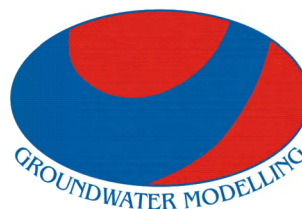




**Vakgroep
Geologie en Bodemkunde**



Cel Grondwatermodellering

Grondwaterstudie in kader van uitbreiding van het Zwin

Studie en Verslag: Prof. Dr. L. Lebbe, Dr. A. Vandenbohede, Lic. C. Courtens
Dr. E. Cosyns

Opdrachtgever: Uitvoerend Secretariaat Technische Scheldecommissie

Datum: juli 2009

1. Opdracht

Het uitvoerende secretariaat van de Technische Scheldecommissie gaf de Universiteit Gent, Vakgroep Geologie en Bodemkunde, Cel Grondwatermodellering (Prof. L. Lebbe) de opdracht een grondwaterstudie op te stellen in het kader van de uitbreiding van het Zwin. De opdracht omvat het uitvoeren van boringen, uitvoeren en verwerken van EM39-metingen, opmeten van geleidbaarheden en stijghoogten in de verschillende observatieputten, diver-metingen, de analyse van deze metingen en de het opstellen van een grondwaterstromingsmodel. Tenslotte wordt door E. Cosyns van WVI een interpretatie gegeven van de modelresultaten naar verwachte effecten op de landbouwgewassen.

Het modelgebied waarin het Zwin en de uitbreiding centraal gelegen is, heeft een oppervlakte van 5 op 3,6 km (Fig.1). De X en Y Lambertcoördinaten van de linkerbeneden hoek van dit model zijn 79000 en 224200 km. Het model wordt opgesteld om de effecten van de uitbreiding van het Zwin op het ondiepe grondwater en de vegetatie op het omringende gebied te begroten. Om het continue verticale verloop van het zoutgehalte van het poriënwater in de omringende sedimenten van het boorgat te begroten worden EM39-metingen in de diepste peilbuizen verricht.



Figuur 1.1 Localisatie van de rijen en kolommen van het eindige-verschil netwerk van het modelgebied gelegen bij het natuurreservaat het Zwin. De rijen en kolommen hebben éézelfde breedte van 50m.

De twee opties van uitbreiding worden gesimuleerd: de uitbreiding van het Zwin met 120 ha en de uitbreiding met 180 ha. De effecten van de ontpoldering alsook milderende maatregelen zowel op het Nederlandse als op het Vlaamse gedeelte zullen onderzocht worden. De dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming wordt in dit modelgebied gemodelleerd in een eindig-verschil 3D-model die 14 lagen, 72 kolommen en 99 rijen bevat waarbij de richtingshoek van de rijen vanuit het noorden naar het oosten 69° bedraagt. Alle eindig-verschil cellen hebben dezelfde grootte; hun basisoppervlak is vierkant met een zijde van 50 m en een hoogte van 1.5 m.

2. Positie boringen

In totaal zijn er zes boringen geplaatst waarvan 5 langs het uit te breiden gebied en 1 in het midden van het uit te breiden gebied. Boring P1 t.e.m P4 liggen op het Vlaamse grondgebied. P5 en P6 zijn op het Nederlandse grondgebied gesitueerd. In het boorgat zijn twee peilbuizen geplaatst; één met een filter tussen 23 en 25 m onder het maaiveld en één met een filter tussen 5 en 6 m onder het maaiveld. De filters worden omstort door gekalibreerd zand en de ringvormige ruimtes tussen boorgatwand en de peilbuizen worden kleistoppen aangebracht. Deze spoelboringen werden uitgevoerd door GEOLAB. Tijdens het uitvoeren van de spoelboringen werd het bodemprofiel niet beschreven. De positie van de boringen is aangegeven op figuur 2.1.

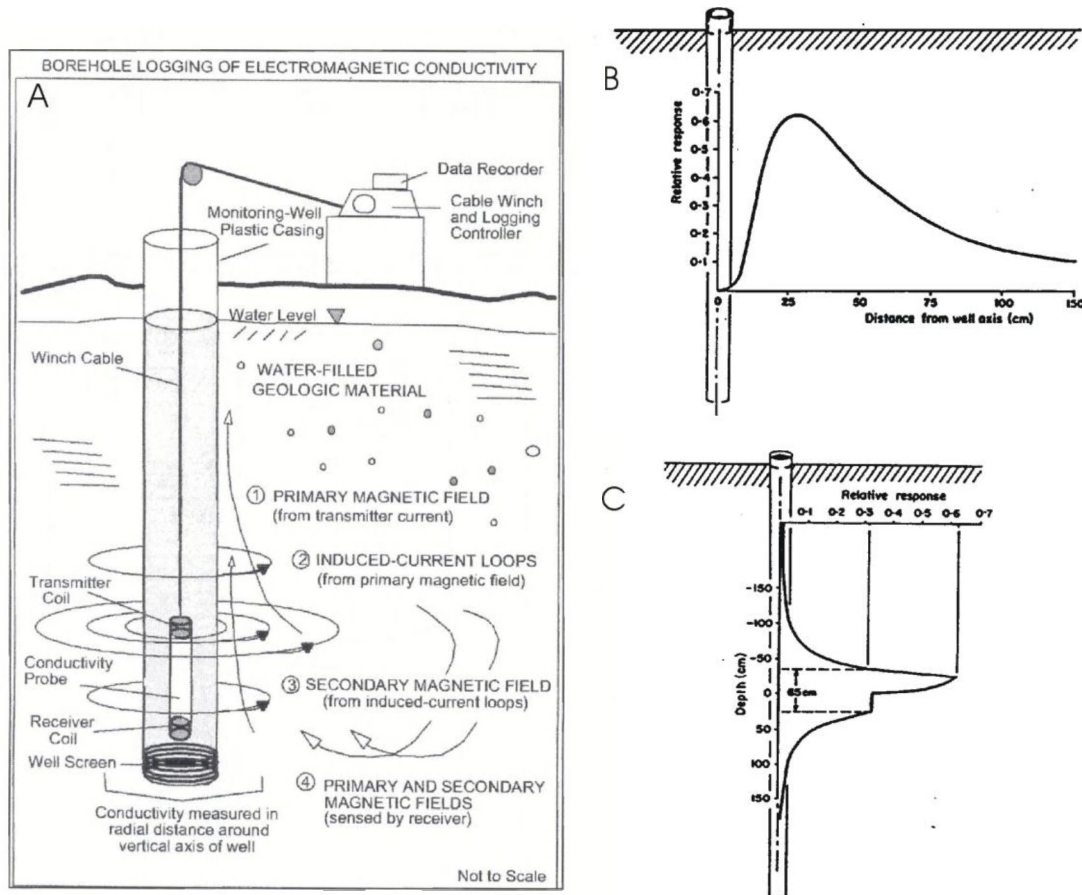


Figuur 2.1. Positie van de zes geplaatste boringen.

3. Geofysische prospectie

3.1 Inleiding

De EM-39 is een gefocusseerde elektromagnetische inductiemethode ontworpen door Geonics Ltd om de geleidbaarheid van sedimenten en poriënwater rond een observatieput te meten. Men kan er dus lithologische lagen, contaminatiepluimen en zoutwaterlenzen mee identificeren. Deze methode is speciaal ontworpen voor het gebruik in een met niet-geleidend materiaal verbuiste boorgat.



Figuur 3.1. A: Schema illustreert de werking van de EM39 (Risch & Robinson, 2000). B: Relatieve respons in functie van de horizontale afstand tot de as van de put. C: Relatieve respons in functie van de diepte (McNeill, 1986).

De EM39 meet de geleidbaarheid van sedimenten en poriënwater die zich bevinden in een torus rond de observatieput. Deze torus heeft een binnenstraal van ongeveer 15 cm en een buitenstraal van ongeveer 110 cm. Dit betekent dat de geleidbaarheid van alles binnen de 15 cm rond de as van de put (water in put, PVC-buis, omstorting, verstoring sediment rond boorgatwand, ...) niet gemeten wordt. Daardoor kan de meting ook in een verbuiste boorgat worden uitgevoerd. De dikte van de torus bedraagt slechts ongeveer een 30 cm. Daardoor kan er met een grote verticale resolutie gemeten worden. Typisch worden metingen om de 20 cm gedaan. Het resultaat is dan ook dat er een continue en gedetailleerd beeld ontstaat van de geleidbaarheid van sedimenten en poriënwater over de volledige lengte van het boorgat.

De EM39 meet de geleidbaarheid van de sedimenten én het poriënwater. Zand heeft daarbij een zeer kleine geleidbaarheid, terwijl klei een grotere geleidbaarheid heeft. Zoet water heeft een kleine geleidbaarheid en zout water een grote geleidbaarheid. Wanneer het sediment rond de observatieput hoofdzakelijk uit zand bestaat, kan op die manier de verdeling tussen zoet en zout water worden

gemeten. In dit geval kan er zelfs een ruwe inschatting gemaakt worden van het totale zoutgehalte (TDS, mg/l) van het poriënwater (Van Meir & Lebbe, 2002):

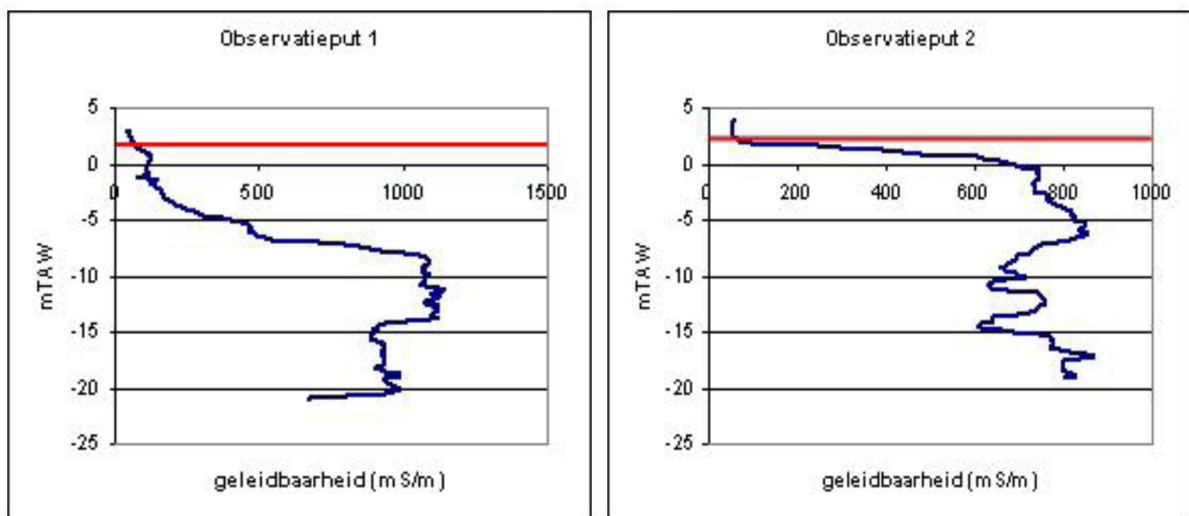
$$TDS = 10F\sigma_b$$

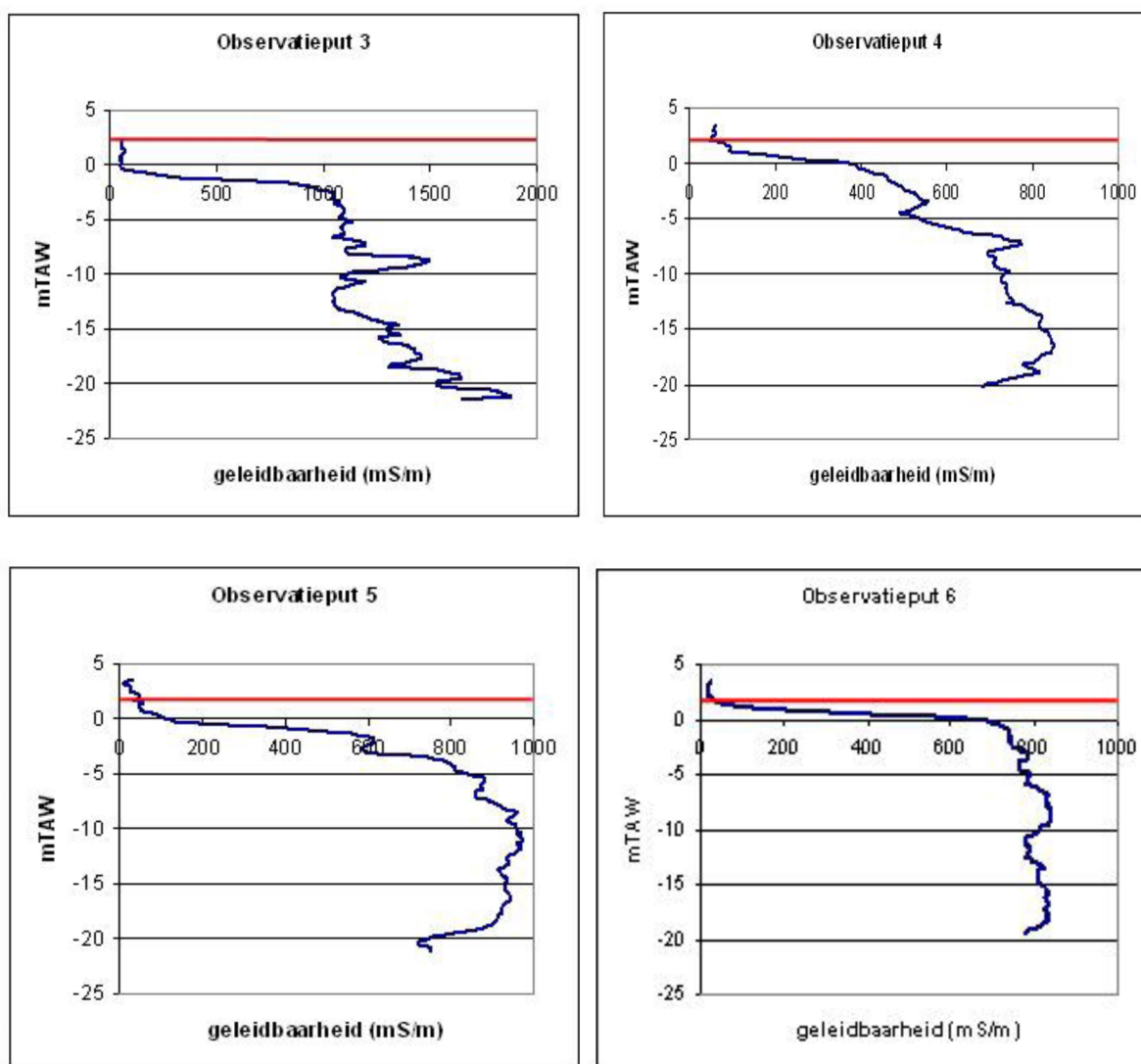
F is hierbij de formatiefactor en σ_b (mS/m) de geleidbaarheid gemeten met de EM39. De formatiefactor is de verhouding van de resistiviteit van het sediment en poriënwater t.o.v de resistiviteit van het poriënwater. Een gemiddelde waarde voor de formatiefactor van de zandige sedimenten aan de Vlaamse kust is 4.

