

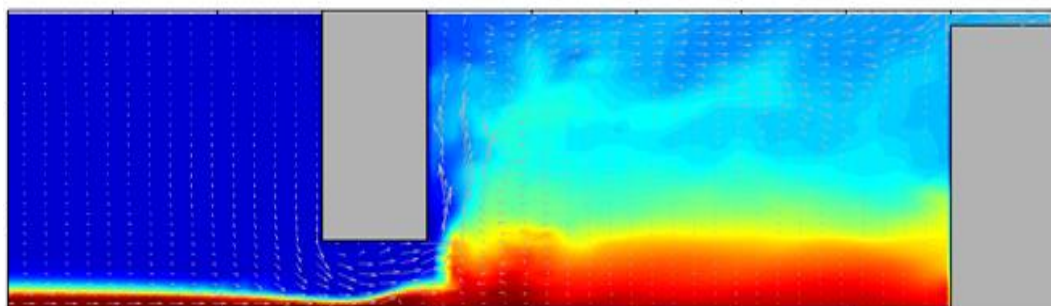
20 jan 2017



De zoete stuw

Ontwerpen en computersimulaties van zoete stuwen met als doel de zoetwaterberging in watergangen van zoute polders te bevorderen

Eindrapport



Samenvatting

De zoete stuw is een nieuw ontwerp van een stuw in watergangen in kustgebieden met kwel van brak grondwater. Bij traditionele stuwen in die watergangen verzamelt zich zoutwater onderin het profiel van de watergang en wordt zoet water versneld afgevoerd. In dergelijke gebieden wil men juist het zoete water vasthouden. Het principe van het nieuwe ontwerp is dat het diepe brakke water preferent wordt afgevoerd bij de stuw waardoor juist berging van zoet water plaatsvindt. Modelberekeningen in dit rapport, die de werking van de zoete stuw simuleren voor verschillende hydrologische omstandigheden en stuwontwerpen geven aan dat dit concept veelbelovend is.

Colofon

Documenttitel	. De zoete stuw
Opdrachtgever	. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Verantwoordelijke bij opdrachtgever	. Esmée Vingerhoed
Status	. Eindrapport
Datum	. 20 januari 2017
Projectnummer	. 706
Projectteam	. Koos Groen (Acacia Water), Linyrd de Wit (Svasek Hydraulics), Jouke Velstra (Acacia Water)

Disclaimer

Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend. De auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties. Aanvullingen of verbeteringen zijn welkom via info@acaciawater.com

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Computational Fluid Mechanics.....	2
3	“Zoete stuw” modellen.....	4
3.1	Zoete stuw met onderspuier	4
3.2	Zoete stuw met drain.....	5
4	Resultaten “zoete stuw” met onderspuier.....	7
4.1	CFD resultaten stromingssituatie 1	7
4.2	CFD resultaten stromingssituatie 2	10
5	Resultaten “zoete stuw” met drain	14
5.1	CFD resultaten stromingssituatie 1	14
5.2	CFD resultaten stromingssituatie 2	17
5.3	Enkele opmerkingen ten aanzien van de modelresultaten	20
6	Conclusies en aanbevelingen	22
6.1	Conclusies.....	22
6.2	Aanbevelingen	23

1

Inleiding

In gebieden met kwel van brak tot zout grondwater vertonen veel watergangen een stratificatie in de zoutgehalten. Onderin de watergangen, waar ook het kwelwater uittreedt, verzamelt zich water met hoge zoutgehalten. Uitgedrukt in chloridengehalten kunnen die enkele duizenden tot meer dan tienduizend milligrammen per liter bedragen. De watergangen voeren uiteraard ook het water van de percelen af, dat van boven en van opzij in de watergangen terecht komt via drains en greppels. Dit water bestaat voornamelijk uit neerslagwater en heeft veel lagere zoutgehalten, meestal lager dan 1000 mg/l. Bij dergelijke verschillen in zoutgehalten gaat de dichtheid een rol spelen en wordt de stratificatie in de watergang bevorderd: het “zoete” water van de percelen blijft als het ware op het “zoute” kwelwater drijven. In dit rapport definiëren we zout water als water met chloridengehalten hoger dan 2000 mg/l, brak water als water met gehalten tussen 200 en 2000 mg/l en zoet water als water met gehalten lager dan 200 mg/l.

Bij stuwen in watergangen met een zoutstratificatie vergroot de overstort de stroomsnelheid in de zoete en licht brakke bovenlaag van de watergang. Daardoor wordt dit water, vooral na regenbuien, versneld afgevoerd en blijft het zoute water achter de stuw “hangen”. In de noordelijke Waddenregio, waar onvoldoende of geen mogelijkheden zijn voor het doorspoelen van de watergangen in het voorjaar en de zomer, is dat een ongewenste situatie. Watergebruikers en –beheerders in dit gebied streven er naar om zoveel mogelijk water vast te houden.

Met het oog op deze problematiek hebben Acacia Water en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier het concept van de “zoete stuw” ontwikkeld. De “zoete stuw” heeft als doel meer zoet water te bergen en juist het zoute water preferent af te voeren. Om het conceptuele idee verder te brengen heeft het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier Acacia Water opdracht gegeven om concrete ontwerpen te maken van de “zoete stuw” en modelsimulaties uit te voeren. Het doel daarvan is de werking van de “zoete stuw” nader te bestuderen. De opdracht is uitgevoerd door Acacia Water, die de ontwerpen heeft gemaakt en de hydrologische randvoorwaarden heeft bepaald. Svasek Hydraulics heeft de modelsimulaties uitgevoerd met het CFD (Computational Fluid Dynamics) programma.

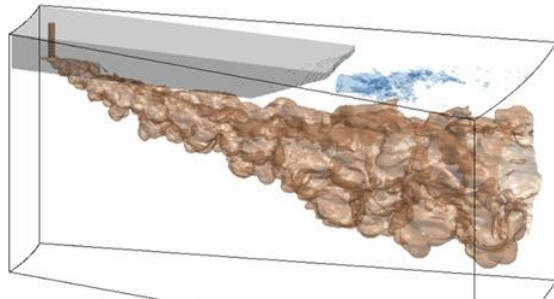
Voor deze studie zijn twee ontwerpen van een zoete stuw onderzocht. De eerste is een gewone stuw met op korte afstand daarvoor een stuw met onderspuier. Via de opening in de onderspuier wordt het zoute water uit de onderlaag van de watergang versneld afgevoerd. Achter de onderspuier komt het water omhoog en stort vervolgens over de gewone stuw. De verwachting is dat door de hoge stroomsnelheid langs de bodem de dikte van de zoutwaterlaag bovenstrooms van de stuw zal afnemen en meer zoet water zal worden geborgen in de watergang. Het tweede ontwerp met hetzelfde beoogde effect is een stuw, waarbij de afvoer van het diepe zoute water wordt bevorderd door een drain op de bodem van de watergang, bovenstrooms van de gewone stuw. Deze drain, die door de stuw loopt, vangt de gehele afvoer af en lost die achter de stuw op een uitstroombuigter gelijk aan het gewenste stuwpeil. Het water stort dan niet meer over de stuw zelf.

Het doel van de CFD simulaties is om te onderzoeken of het effect van zoetwaterberging inderdaad optreedt bij een zoete stuw. In het CFD programma voor waterstroming van Svasek Hydraulics kan namelijk de werking van dichtheidsverschillen en turbulentie gedetailleerd worden gesimuleerd. Daarnaast is er het doel om aan de hand van de simulaties de optimale dimensies van de zoete stuw te bepalen.

2

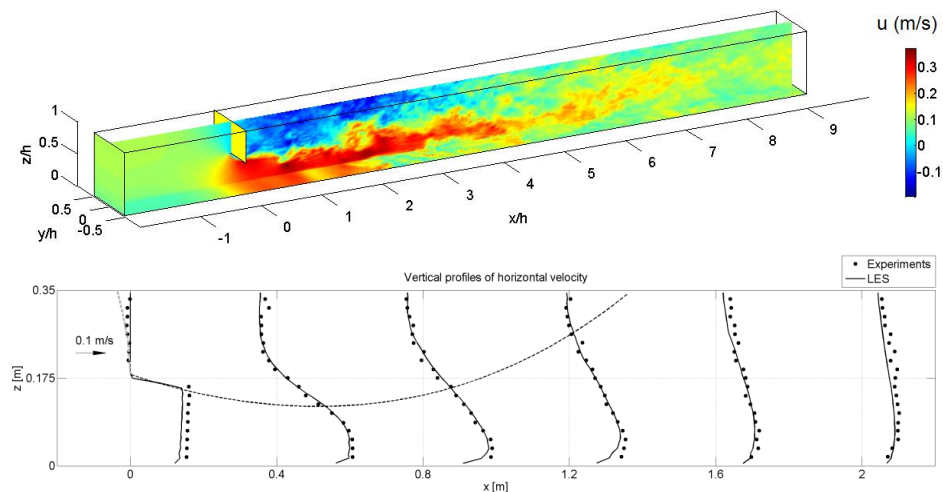
Computational Fluid Mechanics

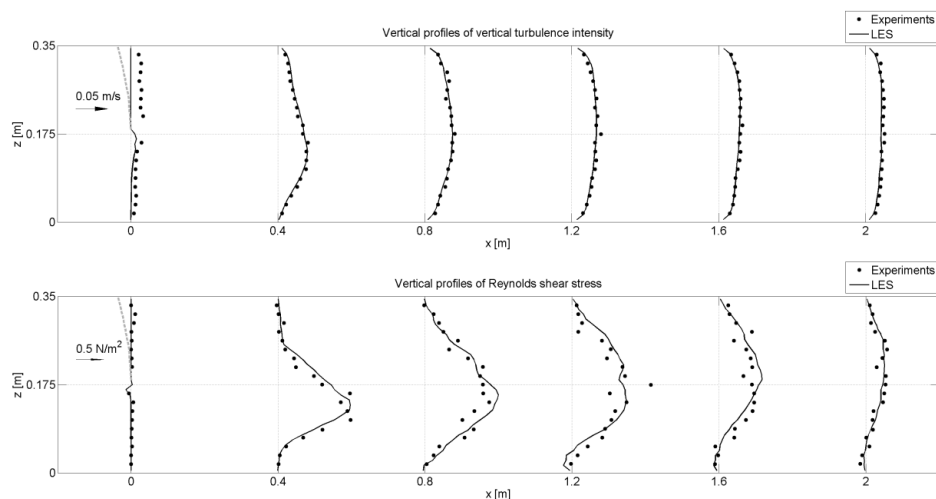
De gedetailleerde simulaties van invloeden van turbulente menging en dichtheidsgedreven stroming door de zoutlaag bij de stuw worden uitgevoerd met het Computational Fluid Mechanics (CFD) model TUDflow3d <http://www.svasek.nl/modelling/tudflow3d.html>. Deze CFD code is ontwikkeld in het kader van een promotieonderzoek naar het mengen van een sedimentpluim nabij een baggerschip inclusief de invloed van turbulentie en dichtheidseffecten en het schip inclusief schroeven en de waterbodem (De Wit 2015), zie Figuur 2-1. Het model gebruikt een zeer fijn rekenrooster (schaal van centimeters voor een stuw) om alle turbulente wervels nauwkeurig te kunnen simuleren.



