt van het RNG- $k-\epsilon$ turbulentiemodel. De berekende stroming blijkt niet stationair en niet symmetrisch. Figuur 6.2 geeft een weergave van de berekende stroomrichting en volumefractie lucht nabij het bellenscherm indien er gebruik wordt gemaakt van het standaard $k-\epsilon$ turbulentie model. In dit geval is de berekende stroming in en rondom de luchtbellenkolom stationair en symmetrisch. Uit een analyse van de videobeelden van proef 1 in Deeltaak 2 is te zien dat de positie en vorm van het luchtbellenscherm kan variëren in de tijd. Dit gedrag lijkt gepresenteerd te worden in de simulatie met het RNG- $k-\epsilon$ turbulentiemodel⁴.

Er is een korte convergentiestudie uitgevoerd naar de robuustheid van de resultaten met betrekking tot tijdstap, roosterafmeting en de keuze voor de orde van het advectionschema. Binnen de variaties die zijn uitgevoerd is er geen substantiële verandering waargenomen in de maximale stroomsnelheid aan het oppervlak en de dikte van de uitstroomlaag. Tevens is er onderzocht of de beldiameter 3-10 mm en afmeting van de luchtinlaat (in de goot) 1-1.5 cm effect hebben op de resultaten. Dit blijkt geen significante grootte te zijn. In eerdere studies is de beldiameter sterker gevarieerd van 4-20 mm hierbij is geconstateerd dat de variatie in de oppervlakte snelheid kleiner is dan 5%.

4. Er wordt een kleinere turbulente viscositeit berekend met het RNG- $k-\epsilon$ model in vergelijking tot het standaard $k-\epsilon$ model. Hierdoor ontstaan er instationariteiten in het luchtbellenscherm. Om de aard van deze instationariteiten beter te begrijpen is meer analyse nodig met geavanceerdere turbulentiemodellen op een fijnmazig (3D) rekenrooster. De onderliggende vraag is namelijk of de instationariteit in het luchtbellenscherm als turbulentie geïnterpreteerd moet worden of als een versnelling in de (ensemble gemiddelde) stroming. Dit valt buiten het kader van deze studie. Voor de validatie van het model van een luchtbellenscherm in homogeen water is van belang dat de stroming in de circulatiezone redelijk gerepresenteerd wordt. Voor de menging in de luchtbellenzone kan de instationariteit van belang zijn. Daarom wordt de keuze van het turbulentie model pas gedaan na de analyse van de zouttransporten bij een luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoet.

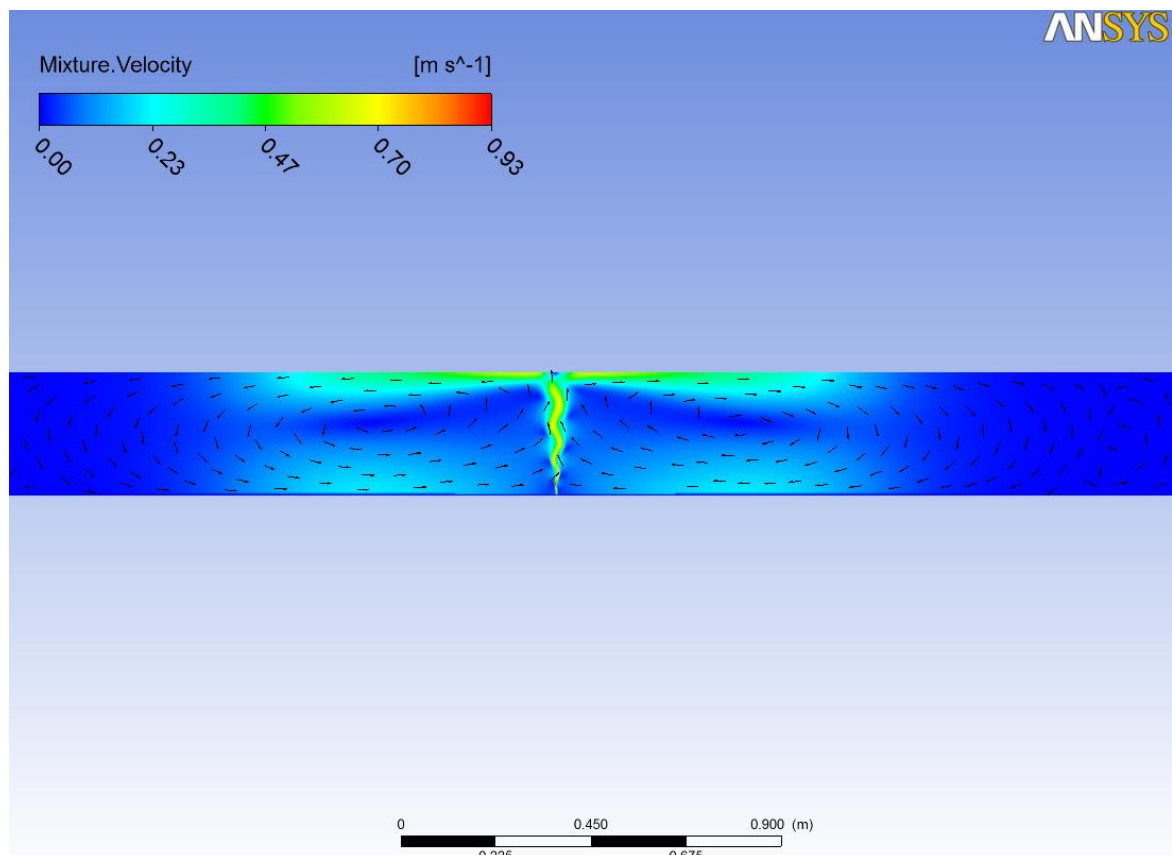


Figuur 6.1 Volumefractie lucht en richting van de stroming bij een bellenscherm in homogeen water berekend met CFX. De gele lijnen links- en rechtsboven het figuur geven de experimenteel bepaalde laagdiktes uit de experimenten van Bulson (1961). Er is 92 l/min toegevoegd. De maximale snelheid aan het oppervlak op een horizontale afstand van één maal de waterdiepte is 0.45 m/s. Bij deze simulatie is gebruik gemaakt van het RNG- $k-\epsilon$ turbulentiemodel.

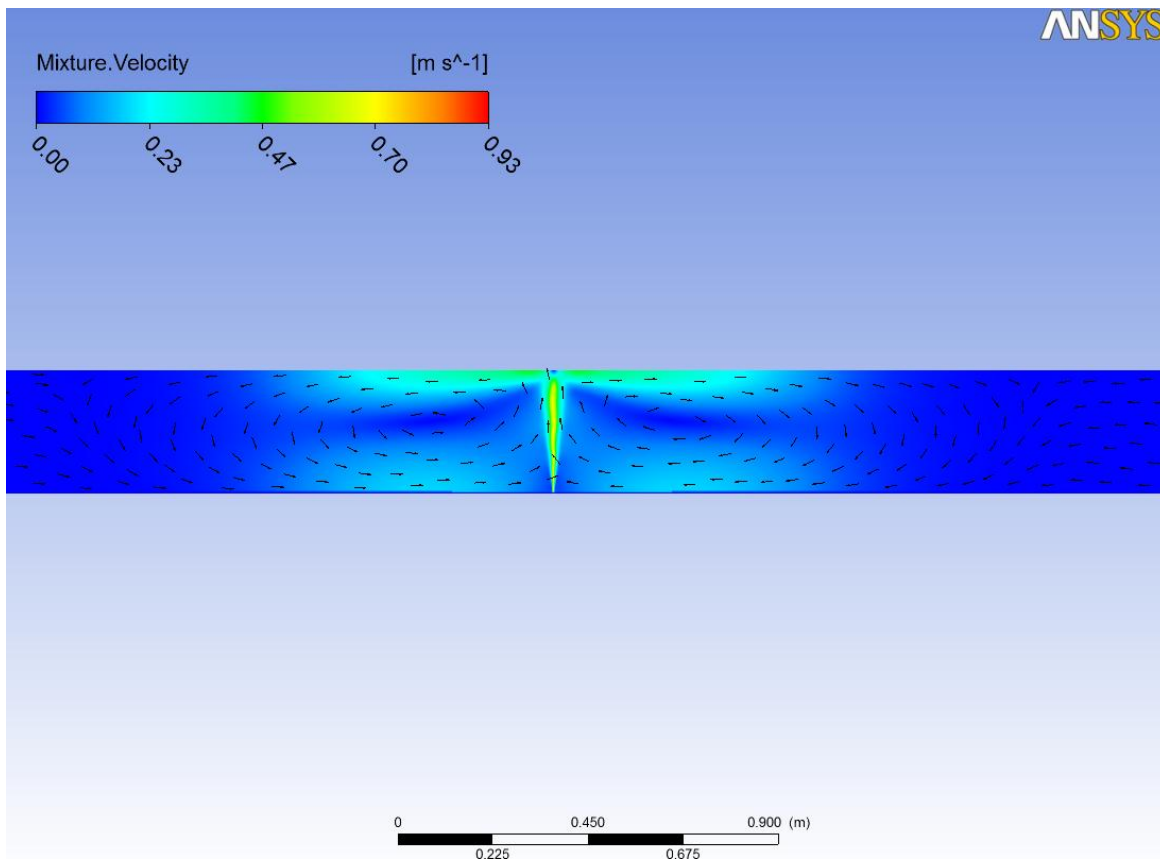


Figuur 6.2 Volumefractie lucht en richting van de stroming bij een bellenscherm in homogeen water berekend met CFX. De gele lijnen links- en rechtsboven het figuur geven de experimenteel bepaalde laagdiktes uit de experimenten van Bulson (1961). Er is 92 l/min toegevoegd. De maximale snelheid aan het oppervlak op een horizontale afstand van één maal de waterdiepte is 0.35 m/s. Bij deze simulatie is gebruik gemaakt van het standaard-k- ϵ turbulentiemodel. Andere instellingen zijn hetzelfde als in de simulatie in Figuur 6.1.

Figuur 6.3 en Figuur 6.4 laten de vorm van de twee circulatiegebieden zien die links en rechts van het luchtbellenscherm ontstaan. De rotatie-as van de circulatiegebieden ligt bij het de berekening met het RNG-k- ϵ model op ongeveer 35 cm van het hart van het bellenscherm en bij de berekening met het standaard k- ϵ model op 30 cm. In Figuur 6.5 en Figuur 6.6 wordt een serie beeldopnamen van laboratoriumproef 1 uit Deeltaak 2 gegeven. Uit de beweging van de kleurvloeistof en de beweging van de luchtballen in de uitstroomlaag volgt dat de circulatiezone minimaal 40 cm meet vanuit het hart van het luchtbellenscherm. Dat betekent dat de afmeting van de circulatiezones berekend met de CFX simulaties consistent is met bovenstaande observatie. De positie van de rotatie-as van de circulatiezone is niet te bepalen op basis van de beeldopnamen. De dikte van de uitstroomlaag onder het oppervlak is ongeveer een kwart van de waterdiepte. Dit is consistent is met Bulson (1961). De dikte van de uitstroomlaag in de CFX berekeningen weergegeven in Figuur 6.3 en Figuur 6.4 komt hiermee overeen.

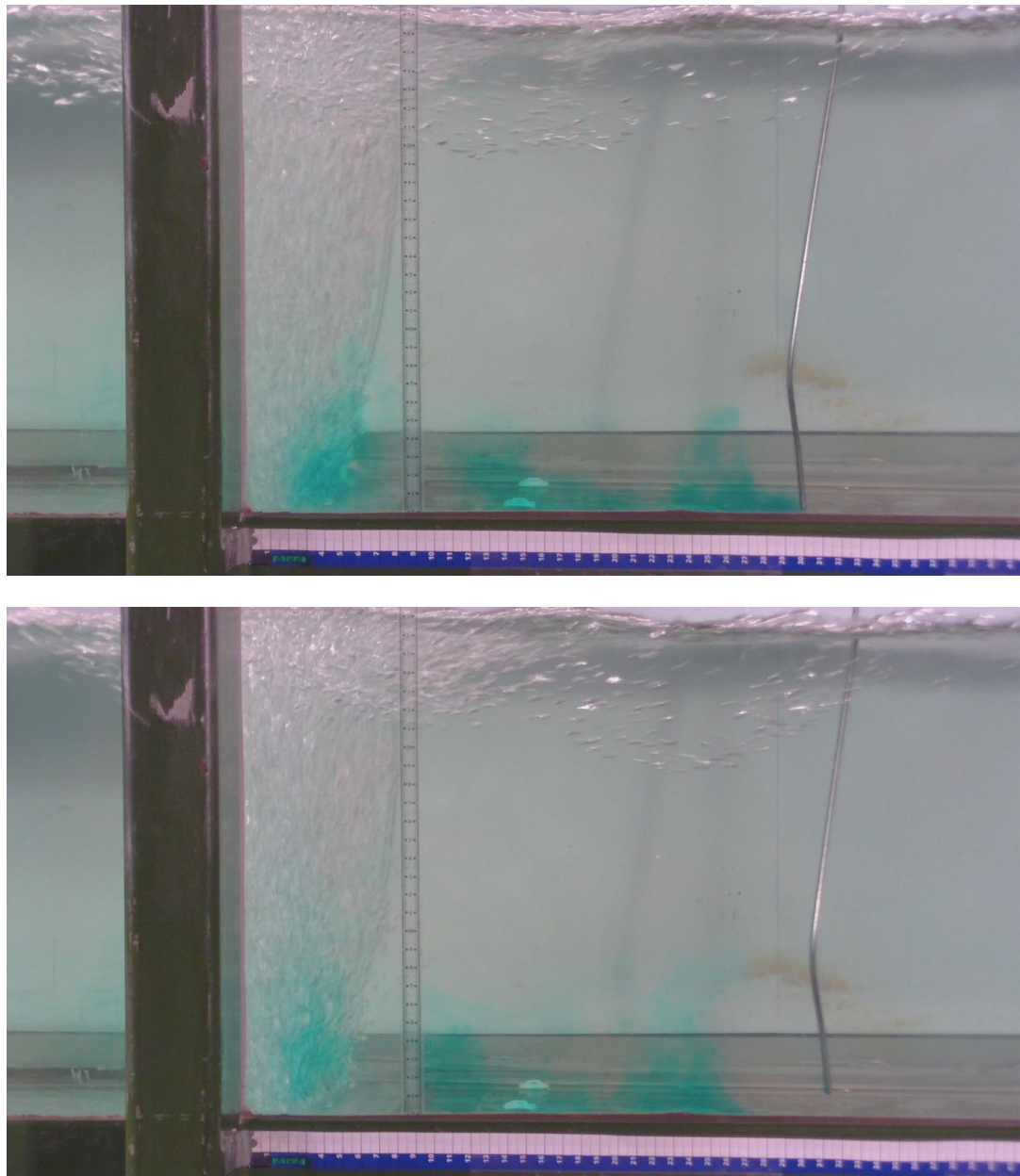


Figuur 6.3 Stroomsnelheid en stromingsrichting bij een luchtbellenscherm in homogeen water berekend met CFX. In deze simulatie is gebruik gemaakt van het RNG-k- ϵ turbulentiemodel. Maximum snelheid aan het oppervlak op een afstand van één maal de waterdiepte is 0.45 m/s.