3.2 EM-39 metingen rond het Zwin

Om het continue verticale verloop van het zoutgehalte van het poriënwater in de omringende sedimenten van het boorgat te begroten worden EM39-metingen in de diepste peilbuizen verricht. Figuur 3.2 geeft de EM-39 metingen weer die zijn uitgevoerd in de zes diep geplaatste observatieputten. Op deze figuren wordt de het niveau van de watertafel met een rode lijn weergegeven. In alle observatieputten komt de zoutwatergrens voor vanaf 2 tot 5 m diepte. In observatieputten 1, 3 en 5 zit de zoutwatergrens op ongeveer 0 mTAW. In observatieputten 2, 4 en 6 is het zout water aanwezig op 1.5 mTAW. Bemerkt trouwens dat er bij P1 t.e.m P4 onmiddellijk onder het maaiveld een grotere geleidbaarheid wordt gemeten (45 tot 67 mS/m) dan bij boringen P5 en P6 (11 tot 25 mS/m). Alleen in de observatieputten P5 en P6 gelegen op het Nederlandse grondgebied is er een dikkere onverzadigde zone aanwezig. De kleine veranderingen in geleidbaarheid zijn waarschijnlijk te wijten aan de lithologie.

De grootste geleidbaarheden worden gemeten in observatieputten 3 en 5 waarbij de grootste geleidbaarheid bij observatieput 3 op grotere diepte voorkomt dan bij observatieput 5.





Figuur 3.2. EM39-meting in de observatieputten in het studiegebied. Het niveau van de watertafel (mTAW) wordt door de rode lijn weergegeven.

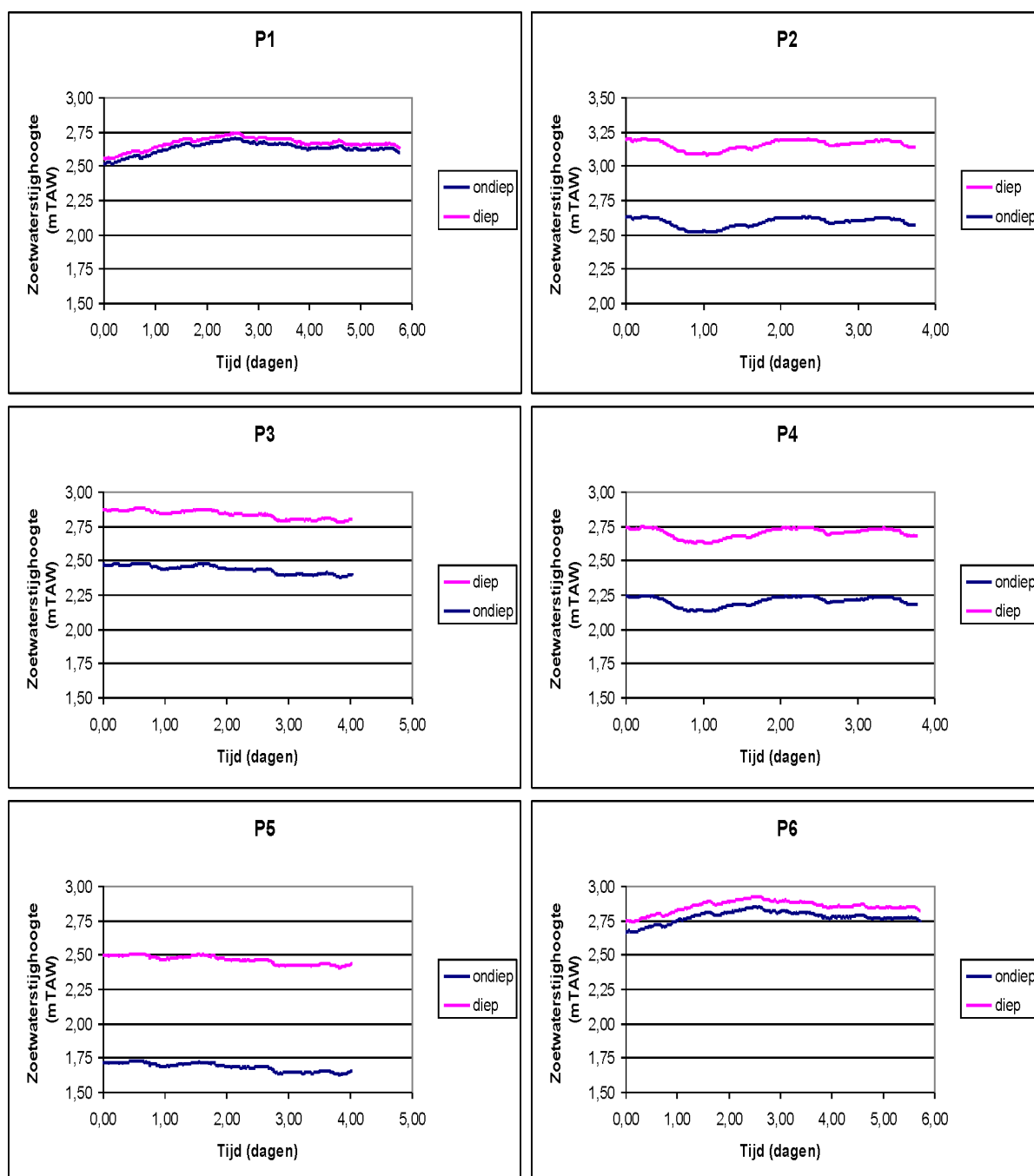
4. Zoetwaterstijghoogte

Om de horizontale en de verticale grondwaterstroming te begroten in een grondwaterreservoir die gevuld is met waters van verschillende dichtheden (zoet, brak, zout), moet naast het verticale verloop van het zoutgehalte tevens de zoetwaterstijghoogte opgemeten worden. Naast de nivellering van de top van de peilbuizen, en het meten van de diepte van het wateroppervlak moet de gemiddelde dichtheid van de waterkolom in de peilbuis begroot worden. Dit gebeurde door het uitvoeren van elektrische geleidbaarheidsmetingen van water in de peilbuizen. Met deze aanvullende metingen werden de continue metingen met divers (in elke peilbuis over een totale periode van ca. 2 weken) omgezet in het verloop van de zoetwaterstijghoogtes tegenover de tijd en vervolgens werden de gemiddelde zoetwaterstijghoogtes begroot. Figuur 4.1 geeft de zoetwaterstijghoogtes (in mTAW) in de loop van de tijd weer.

Een stijghoogte h die in een observatieput opgemeten wordt is de som van de plaatshoogte h_z (of de hoogte van de filter t.o.v. de referentie 0 mTAW) en de drukhoogte h_p . Deze drukhoogte is de hoogte van de waterkolom in de observatieput. Dit is echter afhankelijk van de waterkwaliteit daar zout water een grotere densiteit heeft dan zoet water. Als het water op de plaats van de filter aan een druk P

onderhevig is en het water in de observatieput is zoet dan zal dit een drukhoogte h_p veroorzaken. Als het water in de observatieput zout water is, zal de hoogte van de waterkolom en dus ook de waargenomen stijghoogte h kleiner zijn. De grotere densiteit zorgt er immers voor dat er een kleinere kolom water nodig is om in evenwicht te komen met een druk P .

Bij het bekijken van de verticale grondwaterstroming wordt een neerwaartse stroming waargenomen in P1 en P6. In P2, P3, P4 en P5 wordt een opwaartse stroming waargenomen. Dit is te verklaren door de ligging van de observatieputten namelijk P2, P3, P4 en P5 liggen allen dicht bij een drainagegracht waardoor een opwaartse stroming kan verwacht worden. Dit is niet het geval bij P1 en P6.



Figuur 4.1 Zoetwaterstijghoogten in mTAW in de observatieputten in het studiegebied.

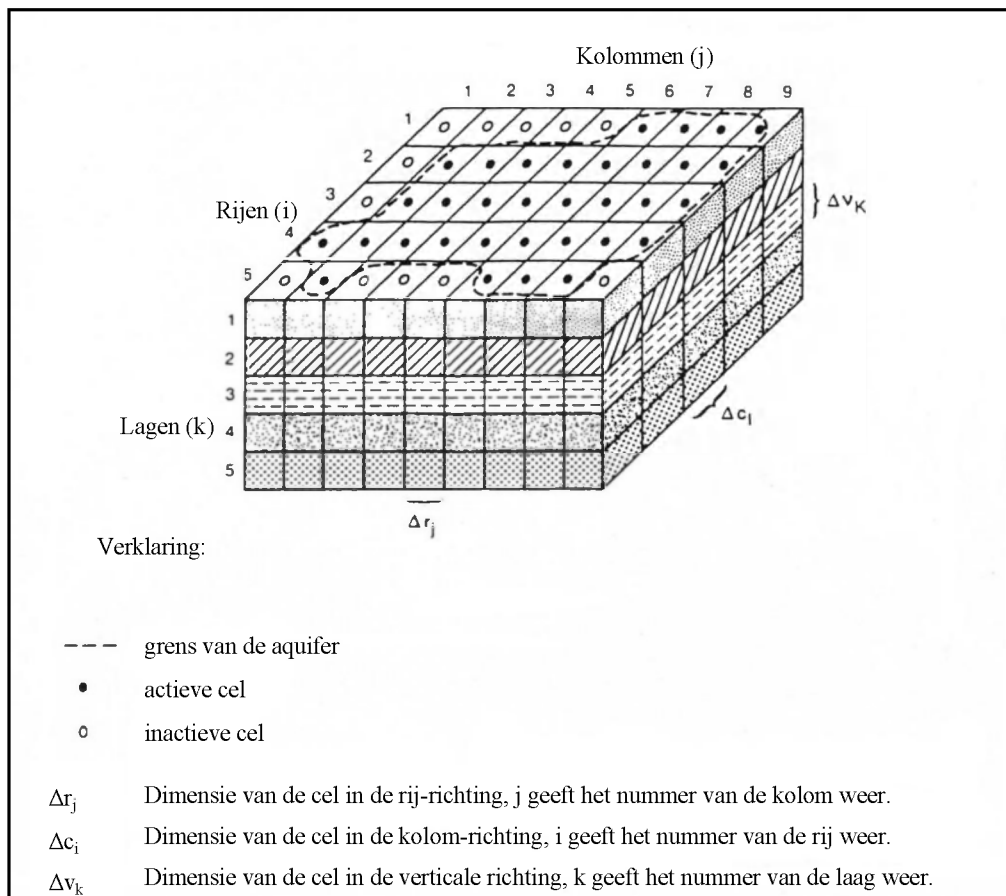
5. Het 3D-model

5.1 Aangewend model

Voor deze simulaties wordt gebruikt gemaakt van MOCDENS3D (Lebbe & Oude Essink, 1999). MOCDENS3D is een dichtheidsafhankelijk eindig-verschil grondwaterstromingsmodel. Het is een aanpassing voor dichtheidsverschillen van het opgeloste stoffen transport model MOC3D (Konikow & Goode, 1996). MOC3D op zijn beurt is een koppeling van de opgeloste stoffen transport vergelijking aan de grondwaterstromingsvergelijking van MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988). Visual MOCDENS3D (Vandenbohede, 2007) wordt hier gebruikt als postprocessor.

Er worden twee partieel differentieel vergelijkingen, zijnde de stromingsvergelijking en de opgeloste stoffen transport vergelijking, simultaan opgelost voor een modelgebied dat wordt onderverdeeld in een aantal kolommen, rijen en lagen.

Met MOCDENS3D wordt de grondwaterstroming in het model gesimuleerd. Gelijktijdig wordt opgeloste stoffen transport berekend. Dit opgeloste stoffen transport houdt in dat zowel advection als dispersie transport in rekening kunnen worden gebracht. Daarnaast kan tevens eerste orde verval van een stof en absorptieprocessen worden gesimuleerd. Bij het berekenen van de grondwaterstroming wordt telkens rekening gehouden met de dichtheitsverdeling van de opgeloste stoffen in het studiegebied. De stromingsvergelijking werd daartoe aangepast. Verder werkt het model steeds met zoetwaterstijghoogtes.