Figuur 2-1 Voorbeeld CFD model van een sedimentpluim nabij een baggerschip

Het model is gevalideerd voor simuleren van een breed scala aan stromingssituaties, zoals turbulente menging onder een slibscherm door, dichtheidsstroming nabij de bodem, menging van een pluim of een straal, turbulente stroming in een sloot. Zie Figuur 2-2 voor een voorbeeld van CFD resultaten van turbulente stroming onder een scherm. Het CFD model is ook voor praktijkprojecten al vele malen succesvol toegepast.





Figuur 2-2 Voorbeeld van CFD modelresultaten bij stroming onder een scherm vergeleken met lab metingen (Radermacher 2016)¹

Enkele (numerieke) karakteristieken van TUDflow3d zijn:

- Volledig 3D stromingsmodel inclusief de invloed van dichtheidseffecten door de volledige Navier Stokes vergelijkingen inclusief variabele dichtheid op te lossen.
- De stroming van zout en sediment kan nauwkeurig worden gesimuleerd inclusief de invloed op de dichtheid en het bezinken van sediment (toepassing mogelijk van meerdere sediment fracties met verschillende diameter/valsnelheid inclusief kruislingse invloed).
- De numerieke schematisatie is 2^e orde nauwkeurig in ruimte en tijd en gebruikt een nauwkeurige en stabiele, versprongen ruimteschematisatie. Het CFD model hanteert een 'rigid lid' benadering waarbij er geen vrij bewegend wateroppervlak is. Dit is een gangbare benadering voor CFD die voor de menging bovenstrooms van de stuw is toegestaan en nauwkeurige resultaten oplevert met een reductie in reketijden als voordeel. Objecten worden gemodelleerd met een Immersed Boundary Technique.
- Toepassing van de state of the art Large Eddy Simulation (LES) techniek om turbulentie te simuleren door individuele wervels op te lossen op een zeer fijn grid. Er is keuze uit verschillende LES subgrid-schaal turbulentiemodellen zoals WALE, SIGMA, Smagorinsky en Dynamisch Smagorinsky. In deze studie is het robuuste en in de CFD engineering praktijk vaak toegepaste WALE model gebruikt omdat dit automatisch de juiste nul viscositeit bij een wand geeft en snel rekt.
- Toepassing van zeer efficiënte numerieke oplostechieken parallel via MPI op multicore computers. Hierdoor kunnen 1-50 miljoen gridcel simulaties binnen enkele dagen op een workstation worden uitgevoerd.
- Meer (wetenschappelijke) uitleg over TUDflow3d en de uitgevoerde validatie simulaties is te vinden in De Wit (2015)².

¹ Radermacher, M., De Wit, L., Winterwerp, J.C. and Uijtewaal, W.S.J. 2016, [Efficiency of hanging silt screens in crossflow](#). Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 142 (1).

² De Wit, L. 2015, [3D CFD modelling of overflow dredging plumes](#). Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft.

3

“Zoete stuw” modellen

3.1 Zoete stuw met onderspuier

3.1.1 Geometrie

Ten behoeve van de simulaties is een zoete stuw met onderspuier gemodelleerd met de hieronder beschreven afmetingen. Voor enkele afmetingen zijn de waarden gevarieerd om het effect daarvan te onderzoeken en het ontwerp te optimaliseren.

- Breedte watergang bij wateroppervlak: 3 m
- Breedte bodem watergang: 1.5 m
- Waterdiepte midden watergang: 0.60 m
- Breedte kruin van gewone achterste stuw: 1.5 m
- Hoogte opening vanaf bodem in voorste stuw met onderspuier: 7, 14 en 28 cm.
- Afstand tussen voorste en achterste stuw: 30 en 100 cm.

3.1.2 Stromingssituaties

De stromingssituaties, die zijn toegepast in de modelsimulaties, zijn gebaseerd op een hydrologische analyse van een peilvak ten noorden van de Cocksdoorp op Texel (Acacia Water, 2017. Zoete stuw bij de Cocksdoorp. Opdrachtgever Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier). Er zijn twee karakteristieke stromingssituaties vastgesteld: 1) hoge afvoer, gedomineerd door zoet water, aan het eind van een natte periode in de winter; 2) lage basisafvoer, waarbij de zoute kwel een belangrijk deel van de afvoer vormt.

Stromingssituatie 1: einde natte tijd in winter

- Randvoorwaarden:
 - Constant zoet debiet op 20 m vanaf stuw: 10 l/s
 - Constant zout debiet op 20 m vanaf stuw: 0.7 l/s
- Beginconditie:
 - Scherp grensvlak tussen zoet (200 mg/l) en zout (10000 mg/l) water
 - Bovenzijde zout (10.000 mg/l) vanaf bodem: 0.14 m

Stromingssituatie 2: in droge tijd voorjaar

- Randvoorwaarden:
 - Constant zoet debiet op 20 m vanaf stuw: 1.2 l/s
 - Constant zout debiet op 20 m vanaf stuw: 0.7 l/s
- Beginconditie:
 - Scherp grensvlak tussen zoet (200 mg/l) en zout (10000 mg/l) water
 - Bovenzijde zout (10.000 mg/l) vanaf bodem: 0.45 m

De volgende relatie tussen zoutgehalte in mg/l chloride (Cl) en dichtheid in kg/m³ (ρ) is gehanteerd:

$$\rho = 1000 + 1.25 \cdot Cl$$

3.1.3 Numerieke instellingen

De volgende numerieke instellingen zijn gebruikt:

- Voor stromingssituatie 1 en 2 bestaat het modelgrid van 20 meter sloot uit 4.5 miljoen cellen met een afmeting van 20, 20 en 10 mm in respectievelijk de x-, y- en z-richting (60 lagen over de diepte).
- Dynamische tijdstap met Courant conditie 0.6.
- Bovenstrooms zijn de instroomrandvoorwaarden voor snelheid en zout opgelegd conform de beschreven stromingssituatie in voorgaande paragraaf. Benedenstrooms heerst een nul-gradient randvoorwaarde met druk 0 opgelegd voor stabiele uitstroming. Bij de bodem is een Nikuradse bodemruwheid van 5 mm gehanteerd.

3.2 Zoete stuw met drain

3.2.1 Geometrie

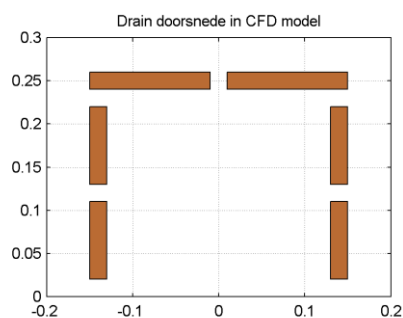
In het CFD model van de zoete stuw met drain is de drain gemodelleerd als een rechthoekige buis op de bodem van de watergang (Figuur 3-1). Spleten in de zijwanden (dikte van 2 cm) maken toevoer vanuit de watergang mogelijk. De uitstroom uit drainbuis benedenstrooms van de stuw is in het model geconstrueerd zonder de hevel, zoals aangegeven in Figuur 3. De reden is, dat zonder hevel de simulatietijd kan worden verkort, terwijl dat voor de werking van de zoete stuw als geheel niet uitmaakt.



Figuur 3-1. Traditionele stuw (links) en zoete stuw met drain (rechts)

De zoete stuw met drain heeft de volgende afmetingen:

- Breedte watergang bij wateroppervlak: 3 m
- Breedte bodem watergang: 1.5 m
- Waterdiepte midden watergang: 0.60 m
- Breedte kruin achterste stuw: 1.5 m
- Drain
 - Lengte drain = 9.5 m; dit is bijna gelijk aan het gehele CFD modeldomein van 10 m.
 - In werkelijkheid is de drain rond 25 cm inwendig; in het CFD model is de drain rechthoekig met zijden van 24 cm x 26 cm inwendig
 - In werkelijkheid heeft de drain veel kleine spleten met een instroomoppervlak van 15-20 %; in het CFD model heeft de drain 8 spleten van 2 cm breed met een instroomoppervlak van 16 %.
 - De drain doorsnede in het CFD model wordt hieronder weergegeven in Figuur 4; de onderzijde van de drain ligt op de bodem en daarmee is de onderste spleet geblokkeerd. In werkelijkheid ligt de drain ook op de bodem in slib/bagger en is daarmee ook instroming van zout water vanuit de onderzijde (deels) verhinderd.
 - De precieze locatie van de spleten in het CFD model heeft enige invloed op de effectiviteit van de drain. Bijvoorbeeld in geval dat de onderste spleet op enkele cm hoogte van de bodem wordt gepositioneerd, dan zou in het CFD model de drain nooit de onderste zoutlaag onder de spleet kunnen afvoeren. Daarom is gekozen voor een gelijkmatige verdeling van de spleten over de vierkante doorsnede van de buis met zeven open spleten die op vier verschillende hoogtes een connectie tussen drain en sloot vormen (Figuur 4). De onderste spleten zitten bij de bodem zodat, net als bij een echte drain, er geen zout laag achterblijft op de bodem.



Figuur 3-2. Doorsnede drain zoals die in het model is ingevoerd. In werkelijkheid zal drain veel meer openingen bevatten. Het percentage instroomopening van de modeldrain is 16 %.

3.2.2 Stromingssituaties

Voor deze modelsimulaties zijn dezelfde stromingssituaties gebruikt als beschreven in paragraaf 3.1.2.