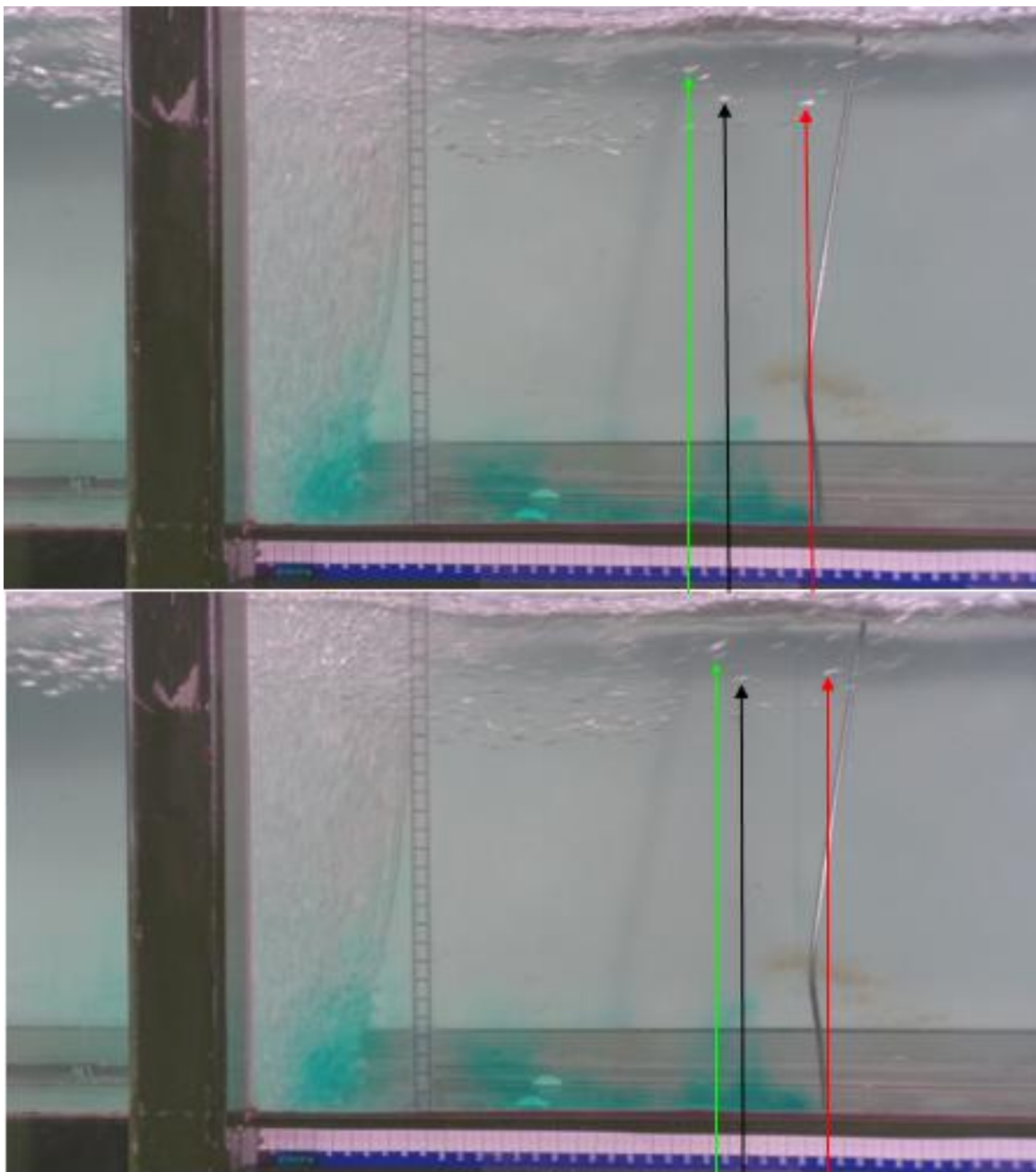


Figuur 6.4 Stroomsnelheid en stromingsrichting bij een bellenscherm in homogeen water berekend met CFX. In deze simulatie is gebruik gemaakt van het standaard $k-\epsilon$ turbulentie model. De andere instellingen zijn identiek aan Figuur 6.3. Maximale snelheid aan het oppervlak is 0.35 m/s.

Tabel 6.2 geeft een vergelijking van de berekende snelheden, de stroomsnelheid die bepaald is op basis van de beeldopnamen en de relatie van Bulson (1961). De berekende stroomsnelheden zijn consistent met de metingen.



Figuur 6.5 Beeldopnamen bij proef 1 uit Deeltaak 2 van een luchtbellenscherm in homogeen water zonder zout-zoet overgang en waterscherm. De kleurvloeistof wordt op circa 30 cm vanaf het hart van het luchtbellenscherm losgelaten. Het tijdsverschil tussen de opname boven en onder is 1/3 seconde. De schaal onderin loopt van 0 tot 40 cm.



Figuur 6.6 Beeldopnamen bij proef 1 uit Deeltaak 2 van een luchtbellenscherm in homogeen water zonder zout-zoet overgang en waterscherm. De kleurvloeistof wordt op circa 30 cm vanaf het hart van het luchtbellenscherm losgelaten. Het tijdsverschil tussen de opname boven en onder is 1/30 seconde. De schaal onderin loopt van 0 tot 40 cm. De pijlen markeren de positie van individuele luchtbellen. Op deze manier kan een zeer grove schatting gemaakt worden van de stroomsnelheid onder het wateroppervlak.

Tabel 6.2 Vergelijking van de gemeten en berekende snelheid in m/s op drie locaties. Hierbij is x de horizontale afstand tot het hart van het luchtbellenscherm en z de verticale afstand tot de bodem. In de tweede kolom staan de snelheden zoals geschat uit de beeldopnamen uit proef 1 uit Deeltaak 2. In de derde kolom staat de relatie van Bulson (1961), zie sectie 6.1.1. In kolom 4 staan de resultaten berekend met het CFX model dat gebruik maakt van het RNG- k - ϵ turbulentiemodel. In kolom 5 staan de berekende resultaten met het standaard- k - ϵ turbulentiemodel. Het luchtdebiet in proef 1 in Deeltaak 2 is 92 NI/s, de waterdiepte is 29 cm.

	Proef 1	Bulson (1961)	RNG	Standaard
$x=H, z=H$	0.30-0.50	0.45	0.45	0.35
$x=0.25, z=0.26$	0.20-0.40	nvt	0.30	0.25
$X=0.28, z=0.01$	0.15-0.25	nvt	0.18	0.18

Conclusie met betrekking tot de validatie van numerieke modellen voor de beschrijving van een luchtbellenscherm in homogeen water op labschaal.

De stroming in de circulatiezones naast het luchtbellenscherm wordt met een acceptabele nauwkeurigheid berekend met de CFX modellen. De verschillen met betrekking tot de stroming in de circulatiezone tussen de twee simulaties met respectievelijk het RNG- k - ϵ en standaard- k - ϵ turbulentiemodel zijn te gering om op basis hiervan een keuze te maken voor het turbulentiemodel. Opvallend verschil is de detailstroming in de luchtbellenzone. De CFX berekening met het RNG- k - ϵ resulteert in relatief sterk instationair gedrag van de stroming in het luchtbellenscherm. Aangezien dit van invloed kan zijn op de zoutuitwisseling wordt de keuze voor het turbulentiemodel pas gemaakt na de analyse van het zouttransport door het luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoet water.

6.1.3 Validatie numeriek model luchtbellenscherm in homogeen water op prototypeschaal

In deze sectie worden de resultaten gepresenteerd van een serie CFX berekeningen van een luchtbellenscherm in homogeen water zonder zout-zoet overgang op de prototypeschaal. In de berekening is gebruik gemaakt van het RNG- k - ϵ turbulentiemodel. Tabel 6.3 geeft een overzicht van de gebruikte instellingen. Een belangrijke validatie onderdeel is de stroomsnelheid aan het oppervlak, zie sectie 6.1.1.

Tabel 6.3 Instellingen die gebruikt zijn bij de opzet van het CFX 2DV model van de Stevinluis. De luchtbeldiameter is geschat met behulp van beeldopnamen van de diffusers die in de veldstudie gebruikt gaan worden.

Luchtdebiet	1400, 700, 400 NI/s
Breedte luchtinlaat	16 cm
luchtbeldiameter	10 mm
Breedte	14 m
Diepte	4.7 m
Lengte kolk	120 m
Lengte voorhaven	40 m

Tabel 6.4 geeft een vergelijking van de berekende snelheid aan het oppervlak versus de experimenteel bepaalde relatie van Bulson (1961) zie vergelijking (4.1). De stroomsnelheid

aan het oppervlak varieert sterk in de tijd en in de horizontale richting aan het wateroppervlak. De overeenkomst met de experimentele relatie van Bulson (1961) is acceptabel.

Tabel 6.4 Vergelijking van de berekende snelheid aan het oppervlak op één maal de waterdiepte vanuit het hart van het luchbellenscherm en de experimenteel bepaalde relatie van Bulson (1961) voor diverse luchtdebieten. De laatste kolom geeft de afmeting van de circulatiezone in de kolk uitgedrukt in waterdiepte H.

Luchtdebiet	Vmax,1	CFX	Variatie	Afmeting circulatiezone
1400 NI/s	1.3 m/s	1.6 m/s	0.6 m/s	7 H
700 NI/s	1.0 m/s	1.2 m/s	0.4 m/s	5 H
400 NI/s	0.9 m/s	0.9 m/s	0.2 m/s	5 H

Conclusie met betrekking tot de validatie van de numerieke simulatie van een luchbellenscherm in homogeen water op prototypeschaal. De CFX modellen van de praktijkproef geven een acceptabele representatie van de snelheid aan het oppervlak als functie van het luchtdebiet volgens de relatie van Bulson (1961).

6.2 Numerieke simulatie van een luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoetwater

6.2.1 Validatie numeriek model luchtbellenscherm bij een overgang van zout naar zoet op labschaal

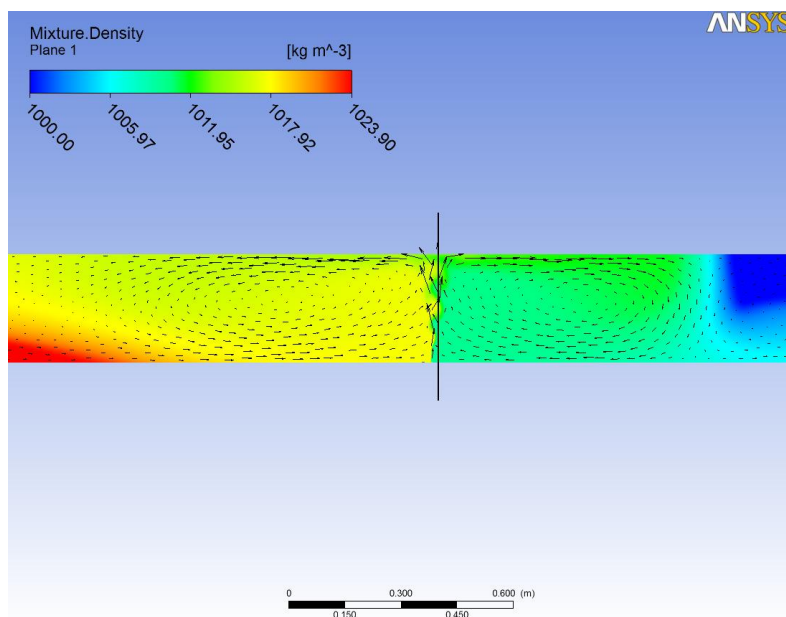
In deze sectie worden de berekeningen van een luchtbellenscherm bij een overgang van zout naar zoetwater op de schaal van de laboratoriumproef uit Deeltaak 2 beschouwd. Bij deze berekeningen is gebruik gemaakt van het RNG-k- ϵ turbulentiemodel. Tabel 6.5 geeft een overzicht van de instellingen.