Figuur 5.1 Schematisatie van een hypothetisch grondwaterreservoir in het eindig-verschil MODFLOW netwerk.

Bespreking input van het MOCDENS3D-model

Het model vereist een basis aan invoergegevens. Voor de grondwaterstromings-vergelijking werkt het model identiek aan MODFLOW en worden de invoergegevens opgedeeld in een aantal pakketten (rivieren, drainage, infiltratie,...). De aanpassing voor dichtheidsverschillen van de grondwaterstromingsvergelijking gebeurt door twee extra pakketten waarin het gewenste dichtheidsverschil kan worden opgegeven. Dit laatste is voor de uitgevoerde simulaties echter niet van toepassing. Voor de opgeloste stoffen transport vergelijking bestaat er één groot invoerbestand.

De invoergegevens voor de grondwaterstromingsvergelijking bestaan uit:

- de schematisatie van het grondwaterreservoir,
- de horizontale doorlatendheid van elke laag (K_H),
- de verticale doorlatendheid van elke laag (K_V),
- de specifiek elastische berging (S_s) van elke laag en de bergingscoëfficiënt nabij de watertafel (S_0) in geval van de niet permanente grondwaterstroming,
- parameters voor het rekenmechanisme.

Optioneel kunnen nog een aantal andere gegevens ingebracht worden:

- de infiltratiesnelheden (er moet gegeven worden in welke cellen er infiltratie is en met welke snelheden),
- het drainagenetwerk (er moet gegeven worden in welke cellen er drainage plaatsvindt, tot welk niveau er gedraineerd wordt en de contactfactor),
- de rivieren (er moet gegeven worden in welke cellen er rivieren aanwezig zijn, het waterniveau, het niveau van de bodem van de rivier en de contactfactor).

Voor de opgeloste stoffen transport vergelijking zijn volgende gegevens nodig:

- de longitudinale dispersiviteit (α_L), de transversale dispersiviteit voor de horizontale stroming (α_{Th}) en de transversale dispersiviteit voor de verticale stroming (α_{Tv}),
- eventueel retardatiefactor en/of snelheid van 1^e orde verval,
- dikte van elke laag,
- effectieve porositeit van elke laag (n_e),
- stabiliteitscriteria voor de berekeningen.

Daarnaast zijn er steeds een aantal randvoorwaarden vereist:

- vaste stijghoogtegrenzen,
- ondoorlatende grenzen,
- grenzen waar er een vaste instroming is in het model.

Voor het starten van de berekeningen zijn er een aantal initiële voorwaarden nodig:

- initiële stijghoogten en de initiële concentraties.

De modelresultaten worden voorgesteld aan de hand van het softwarepakket VISUALMOCDENS3D (Vandenbohede, 2007). De resultaten worden in dit rapport enkel in horizontale doorsneden voorgesteld. De horizontale doorsneden stellen de modelresultaten weer per laag. De gesimuleerde zoetwaterstijghoogten worden voorgesteld door middel van contourlijnen; de grondwatersnelheden door middel van vectoren en de zoutwaterpercentages door middel van een kleurenschaal.

5.2 Modelopbouw

Het beschouwde grondwaterreservoir bestaat uit quartaire afzettingen en wordt onderaan begrensd door tertiaire afzettingen. De tertiaire afzettingen bestaan hoofdzakelijk uit zeer fijn zand waarin lagen voorkomen van zandhoudende klei. Het Tertair wordt voor deze studie als ondoorlatend beschouwd en vormen zodoende de basis van het model. De hydrogeologische databank van de afdeling –

Operationeel Waterbeheer van de VMM wordt aangewend voor het opstellen van het bestand van het doorlaatvermogen van de verschillende lagen en voor de hydraulische weerstand tussen de verschillende lagen van het numerieke model (Lebbe et al, 2008).

De hydrogeologische basiseenheden die in het beschouwde grondwaterreservoir samenstellen, zijn de kleiige polderafzettingen van de kustvlakte (HCOV 0131), de zandige kreekruigen (HCOV 0134), de veen-kleiige poelgronden (HCOV 0135), de deklagen (HCOV 0150) en het Pleistoceen van de kustvlakte (HCOV 0160). De kleiige polderafzettingen van de kustvlakte (HCOV 0131), de zandige kreekruigen (HCOV 0134), de veen-kleiige poelgronden (HCOV 0135) worden samen beschouwd in de hydrogeologische subeenheid "Polderafzettingen" (HCOV 0130). Binnen deze subeenheid wordt de laterale en verticale variatie van de doorlatendheden met behulp van een profieltypekaart omschreven. In het beschouwde modelgebied komen volgende profieltypes voor: strandafzettingen, duinen gelegen op doorlatende afzettingen, duinen gelegen op minder doorlatende afzettingen, doorlatende afzettingen onder de kreekruigen en minder doorlatende afzettingen onder de geulen de poelgrondpolder en de schorpolder.

De horizontale doorlatendheid van de strandafzettingen wordt gelijk gesteld aan 13 m/d over de volledige dikte van deze afzettingen. Ook de duinafzettingen die liggen op doorlatende afzettingen hebben een constante waarde voor de horizontale doorlatendheid over hun volledige dikte (12 m/d). De duinen die gelegen zijn op minder doorlatende afzettingen, hebben bovenaan een doorlatendheid van 12 m/d; onderaan is de horizontale doorlatendheid verminderd tot 0.25 m/d. De horizontale doorlatendheid van de kreekafzettingen varieert tussen 3 m/d en 12 m/d afhankelijk van de afstand van het beschouwde gebied tot de hoogwaterlijn. Tegen de hoogwaterlijn bereiken de kreekafzettingen de maximale waarde van 12 m/d. Er wordt aangenomen dat deze horizontale doorlatendheid afneemt met 0.4 m/d per kilometer afstand tot de hoogwaterlijn. Daar deze afzettingen in het modelgebied tussen ca. 2.4 en 4.2 km van de hoogwaterlijn gelegen zijn, varieert er de horizontale doorlatendheid tussen 11.0 en 10.3 m/d. De horizontale doorlatendheid van de minder doorlatende afzettingen onder de geulen, de poelgrond- en schorpolders is zowel een functie van de afstand tot de hoogwaterlijn als van de diepte van de verziltingsgrens (Lebbe et al., 2006). De toegekende doorlatendheid van deze minder doorlatende afzetting onder de poelgrondpolders varieert binnen het modelgebied van 0.25 m/d (bovenaan) tot 6 m/d (onderaan). Bij de geulen verandert de horizontale doorlatendheid van 0.3 m/d, bovenaan, naar 0.6 m/d in het onderste gedeelte van de afzetting. Onder de schorpolders varieert de horizontale doorlatendheid tussen 0.12 m/d (bovenaan) en 0.96 m/d (onderaan). De horizontale doorlatendheid van de dunne (maximum 1.5 m dik) en eerder discontinue deklagen (HCOV 0150) is gelijk gesteld aan 2 m/d. De onderste helft van het beschouwde grondwaterreservoir bestaat hoofdzakelijk uit het Pleistoceen van de kustvlakte (HCOV 0160) met een horizontale doorlatendheid van 7 m/d. Binnen het beschouwde grondwaterreservoir wordt de verticale doorlatendheid gelijk gesteld aan één vijfentwintigste van de horizontale doorlatendheid. De quartaire afzettingen zijn onderaan begrensd door de minder doorlatende tertiaire afzettingen die behoren tot het Bartoonaquitard systeem (HCOV 0500). In het model wordt de top van het Bartoonaquitard systeem beschouwd als de ondoorlatende basis van het gemodelleerde grondwaterreservoir.

Bij het dichtheidsafhankelijk grondwaterstromingsmodel worden veertien lagen in het numeriek model beschouwd. De grensvlakken tussen deze lagen zijn horizontaal. De basis van de bovenste laag van het numeriek model is gelegen op 0.8 mTAW. De dikte van de bovenste laag van het numeriek model varieert (tussen 0.9 en 4.0 m) daar de top van deze laag overeenkomt met de watertafel. Modellagen 2 tot en met 13 hebben éénzelfde dikte, namelijk 1.5 m. De dikte van de onderste laag (Laag 14 van het numeriek model) varieert eveneens (tussen het peil -17.2 mTAW en de basis van het beschouwde grondwaterreservoir, d.i. de top van het Bartoonaquitard systeem). Voor het opgeloste stoffen transport wordt een effectieve porositeit van 0.38 gebruikt. De longitudinale, transversale horizontale en transversaal verticale dispersiviteit zijn respectievelijk gelijk aan 0.3, 0.05 en 0.03 m.

5.3 Natuurlijke evolutie met stijging van zeespiegel

De grondwaterstroming en de verdeling van zoet en zout water wordt bepaald door de lithologische opbouw van het grondwaterreservoir, de heropvulling van het grondwaterreservoir, de drainage in de polders en de afwezigheid van drainage onder de dijken. De complexe opbouw van de quartaire toplagen zorgt samen met de verschillende drainage van de verschillende geomorfologische gebieden voor het ontstaan van zoetwaterlenzen. De aanvankelijke zoet/zoutwaterverdeling in het grondwaterreservoir werd afgeleid uit de kaart van De Breuck et al. (1975). Deze geeft de diepte aan van het grensvlak tussen zoet en zout water in de freatische laag in het Belgische kustgebied. Na de inpoldering zijn de drainageniveaus op de kreekruggen iets hoger dan in de poelgronden waardoor de diepte van het grensvlak onder de kreekruggen groter is dan onder de poelgronden.

De simulatie van de evolutie van de zoet/zoutwaterverdeling start in het begin van de jaren 1970. Het grondwaterreservoir wordt aangevuld met zoet water dat ontstaat door infiltratie van een gedeelte van het regenwater doorheen de onverzadigde zone. Het grootste gedeelte van dit water dat de freatische laag bereikt, wordt echter na een relatief korte periode uit de freatische laag verwijderd door het drainagestelsel (drainagebuizen en -grachten). Deze drainage wordt in het model ingevoerd via het drn-bestand. De wisselwerking tussen de onbevaarbare waterlopen in de polders en de beschouwde freatische laag wordt in het model ingevoerd via het riv-bestand. De parameters van de rivieren worden opgesteld rekening houdend met de gegevens in databank van de waterlopen, de topografie en de HCOV-databank. Afhankelijk van de categorie van de waterloop wordt een contactfactor ingeschat. In het Zwin werken de geulen drainerend. Er werd een rivierhoogte van 3.5 mTAW aangenomen samen met een contactfactor van 1250 m²/d. Het zoutwaterpercentage in deze geulen is geschat op 60%. De rivierbodem is er 0.024 m lager dan de rivierhoogte.

De modelleerperiode is ingedeeld in negen tijdstappen elk met een duur van 10 jaar. Tijdens de eerste vier tijdstappen wordt de zoet/zoutwaterverdeling gesimuleerd vanaf 1970 tot op heden. Hierbij nemen we aan dat onder de duinen en de dijken van Knokke-Heist de bovenste laag aangevuld wordt met zoet water met een snelheid van 0.25 m/j. In de Kleine Vlakte en de binnenduinen vanaf het Koningsbos tot de Hazegrashoeve wordt de bovenste laag aangevuld met zoet water met een snelheid gelijk aan 25 % van deze onder de duinen en de dijken. In de polders is de aanvulsnelheid van het zoete water 10% van deze onder de duinen en de dijken.

In het model wordt de klimaatsverandering in de loop van de tijd door middel van zeespiegelstijging in het model opgenomen. Bij een gegeven stijging van de temperatuur is volgens de IPCC met redelijke zekerheid te bepalen hoe groot de zeespiegelstijging zal zijn ten gevolge van geleidelijke veranderingen. De zeespiegelstijging is een optelsom van de uitzetting van zeewater, het geleidelijk smelten van gletsjers en van de ijskappen op Groenland en Antarctica. Hoe warmer het wordt, hoe groter de bijdrage van de uitzetting van het zeewater en van het vrijkomen van smeltwater van gletsjers. Op basis van bovenstaande factoren wordt een zeespiegelstijging van 10 tot 90 cm per 100 jaar ingeschat door de IPCC (2001). In het model wordt een gemiddelde genomen van 60 cm per 100 jaar.

In de volgende 5 tijdstappen wordt de natuurlijke zoet/zoutwaterverdeling gesimuleerd vanaf heden tot 2050. Na stap 5 wordt de toestand berekend na 10 jaar natuurlijke evolutie en na stap 6, 7, 8 en 9 na respectievelijk 20, 30, 40 en 50 jaar natuurlijke evolutie. In dit verslag worden enkel de figuren na 10 en 30 jaar opgenomen. In de in bijlage toegevoegde powerpoint-presentaties worden alle figuren weergegeven. In de figuren worden de uitgemiddelde zoetwaterstijghoogtes t.o.v. de tijd uitgezet. Dit geldt niet alleen voor de natuurlijke evolutie maar ook voor de evolutie met uitbreiding 120 ha en 180 ha.