Stromingssituatie 1: einde natte tijd in winter

- Randvoorwaarden:
 - Constant zoet debiet op 20 m vanaf stuw: 10 l/s
 - Constant zout debiet op 20 m vanaf stuw: 0.7 l/s
- Beginconditie:
 - Scherp grensvlak tussen zoet (200 mg/l) en zout (10000 mg/l) water
 - Bovenzijde zout (10.000 mg/l) vanaf bodem: 0.14 m

Stromingssituatie 2: in droge tijd voorjaar

- Randvoorwaarden:
 - Constant zoet debiet op 20 m vanaf stuw: 1.2 l/s
 - Constant zout debiet op 20 m vanaf stuw: 0.7 l/s
- Beginconditie:
 - Scherp grensvlak tussen zoet (200 mg/l) en zout (10000 mg/l) water
 - Bovenzijde zout (10.000 mg/l) vanaf bodem: 0.45 m

De volgende relatie tussen zoutgehalte (Chloride) en dichtheid is gehanteerd:

$$\text{Dichtheid water (in kg/m}^3\text{)} = 1000 + \text{Chloridegehalte (in kg/m}^3\text{)} * 1.25$$

3.2.3 Numerieke instellingen

De volgende numerieke instellingen zijn gebruikt:

- Het modelgrid van 10 meter sloot bestaat uit 4.5 miljoen cellen met afmetingen van 20, 10 mm in respectievelijk de x- en z-richting (60 lagen over de diepte). Lateraal in y-richting verloopt de celgrootte vloeiend van 10 mm naar 40 mm.
- Dynamische tijdstap met Courant conditie 0.6.
- Bovenstreams zijn de instroomrandvoorwaarden voor snelheid en zout opgelegd conform de beschreven stromingssituatie in voorgaande paragraaf. Benedenstreams heerst een nul-gradient randvoorwaarde met druk 0 opgelegd voor stabiele uitstroming. Bij de bodem is een Nikuradse bodemruwheid van 5 cm gehanteerd. Opgemerkt wordt de bodemruwheid voor deze modelsimulaties groter is dan die voor de simulaties met de zoete stuw met onderspuier. In de periode tussen deze simulaties is nieuw inzicht ontstaan tijdens de studie van de grote stuw bij de Cocksdoorp (Acacia Water, 2017. Zoete stuw bij de Cocksdoorp. Opdrachtgever Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier). De bodemruwheid is toen verhoogd van 5 mm naar de meer realistische 5 cm. Dit bleek echter geen effect te hebben op de resultaten. Om die reden zijn geen hernieuwde simulaties uitgevoerd voor de stuw met de onderspuier.

4

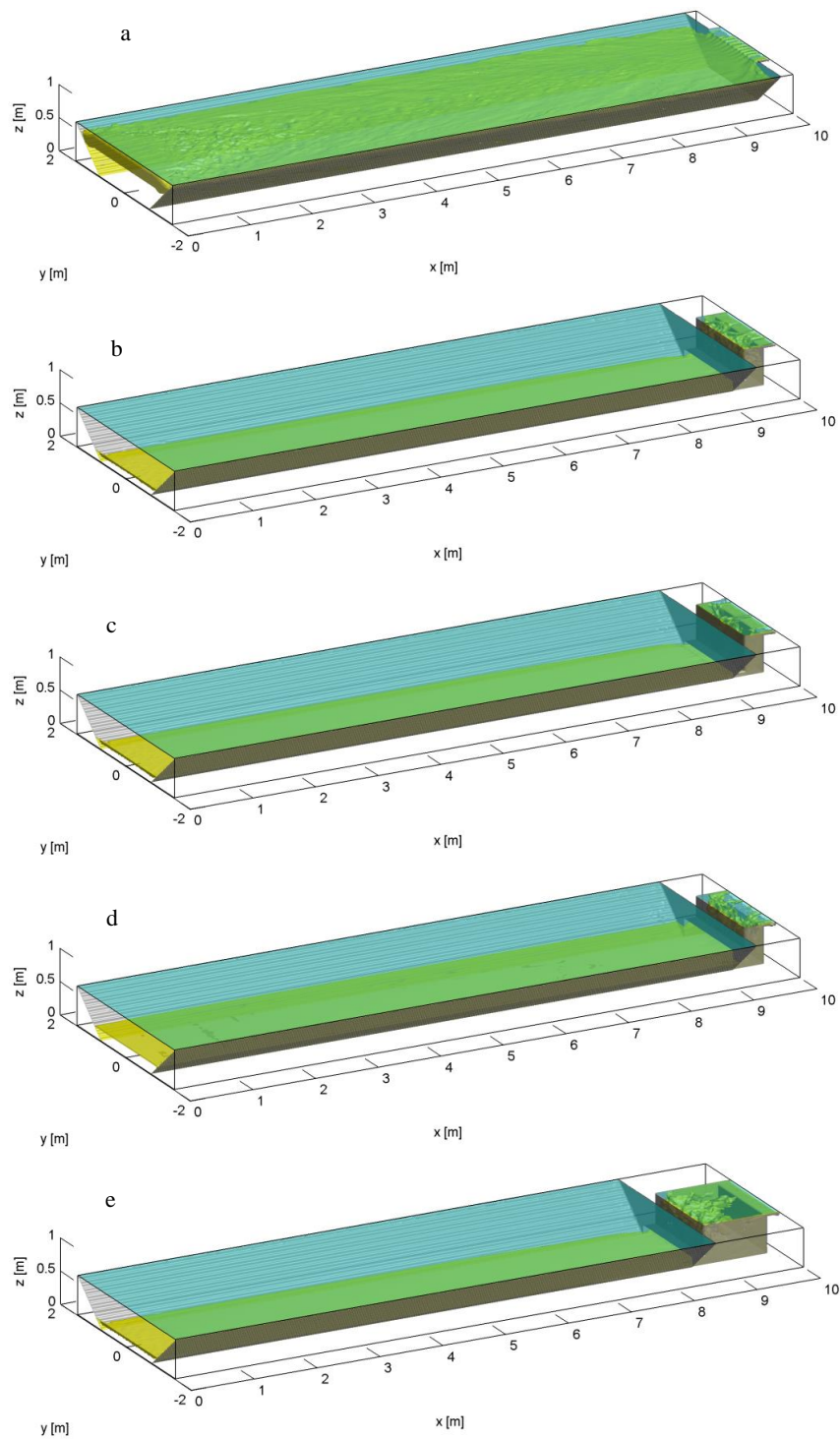
Resultaten “zoete stuw” met onderspuier

4.1 CFD resultaten stromingssituatie 1

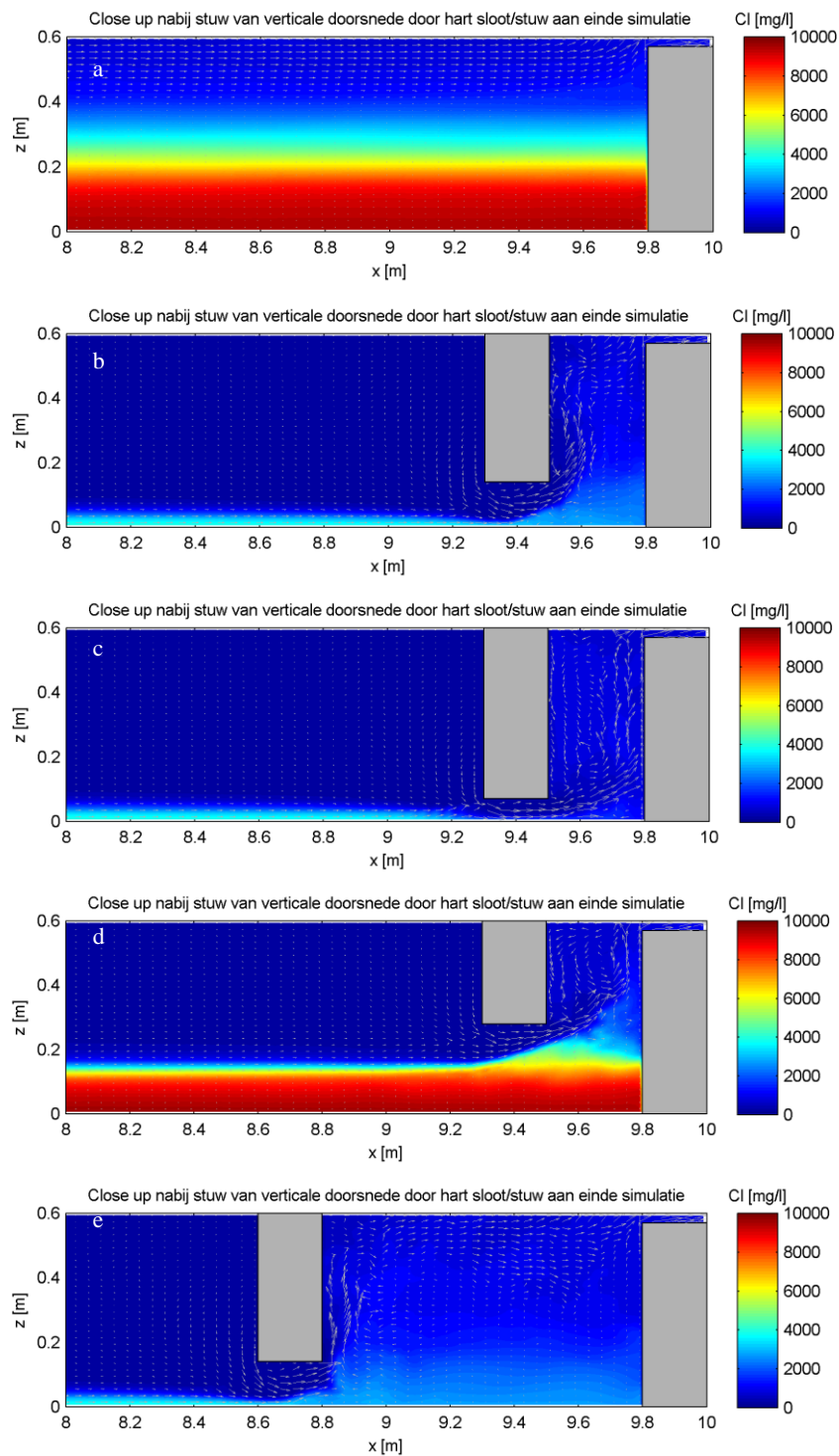
De resultaten van de simulaties voor de verschillende geometrieën van de zoete stuw worden geïllustreerd aan de hand van een aantal figuren. Figuur 4-1 laat 3D-impresies zien van het model en de top van de zoutlaag aan het eind van de simulatieperiode. Figuur 4-2 omvat close ups van de 2D patronen van de zoutgehalten in het midden van de watergang nabij de zoete stuw. Figuur 4-3 visualiseert tenslotte de effectiviteit van de verschillende stuw geometrieën aan het verloop in de tijd van: a) het percentage zout, dat aanwezig is in de watergang ten opzichte van de beginhoeveelheid; b) de hoeveelheid uitstromend zout als percentage van de instromende hoeveelheid zout; en c) het zoutgehalte van het gemengde uitstromende water.

De simulatie bij een normale stuw laat zien dat zich een stabiele stratificatie vormt waarbij de top van de zoute laag (> 2000 mg/l Cl) zich ongeveer op 35 cm vanaf de bodem bevindt (Figuur 4-2a). De simulaties met verschillende geometrieën van de zoete stuw laten zien dat er veel zout wordt uitgespoeld tijdens de eerste 5 minuten na het installeren van de stuw. Na ongeveer 20 minuten wordt het nieuwe zoutpatroon stabiel (Figuur 4-3). Dat wil zeggen dat de sloot op dat moment één keer is doorgespoeld met het debiet van 10.7 l/s. De zoete stuw lijkt te functioneren zoals werd verwacht.