Figuur 6.7 presenteert de berekende dichtheid en stroming rond het luchtbellenscherm. Het stromingspatroon is niet meer symmetrisch zoals bij een luchtbellenscherm in homogeen water. Uit de circulatiezone in de kolk ontstaat een zouttong, die verder de kolk in propageert.

Bovenstaande observaties zijn consistent met de waargenomen stroombeelden van zoutwater in de overeenkomstige experimenten uit Deeltaak 2, zie Foto 6.1.

Tabel 6.5 Overzicht van de instellingen die gebruikt zijn bij de berekening van een luchtbellenscherm bij een overgang van zout naar zoetwater op de schaal van de laboratoriumproef in Deeltaak 2. De luchtbeldiameter is geschat met beeldopnamen tijdens de proef.

Luchtdebiet	91.8 Normaal l/min
Breedte luchtinlaat	1 cm
Schatting bel diameter	3 mm
Breedte	50 cm
Diepte	29 cm
Lengte kolk	4.09 m
Lengte voorhaven	10 m
Saliniteit kolk voor opening	0 ppt
Dichtheid kolk voor opening	1000 kg/m³
Saliniteit voorhaven	35 ppt
Dichtheid voorhaven	1023.9 kg/m³



Figuur 6.7 Berekende dichtheid en stroming rond een luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoetwater op labschaal. De instellingen zijn gegeven in Tabel 6.5. De maximale snelheid aan het oppervlak op één maal de waterdiepte afstand van het scherm is 0.48 m/s aan de zoutzijde en 0.43 m/s aan de zoetzijde.

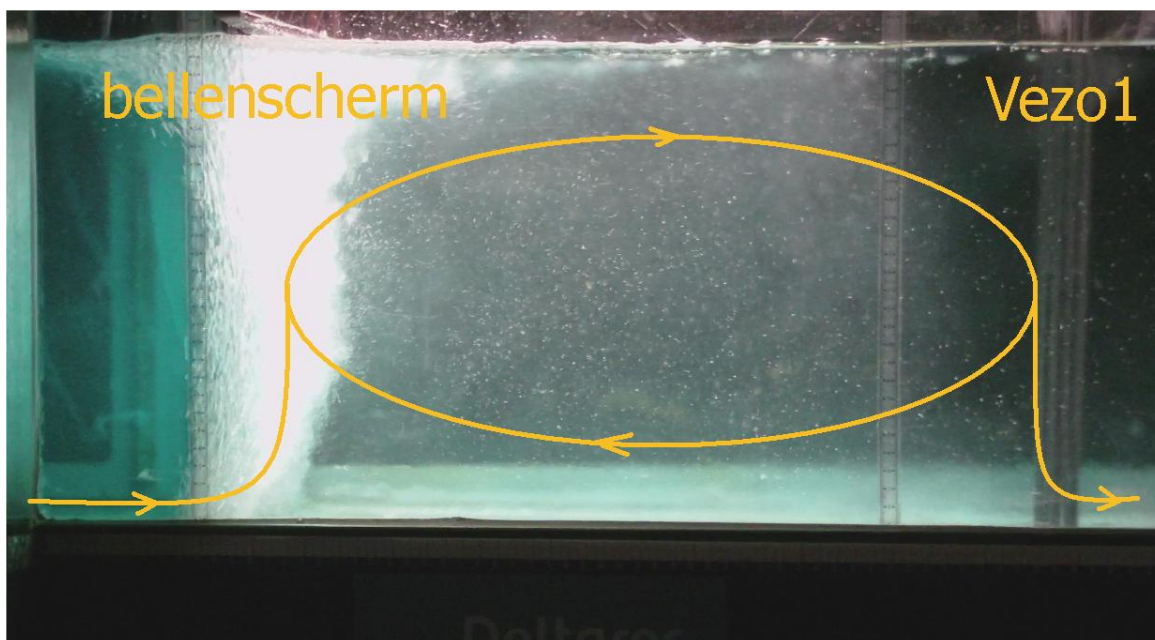


Foto 6.1 Brakwatercirculatie in de sluiscolk achter het luchtbellenscherm, uit rapport Deeltaak 2, Mastbergen (2010). De verticalen met zoutopnemers (VeZo) bevinden zich op circa 50 cm vanuit het hart van het luchtbellenscherm

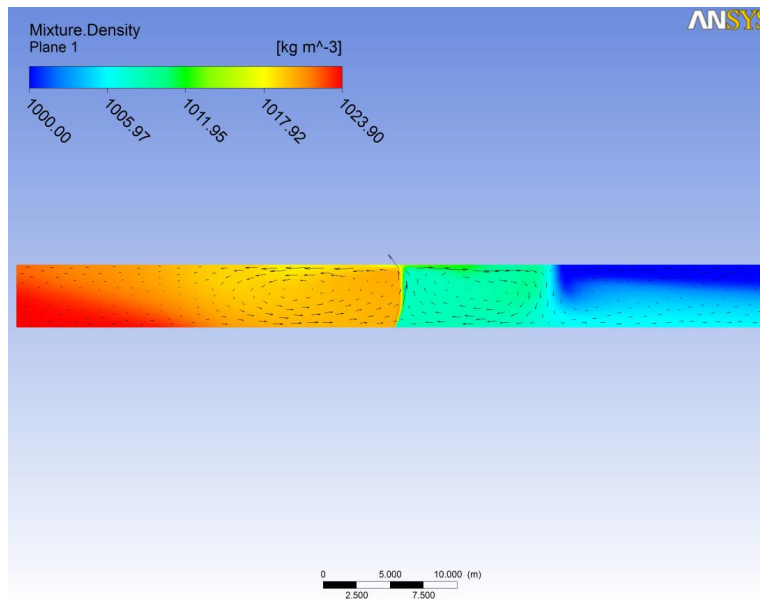
6.2.2 Numerieke analyse luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoet op prototypeschaal

Tabel 6.6 geeft een overzicht van de parameters die gebruikt zijn bij de opzet van het CFX model van een luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoetwater op de schaal van de Stevinsluis. Initieel zijn de dichtheid en saliniteit in de voorhaven en kolk uniform over de diepte.

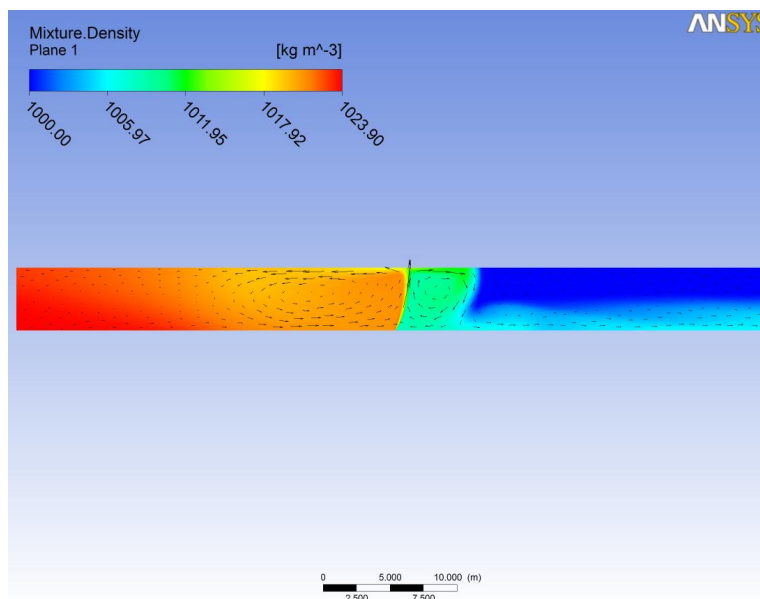
Tabel 6.6 Instellingen die gebruikt zijn bij de opzet van het CFX model van een luchtbellenscherm bij een overgang van zout naar zoetwater op de schaal van de Stevinsluis.

Luchtdebiet	1400, 700, 400 Normaal l/s
Breedte luchtinlaat	16 cm
Schatting bel diameter	10 mm
Breedte	14 m
Diepte	4.7 m
Lengte kolk	120 m
Salinitei kolk	0 ppt
Dichtheid kolk	1000 kg/m³
Lengte voorhaven	40 m
Saliniteit voorhaven	35 ppt
Dichtheid voorhaven	1023.9 kg/m³

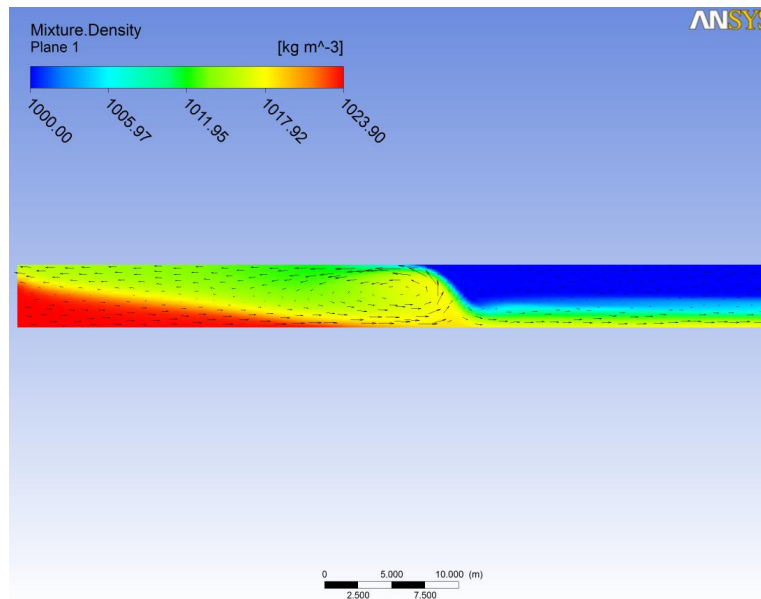
Figuur 6.8 geeft de berekende dichtheid en de stroming weer bij een luchtbellenscherm (met luchtdebiet 1400 NI/s) op een overgang van zout naar zoetwater. Het stromingspatroon is asymmetrisch. Het dichtheidsverschil aan weerszijden van het bellenscherm is ongeveer een kwart van het oorspronkelijke dichtheidsverschil. Aan de kolkzijde stroomt een verzwakte zouttong via de bodem de kolk in. Aan de zoutzijde stroomt een zoettong de voorhaven in. Bij een lager luchtdebiet van 700 NI/s wordt het stromingspatroon nog meer asymmetrisch, zie Figuur 6.9. Bij nog verdere verlaging van het luchtdebiet is er alleen een circulatiezone in de voorhaven. Het luchtbellenscherm is in deze situatie zeer sterk gekromd, zie Figuur 6.11. In de appendix wordt een plausibele verklaring gegeven voor bovengenoemd transitie in circulatiepatronen.



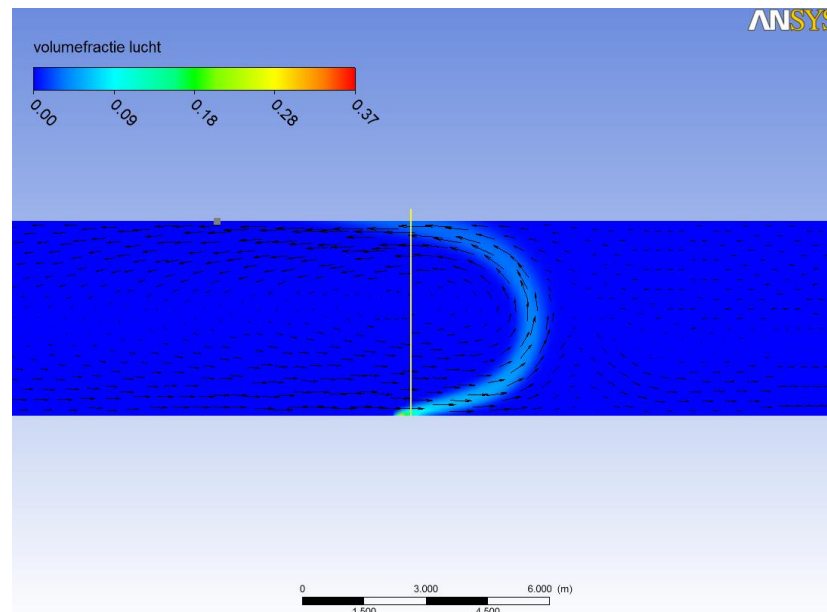
Figuur 6.8 Berekende dichtheid en stroming bij een bellenscherf in de Stevinluis. Het luchtdebiet is 1400 Normaal l/s en het dichtheidsverschil is 23.9 kg/m³ corresponderend met een saliniteitsverschil van 35 ppt. De maximum stroomsnelheid aan het oppervlak is aan beide zijden op één maal de waterdiepte afstand van het scherm is 1.50 m/s en varieert circa 0.2 m/s in de tijd.



Figuur 6.9 Berekende dichtheid en stroming bij een bellenscherf in de Stevinluis. Het luchtdebiet is 700NI/s en dichtheidsverschil is 23.9 kg/m³ corresponderend met een saliniteitsverschil van 35 ppt. De maximum stroomsnelheid aan het oppervlak is aan de zoutzijde op één maal de waterdiepte afstand van het scherm 1.20 m/s en aan de zoetzijde ongeveer 0.6 m/s de stroomsnelheid varieert met circa 0.2 m/s in de tijd.