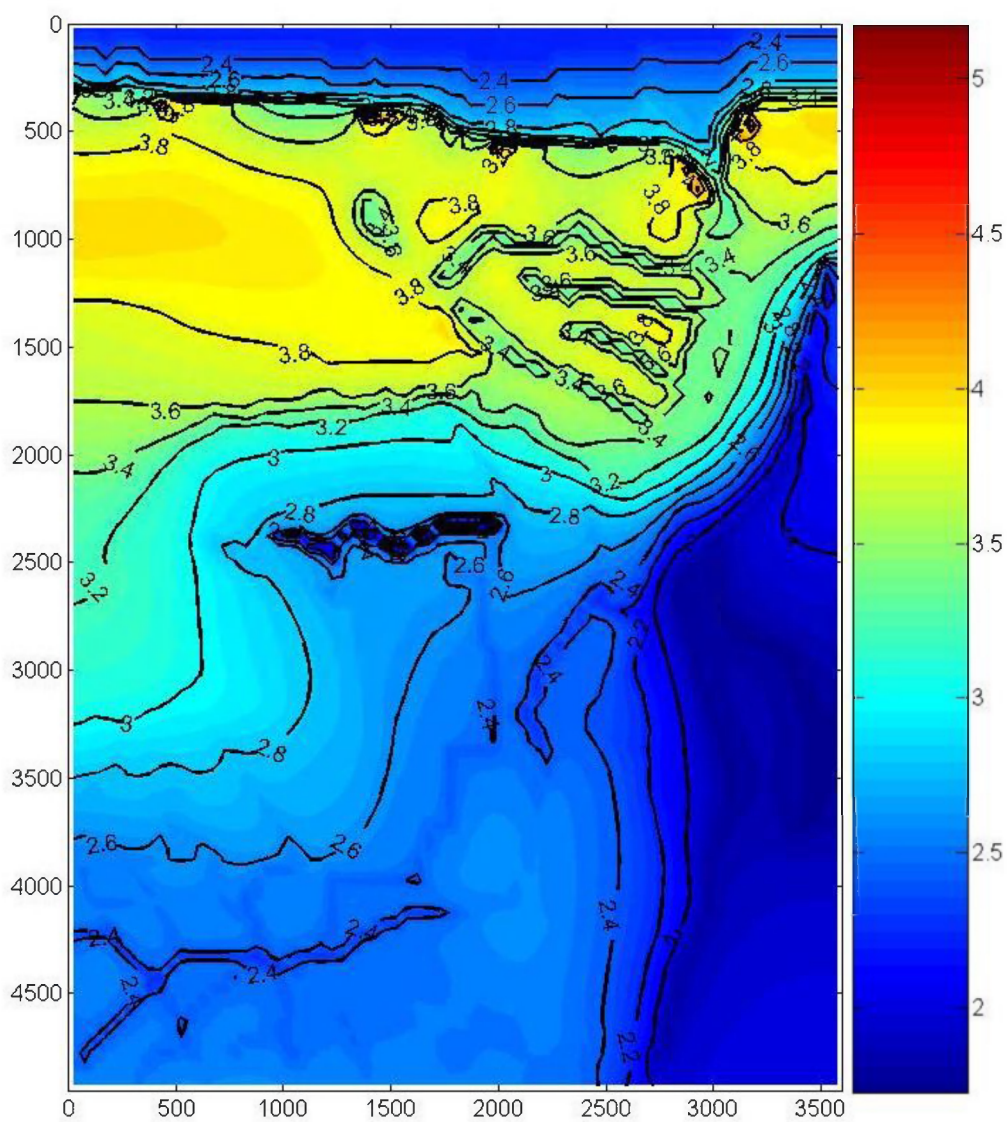
In het huidige natuurreserveaat het Zwin is de aanvulsnelheid en het zoutwaterpercentage van het aanvulwater sterk afhankelijk van het niveau van het maaiveld. Steunend op een gemiddelde getijfluctuatie worden vier opeenvolgende niveau-intervallen onderscheiden. De bovengrens van de slikke wordt voor het heden op 4.95 mTAW gezet, d.i. de hoogte van de zeespiegel bij een normaal springtij. De bovengrens van de schorre komt overeen met een zeespiegelstand bij een zeer hoog springtij en wordt hier op 5.95 mTAW geplaatst. Indien het maaiveldniveau in het Zwin hoger is dan

5.95 mTAW wordt aangenomen dat de aanvulling analoog gebeurt als in de duinen; er is een aanvulling van zoet water met een snelheid van 0.25 m/j. Als het niveau van het maaiveld in het Zwin tussen 4.95 en 5.95 mTAW ligt dan wordt het grondwaterreservoir aangevuld met brak water (zoutwaterpercentage gelijk aan 12.5% en aanvulsnelheid van 0.28 m/j). Als het maaiveld gelegen is tussen 4.55 en 4.95 mTAW is er aanvulling met zout water (aanvulsnelheid van 0.4 m/j en een zoutwaterpercentage van 60%). De aanvulsnelheid en het zoutwaterpercentage is het grootst als het maaiveld tussen 0.15 en 4.55 mTAW gelegen is (respectievelijk 0.5 m/j en 90%). Bij de volgende simulatiestappen in de toekomst verschuiven deze grenzen naar boven. Per stap van tien jaar vermeerderen deze niveau-intervallen met 6 cm (d.i. overeenkomstig met een ingeschatte zeespiegelstijging van 0.60 cm/j).

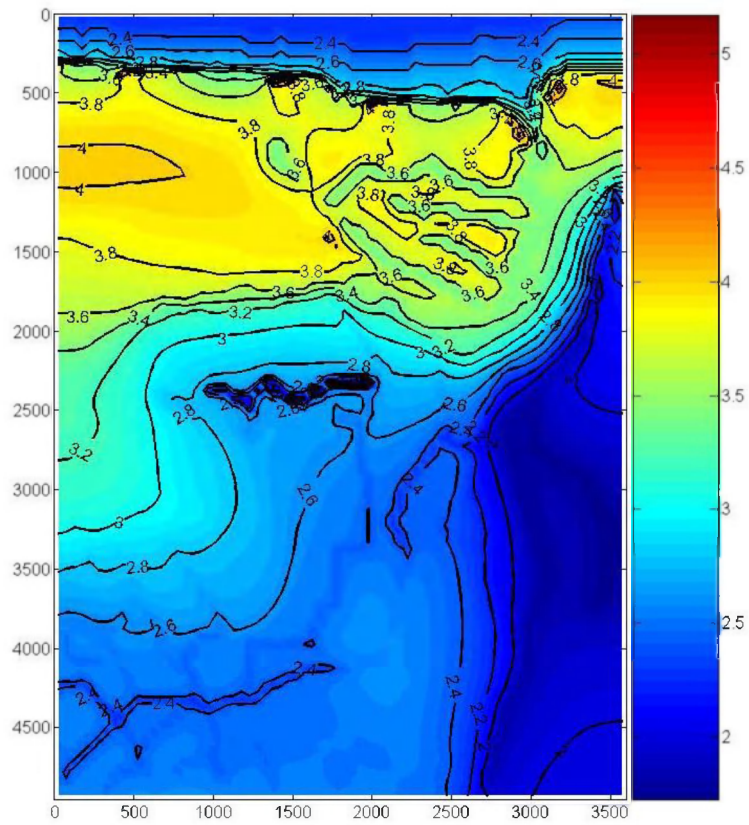
5.3.1 Zoetwaterstijghoogten

Figuur 5.2 toont de zoetwaterstijghoogten in een horizontale doorsnede volgens modellaag 1 (op het niveau van 1,5 mTAW) d.m.v. een kleurenschaal (waarden in mTAW) en zwarte contourlijnen. Laag 1 is onderaan begrensd door een horizontaal vlak op het niveau van 0.80 mTAW. De zoetwaterstijghoogten (en de zoutwaterpercentages) worden berekend voor de nodale punten die op het niveau +1.5mTAW liggen. Bovenaan is de laag begrensd door de watertafel. De gemeten zoetwaterstijghoogten komen goed overeen met de berekende zoetwaterstijghoogten. Ter hoogte van de hoge duinen, bevindt er zich een waterscheidingskam waar zoet water infiltreert en er een zoetwaterlens in stand houdt. De Nieuwe Hazegraspolder wordt ingesloten in het noorden en in het westen door respectievelijk de Kleine Vlakte en de binnenduinen. In het oosten in de richting van het uitwateringskanaal naar de Wielingen nemen de stijghoogtegradiënten toe. De lagere zoetwaterstijghoogtes in het Zwin komen overeen met de ligging van de geulen in het Zwin.

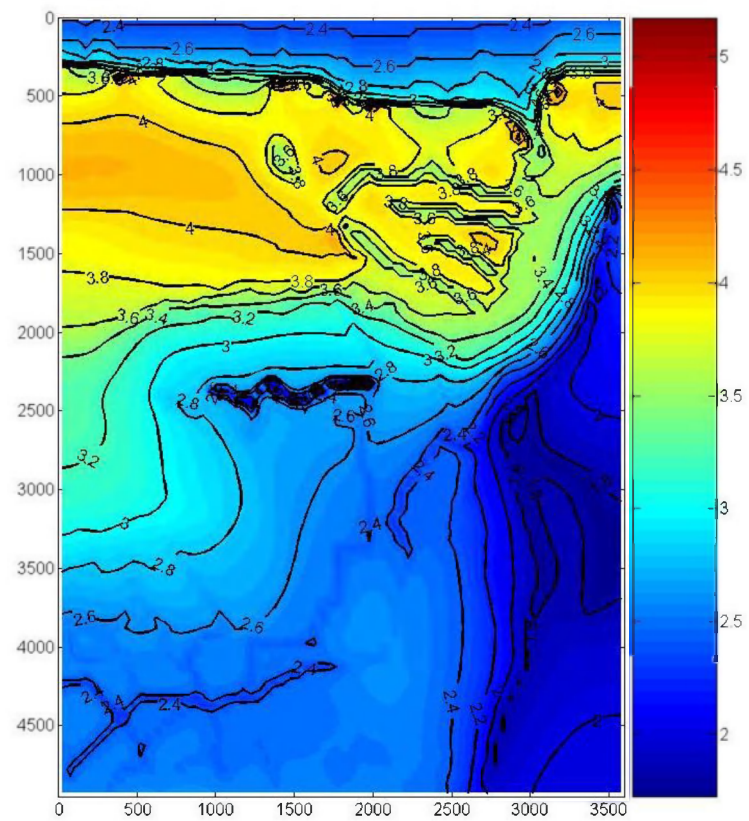
Figuur 5.3 en 5.4 geven de zoetwaterstijghoogten na respectievelijk 10 en 30 jaar weer in een horizontale doorsnede doorheen de freatische laag volgens modellaag 1 (1,5 mTAW) d.m.v. een kleurenschaal (waarden in mTAW) en contourlijnen. De impact van de zeespiegelstijging, die 6 cm per 10 jaar toeneemt, op de zoetwaterstijghoogtes is vooral waarneembaar in de hoge duinen en in het Zwin-gebied zelf.



Figuur 5.2 Huidige zoetwaterstijghoogte in freatische laag van modellaag 1 (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.3 Zoetwaterstijghoogtes na 10 jaar in freatische laag van modellaag 1 (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).

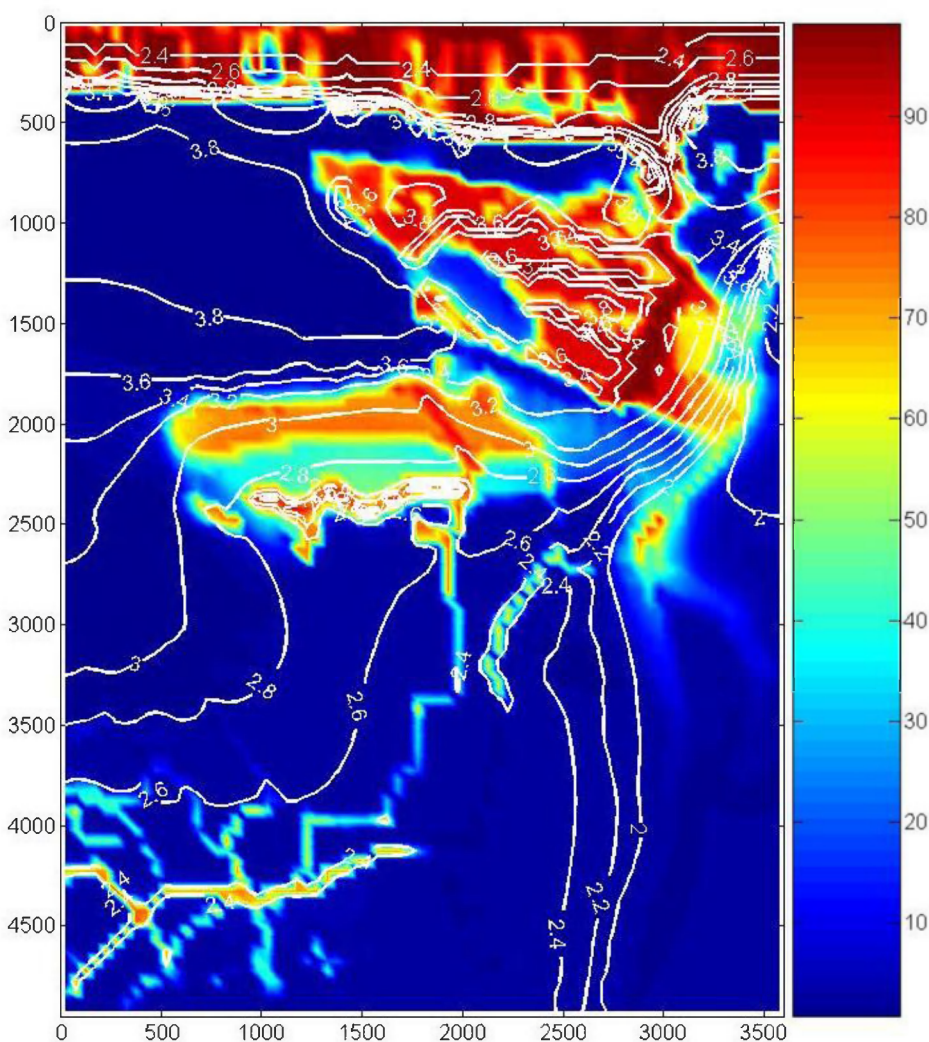


Figuur 5.4 Zoetwaterstijghoogtes na 30 jaar in freatische laag van modellaag 1 (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).