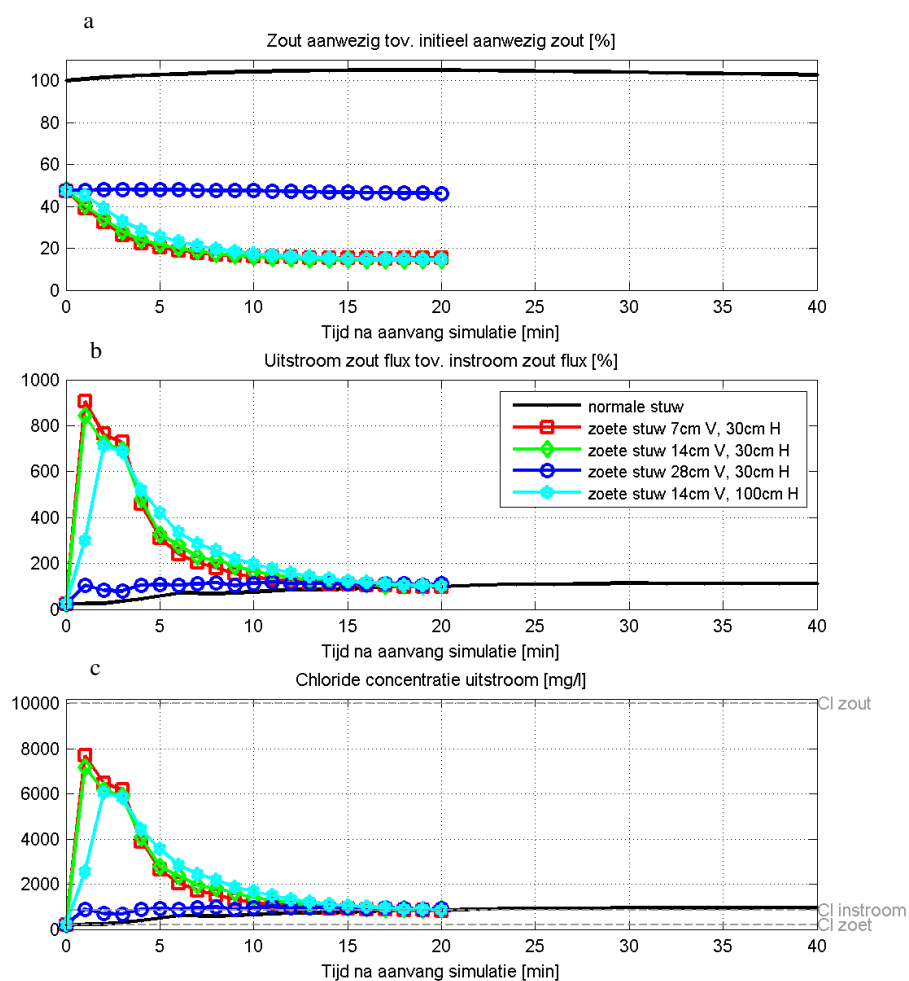
Bij zoete stuwen met openingen in de onderspuier van 7 en 14 cm is de laag met zout water (> 2000 mg/l Cl) gereduceerd van 35 cm (bij een normale stuw) tot enkele cm (Figuur 4-2a, 4-2b en 4-2c). Dat geldt voor de gehele lengte van de gemodelleerde watergang van 10 m (Figuur 4-1). Bij een voorspuier met een opening van 28 cm resteert nog wel een laag van 15 cm in de eindsituatie (Figuur 4-2d). Kennelijk is er een zeker kritisch omslagpunt tussen openingen van 14 en 28 cm. De twee simulaties met verschillende afstanden tussen de stuw en de voorspuier tonen aan dat variatie in die afstand niet veel invloed heeft (Figuur 4-2b en 4-2e).



Figuur 4-1. Dimensies model zoete stuw. Het geelgroene vlak geeft bovenzijde zoute water aan voor verschillende situaties. Deze zijn van boven naar beneden: a) normale stuw; b) onderspuier op 30 cm voor de stuw met een opening van 14 cm; c) idem met opening van 7 cm; d) idem met opening van 28 cm; en e) onderspuier op 100 cm voor de stuw met een opening van 14 cm



Figuur 4-2. Gesimuleerde dichtheden (zoutgehalten) voor verschillende geometrieën. Deze zijn van boven naar beneden: a) normale stuw; b) onderspuier op 30 cm voor de stuw met een opening van 14 cm; c) idem met opening van 7 cm; d) idem met opening van 28 cm; en e) onderspuier op 100 cm voor de stuw met een opening van 14 cm.



Figuur 4-3. Simulaties in de tijd voor de normale (zwart) en de zoete stuw (in kleur): a) percentage zout, dat aanwezig is in de watergang ten opzichte van de beginhoeveelheid; b) hoeveelheid uitstromend zout als percentage van de instromende hoeveelheid; en c) verloop van het zoutgehalte van het gemengde uitstromende water over de stuw.

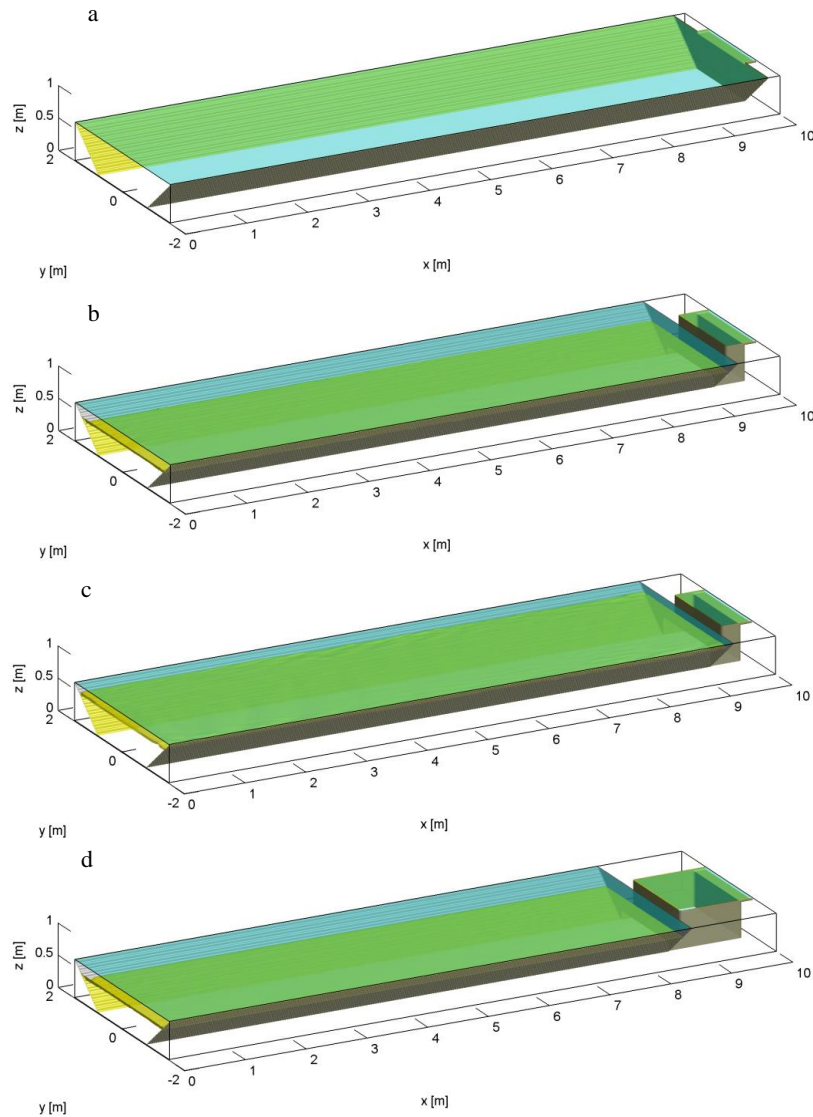
4.2 CFD resultaten stromingssituatie 2

Conform stromingssituatie 1 zijn voor stromingssituatie 2 de resultaten in dezelfde type figuren weergegeven (Figuur 4-4 t/m 4-6). De simulatie met een opening van de onderspuier van 7 cm ontbreekt hierin, omdat die weinig verschilt met die van 14 cm (Paragraaf 4.1).

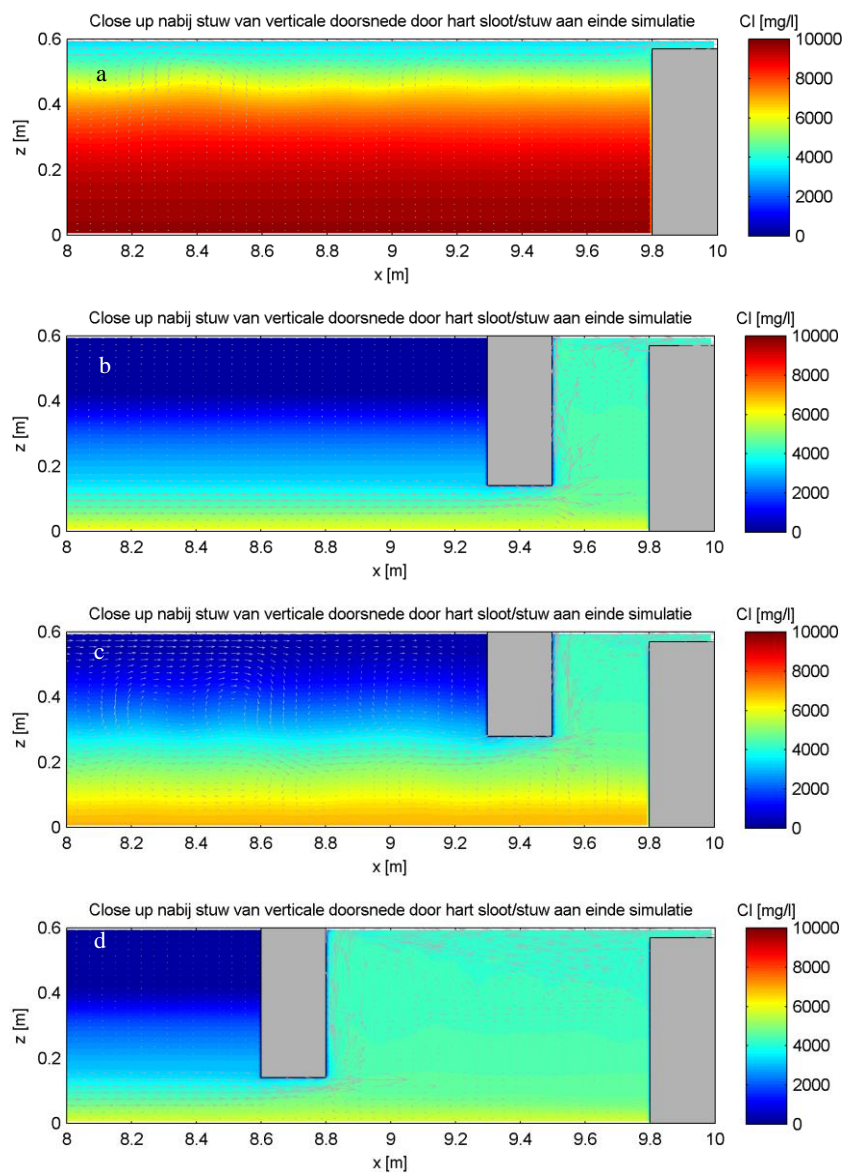
De simulaties met de verschillende geometrieën laten zien dat bij deze relatief lage totale afvoer van 1.9 l/s het lang duurt voordat het zout is uitgespoeld, in vergelijking met situatie 2 (Figuur 4-6). Pas na 240 minuten wordt een stabiele eindsituatie bereikt. Dat wil zeggen dat bij dit lage debiet de watergang dan ongeveer twee keer is doorgespoeld.