Figuur 6.10 Berekende dichtheid en stroming bij een bellenschermbij in de Stevinluis. Het luchtdebiet is 400 Normaal l/s en dichtheidsverschil is 23.9 kg/m³ corresponderend met een saliniteitsverschil van 35 ppt. De maximum stroomsnelheid aan het oppervlak is aan de zoutzijde op één maal de waterdiepte afstand van het scherm is 0.8 m/s en aan de zoetzijde ongeveer 0.2 m/s de stroomsnelheid varieert met circa 0.2 m/s in de tijd.



Figuur 6.11 Berekende volumefractie lucht en stroming bij een bellenschermbij in de Stevinluis. Het luchtdebiet is 400 NI/s en dichtheidsverschil is 23.9 kg/m³ of 35 ppt. De verticale gele lijn markeert de positie van de oorspronkelijke zout-zoet scheiding. De maximum stroomsnelheid aan het oppervlak is aan de zoutzijde op één maal de waterdiepte afstand van het scherm is 0.8 m/s en aan de zoetzijde ongeveer 0.2 m/s de stroomsnelheid varieert met circa 0.2 m/s in de tijd.

Conclusie met betrekking tot de numerieke analyse van een luchtbellenscherm op een overgang van zout- naar zoetwater op prototypeschaal.

Bij toepassing van een luchtbellenscherm op een overgang van een zoute voorhaven naar een zoete kolk worden, bij voldoende groot luchtdebiet, twee circulatiezones gevormd. De afmeting en sterkte van de circulatiezones in de kolk en voorhaven zijn niet gelijk. Bij een afname van het luchtdebiet wordt, bij een gegeven dichtheidsverschil, de circulatiezone in de kolk kleiner en zwakker. Er is een luchtdebiet waarbij de circulatiezone aan de zoetzijde geheel verdwijnt.

In het regiem waarbij er twee circulatiezones optreden ontstaat er een zouttong, die de kolk in propageert. Deze zouttong is met circa een factor 4 verdund ten opzichte van de situatie zonder maatregelen. In het regiem met alleen een circulatiezone aan de zoutzijde dringt het zoute water de kolk in via de onderzijde van het luchtbellenscherm.

Bij de een voorhaven van 35 ppt en een kolk van 0 ppt bij een waterdiepte van 4.7 m (Stevin situatie bij maximaal realiseerbaar zoutgehalte) ligt de regiemverandering van een enkele circulatiezone naar twee circulatiezones tussen de 400 en 700 NI/s.

7 Numerieke bepaling van effectiviteit maatregelen tegen zoutindringing

In Hoofdstuk 5 is aangetoond dat de relevante aspecten van een 'lock-exchange flow' met acceptabele nauwkeurigheid beschreven wordt met CFX. In Hoofdstuk 6 is geconstateerd dat een luchtbellenscherm goed gepresenteerd wordt door de CFX modellen van de laboratorium- en praktijkproeven. In dit hoofdstuk zal een validatie uitgevoerd worden van de CFX modellen op basis van het zoutmassatransport tussen de voorhaven en kolk. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt met twee verschillende laboratoriumproeven uit Deeltaak 2. Daarna volgt een analyse van de zoutinrusie bij de Stevinsluis voor verschillende combinaties van lucht- en waterdebieten en een lekkende ebdeur.

7.1 Definitie van de reductiefactor

Het effect van een beperkende maatregel tegen het indringende zouttransport kan uitgedrukt worden in de reductiefactor n van de massa zout die indringt in de kolk in een situatie met maatregelen ten opzichte van de massa zout indringing tijdens een ongehinderde lock-exchange bij opening van de sluisdeur aan één zijde van de kolk

$$n(t) = \frac{q_{\text{int}}}{q_{\text{int},0}} \quad (4.2)$$

Hierbij is $q_{\text{int},0}$ gedefinieerd als de massaflux van zout in kg/s dat kolk instroomt tijdens een ongehinderde lock-exchange en q_{int} is de massaflux van zout dat de kolk instroomt bij een lock-exchange indien er wel een maatregel genomen is.

In het Zoutvrachtmodel van Uittenbogaard (2010) wordt de reductiefactor gedefinieerd voor een bepaalde deur-open-tijd t_{open} . In dat geval moeten q_{int} en $q_{\text{int},0}$ opgevat worden als tijdsgemiddelde grootheden,

$$\bar{q}_{\text{int}} = \frac{1}{t_{\text{open}}} \int_{t=0}^{t_{\text{open}}} q_{\text{int}} dt \quad (4.3)$$

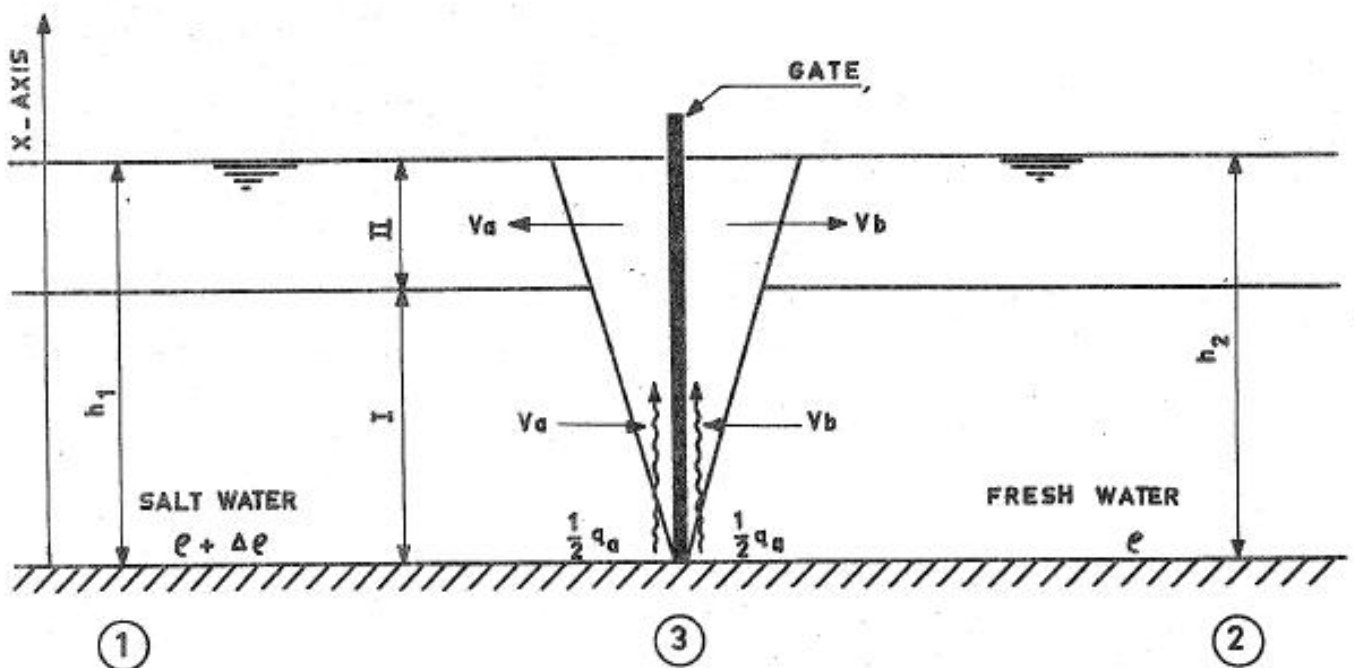
en de reductiefactor is dan een functie van de deur-open-tijd,

$$n(t_{\text{open}}) = \frac{\bar{q}_{\text{int}}}{q_{\text{int},0}} \quad (4.4)$$

De tijdsgemiddelde massaflux zout is gelijk aan de totale massa zout die de kolk instroomt gedurende de de deur-open-tijd gedeeld door de deur-open-tijd. Deze massa kan bepaald worden door ruimtelijke integratie uit de dichtheids- en saliniteitsverdeling na het sluiten van de deur. In de laboratorium- en praktijkproeven kan deze ruimtelijke integraal benaderd worden door een sommatie over puntmetingen, zie Mastbergen (2010).

7.2 Theorie voor de reductiefactor bij een luchtbellenscherm zonder waterscherm

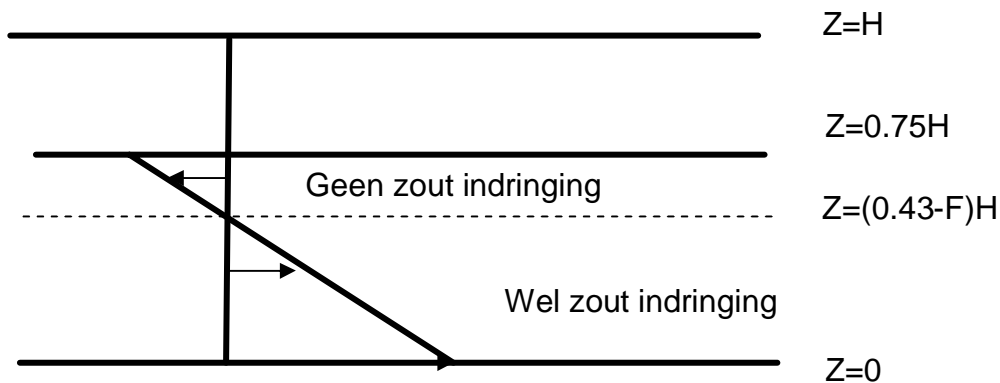
Figuur 7.1 geeft een schematische weergave van een luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoetwater uit Abraham en van der Burgh (1962). Aan de linkerkzijde is het water zout en aan de rechterzijde zoet. Verder wordt er verondersteld dat er geen menging plaats kan vinden in het luchtbellenscherm. In zone I is er een netto instroming van water en in zone II is er een netto uitstroming. De snelheidscomponent die relevant is voor het zouttransport is v_b in zone I. Volgens het model kan deze snelheid namelijk negatief worden dat wil zeggen de kolk in en resulteren in een netto zouttransport van voorhaven naar kolk. In Figuur 7.2 is de snelheidsverdeling van v_b in zone I is weergegeven volgens de theorie van Abraham en van der Burgh (1962).



$$\text{I : ZONE OF } \frac{d q_w}{d x} > 0 ; 0 < x < \frac{3}{4} h$$

$$\text{II : ZONE OF } \frac{d q_w}{d x} < 0 ; \frac{3}{4} h < x < h$$

Figuur 7.1 Schematische weergave van een luchtbellenscherm op een overgang van zout (links) naar zoetwater (rechts) uit Abraham en van der Burgh (1962).



Figuur 7.2 Profiel van de netto indringsnelheid van het zoute water onderin het profiel volgens vergelijking (45) in Abraham en van der Burgh (1962).

Abraham en van der Burgh (1962) hebben de volgende uitdrukking afgeleid voor reductiefactor,

$$n = -0.86F^{1/2} + 0.185F^{-1/2} + F^{3/2} \quad , \quad (4.5)$$

Waarbij F een functie is van het luchtdebietgetal f gedefinieerd als,

$$f^{1/2} = \frac{(q_a g)^{1/3}}{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} gH\right)^{1/2}} \quad , \quad (4.6)$$

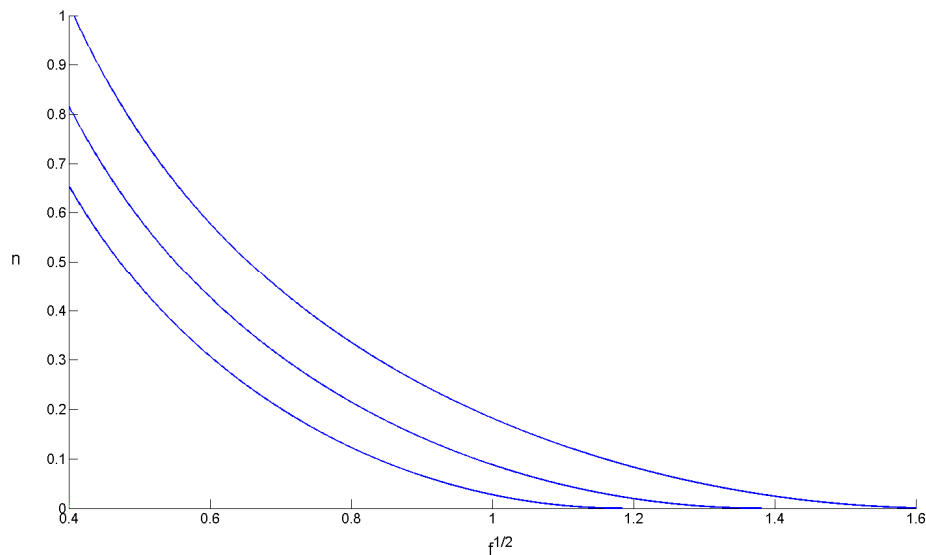
q_a is het luchtdebiet in $m^3/s/m$, g de gravitatie versnelling in m/s^2 , $\Delta\rho$ het dichtheidsverschil in kg/m^3 en H de waterdiepte in m .

Deze relatie wordt weergegeven in Figuur 7.3. Indien bij een gegeven dichtheidsverschil een groter luchtdebiet wordt gebuikt, wordt er meer zoutwater in het bellenscherf gezogen. Hierdoor wordt de netto indringing kleiner. Dit betekent dat het punt met de tekenomslag in Figuur 7.2 dichter bij de bodem komt te liggen.