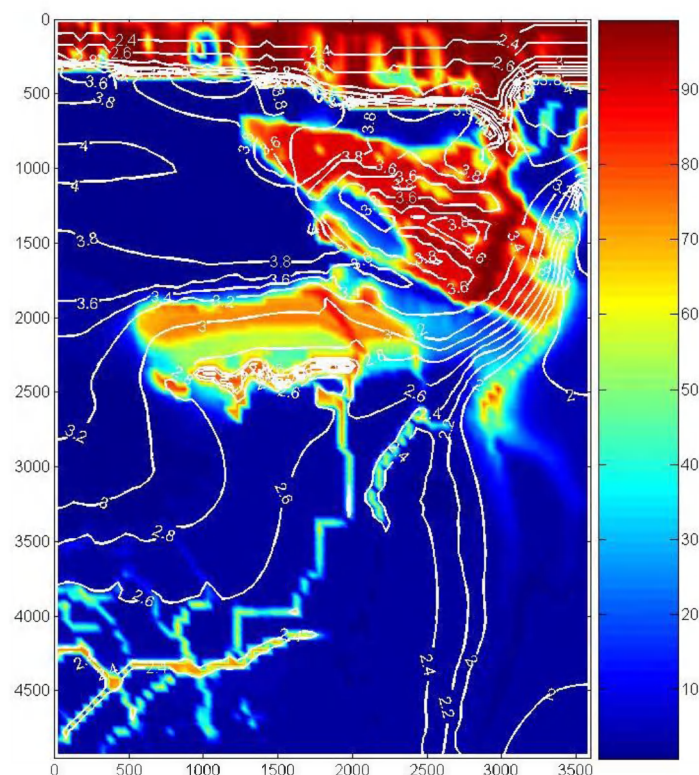
5.3.2 Zoutwaterpercentages

Figuur 5.5 toont een horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) doorheen het modelgebied waarop de huidige zoutwaterpercentages van het grondwater met een kleurschaal worden afgebeeld. Daarop worden de zoetwaterstijghoogtes weergegeven door middel van witte contourlijnen. Onder het strand en het Zwin komt zout grondwater voor tot aan het oppervlak ten gevolge van dagelijkse overstromingen door de getijdencyclus. Ter hoogte van het strand stroomt het zoetwater vanuit de duinen onder het geïnfilterde zout water en vervolgens opwaarts naar de zee zodat onder het strand een zoutwaterlens voorkomt. In het oosten in de richting van het uitwateringskanaal naar de Wielingen nemen de stijghoogtegradiënten toe. Ten zuiden van de Internationale dijk en in het noorden van de Nieuwe Hazegraspolder is er zout water aanwezig.

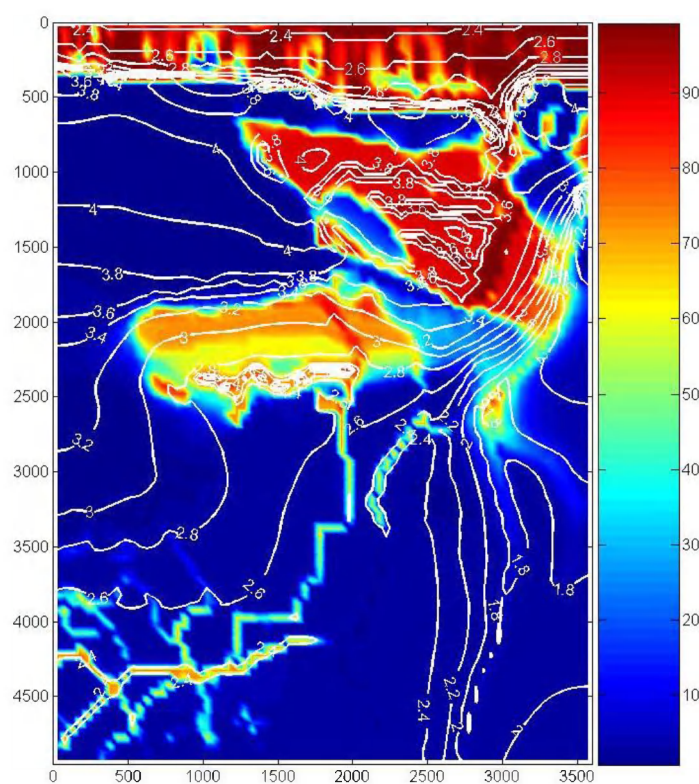
Figuren 5.6 en 5.7 geven in een horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) de zoutwaterpercentages na respectievelijk 10 en 30 jaar weer. Na 10 jaar en zeker na 30 jaar kan waargenomen worden dat de verzilting van het Zwin toeneemt. Dit geldt ook voor het noorden van de Nieuwe Hazegraspolder.



Figuur 5.5 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) van het modelgebied. Kleurenschaal geeft het huidige zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.



Figuur 5.6 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) van het modelgebied na 10 jaar. Kleurenschaal geeft het zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.



Figuur 5.7 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) van het modelgebied na 30 jaar. Kleurenschaal geeft het zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.

5.4 Evolutie van het Zwin bij uitbreiding met 120 ha

De modelopbouw van de grondwaterstroming en de verdeling van zoet en zout water bij uitbreiding van het Zwin met 120 ha is hetzelfde als deze voor de natuurlijke evolutie. De modelleerperiode is ingedeeld in negen tijdstappen elk met een duur van 10 jaar. Tijdens de eerste vier tijdstappen wordt de zoet/zoutwaterverdeling gesimuleerd vanaf 1970 tot op heden. Hierbij zijn de aanvulsnelheden in het modelgebied hetzelfde als bij de natuurlijke evolutie. Tijdens de vijf volgende stappen wordt rekening gehouden met de uitbreiding van het Zwin. Bij de uitbreiding van het Zwin zal de Internationale dijk over een breedte van ca 250 m doorbroken worden tot op een peil van ca 3.5 mTAW. Eens het zeewater deze drempel overschreden heeft zal er continu zoutwater in het uitbreidingsgebied aanwezig zijn. Het waterniveau zal er continu schommelen tussen 3.5 mTAW en de maximale zeespiegelstanden. In de gedeelten van de uitbreiding waar het maaiveld hoger gelegen is dan 3.5 mTAW gebeurt de aanvulling op dezelfde wijze als in het huidige Zwin.

De drempel is een belangrijke factor in de verdere evolutie van het uitbreidingsgebied. Naargelang het niveau en de breedte van de drempel zal er een grotere of kleinere instroom van zout water afkomstig van de Zvingeul plaatsvinden. Indien het niveau van de drempel lager wordt genomen dan 3.5 mTAW zal er een sterkere stroming zijn van instromend en uitstromend water. Deze continue stroming zorgt ervoor dat het aangebrachte materiaal ook weer wordt weggehaald waardoor de kans dat het doorbroken gebied zal dichtslibben hiermee kan verkleind worden. Vervolgens zal bij het nemen van een drempel rond 3.5 mTAW of lager het schorre-gebied verder uitgebreid worden. Langs de andere kant zal bij het nemen van een hogere drempel het slikke-gebied eerder toenemen. Verder onderzoek kan gedaan worden naar de optimalisatie van de afmetingen van deze drempel.

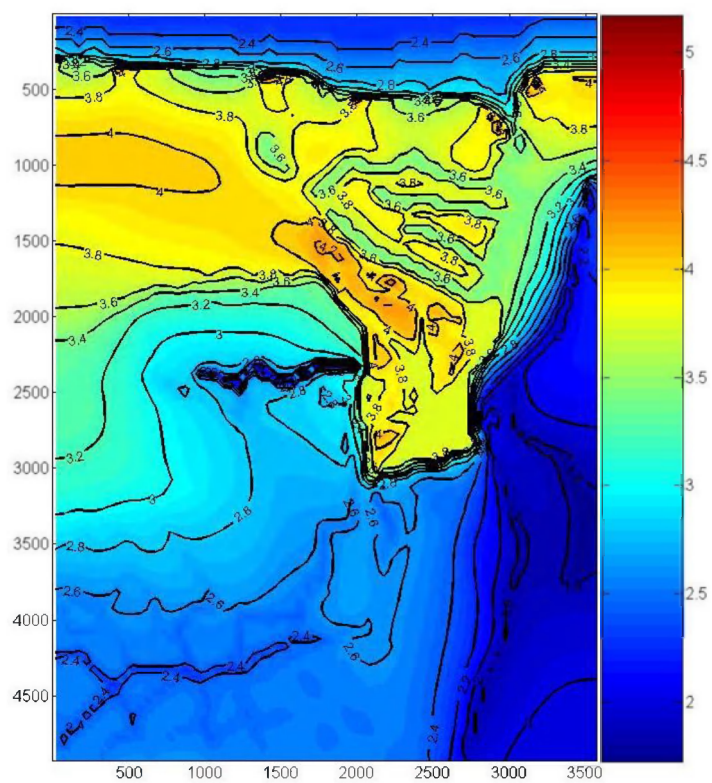
Het effect van de geplande ingreep op de grondwaterstroming en op de evolutie van de zoet/zoutwaterverdeling wordt ingedeeld in vijf stappen zodat we telkens een reeks van opeenvolgende figuren kunnen voorstellen. Na stap 5 wordt de toestand berekend na 10 jaar van de uitvoering van de ingreep en na stap 6, 7, 8 en 9 na respectievelijk 20, 30, 40 en 50 jaar na de uitvoering van de uitbreiding. In dit verslag worden enkel de figuren na 10 en 30 jaar opgenomen. De in bijlage toegevoegde powerpoint-presentaties geven alle figuren weer. In de figuren worden de uitgemiddelde zoetwaterstijghoogtes t.o.v. de tijd uitgezet.

5.4.1 Zoetwaterstijghoogtes en zoutwaterpercentages

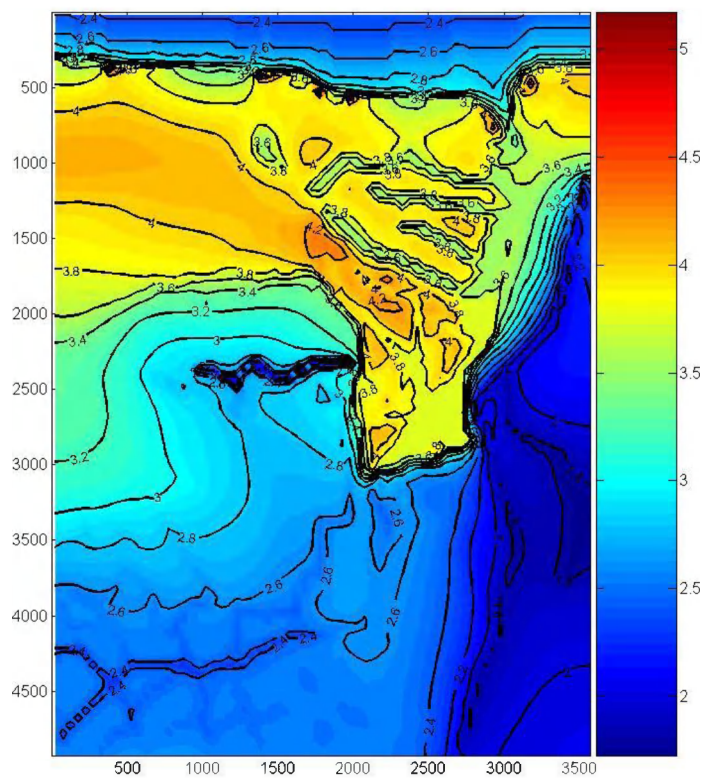
Figuren 5.8 en 5.9 geven de zoetwaterstijghoogtes na respectievelijk 10 en 30 jaar na de uitbreiding met 120 ha in de freatische laag van modellaag 1 weer. Na 10 jaar uitbreiding met 120 ha is in het volledige gebied de zoetwaterstijghoogte gestegen. Ter hoogte van de dijk die het uitbreidingsgebied omringd zijn er grote stijghoogtegradiënten aanwezig.

Figuren 5.10 en 5.11 geven in een horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) de zoutwaterpercentages na respectievelijk 10 en 30 jaar weer voor de uitbreiding met 120 ha. Het doorbreken van de Internationale dijk over een breedte van 250 m zorgt voor een toevoer van zout water in het uitbreidingsgebied waardoor na 10 jaar het zoete water verdrongen is door het zoute water. In de Nieuwe Hazegraspolder breidt in de loop van de tijd de invloed van het zoute water verder uit van noord naar zuid. In het zuidoosten van de uitbreidingszone wordt er ook verzilting waargenomen.