In stromingssituatie 2 is het aandeel van de zoute afvoer relatief groot. De verwachting bestond al dat bij een normale stuw de top van het zoute water (grens in dit onderzoek is 2000 mg/l), relatief hoog zou liggen. Opmerkelijk is dat de eindsituatie van de simulatie bij een normale stuw laat zien, dat er zodanig veel diffusie en menging tussen zoet en zout optreedt, dat zelfs het bovenste water niet meer zoet is (Figuur 4-5a). In vergelijking daarmee laten de simulaties van de zoete stuw zien dat bij een opening in de onderspuier van 14 cm de top van de laag met zout water is gezakt van het wateroppervlak (60 cm vanaf de

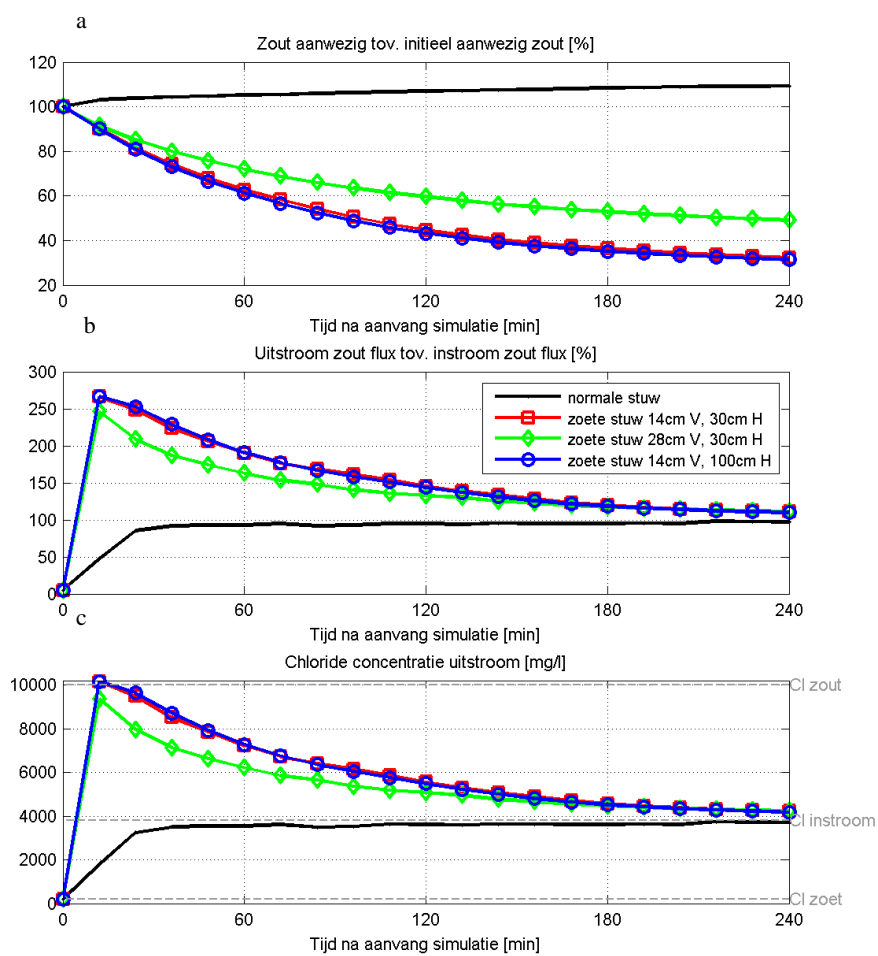
bodem) tot ca 30 cm vanaf de bodem (vergelijk Figuur 4-5a en 4-5b). Dat geldt voor de gehele lengte van de gemodelleerde watergang van 10 m (Figuur 4-4). Bij een voorspuier met een opening van 28 cm ligt de top aan het eind van de simulatie op ca 45 cm (Figuur 4-5c). De twee simulaties met verschillende afstanden tussen de stuw en de voorspuier tonen weer aan dat variatie in die afstand nauwelijks van invloed is (Figuur 4-5b en 4-5d).



Figuur 4-4. Dimensies model zoete stuw. Het geelgroene vlak geeft bovenzijde zoute water aan voor verschillende situaties. Deze zijn van boven naar beneden: a) normale stuw; b) onderspuier op 30 cm voor de stuw met een opening van 14 cm; c) idem met opening van 28 cm, d) onderspuier op 100 cm voor de stuw met een opening van 14 cm.



Figuur 4-5. Gesimuleerde dichtheden (zoutgehalten) voor verschillende situaties. Deze zijn van boven naar beneden: a) normale stuw; b) onderspuier op 30 cm voor de stuw met een opening van 14 cm; c) idem met opening van 28 cm; en d) onderspuier op 100 cm voor de stuw met een opening van 14 cm



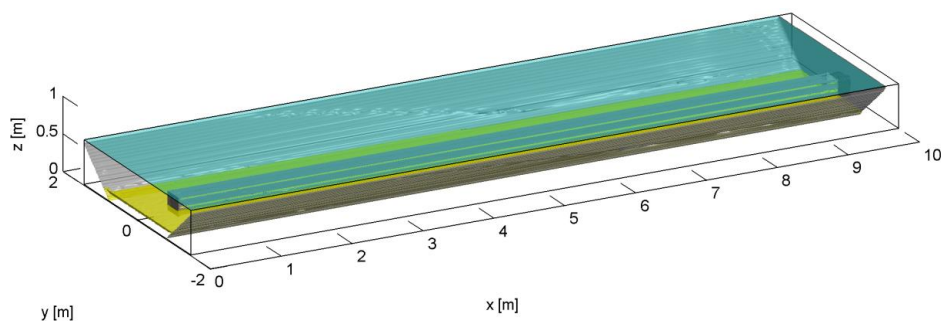
Figuur 4-6. Simulaties in de tijd voor de normale (zwart) en de zoete stuw (in kleur): a) percentage zout dat aanwezig is in de watergang ten opzichte van de beginhoeveelheid; b) hoeveelheid uitstromend zout als percentage van de instromende hoeveelheid zout; en c) het verloop van het zoutgehalte van het gemengde uitstromende water over de stuw.

5

Resultaten “zoete stuw” met drain

5.1 CFD resultaten stromingssituatie 1

De resultaten van de simulaties van de zoete stuw met drain op de bodem bovenstrooms van de stuw worden geïllustreerd aan de hand van dezelfde soort figuren als die voor de zoete stuw met de onderspuier. Er is echter slechts één bepaalde geometrie gesimuleerd (Paragraaf 3.2.1). In Figuur 5-1 wordt een 3D impressie getoond van het model en de situatie van de top van het zoute water aan het einde van de simulatie voor stromingssituatie 1. De zoute laag is weergegeven door het geelgroene vlak. In Figuur 5-2 wordt een 2D beeld getoond van de zoutgehalten in het midden van de watergang. De figuur toont alleen de dichtheden nabij de stuw (afstand 8 tot 10 m). In Figuur 5.2 wordt ook, ter vergelijking, de eerder besproken simulatie van de normale stuw weergegeven voor de zelfde stromingssituatie. Figuur 5.3 laat zien hoe de afvoer van water en zout in de drain verloopt over de gehele lengte van de drain. In Figuur 5-4 worden de dichtheden en stroomsnelheden getoond langs enkele dwarsprofielen op verschillende afstanden vanaf de stuw. De tijdseries in Figuur 5-5 laten het verloop van de zoutuitspoeling zien van de zoete stuw met drain alsmede die van de verschillende zoete stuwen met onderspuiers, besproken in het vorige hoofdstuk.

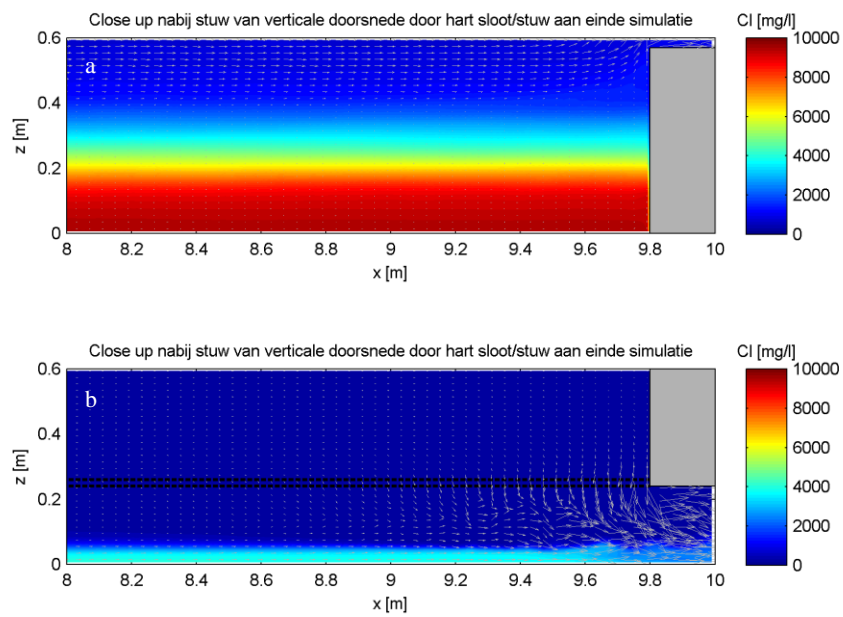


Figuur 5-1. Dimensies model zoete stuw met drain voor stromingssituatie 1. Het geelgroene vlak geeft de bovenzijde van het zoute water aan het einde van de simulatie.