De reductiefactor gaat naar nul voor grote waarde van het luchtdebietgetal. Echter er wordt bij de afleiding van (4.5) aangenomen dat er geen menging plaatsvindt in het luchtbellenscherf. Dit is een beperking van de toepasbaarheid van deze relatie met name

voor de situatie met een relatief groot luchtdebiet. In dat geval kan het intrusiepad van het zout aan de bovenzijde van het scherm dominant worden, zie Figuur 7.4.

Merk op dat de stroompatronen in Hoofdstuk 5 dergelijke regiemveranderingen als functie van het luchtdebiet suggereren. In het regiem waarbij er twee circulatiezones ontstaan is het gebruik van de theorie van Abraham en van der Burgh (1962) waarschijnlijk niet mogelijk aangezien er juist zeer sterke menging plaatsvindt. Voor het geval dat er alleen een circulatiezone aan de voorhaven zijde ontstaat vindt de indringing van zoutwater voornamelijk aan de bodem plaats zie Figuur 6.11. Dit zou mogelijk een regiem zijn waarbij de theorie van Abraham en van der Burgh (1962) toegepast mag worden.



Figuur 7.3 Weergave van de reductiefactor versus het luchtdebietgetal volgens Abraham en van der Burgh, 1962, zie vergelijking (4.5). De verschillende lijnen reflecteren de experimentele onzekerheid in de metingen van de snelheid aan het wateroppervlak als functie van het luchtdebiet.

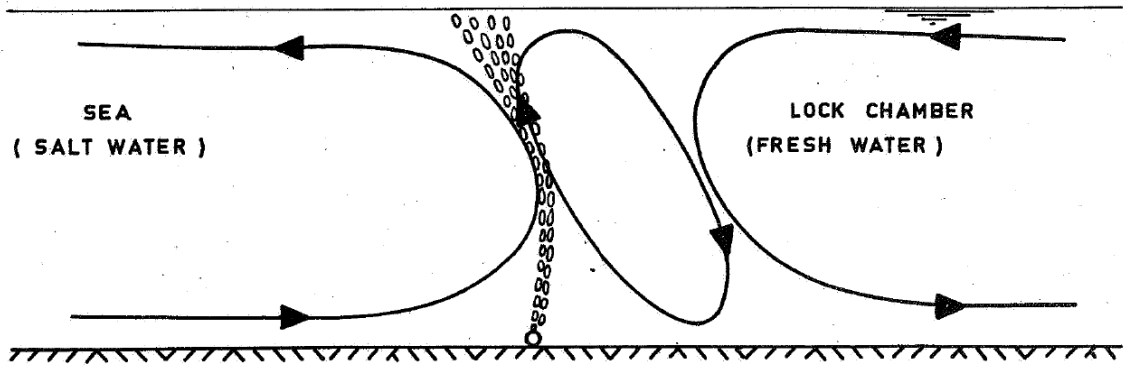


FIG. a FLOW PATTERN NEAR OUTER GATE

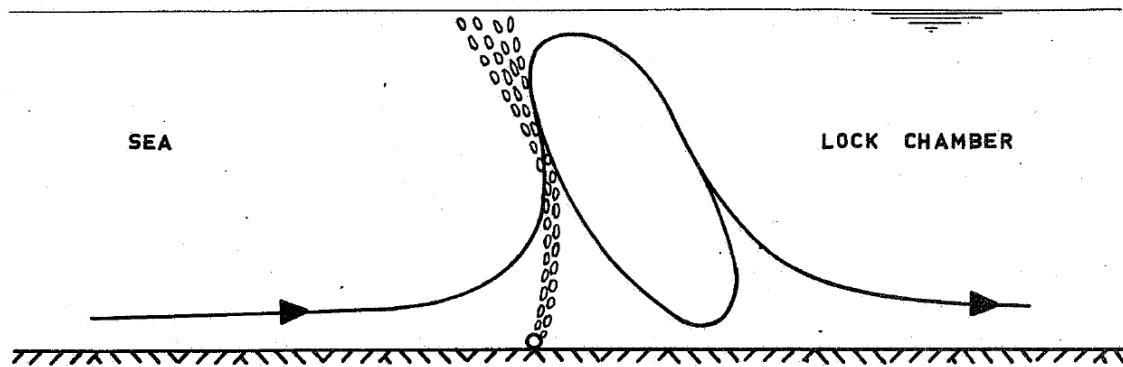


FIG. b PATH OF INTRUSION OF SALT WATER

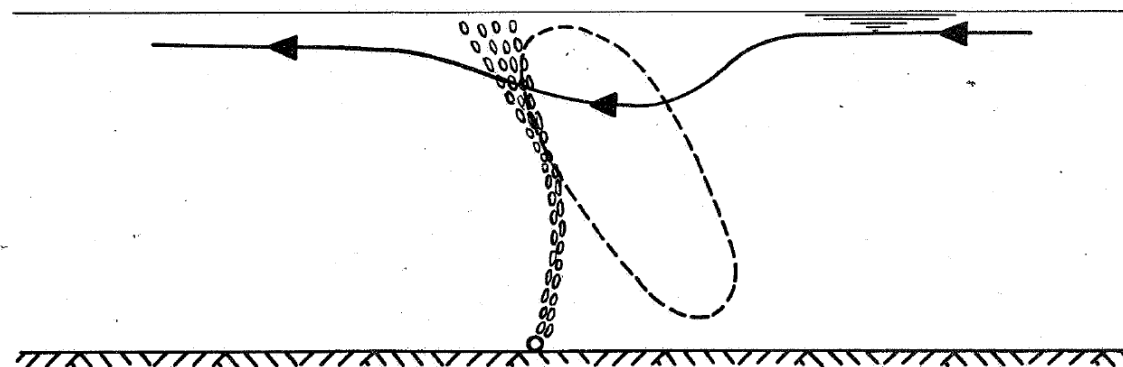


FIG. c PATH OF EXTRUSION OF FRESH WATER

Figuur 7.4 Intrusiepad van zout en extrusiepad van zoet water aan de bovenzijde van het bellenscherm volgens Abraham en van der Burgh (1962). Intrusie van zout en extrusie van zoet wisselen elkaar af.

7.3 Validatie numerieke modellen van maatregelen op laboratoriumschaal

In deze sectie wordt bestudeerd welke modelkeuzes gemaakt moeten worden om het zouttransport langs een luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoetwater binnen acceptabele nauwkeurigheid te beschrijven. Daarom wordt er een vergelijking gemaakt met de laboratoriumexperimenten uit Deeltaak 2. Deze stap is noodzakelijk voor de keuzes die gemaakt moeten worden voor de CFX modellen van de prototypeschaal. Er wordt onderscheid gemaakt tussen modelkeuzes en keuzes die bij de numerieke benadering een rol spelen, oftewel, welke vergelijkingen worden er gebruikt en worden deze vergelijkingen voldoende nauwkeurig benaderd voor de beantwoording van de onderliggende vraag?

Tabel 7.1 geeft een overzicht van de parameters die gebruikt zijn in het CFX model van het laboratoriumproef 5 en 7 uit Deeltaak 2 met een luchtbellenscherm in combinatie met een waterscherm.

Tabel 7.1 Instellingen die gebruikt zijn in het CFX model van laboratoriumproef 5 en 7 uit Deeltaak 2. In proef 7 is een luchtbellenscherm gecombineerd met een waterscherm. In proef 5 is alleen een luchtbellenscherm gebruikt. De diameter van de luchtballen is met beeldopnamen bepaald.

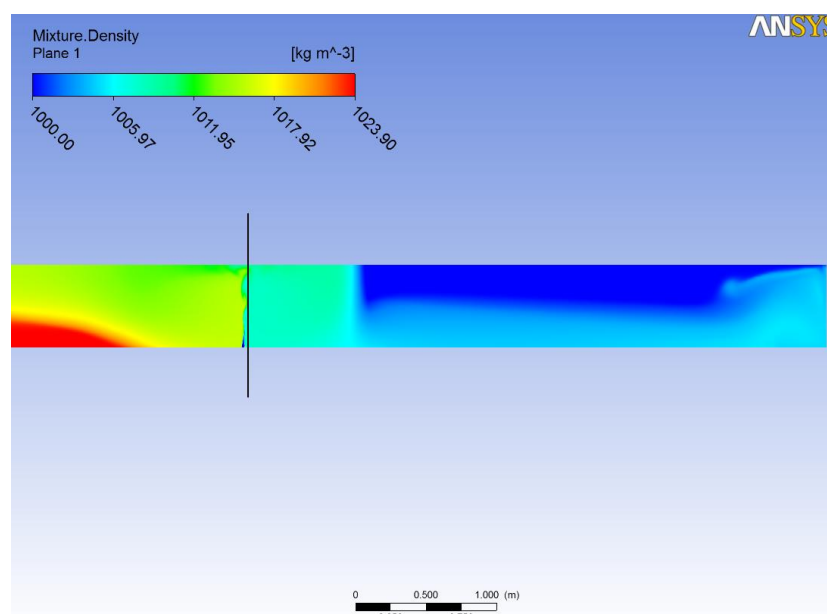
Luchtdebiet	91.8 NI/min
Breedte luchtinlaat	10 mm
Schatting bel diameter	3 mm
Waterdebiet	0.90 l/s
Breedte waterinlaat bodem	6 mm
Breedte	50 cm
Diepte	29 cm
N Lengte kolk	4.09 m
Lengte voorhaven	10 m
Dichtheid kolk initieel	1000 kg/m³ (0 ppt)
Dichtheid voorhaven initieel	1023.9 kg/m³ (35 ppt)
Grootste cel (in kolk)	8 mm
Kleinste cel (bij luchtinlaat)	1.4 mm

Tabel 7.2 geeft een overzicht van de verschillende modelvarianten die gebruikt zijn in de gevoeligheidsanalyse. Er is gevarieerd met twee turbulentiemodellen, het standaard-k- ϵ en het RNG-k- ϵ model. Daarnaast is een modelvariant getest waarbij naast het RNG-k- ϵ model extra turbulente viscositeit is toegevoegd aan de gebieden met een hoge volumefractie lucht door gebruik te maken van het Sato-Enhanced-Eddy-Viscosity model. Er zijn verschillende methodes om zoutgehalten te implementeren in CFX. In een van de modelvarianten wordt een alternatieve toestandsvergelijking gebruikt wordt om verschil in zoutgehalten te beschrijven. Voor een korte beschrijving van deze modellen zie Hoofdstuk 4. Tevens is er gekeken naar rooster- en tijdstapgevoeligheden: worden de vergelijkingen voldoende nauwkeurig benaderd voor de beantwoording van de onderliggende vraag?

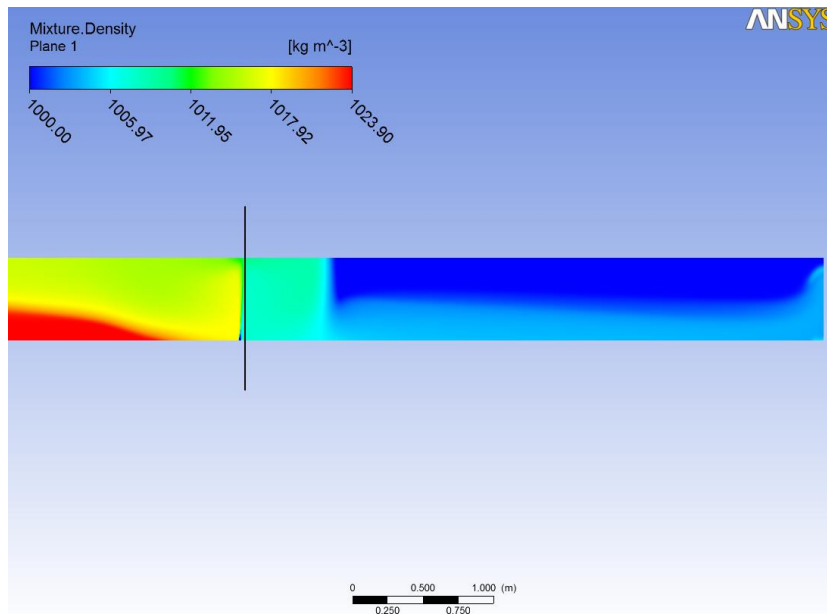
Tabel 7.2 Alternatieve modellen die gebruikt zijn in de gevoeligheidsanalyse van de situatie van een bellenscherm in combinatie met een waterinlaat op de zout-zoet scheiding. Er is gekeken naar zowel numerieke effecten (blauwe rijen) als modelkeuzes (groene rijen).