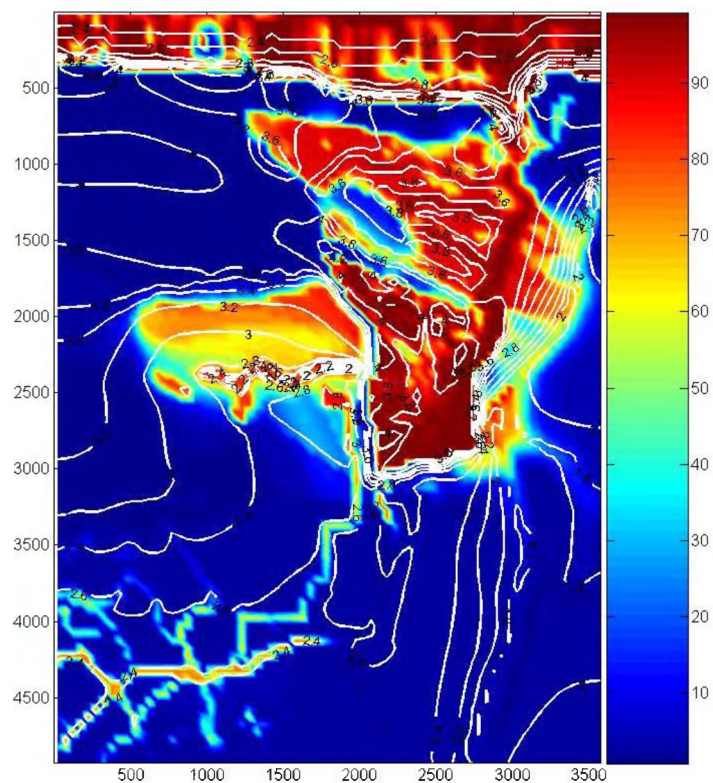
Figuren 5.12 en 5.13 geven in een horizontale doorsnede de zoutwaterpercentages na 10 jaar voor de uitbreiding met 120 ha volgens respectievelijk laag 3 (-1.5 mTAW) en laag 7 (-7.5 mTAW) weer. Deze figuren tonen aan dat onder de polders en in het bovenste gedeelte van de freatische aquifer het zoutwaterpercentage lateraal sterk kan verschillen en over het algemeen sterk toeneemt met de diepte. Vanaf laag 7 zijn de geulen in het Zwin praktisch niet meer te onderscheiden. In laag 3 is het gebied ten zuiden van de Internationale dijk verzilt. Dit is niet het geval onder de dijken rond het uitbreidingsgebied. In het centrum van het uit te breiden gebied komt zoet water voor in laag 3. Dit is zoet water dat net voor de uitbreiding in het bovenste gedeelte van de freatische laag aanwezig was en die neerwaarts verdreven wordt door het infiltrerende zout water in het uitbreidingsgebied.



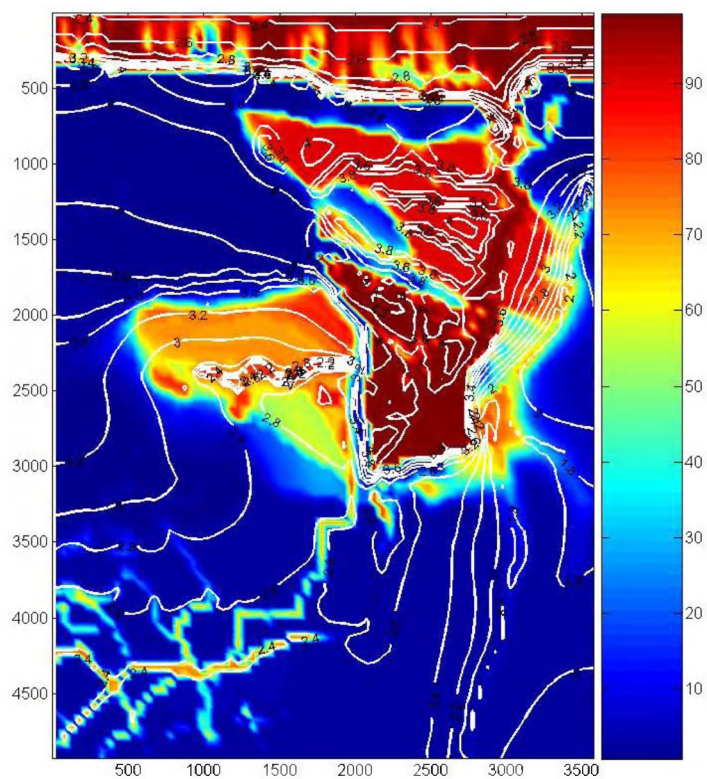
Figuur 5.8 Zoetwaterstijghoogtes na 10 jaar na de uitbreiding met 120 ha in de freatische laag van modellaag 1 (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



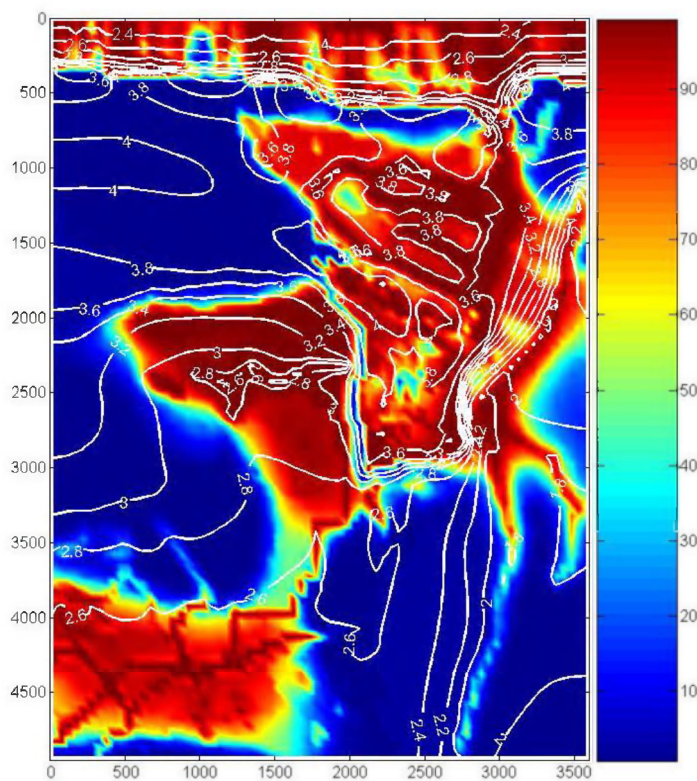
Figuur 5.9 Zoetwaterstijghoogtes na 30 jaar na de uitbreiding met 120 ha in de freatische laag van modellaag 1 (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



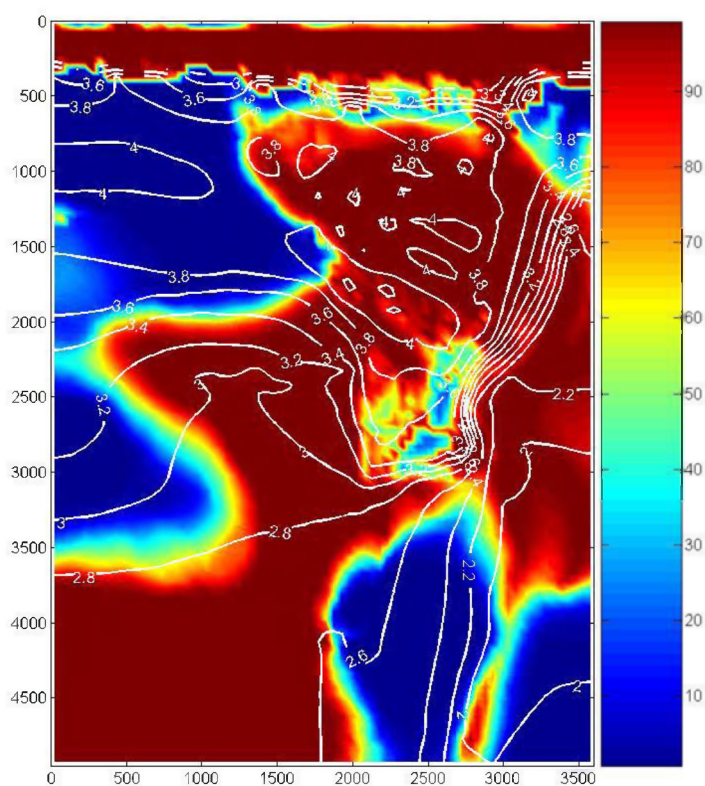
Figuur 5.10 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) met uitbreiding van 120 ha na 10 jaar. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.



Figuur 5.11 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) met uitbreiding van 120 ha na 30 jaar. Kleurenschaal geeft het huidige zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.



Figuur 5.12 Horizontale doorsnede volgens laag 3 (-1.5 mTAW) van het modelgebied na 10 jaar uitbreiding met 120 ha. Kleurenschaal geeft het zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water) . Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.

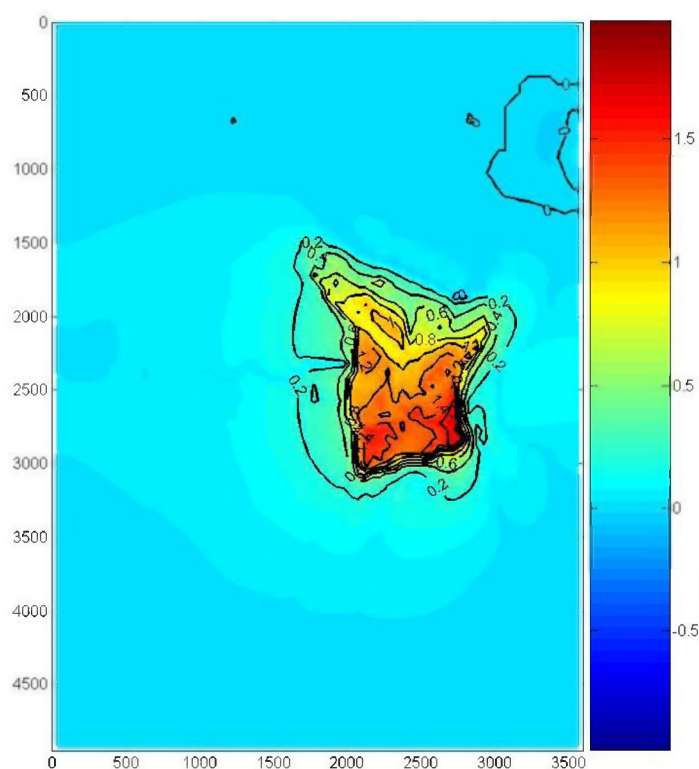


Figuur 5.13 Horizontale doorsnede volgens laag 7 (-7.5 mTAW) van het modelgebied na 10 jaar uitbreiding met 120 ha. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.

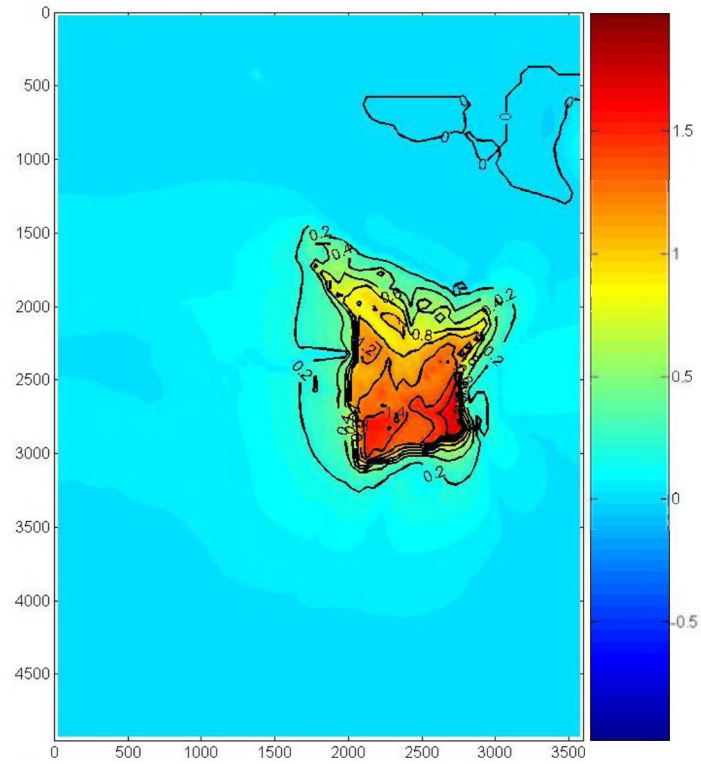
5.4.2 Toename in zoetwaterstijghoogtes en zoutwaterpercentages

Figuren 5.14 en 5.15 tonen de toename in zoetwaterstijghoogte in modellaag 1 t.g.v. van de Zwinuitbreiding met 120 ha na respectievelijk 10 en 30 jaar. De toename in zoetwaterstijghoogte na 10 jaar wordt verkregen door de situatie met 120 ha uitbreiding na 10 jaar te verminderen met de natuurlijke situatie zonder uitbreiding na 10 jaar. Hetzelfde geldt voor de toename in zoetwaterstijghoogte na 30 jaar en voor de uitbreiding met 180 ha. In het modelgebied zijn de zoetwaterstijghoogtetoenames het grootst in het uitbreidingsgebied. Deze zijn het grootst in het zuidelijke gedeelte van het uitbreidingsgebied daar waar het niveau van de huidige polders het laagst is.