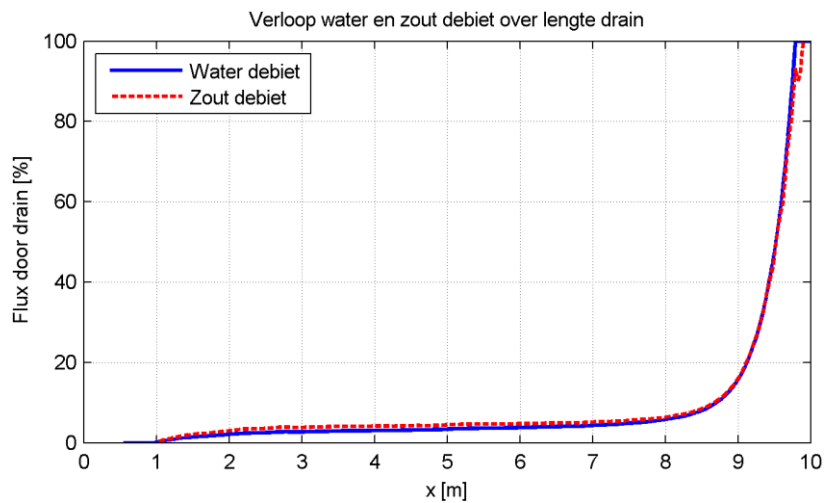
Uit de Figuren 5-2 t/m 5-5 blijkt dat ook de zoete stuw met drain effectief is in het verlagen van de top van de zoutwater laag oftewel het vergroten van de berging van zoet water. In ongeveer 30 minuten na plaatsing van de stuw wordt een eindsituatie bereikt (Figuur 5-5), waarbij de grenslaag tussen zoet en zout water daalt van ca 25 tot 5 cm (Figuur 5-4). De watergang is dan ongeveer anderhalf keer doorgespoeld. Dat is vergelijkbaar met het resultaat van de zoete stuw met de onderspuier (Figuur 4-2b).

De drain is weliswaar aangebracht over de gehele modellenlengte van 10 m, maar uit Figuur 5-3 komt naar voren dat het meeste zoute water uit de watergang pas in de laatste 2 meters voor de stuw de buis instroomt

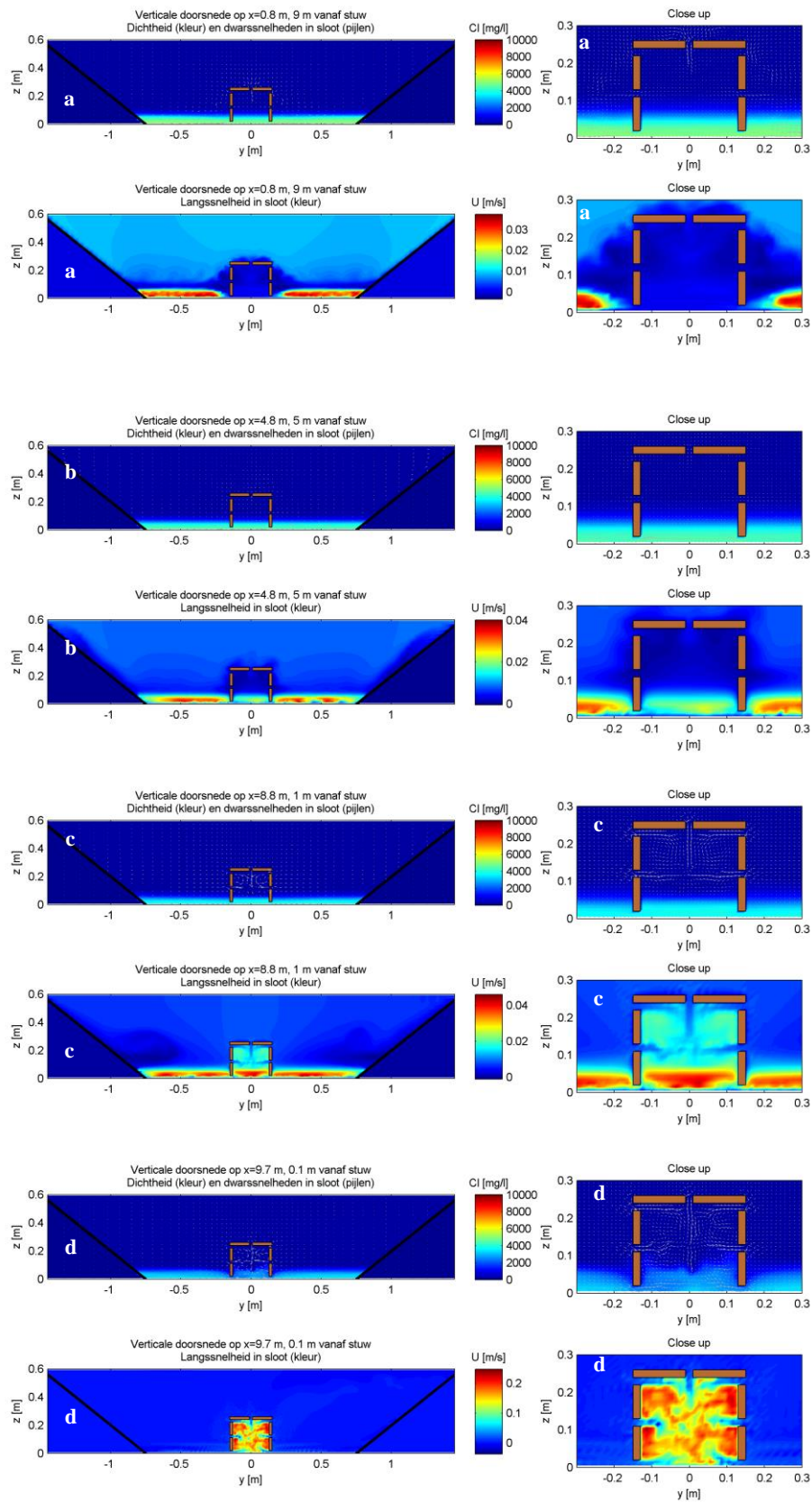
Opgemerkt wordt dat in het model het water de drain instroomt via een klein aantal spleten. In werkelijkheid zal de instroom veel meer gespreid zijn over de omtrek van een echte drain met veel kleine openingen. We verwachten dat dit verschil niet van grote invloed zal zijn op de effectiviteit van de drain.



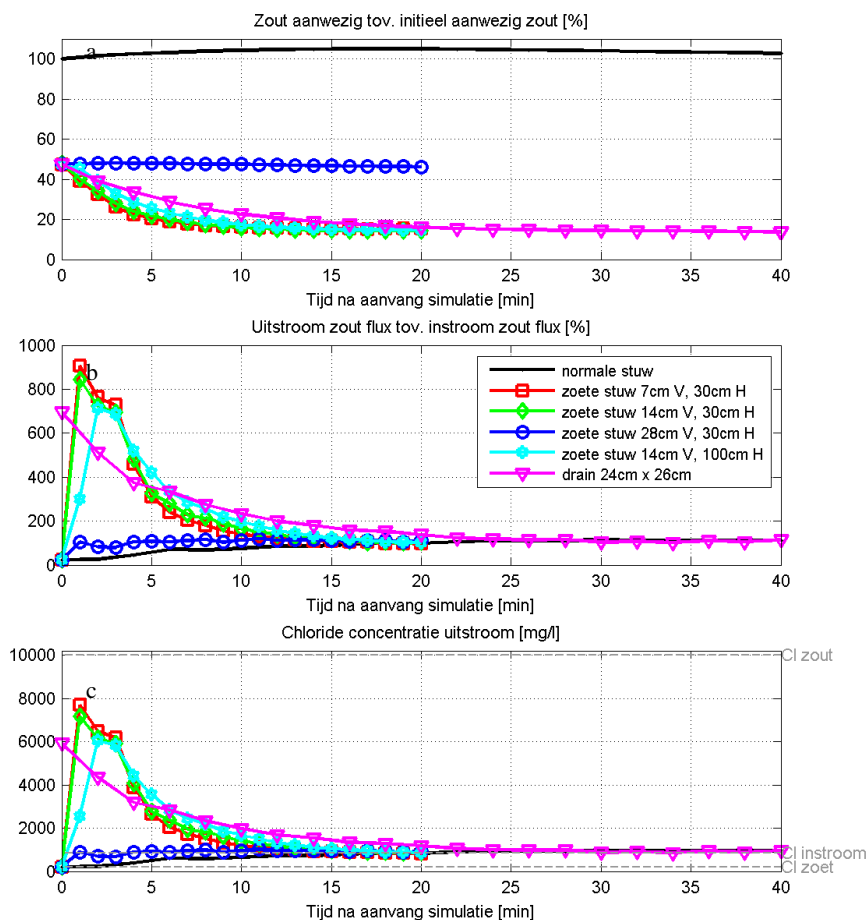
Figuur 5-2. Gesimuleerde dichtheden (zoutgehalten) voor a) een normale stuw en b) een zoete stuw met drain voor stromingssituatie 1.



Figuur 5-3. Verloop van de afvoer van water en zout door de drain



Figuur 5-4. Dwarsprofielen van dichtheid (zoutgehalte) op: a) 9 m voor de stuw; b) 5, m voor de stuw; c) 1 m voor de stuw; en d) 0.1 m voor de stuw.

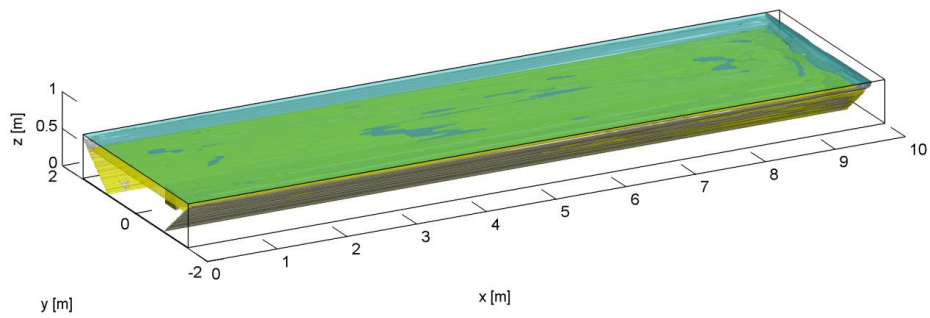


Figuur 5-5. Simulaties in de tijd voor de normale (zwart) en de zoete stuw (in kleur): a) het percentage zout dat aanwezig is in de watergang ten opzichte van de beginhoeveelheid; b) hoeveelheid uitstromend zout als percentage van de instromende hoeveelheid; c) het verloop van het zoutgehalte van het gemengde uitstromende water over de stuw.