Varianten	Beschrijving	Resolutie
RNG_rhoog	RNG-k-ε	Hoog
RNG_rlaag	RNG-k-ε	Laag (factor ½ ruimtelijk en temporeel)
RNG_tlaag_rhoog	RNG-k-ε met grote tijdstap	Hoog
RNG_advlaag_rhoog	RNG-k-ε+lage orde advection schema's	Hoog
Keps_rhoog	Standaard k-ε	Hoog
Sato_rhoog	Sato enhanced eddy viscosity+RNG-k-ε	Hoog
Eqs_rhoog	Equation of state benadering+RNG-k-ε	Hoog

Figuur 7.5 en Figuur 7.6 geven de berekende dichtheid weer van de CFX modellen met respectievelijk het RNG-k-ε en het standaard-k-ε turbulentiemodel. De zouttong is in de simulatie met het RNG-k-ε model verder de kolk in gepropageerd. Het algemene stroombeeld is in beide berekeningen identiek. In Tabel 7.3 worden de resultaten samengevat met betrekking tot het totale zouttransport gedurende 90 seconden. Significante afwijking ten opzichte van het experiment zijn de model varianten waarbij het standaard k-ε model gebruikt is en de modelvariant waarbij RNG-k-ε turbulentiemodel gecombineerd is met het Sato-Enhanced-Eddy-Viscosity model. Merk hierbij dat in deze laatste twee simulaties het lokale snelheidsveld nabij de luchtbellenzone nagenoeg stationair en symmetrisch is, zoals beschreven in sectie 6.1.2. Dit kan resulteren in een onderschatting van de menging die gepaard kan gaan door links-rechts bewegingen van de luchtbellenzon.



Figuur 7.5 Berekende dichtheid in het CFX model van het laboratoriumexperiment. Er is zowel een bellenscherm als een waterscherm toegepast. In deze som is gebruik gemaakt van het RNG-k-ε turbulentiemodel.



Figuur 7.6 Berekende dichtheid in het CFX model van het laboratorium experiment. Er is zowel een bellenscherm als een waterscherm toegepast. In deze som is gebruik gemaakt van het standaard -k-ε turbulentie model. Andere instellingen zijn identiek aan Figuur 7.5.

Tabel 7.3 Netto zoutmassaïndringing in de kolk na 90 seconden bij toepassing van een luchtbellenscherm met waterscherm proef 7 uit Deeltaak 2. De reductiefactor is bepaald ten opzichte van een 'lock-exchange flow' zonder maatregelen tegen zoutintrusie (oranje rijen). Numerieke effecten (blauwe rijen) en effecten model keuzes (groene rijen) worden onderscheiden.

Varianten	Variante	Zout massa	Verschil Absoluut	Verschil Relatief	Reductiefactor
Lab lock exchange	Referentie	0.178 kg/s	-	-	1.0
Lab bellen+water	Meting	0.036 kg/s	0.00	0 %	0.20
CFX lock exchange	Referentie	0.212 kg/s	-	-	1.0
Rng_rhoog	Numeriek	0.033 kg/s	0.003 kg/s	8 %	0.15
Rng_rlaag	Numeriek	0.033 kg/s	0.003 kg/s	8 %	0.15
Rng_advlaag_rhoog	Numeriek	0.031 kg/s	0.005 kg/s	14 %	0.15
Rng_tgroot_rhoog	Numeriek	0.029 kg/s	0.007 kg/s	19 %	0.14
Eqs_rhoog	Model	0.037 kg/s	0.001 kg/s	3 %	0.17
Sato_rhoog	Model	0.023 kg/s	0.013 kg/s	36 %	0.11
Keps_rhoog	Model	0.024 kg/s	0.012 kg/s	33 %	0.11

Ter controle is er een simulatie uitgevoerd met alleen een luchtbellenscherm zie Tabel 7.4. Het model met RNG-k-ε geeft ook in deze situatie een nauwkeuriger schatting van het zouttransport dan het standaard-k-ε model.

Tabel 7.4 Overzicht van de resultaten van de CFX modellen voor de situatie met alleen een bellenscherm. De andere parameters zijn identiek als in Tabel 7.3.

	Zout massa	Reductiefactor
Laboratorium alleen bellenscherm	0.040 kg/s	0.19
RNG-k-ε_rhoog	0.042 kg/s	0.20
k-ε_rhoog	0.033 kg/s	0.16

Conclusie validatie numerieke simulatie van maatregelen op labschaal

Het berekende zoutmassatransport komt binnen acceptabele maten overeen met de laboratoriumproeven uit Deeltaak 2. Er is een gevoeligheid geconstateerd voor de keuze van het turbulentiemodel. Deze keuze bepaalt sterk het lokale gedrag van de luchtbellenscherm en daarmee het zouttransport langs het luchtbellenscherm. Het model met het RNG-k-ε turbulentiemodel geeft de beste representatie van het zouttransport al zal daarom gebruikt worden bij de analyse van het zouttransport bij een luchtbellenscherm op de prototypeschaal.

7.4 Numerieke analyse effect maatregelen op prototypeschaal

In deze sectie wordt een analyse gedaan naar het effect van diverse maatregelen op prototypeschaal. Merk op dat CFX geen expliciet gebruik maakt van schaaltechnieken. De modelkeuze die op basis van de vergelijking van de laboratoriumexperimenten is gemaakt is daarom zeer waarschijnlijk de beste keuze voor de numerieke modellen voor de prototypeschaal. Er wordt daarom gebruik gemaakt van het RNG-k-ε turbulentiemodel bij de analyses in deze sectie.

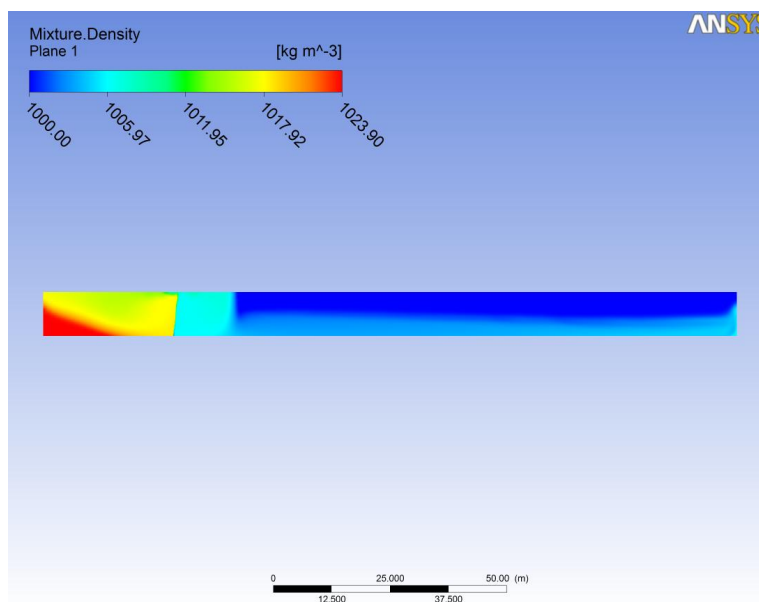
Tabel 7.5 geeft een overzicht van de verschillende combinaties van saliniteitsverschillen en lucht- en waterdebieten die gebruikt zijn voor de numeriek simulaties in de Stevinsluis. Initieel is er geen gelaagdheid in de kolk en voorhaven. Het waterdebiet van 1.6 m³/s is het maximaal realiseerbare waterdebiet dat gerealiseerd kan worden in de praktijkproeven. Het luchtdebiet van 1400 NI/s is het maximaal realiseerbare luchtdebiet. Het luchtdebiet is in twee simulaties gehalveerd. Het luchtdebiet van 400 NI/s is gekozen, omdat in dat geval de maximale snelheid aan het oppervlak ongeveer twee maal de snelheid van de zouttong is zonder beperkende maatregelen bij 35 ppt verschil tussen de voorhaven en kolk.

Tabel 7.5 Verschillende combinaties van saliniteitsverschillen en lucht- en waterdebieten die hier beschouwd zijn.

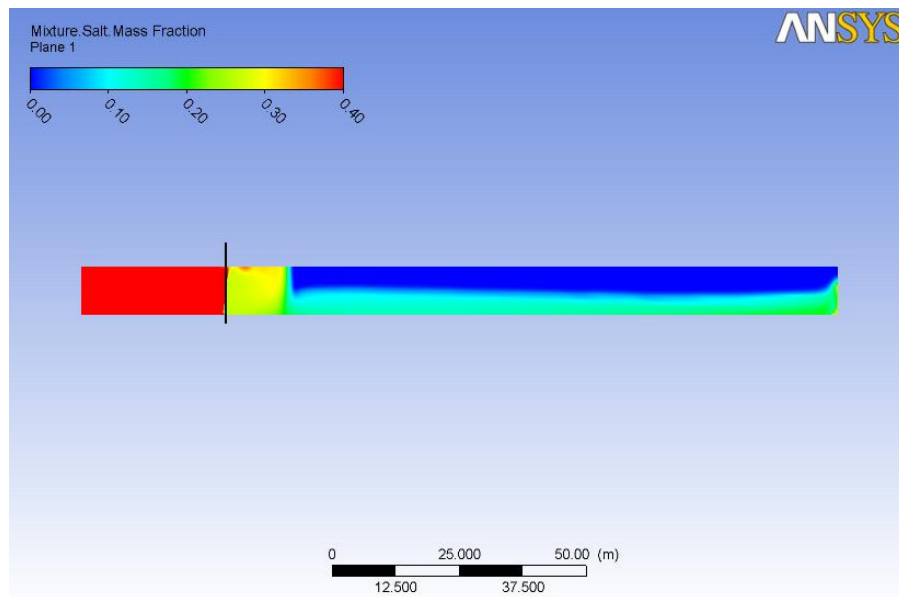
Voorhaven	Kolk	luchtdebiet	waterdebiet
35 ppt	0 ppt	1400 NI/s	1.6 m ³ /s
35 ppt	0 ppt	1400 NI/s	0 m ³ /s
35 ppt	0 ppt	400 NI/s	0 m ³ /s
35 ppt	0 ppt	400 NI/s	1.6 m ³ /s
35 ppt	0 ppt	700 NI/s	0 m ³ /s
35 ppt	10 ppt	400 NI/s	1.6 m ³ /s
0 ppt	10 ppt	700 NI/s	0 m ³ /s

Figuur 7.7 toont de berekende dichtheidsverdeling als het maximaal realiseerbare lucht- en waterdebiet wordt ingezet dat gerealiseerd kan worden in de praktijkproeven. Er ontstaat een

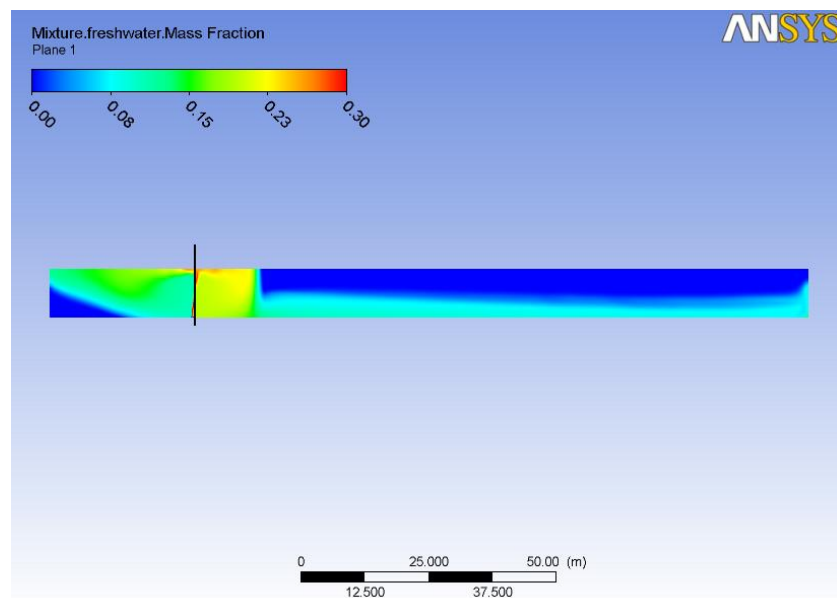
sterk verdunde zouttong met een dichtheid van minder dan een kwart van het oorspronkelijke dichtheidsverschil tussen de kolk en de voorhaven. Het stroombeeld is vergelijkbaar met de simulatie van de laboratoriumproeven, zie Figuur 7.5. In Figuur 7.8 en Figuur 7.9 zijn respectievelijk de massafractie zoutwater en inlaatwater gegeven. Ongeveer 15 procent van het water in de zouttong komt oorspronkelijk uit de zoute voorhaven en ongeveer 8 procent van de inlaat. De resterende fractie is water dat oorspronkelijk in de kolk aanwezig was. Merk op dat de indringing van zoutwater en inlaatwater via de bovenzijde van het luchtbellenscherm de kolk ingaat. Vergeleken met de situatie zonder beperkende maatregelen is de zoutintrusie sterk vertraagd, zie Figuur 5.10. Daarnaast is het zoutgehalte lager.



Figuur 7.7 Berekende dichtheid in de Stevinsluys na 600 seconden. De dichtheid in de kolk is initieel 1000 kg/m³ (0 ppt) en de voorhaven 1023.9 kg/m³ (35 ppt). Er is gebruik gemaakt van een luchtdebiet van 1400 NI/s en een waterdebiet van 1.6 m³/s.