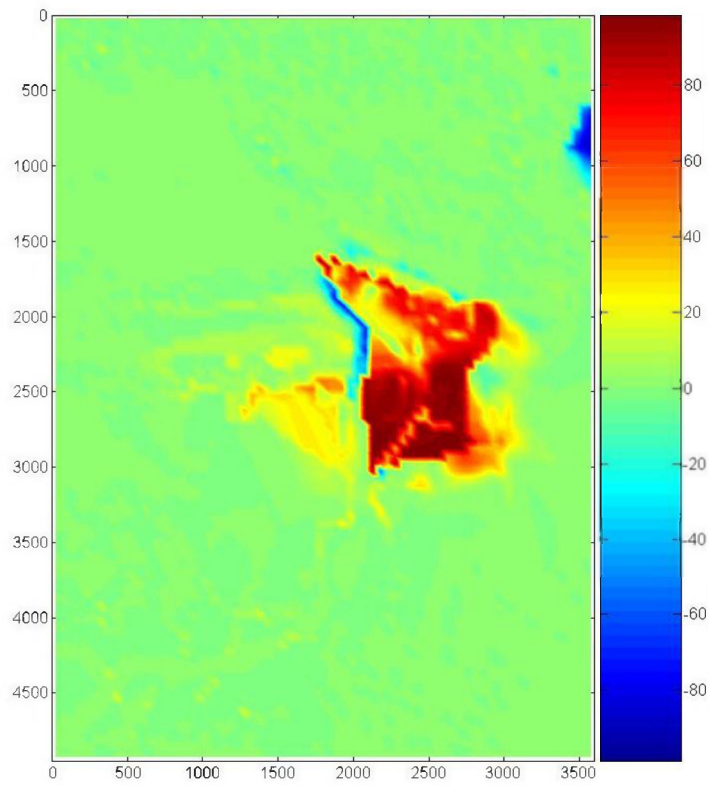
Figuren 5.16 en 5.17 tonen de toename in zoutwaterpercentage in modellaag 1 t.g.v. de uitbreiding met 120 ha na respectievelijk 10 en 30 jaar. De toename in zoutwaterpercentage na 10 jaar wordt verkregen door de situatie met 120 ha uitbreiding na 10 jaar te verminderen met de natuurlijke situatie zonder uitbreiding na 10 jaar. Hetzelfde geldt voor de toename in zoutwaterpercentage na 30 jaar en voor de uitbreiding met 180 ha. Deze figuren tonen grote verschillen in zoutwaterpercentage in het uitbreidingsgebied zelf, in het zuidoosten van het uitbreidingsgebied en in het midden van de Nieuwe Hazegraspolder. De verandering in zoutwaterpercentage t.g.v. de uitbreiding is een relatief traag proces en evolueert nog steeds 30 jaar na de uitbreiding van het Zwin (zelfs na 50 jaar, zie powerpoint-presentatie in bijlage). In het noorden en noordoosten van de Nieuwe Hazegraspolder treedt er in de loop van de tijd verzoeting op (blauwe kleur, negatieve waarden).



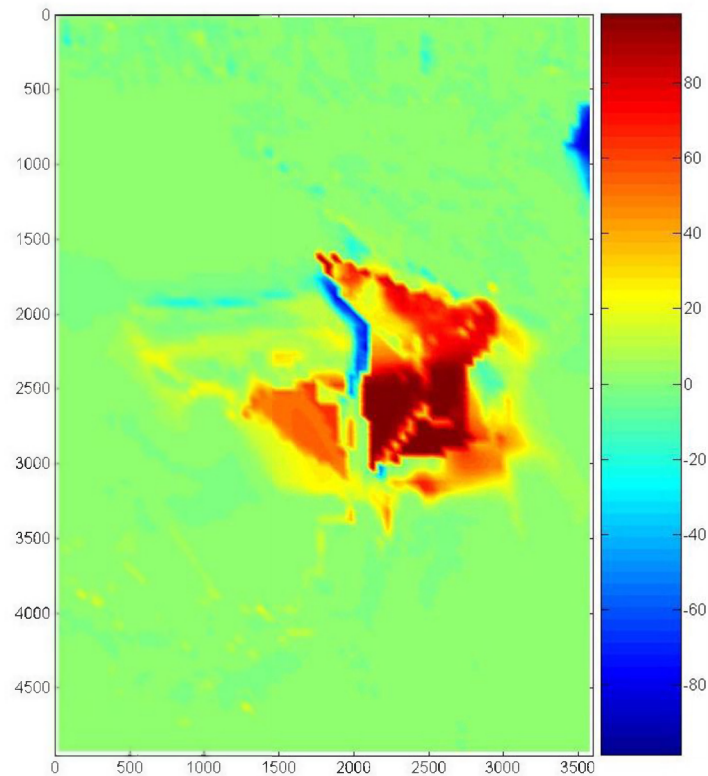
Figuur 5.14 Toename van zoetwaterstijghoogte in modellaag 1 na 10 jaar t.g.v. Zwinuitbreiding met 120h, d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.15 Toename in zoetwaterstijghoogte in modellaag 1 na 30 jaar t.g.v Zwinuitbreiding met 120ha, d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.16 Toename in zoutwaterpercentage na 10 jaar t.g.v. Zwinuitbreiding met 120ha in modellaag 1 (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.17 Toename in zoutwaterpercentage na 30 jaar t.g.v. Zwinuitbreiding met 120ha in modellaag 1 (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).

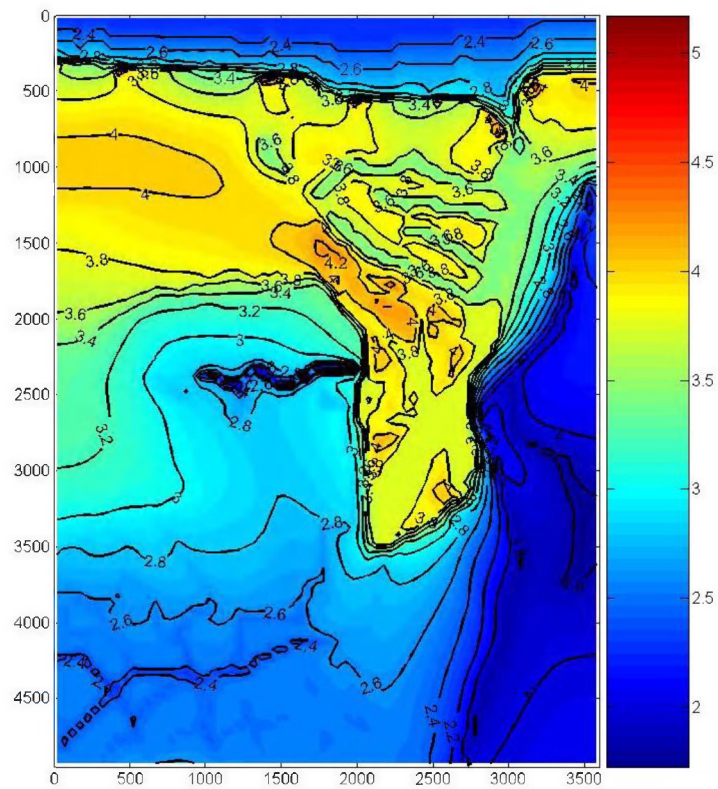
5.5 Evolutie van het Zwin bij uitbreiding met 180 ha

De modelopbouw bij de uitbreiding van het Zwin met 180 ha is hetzelfde als bij de uitbreiding met 120 ha met als enige verschil dat de zuidelijke grens iets zuidelijker gelegen is waardoor een grotere oppervlakte wordt ingepolderd.

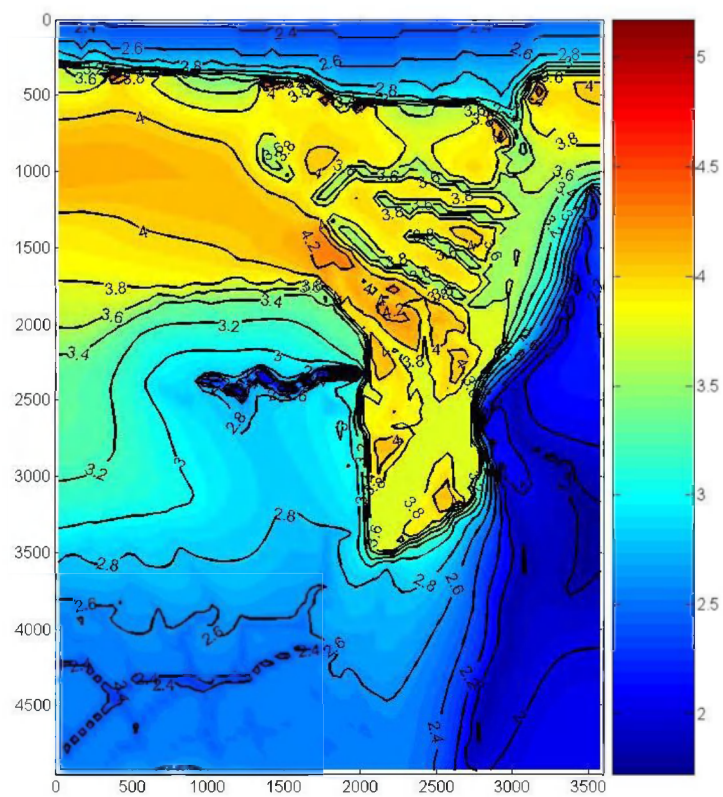
5.5.1 Zoetwaterstijghoogtes en zoutwaterpercentages

Figuren 5.18 en 5.19 geven de zoetwaterstijghoogtes na respectievelijk 10 en 30 jaar uitbreiding met 180 ha in de freatische laag van modellaag 1 weer. Het gebied wordt over een grotere oppervlakte beïnvloed dan bij de 120 ha uitbreiding.

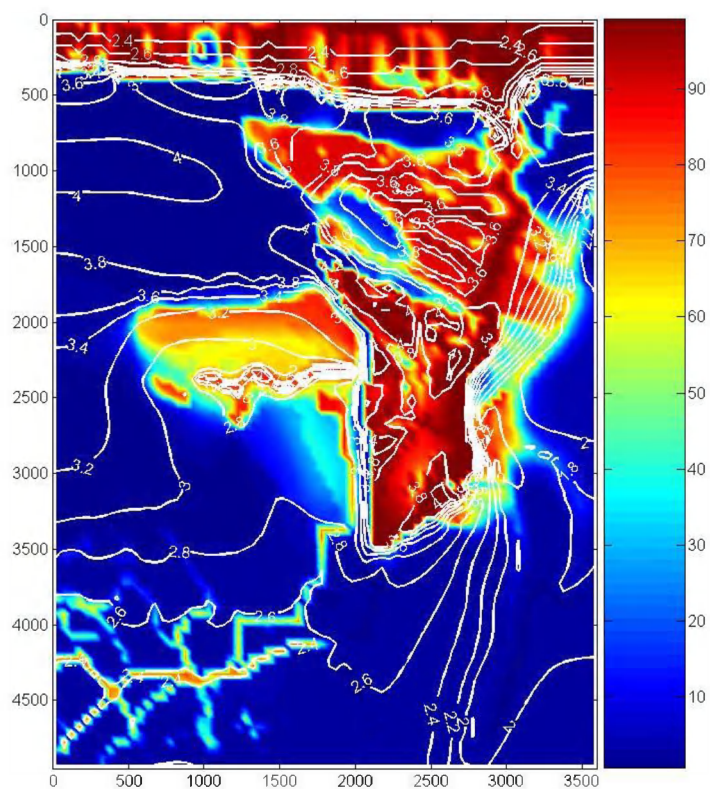
Figuren 5.20 en 5.21 geven in een horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) de zoutwaterpercentages na respectievelijk 10 en 30 jaar weer voor de uitbreiding met 180 ha. Een uitbreiding over een grotere oppervlakte zorgt ervoor dat een grotere oppervlakte buiten het uitbreidingsgebied wordt beïnvloed.



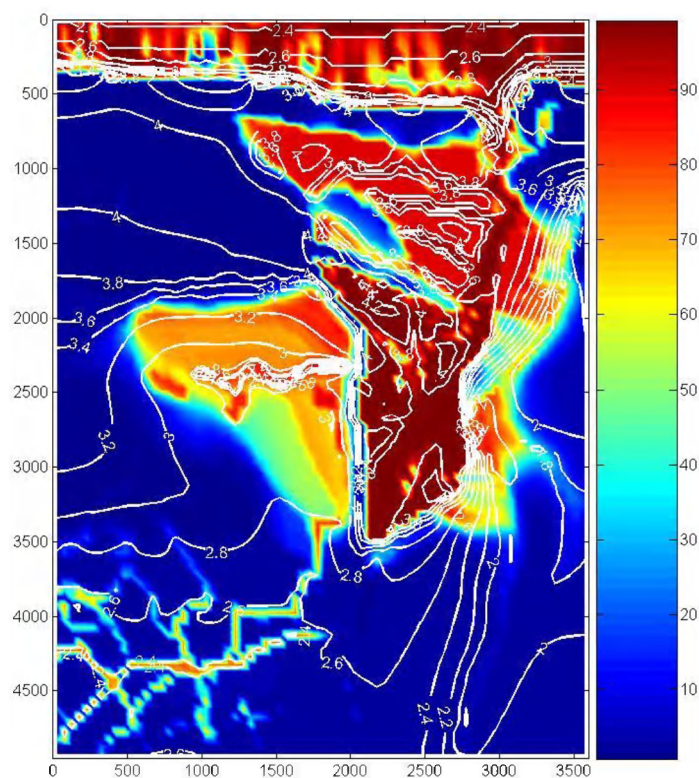
Figuur 5.18 Zoetwaterstijghoogtes na 10 jaar na de uitbreiding met 180 ha in de freatische laag van modellaag 1 (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.19 Zoetwaterstijghoogtes na 30 jaar na de uitbreiding met 180 ha in de freatische laag van modellaag 1 (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.20 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) na 10 jaar Zwinuitbreiding met 180 ha. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.