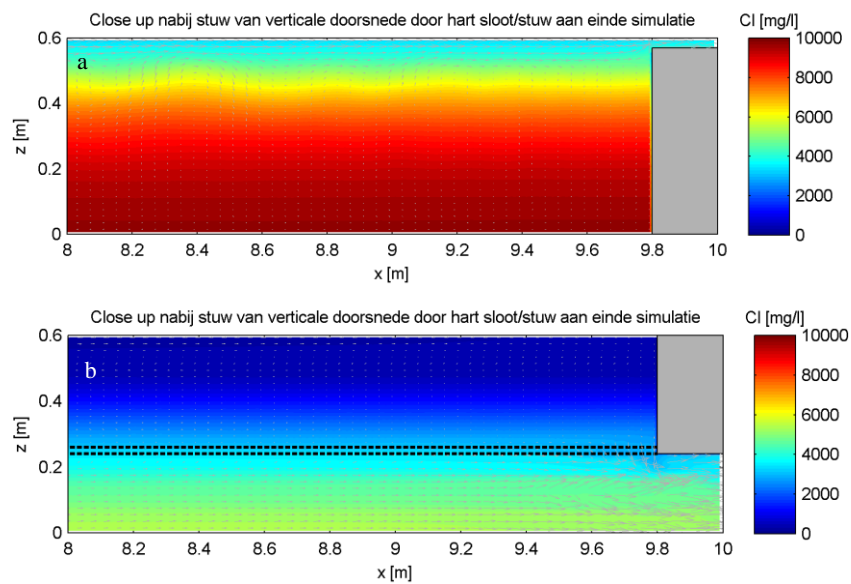
5.2 CFD resultaten stromingssituatie 2

In Figuur 5-6 wordt een 3D impressie getoond van het model van de zoete stuw met drain en de positie van de top van het zoute water aan het einde van de simulatie voor stromingssituatie 2. De zoute laag is weergegeven door het geelgroene vlak. Figuur 5-7 laat een 2D beeld zien van de zoutgehalten van het water in het midden van de watergang aan het einde van de simulatieperiode. De figuur toont alleen de zoutgehalten nabij de stuw (afstand 8 tot 10 m). Figuur 5.8 geeft het verloop weer van de afvoer van zout water door de drain langs het hele model. Deze figuren maken duidelijk dat vooral over de laatste meters het meeste water vanuit de watergang de buis instroomt. In Figuur 5-9 worden de dichtheden en stroomsnelheden getoond langs enkele dwarsprofielen op verschillende afstanden vanaf de stuw. De tijdseries in Figuur 5-10 laten het verloop van de zoutuitspoeling zien van de zoete stuw met drain alsmede die van de verschillende zoete stuw met onderspuiers, besproken in het vorige hoofdstuk.

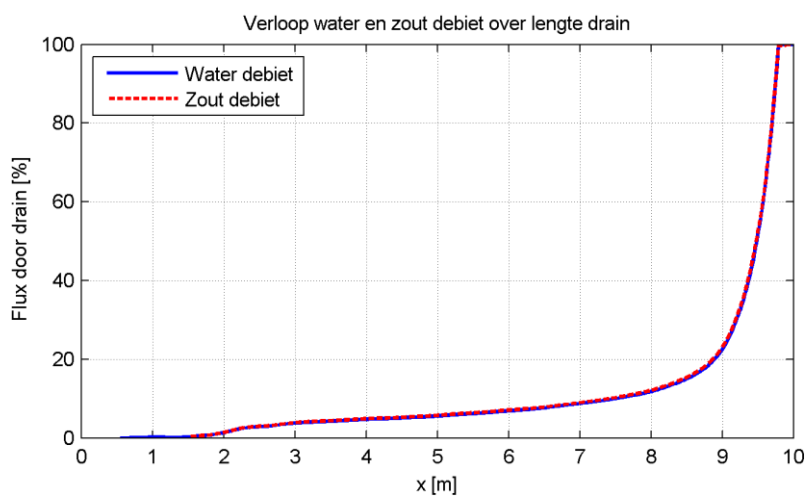
Uit de Figuren 5-6 en 5-9 blijkt dat ook de zoete stuw met drain voor stromingssituatie 2 effectief is in het verkleinen van de zoutwater laag. De grenslaag tussen zoet en zout water daalt vanaf het wateroppervlak (op 60 cm vanaf de bodem) tot ca 35 cm vanaf de bodem. Dat is iets minder sterk dan in het geval van de zoete stuw met onderspuiers (daling tot ca 30 cm vanaf de bodem; Figuur 4-5b). Het verloop van de zoutafvoer in de tijd in Figuur 5-10 is ook vergelijkbaar met die van Figuur 4-6 van de zoete stuw met onderspuiers. Ook voor deze zoete stuw met drain is vanwege het geringe debiet van 1.9 l/s (stromingssituatie 2) een relatief lange periode van 240 minuten of zelfs 300 nodig om een evenwicht te bereiken. De watergang bereikt pas een evenwicht na 2 of 3 keer doorspoelen.



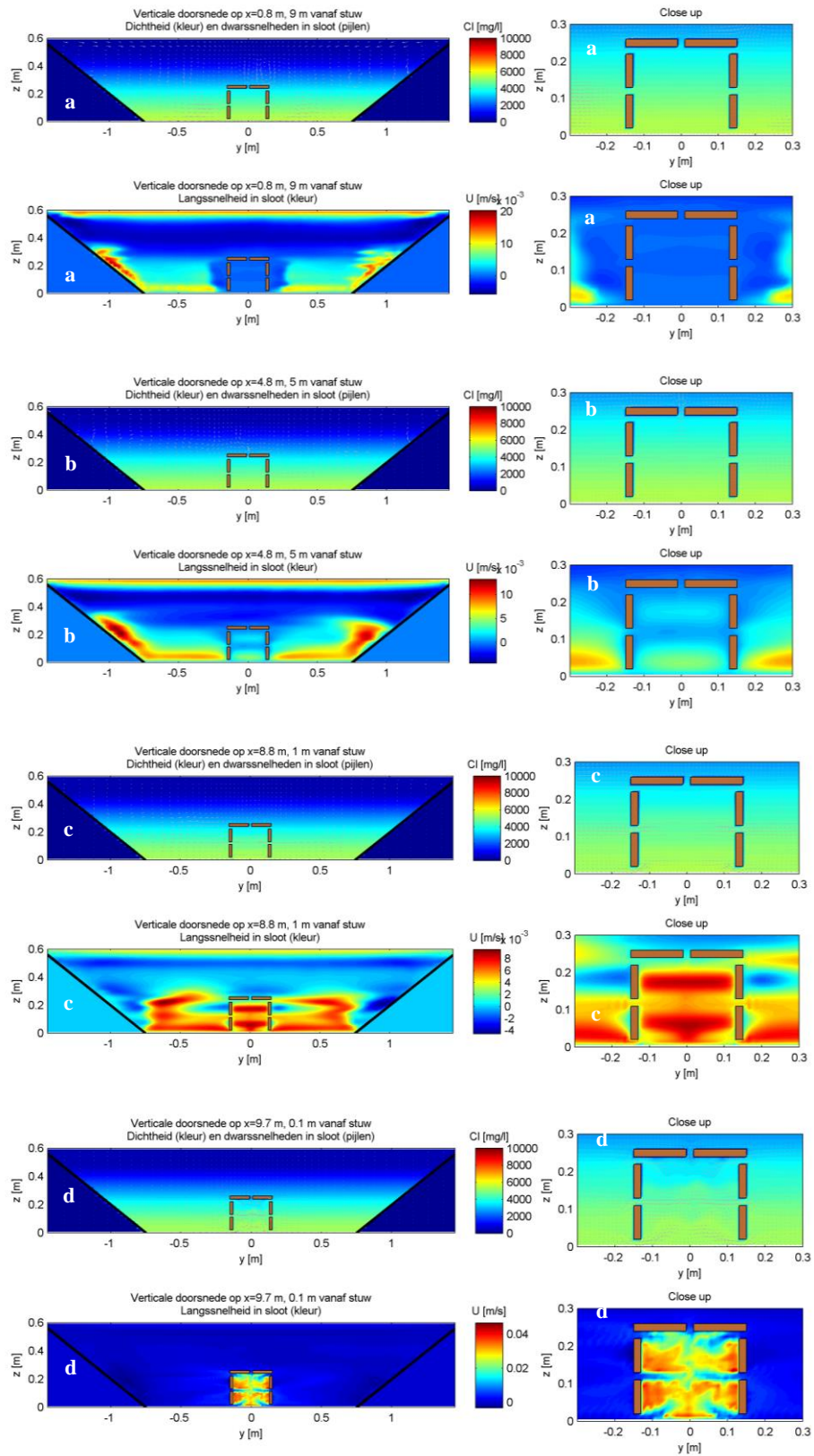
Figuur 5-6. Dimensies model zoete stuw met drain voor stromingssituatie 1. Het geelgroene vlak geeft de bovenzijde van het zoute water aan.



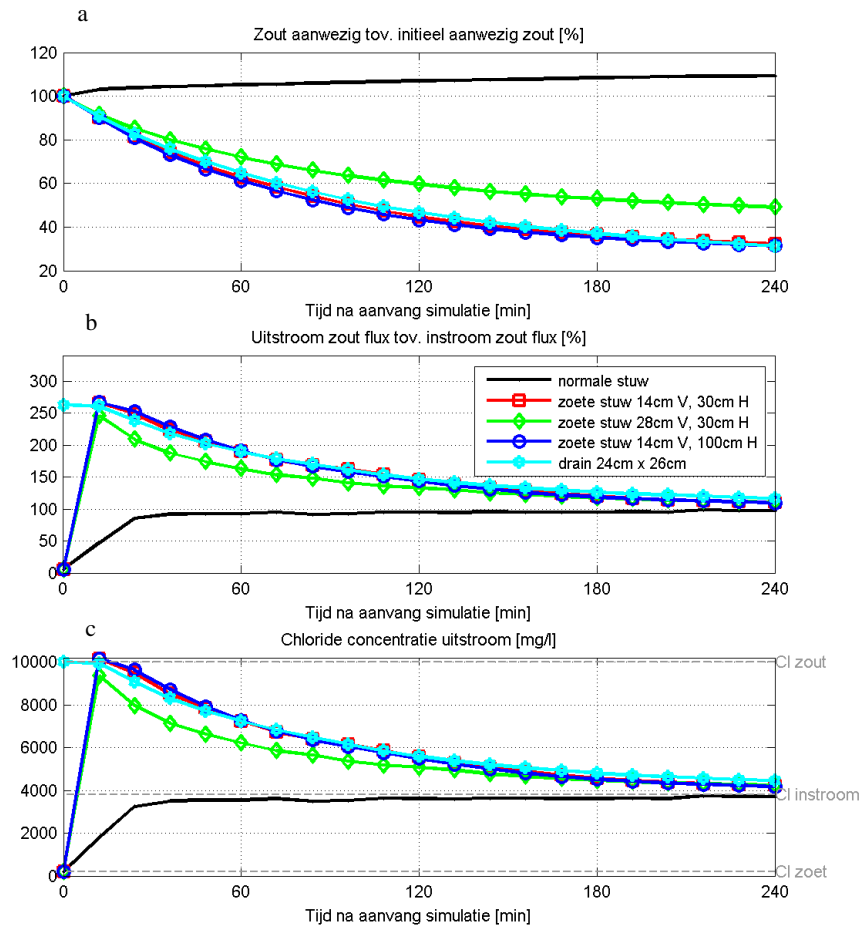
Figuur 5-7. Gesimuleerde dichtheden (zoutgehalten) voor a) een normale stuw en b) een zoete stuw met drain voor stromingssituatie 1.