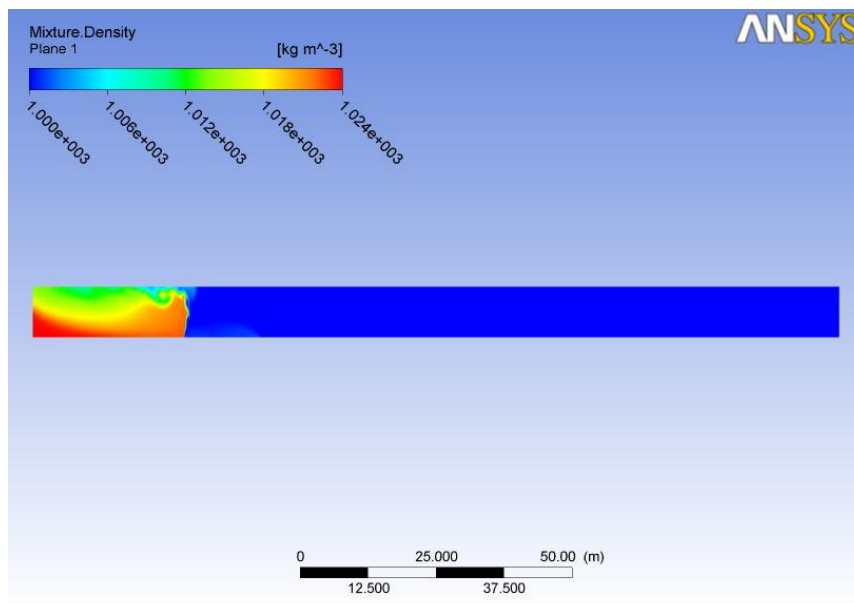
Figuur 7.8 Berekende massa fractie zoutwater in de Stevinluis na 600 seconden. Er is gebruik gemaakt van een luchtdebiet van 1400 NI/s en een waterdebiet van 1.6 m³/s over 14m kolkbreedte.



Figuur 7.9 Berekende massafractie inlaatwater in de Stevinluis na 600 seconden. . De dichtheid in de kolk is initieel 1000 kg/m³ (0 ppt) en de voorhaven 1023.9 kg/m³ (35 ppt). Er is gebruik gemaakt van een luchtdebiet van 1400 NI/s en een waterdebiet van 1.6 m³/s over 14 m kolkbreedte.

Een bekende maatregel tegen zoutintrusie in sluiskolken is de methode van een lekkende ebdeur. Hierbij wordt, indien de waterstand aan de zoete zijde van de sluis hoger is dan de de waterstand aan de zoute zijde, zoetwater door de sluis gespoeld op het moment dat de deuren aan de zoute zijde geopend zijn. Op deze manier wordt zoutwater uit de sluis kolk gespoeld. Figuur 7.10 geeft de berekende dichtheid bij toepassing van een luchtbellen- en waterscherm in combinatie met een lekkende ebdeur. De ebdeur is gemodelleerd als een

massabron nabij de gesloten deur aan de zoetzijde op circa 2 m diepte. Het zoete water wordt met een snelheid van 2 m/s horizontaal geïnjecteerd. In dit geval treedt er nagenoeg geen zout de kolk in. Merk op dat een zoetwaterdebiet van 7.6 m³/s in een kolk van 14 m breedte relatief groot is. Het is mogelijk dat er minder zoetwater gebruikt kan worden in de ordegrrootte van een kwart van het aangezogen water van het bellenscherm. De lekkende ebdeur zou een compensatie kunnen zijn voor de beperking in het maximaal realiseerbare waterdebiet van het waterscherm bij de praktijkproeven.



Figuur 7.10 Berekende dichtheid bij toepassing van een luchtbellens- en waterscherm in combinatie met een lekkende ebdeur. Initieel is de dichtheid in de voorhaven 1023.9 kg/m³ (35 ppt) en in de kolk 1000 kg/m³ (0 ppt). Het luchtdebiet is 400 NI/s en het waterdebiet 1.6 m³/s over een kolkbreedte van 14 m. Bij de deur aan de zoetzijde (rechts) wordt 6 m³/s extra zoet water ingelaten met een snelheid van 2 m/s.

Conclusie met betrekking tot zouttransport op prototypeschaal

Tabel 7.6 geeft een overzicht van de behaalde reductiefactoren van de massa zoutinrusie na 600 seconden ten opzichte van de ongehinderde lock-exchange. Het maximaal realiseerbare luchtdebiet van 1400 NI/s kan aanmerkelijk gereduceerd worden om dezelfde reductiefactor te realiseren. Rond de 400 NI/s treedt bij een initieel zoutgehalte van 35 ppt in de voorhaven en 0 ppt in de kolk een transitie van twee circulatiezones naar een enkele circulatiezone aan de zoutzijde op. De totale hoeveelheid zout die de kolk indringt in de situatie van een enkele circulatiezone aan de zoutzijde is substantieel groter.

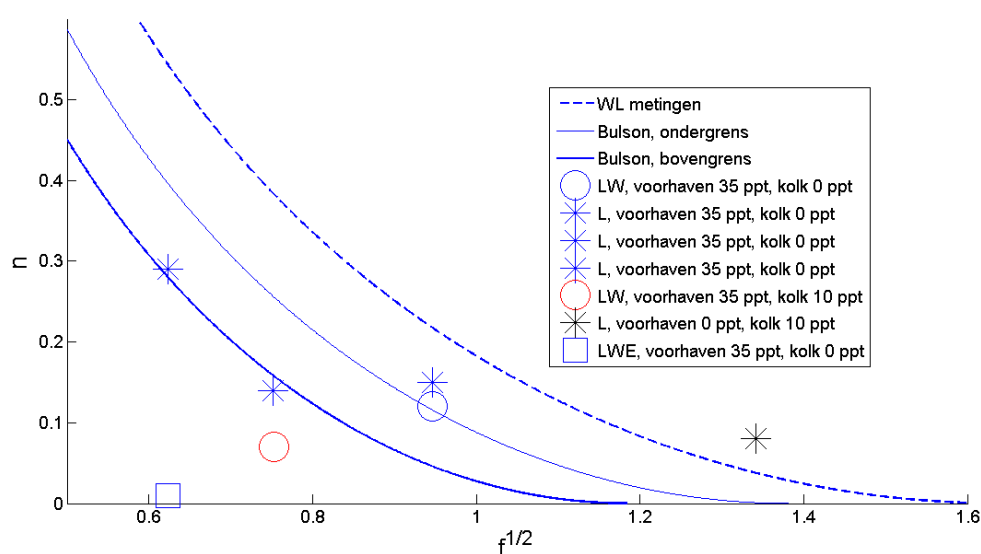
Injectie van het maximale realiseerbare waterdebiet in de praktijkproeven bij de Stevinssluis van 1.6 m³/s heeft vooral effect bij toepassing van een gereduceerd luchtdebiet in een brakke kolk. Merk op dat bij de Volkeraksluizen een groter waterdebiet van max 8.3 m³/s (t.b.v. het waterscherm) kan worden toegepast. Dit betekent dat er meer ontwerprijheid is in de keuze van verhouding van lucht- en waterdebiet.

In Figuur 7.11 worden de berekende reductiefactoren vergeleken met de theorie van Abraham en van der Burgh (1962). Merk op dat deze theorie veronderstelt dat er geen menging plaatsvindt in het luchtbellenscherm. Aan deze aanname kan niet voldaan worden in de situatie met twee circulatiezones, waarbij zeer sterke menging plaatsvindt. Het

berekende zouttransport voor het geval dat er een enkele circulatiezone ontstaat aan de zoutzijde ligt op één van de berekende curven van Abraham en van der Burgh (1962). Het aantal simulaties is te klein om verdere conclusies te doen ten aanzien van de toepasbaarheid van de theorie van Abraham en van der Burgh (1962). Er lijkt een regiem gevonden te zijn waarbij een verdere verhoging van de luchtdebietparameter niet tot een verdere reductie van de zoutuitwisseling leidt, zie Figuur 7.11. Dit kan mogelijk gerelateerd worden aan het optreden van twee circulatiezones naast het luchtbellenscherm waarin sterke menging plaatsvindt. De mengverhouding van voorhaven- en kolkwater in de circulatiezone aan de kolkzijde hangt niet sterk af van het luchtdebiet. De zoutindring kan hierdoor bepaald worden.

Tabel 7.6 Berekende reductiefactoren in de massa zoutinrusie ten opzichte van een ongehinderde lock-exchange na 600 s, bij verschillende lucht- en waterdebiet en saliniteitsverschillen tussen de voorhaven en de kolk.

Vh	Kolk	Lucht	Water	Ebdeur	n	Wervels
ppt	ppt	N l/s	m ³ /s	m ³ /s		
35	0	1400	1.6	0	0.12	2
35	0	1400	0	0	0.15	2
35	0	400	0	0	0.29	1
35	0	400	1.6	0	Onzeker	1-2-1
35	0	700	0	0	0.14	2
35	0	400	1.6	6	0.01	1
35	10	400	1.6	0	0.07	2
0	10	700	0	0	0.08	2



Figuur 7.11 Vergelijking van de berekende reductiefactoren met de theoretische oplossing van Abraham en van der Burgh (1962). De sterren corresponderen met de gevallen waarbij alleen een luchtbellenscherm (L) is gebruikt en bij de cirkels is zowel een bellenscherm als een waterscherm gebruikt (LW). De situatie met een luchtbellenscherm, waterscherm en een lekkende ebdeur (LWE) is gemarkeerd met een vierkant.

8 Conclusies

8.1 Validatie van de numerieke modellen

De resultaten van de CFX simulaties komen met voldoende nauwkeurigheid overeen met de literatuur en de experimenten in Deeltaak 2 ten aanzien van de volgende deelprocessen

- 1 Zouttransport, propagatiesnelheid en laagdikte van een ongehinderde lock-exchange
- 2 Oppervlakte snelheden bij een luchtbellenscherm in homogeen water lab- en prototypeschaal
- 3 Zouttransport bij een luchtbellenscherm op een overgang van zout naar zoetwater
- 4 Zouttransport bij een luchtbellenscherm met waterscherm op een overgang van zout naar zoetwater

Dit geeft voldoende vertrouwen in CFX als instrument om een betrouwbare analyse te maken van de zouttransporten in de Stevinsluis zonder en met toepassing van een luchtbellenscherm en waterscherm..

8.2 Analyse luchtbellenscherm in combinatie met zoetwaterscherm

Verschiedende combinaties van lucht- en waterdebiet zijn onderzocht. Er is een regiem gevonden waarbij het netto zouttransport vrijwel onafhankelijk wordt van het luchtdebiet. Dit gedrag kan begrepen worden uit de typische circulatiepatronen en de mengverhouding van zout- en zoetwater in deze zones.

8.3 Schatting reductiefactor bij diverse combinaties van lucht- en waterdebiet

Voor de Stevinsluis bij 35 ppt verschil in zoutgehalte tussen de voorhaven en kolk ligt dit regiem tussen de 400 en 700 N l/s. De reductiefactor van het netto zouttransport ten opzichte van een gewone 'lock-exchange flow' zonder maatregelen is in dat regiem 0.15 ± 0.05 (80 tot 90 procent reductie). Verder verlagen van de reductiefactor met het maximaal realiseerbare waterdebiet bij het veldexperiment in de Stevinsluis van $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ is waarschijnlijk niet mogelijk. Het kan echter energetisch voordelig zijn om het luchtdebiet verder te verlagen dan 400 N l/s in dat geval kan het waterscherm van $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ een regiemverandering veroorzaken zodanig dat de reductiefactor gelijk blijft aan 0.15 ± 0.05 .

Voor een verdere verlaging van de reductiefactoren zou gebruik gemaakt kunnen worden van

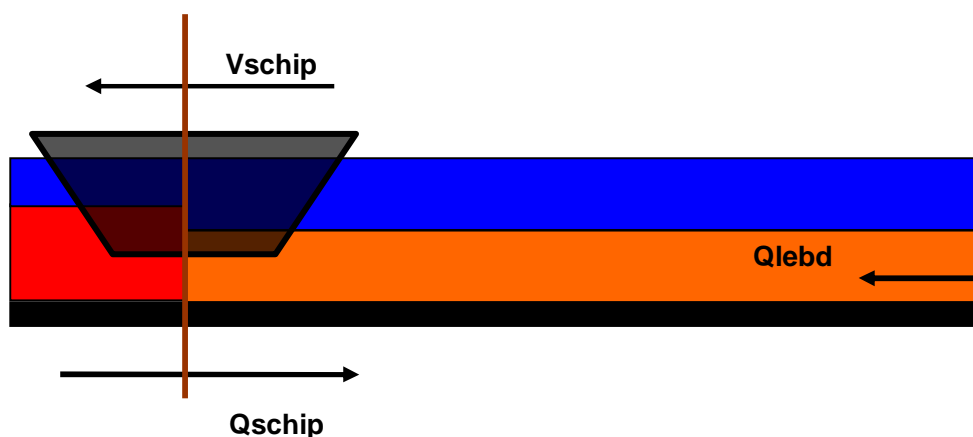
- 1 Een combinatie van een luchtbellenscherm met een lekkende ebdeur
- 2 Een systeem ontwerp met een brakke kolk en een luchtbellenscherm met zoetwaterscherm aan de zoutzijde en een luchtbellenscherm aan de zoetzijde
- 3 Een zoutvang aan de zoetzijde die de verzwakte dichtheidstroom afvangt en dit water gebruiken voor het waterscherm aan de zoutzijde

Merk op dat de reductiefactor alleen nog niet rechtstreeks toegepast kan worden voor een schatting van de daggemiddelde zoutvracht bij de Volkeraksluizen, zie Uittenbogaard (2010) .