Figuur 5-8. Verloop van de afvoer van water en zout door de drain



Figuur 5-9. Dwarsprofielen van dichtheid (zoutgehalte) op: a) 9 m voor de stuw; b) 5 m voor de stuw; c) 1 m voor de stuw; en d) 0.1 m voor de stuw.



Figuur 5-10. Simulaties in de tijd voor de normale (zwart) en de zoete stuw (in kleur): a) percentage zout dat aanwezig is in de watergang ten opzichte van de beginhoeveelheid; b) hoeveelheid uitstromend zout als percentage van de instromende hoeveelheid zout; en c) het zoutgehalte van het gemengde uitstromende water over de stuw.

5.3 Enkele opmerkingen ten aanzien van de modelresultaten

Een disclaimer is dat alle uitkomsten gelden voor de gemodelleerde zone van 25 m stroomopwaarts van de zoete stuw. Het is de vraag tot hoever stroomopwaarts van de zoete stuw de verlaagde zoutsprong zich voortzet. Dat houdt direct verband met het stromingsprofiel. Bij de zoete stuw worden onderin het profiel hoge stroomsnelheden opgewekt. Echter door frictie langs de bodem (bodemruwheidseffect) zal naar verwachting op grote afstand van de stuw weer een normaal stromingsprofiel heersen, waardoor de zoutsprong daar ook weer hoger zal liggen. De bodemruwheid laat over het gemodelleerde traject van 25 nog weinig effect zien in dat opzicht. De capaciteit van de computer en de lange rekentijd laten niet toe om dit verder te onderzoeken. Dit kan het beste worden onderzocht door veldmetingen na uitvoering van een praktijkproef.

Het model verwaarloost de mengende invloed van golven. Indien de invloed van golven significant is, dan kan de effectiviteit van de zoete stuw afnemen. Dit kan modelmatig worden onderzocht.

De bodemruwheid heeft weinig effect op de werking van de zoete stuw.

Om een evenwicht in zoutconcentraties te bereiken moet de watergang in stromingssituatie 1 één tot anderhalve keer doorspoeld worden; in stromingssituatie 2 twee tot drie keer. Gezien in de tijd wordt bij stromingssituatie 1 het evenwicht bereikt na 20 tot 30 minuten; bij stromingssituatie 2 is dat na 240 tot 300 minuten. Daarbij moet worden bedacht dat het hier gaat om een model met een 10 m lange watergang. In werkelijkheid zal het in een veel langere watergang ook langer duren voor een evenwicht wordt bereikt.

Het is van belang op te merken dat deze conclusies betrekking hebben op de processen in een traject van 10 m stroomopwaarts van de stuw. De berekende stratificaties zullen zich vermoedelijk verder stroomopwaarts uitstrekken. Toch zal vanwege de bodemweerstand zich op grotere afstand weer een “normaal” stromingsprofiel met bijbehorende stratificatie instellen. De verzoeting van de watergang is dus eindig in stroomopwaarts richting. Die afstand kan echter niet worden bepaald met dit model. Om die reden wordt aanbevolen om verder onderzoek in het veld uit te voeren aan de hand van een praktijkproef.

6

Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De CFD simulaties tonen aan dat het concept van een zoete stuw met gedwongen afvoer over de bodem van de watergang door middel van een onderspuier of een drain effectief is. Een dergelijke zoete stuw leidt tot een aanzienlijke reductie (ca 50 tot 85 %) van de hoeveelheid zout water in de watergang bovenstrooms van de zoete stuw, oftewel meer berging van zoet water. De zoete stuw met drain is het meest efficiënt, gevolgd door de stuw met onderspuier met een opening van 14 cm.

Een drain vergt mogelijk meer onderhoud als zich slib ophoopt in de watergang en de inteerweerstand toeneemt. Dat betekent dat het waterpeil zal stijgen in de watergang tot een niveau dat over de stuw stort.

Verstopping kan ook ontstaan bij een zoete stuw met onderspuier. Die kan zich in dat geval heel snel ontwikkelen als er grof afval of takken vast komt te zitten in de opening. Ook dan gaat het water stijgen. De onderspuier dient daarom niet te ver boven de kruin van de eigenlijk uit te steken. We bevelen aan een hoogte aan te houden voor de kruin van de onderspuier van 10 cm boven die van de stuw.

Uit de resultaten blijkt dat de effectiviteit van de zoete stuw toeneemt bij een grotere (zoete) afvoer van de watergang. In het algemeen zal gelden dat de effectiviteit van de zoete stuw groter is bij een grotere afvoer, echter tot aan het punt dat het extra debiet zorgt voor te veel turbulente menging.

Het CFD model verwaarloost de mengende invloed van golven, en daardoor kan een stabiele stratificatie in stand blijven met zout water onderin en zoet water bovenin de watergang. Indien de mengende invloed van golven significant is, dan kan het zoete en zoute water gemengd worden waardoor de effectiviteit van de zoete stuw ten opzichte van de normale stuw af zou nemen. Indien gewenst kunnen bovenstaand genoemde invloeden van het debiet, drempel bij de bodem en golven nader onderzocht worden met het CFD model.

6.1.1 Zoete stuw met onderspuier

De meeste gunstige opening bij de gemodelleerde zoete stuwen met onderspuier is die met een opening van 14 cm. Dat is ongeveer een kwart van de waterhoogte van de watergang. Deze kan het beste als uitgangspunt worden genomen bij het dimensioneren van een zoete stuw met onderspuier. De afstand tussen onderspuier en stuw moet minimaal 30 cm bedragen bij kleine stuwen in watergangen tot enkele meters breedte. Bij stuwen in grotere watergangen wordt een minimale afstand van 45 cm aanbevolen.

Het model van de zoete stuw met een onderspuier met een opening van 14 cm lijkt optimaal te functioneren. Bij een kleinere opening (7 cm) wordt de zoutuitspoeling niet beter, terwijl de kans op verstopping en extra hydraulische weerstand bij hoge afvoer toeneemt. Bij een grotere opening (28 cm) is de zoutuitspoeling minder sterk.

Een zoete stuw met onderspuier met een opening van 7 of 14 cm doet de hoeveelheid zout in de watergang ten opzichte van de situatie van een normale stuw afnemen met 85 % bij stromingssituatie 1, dus bij een hoge afvoer van 10.7 l/s; bij een opening van 28 cm is de reductie 50 %.

Bij een lage afvoer, zoals bij stromingssituatie 2 met een afvoer van 1.9 l/s, is de werking van de zoete stuw minder sterk. Bij openingen in de onderspuier van 7 en 14 cm neemt de hoeveelheid zout in de watergang

af met 71 % ten opzichte van de hoeveelheid zout bij een normale stuw. Het model met een opening van 28 cm laat een zoutreductie van 55 % zien. Dat is dus iets gunstiger dan in stromingssituatie 1.

Het vergroten van de afstand tussen de onderspuier en de stuw van 30 naar 100 cm blijkt geen invloed te hebben op de werking van de zoete stuw.

Er is alleen een situatie onderzocht met een zoete stuw zonder drempel bij de bodem, dit is ook de meest wenselijke situatie omdat met een drempel er extra zout water achter zal blijven achter de drempel

6.1.2 Zoete stuw met drain

Voor een zoete stuw met drain hoeft de drain niet langer te zijn dan enkele meters. Aanbevolen wordt een lengte van 5 m aan te houden.

Het model van de zoete stuw met drain leidt tot een afname 86 % van de hoeveelheid zout bij een normale stuw bij een hoge afvoer van 10.7 l/s van stromingssituatie 1. Een zoete stuw met drain doet de zouthoeveelheid met 71 % afnemen bij een lage afvoer van 10.7 l/s van stromingssituatie 2.

Ongeveer 80 % van de afvoer door de 10 m lange drain ontvangt de drain pas bij de laatste 2 m voor de stuw.

6.2 Aanbevelingen

De modelsimulaties hebben hun waarde bewezen en, zoals gezegd, kan verder onderzoek met de CFD modellen nog meer inzicht geven. Echter gezien de beperkte schaal van het model en veel andere onbekende factoren, is het raadzaam om onderzoek voort te zetten aan de hand van een praktijkproef.

Voor een dergelijke praktijkproef bevelen we aan om een veldverkenning van een of twee dagen uit te voeren voorafgaand aan de proef. Tijdens die verkenning kan de werkelijke zoutstratificatie worden onderzocht in de watergang door middel van een geleidbaarheidssensor aan een hengel. Ook kunnen de stuw en de dimensies daarvan nog eens nader worden bepaald in overleg met iemand van het waterschap. Tevens zullen dan de monitoringlocaties worden vastgesteld (zie hieronder)

Het is ook van belang om voorafgaand aan de constructie van een zoete stuw een idee te verkrijgen van de te verwachten piek- en basisafvoeren. We bevelen om deze te schatten aan de hand van veldmetingen, neerslag-afvoerrelaties van ander peilvakken, en grondwaterstudies (kwelfluxen).

We bevelen aan om voorafgaand tot enkele maanden na het plaatsen van een zoete stuw de zoutgehalten midden in de watergang te monitoren met behulp van telemetrische sensoren. Vooralsnog denken we aan locaties 1, 20 en 100 m stroomopwaarts van de zoete stuw op diepten van ca 5, 20, 60 en 100 cm vanaf de bodem.

Verder bevelen we aan om de waterhoogte vlak voor de stuw telemetrisch te meten. Aan de hand van de waterhoogten en enkele afvoermetingen kan een karakteristieke afvoerrelatie (Q-H) worden vastgesteld en kan het afvoerproces worden gereconstrueerd. Ook kan het telemetrisch volgen van de waterstand aanwijzingen geven over de hydraulische weerstand van de onderspuier (verstopping!).

Voor de berekeningen is steeds uitgegaan van een constante zoute instroom. Dat houdt in dat de watergang nooit helemaal verzoet. Deze zoute instroom is het gevolg van kwel van zout grondwater in de watergang. Om de effectiviteit van de stuw te vergroten, zou ook kunnen worden geëxperimenteerd met peilopzet aan het eind van de winterperiode met het doel de kwel te onderdrukken. De zoete stuw zou dan de gehele watergang kunnen verzoeten. Dit kan worden gesimuleerd met het CFD model door een beginsituatie waarbij wel een zoutstratificatie bestaat maar geen instroom van zout water.



van Hogendoornplein 4
2805 BM Gouda

Telefoon: 0182 – 686 424
Internet: www.acaciawater.com
Email: info@acaciawater.com