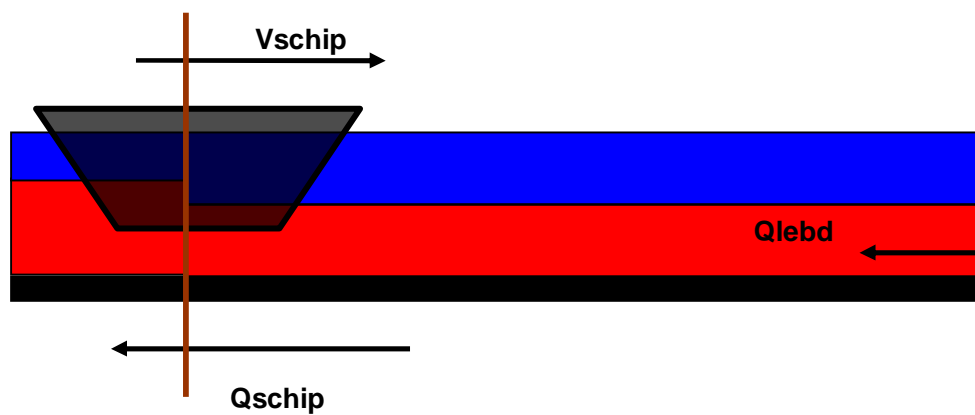
8.4 Advies bij de uitvoering van het veldexperiment in de Stevinsluis

Een praktische aanpak is het luchtdebiet te verhogen tot er twee circulatiezones ontstaan aan de zoute en zoete zijde van het luchtbellenscherm. Dit kan gecontroleerd worden door de richting van de afstroming aan het wateroppervlak te bepalen. Als het regiem gevonden is waarbij twee circulatiezones ontstaan zal door menging een reductiefactor gerealiseerd kunnen worden van circa 0.2 oftewel 80 procent reductie ten opzichte van een ongehinderde lock-exchange. Daarna kan met een waterscherm en/of lekkende ebdeur de reductiefactor verder verlaagd worden. Een vervolg stap kan zijn om het luchtdebiet te verlagen omdat de impuls van de waterinjectie en het drijfvermogen van het zoete water een deel van de werking van het luchtbellenscherm kan overnemen.

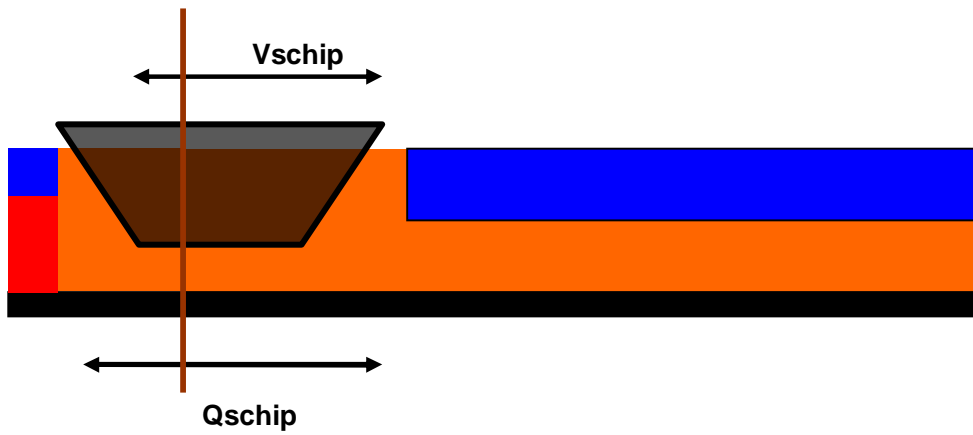
Merk hierbij op dat er niet alleen geoptimaliseerd moet worden voor een lock-exchange proces, maar voor de zoutindringing in de zoete voorhaven gedurende het volledige schutproces. Extra waterinlaat bij de lekkende ebdeur kan bijvoorbeeld retourstromen met zoutwater uit de voorhaven beperken op het moment dat schepen uitvaren naar de zoute zijde, zie Figuur 8.1. Doordat er gelaagdheid aanwezig is in de kolk kan de geforceerde zoutindringing door het uitvaren van schepen niet helemaal gecompenseerd worden door het binnenvaren van schepen, zie Figuur 8.1. Als er een bellenscherm gebruikt wordt is de gelaagdheid bij de ingang van de kolk sterk verminderd. Dit zou het netto zouttransport door de door de scheepvaart geforceerde waterbeweging bij in- en uitvaren kunnen verminderen, zie Figuur 8.3.



Figuur 8.1 Waterbeweging op het moment dat een schip de kolk verlaat aan de zoute zijde. Door het uitvaren komt er een waterbeweging opgang die de kolk ingaat om het scheepsvolume te compenseren. Dit water komt uit de boven- en onderlaag in de voorhaven.



Figuur 8.2 Waterbeweging op het moment dat een schip de kolk invaart aan de zoute zijde. Door het invaren komt er een waterbeweging opgang die de kolk uit gaat en zowel zoetwater uit de bovenlaag als zoutwater uit de onderlaag naar buiten kan transporteren.



Figuur 8.3 Waterbeweging bij een in- en uitvaren van een schip aan de zoute zijde van de kolk bij gebruik van een luchtbellenscherm. De gelaagdheid bij de ingang van de kolk wordt sterk verminderd door menging rondom het luchtbellenscherm.

9 Literatuur

Abraham G. en Burgh P. van der, 1962 Reduction of salt intrusion through locks by pneumatic barriers, Delft Hydraulic Laboratory, **28**, 1962

Benjamin T. B., Gravity currents and related phenomena. J. Fluid Mech. **31**, 1968

Bulson P. S., Currents produced by an air curtain in deep water, Dock and harbour authority, **42**, 1961

Chavanis P.-H. and Sommeria J.; Classification of self-organized vortices in two-dimensional turbulence : the case of a bounded domain. J. Fluid Mech., **314**, 1996

Groenenboom P. Numerical Simulation of Intrusion of Salt Water during Gate Opening of the Stevin Lock Gates ESI-Group, *Proposal 2009-08-048382 (Deltares)*, 2010.

Mastbergen, D., 2010, Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen, Deeltaak 2 labproeven, Deltares, product 4 1201226.002

Shin J.O, Dalziel S.B. and Linden P.F., Gravity currents produced by lock exchange, J. Fluid. Mech. **521**, 2004

Uittenbogaard, R.E., 2010, Voorstudie: Ontwerpstudie en Praktijkproef Zoutlekbeperring Volkeraksluizen, Model voor Zoutvrachtberekeningen, Deltares, product 3-17, 1201226.011

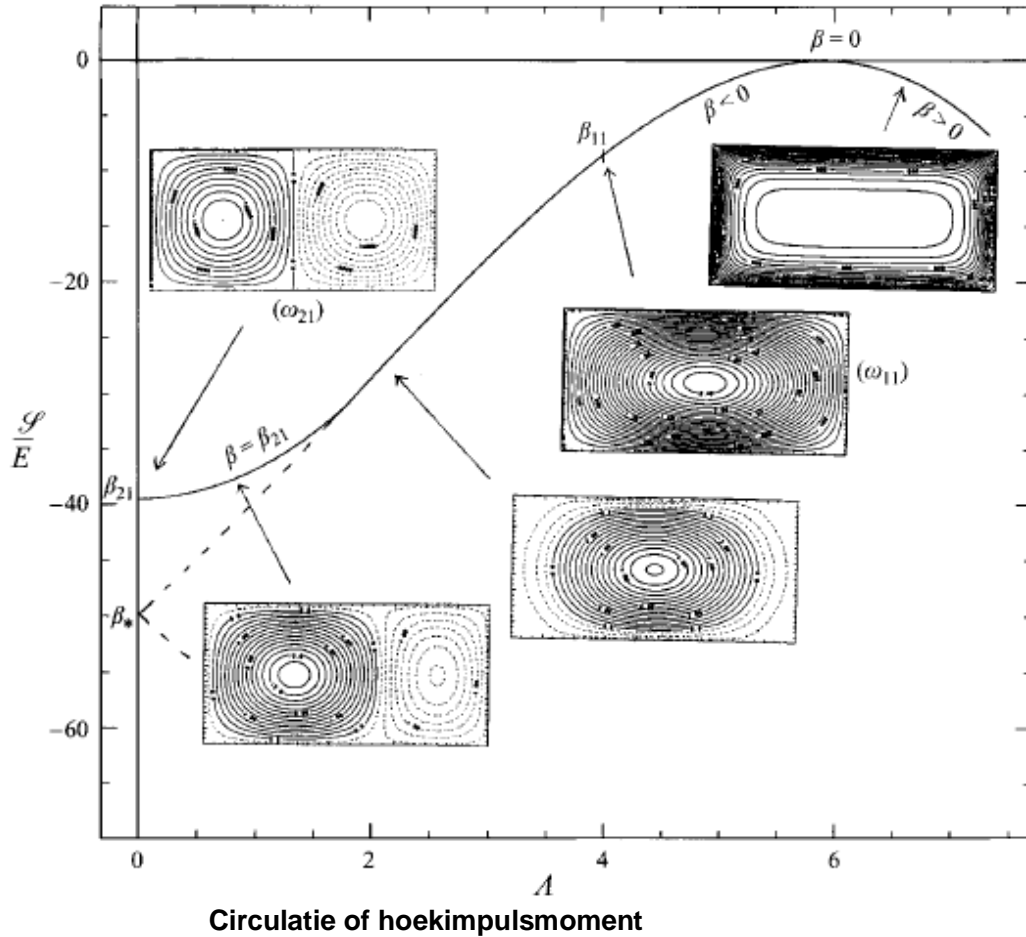
A Quasistationaire wervels

In Hoofdstuk 4 hebben we gezien dat het wervelpatroon rond een luchtbellenscherf sterk a-symmetrisch wordt onder invloed van het barokliene drukverschil. Een volledige wetenschappelijke verklaring voor dit gedrag vergt een gedetailleerde analyse van onder andere het hoekimpulsmoment, de kinetische energie en de vorticeit van het wervelsysteem. Een beschouwing van de statistische evenwichten van de 2D Euler vergelijkingen kan hier zeer nuttig zijn.

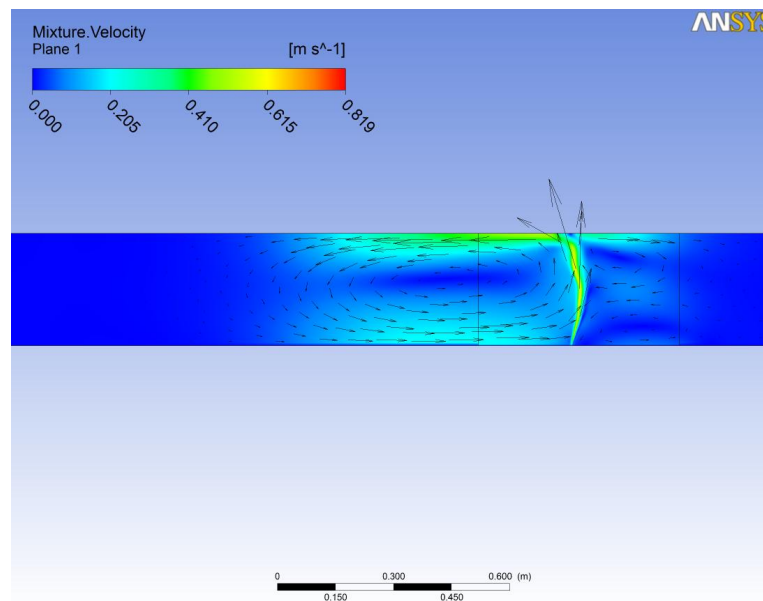
Figuur 9.1 Geeft het fase-diagram van de 2D Euler vergelijkingen in een rechthoekige geometrie. Dit beschrijft de statistische evenwichten van wervelpatronen als functie van het circulatie en de kinetische energie die aan het systeem zijn toegevoegd. Dit zijn oplossingen waarbij de entropie van het stromingsveld een lokaal maximum heeft bereikt. De dipolaire wervel is een als het ware een grondtoestand voor lage waarde van de circulatie ten opzichte van de kinetische energie. Circulatie en hoekimpulsmoment zijn voor deze evenwichtoplossingen aan elkaar gerelateerd.

Naarmate er meer circulatie of hoekimpulsmoment toegevoegd wordt gaat het wervelpatroon geleidelijk over in een monopool. Het fase-diagram geeft een kwalitatief inzicht in de regimeveranderingen zoals deze waargenomen zijn bij het luchtbellenscherf met een barokliene drukverschil. De stroming gaat dan naar een quasi-stationair evenwicht waarbij de kinetische energie die via het luchtbellenscherf wordt toegevoegd ballans maakt met viskeuze dissipatie.

Figuur 9.2 geeft een voorbeeld van een situatie waarbij er over een bellenscherf in homogeen water een barokliene drukverschil gemodelleerd wordt met behulp van een externe kracht. Er vormt zich een sterk a-symmetrisch wervelpatroon onder invloed van het opgelegde krachtmoment en de kinetische energie en vorticeit die door het luchtbellenscherf worden gegenereerd.



Figuur 9.1 Fasediagram en statistische evenwichten van de 2D Euler vergelijkingen in een rechthoekige container met free-slip randen. Op de horizontale as staat de controleparameter; dit is een verhouding tussen de netto circulatie over het wervelsysteem en de totale kinetische energie. Op de verticale as staat een maat voor de entropie van de wervels. *Bewerking van Chavanis en Sommeria, 1996.*



Figuur 9.2 Snelheid en richting bij een luchtbellenscherf in homogeen water waarbij een kracht wordt uitgeoefend over een zone van eenmaal de waterdiepte aan weerszijde van het bellenscherf. De kracht varieert in de hoogte zodanig dat het uitgeoefende krachtmoment overeenkomt met de barocline druk bij een zout-zoet scheiding van 35 versus 0 ppt.