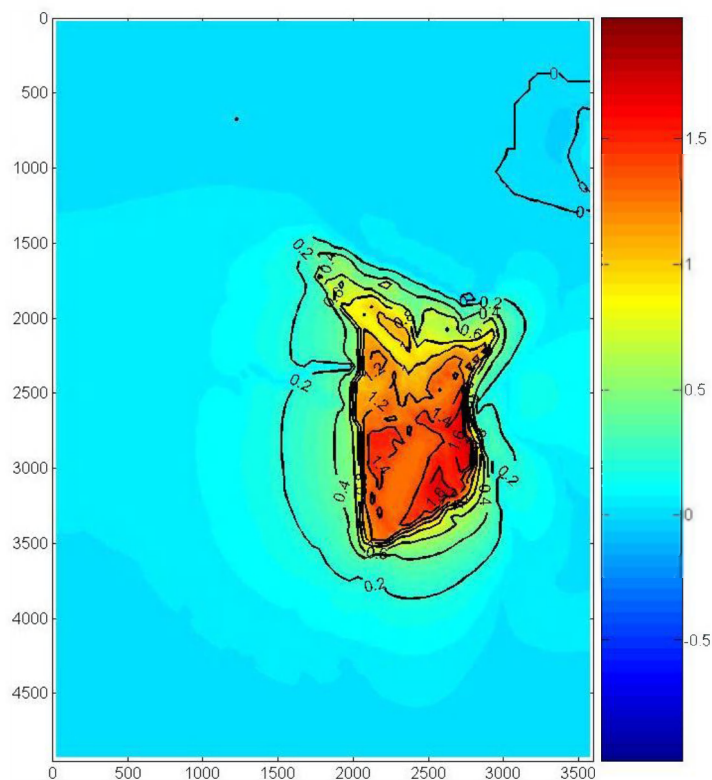


Figuur 5.21 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) na 30 jaar Zwinuitbreiding met 180 ha. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.

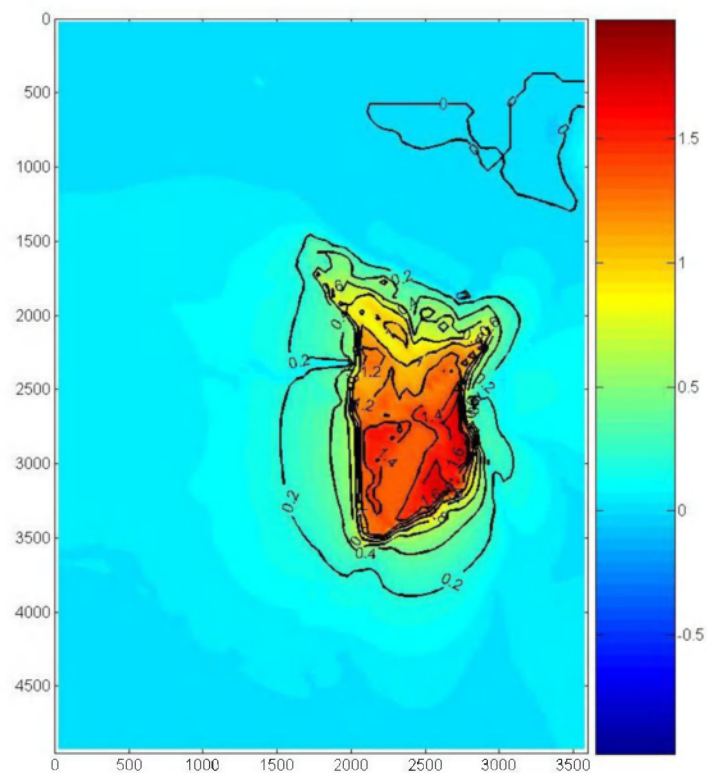
5.5.2 Toenames van zoetwaterstijghoogtes en zoutwaterpercentages

Figuren 5.22 en 5.23 tonen de toename in zoetwaterstijghoogte in modellaag 1 t.g.v. de Zwinuitbreiding met 180 ha na respectievelijk 10 en 30 jaar. Hetzelfde kan worden vastgesteld als voor figuren 5.14 en 5.15. Aangezien het uit te breiden gebied een grotere oppervlakte inneemt, wordt over een grotere oppervlakte hogere zoetwaterstijghoogteverschillen waargenomen.

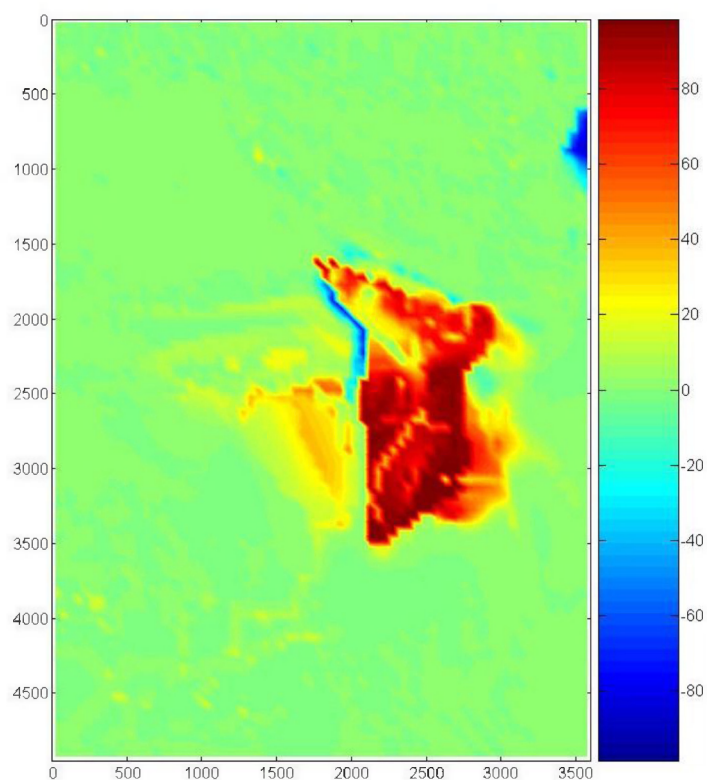
Figuren 5.24 en 5.25 tonen de toename in zoutwaterpercentage in modellaag 1 bij een uitbreiding van het Zwin met 180 ha na respectievelijk 10 en 30 jaar. Voor deze figuren kunnen dezelfde conclusies getrokken worden als voor figuren 5.16 en 5.17.



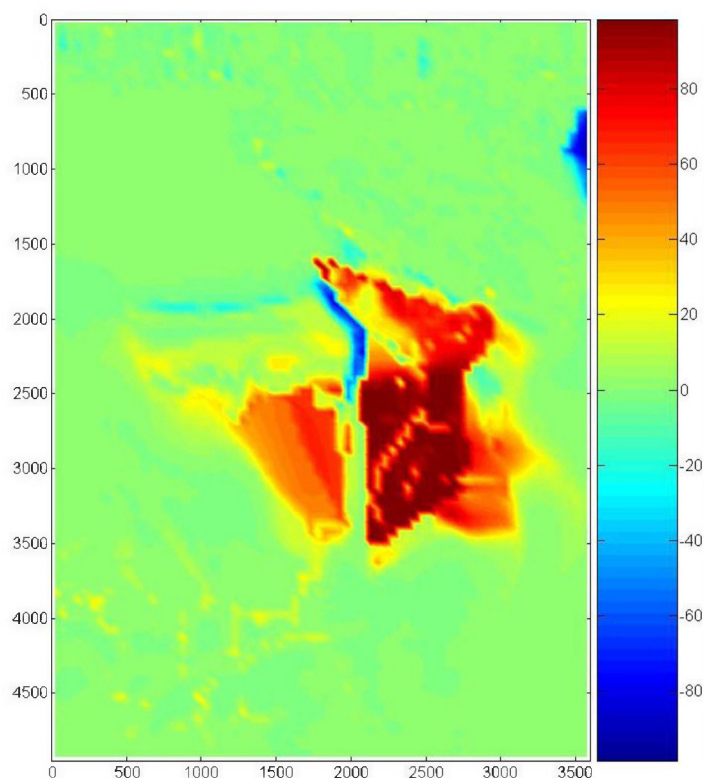
Figuur 5.22 Toename in zoetwaterstijghoogte van modellaag 1 na 10 jaar t.g.v. Zwinuitbreiding met 180ha (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.23 Toename in zweetwaterstijghoogte van modellaag 1 na 30 jaar t.g.v. Zwinuitbreiding met 180ha (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.24 Toename van zoutwaterpercentage in modellaag 1 na 10 jaar Zwinuitbreiding met 180ha (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.25 Toename van zoutwaterpercentage in modellaag 1 na 30 jaar Zwinuitbreiding met 180ha (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).

5.6 Milderende maatregel

Om de laterale uitbreiding van het infiltrerende zout water uit het uitbreidingsgebied naar de omgeving te verminderen werden verschillende mogelijkheden onderzocht. Hierbij bleek dat de beste methode de overschakeling inhoud van de huidige ondiepe drainage naar een diepe drainage. Bij de huidige ondiepe drainage wordt het te veel aan grondwater weggevoerd door een netwerk van drainagegrachten en drainagebuizen die vooral zoet water wegvoeren uit het bovenste gedeelte van de freatische aquifer. Bij een diepe drainage wordt het te veel aan grondwater weggenomen uit het onderste gedeelte van de freatische aquifer. Daar dit gedeelte van de freatische aquifer bijna uitsluitend gevuld is met zout water zal het weggenomen grondwater voornamelijk zout zijn. Bij een diepe drainage wordt water onttrokken uit het onderste gedeelte van de freatische aquifer d.m.v. een reeks putten die door een hevelleiding verbonden wordt met één zuigput (of twee zuigputten) die voorzien is (of zijn) van de nodige pompcapaciteit. Deze putten en de hevelleiding zijn gelegen aan de voet van de omringende dijk van het uitbreidingsgebied. Door te werken met een hevelleiding en met één of twee zuigputten kan het aantal pompen, de regeltechnische installatie en het energiegebruik geminimaliseerd worden. Daar de nodige energie voor het systeem relatief beperkt is, kan deze ter plaatste opgewekt worden door middel van fotovoltaïsche zonnepanelen en/of een kleinere windmolen. Het opgepompte zout water kan dan rechtstreeks via een leiding van beperkte lengte gevoerd worden naar een dieper gelegen deel van het uitbreidingsgebied dat steeds met zoutwater overspoeld is. Deze pumping zou zodanig moeten geoptimaliseerd worden dat het debiet van verwijderd zout water gelijk is aan het debiet van infiltrerend zout water in het uitbreidingsgebied van het Zwin vermeerderd met het debiet van zoet water dat momenteel afgevoerd wordt door de ondiepe drainage in de omringende polders.

Aan de hand van één aanvullende simulatie per uitbreidingsgeval zal aangetoond worden hoe door de toepassing van de diepe drainage de toename in oppervlakte met zoute kwel in het aangrenzende gebied kan verhinderd worden. Hierbij zal gerekend worden met een ruw ingeschat debiet dat vereist is om het voorgestelde doel te bereiken. Enkel door het uitvoeren van gedetailleerder veldonderzoek

kan een betrouwbaar optimaal, minimaal onttrekkingsdebiet bepaald worden die enerzijds de laterale uitbreiding van zoutwater aan de watertafel verhindert in het omringende landbouwgebied en dat anderzijds de verlaging van de watertafel tot het vereiste minimum in dit gebied beperkt. Door de stijgende zeespiegel zal dit vereiste minimum debiet toenemen in de tijd.

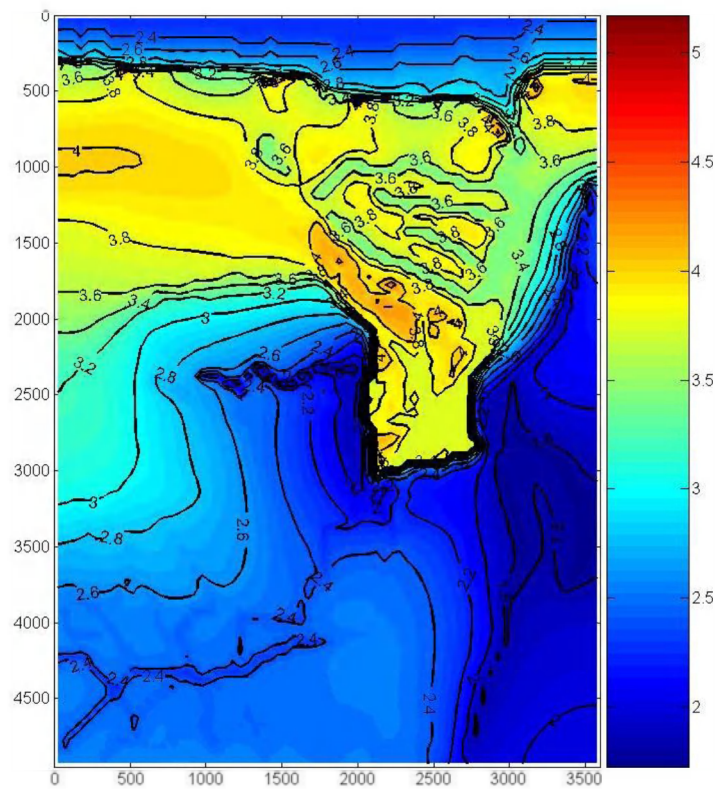
In het model wordt deze diepe drainage opgenomen door een onttrekking van zout water uit de twee onderste lagen van het model, namelijk laag 13 en 14. Dit komt overeen met een filter van de onttrekkingsputten tussen -15.7 en -18.7 mTAW. Er wordt per eindige-verschilcel $25 \text{ m}^3/\text{d}$ onttrokken. In de simulatie met uitbreiding van 120 ha wordt er langs de volledige omringende dijk gelijk gepompt. In totaal wordt er $2450 \text{ m}^3/\text{d}$ ($=102 \text{ m}^3/\text{h}$) water onttrokken. In de simulatie met de uitbreiding van 180 ha wordt per eindige-verschil cel gelegen onder de oostelijke helft van de ringdijk dubbel zoveel onttrokken als uit de eindige-verschil cellen gelegen onder de westelijke helft van de ringdijk. In totaal wordt er $5050 \text{ m}^3/\text{d}$ ($=210 \text{ m}^3/\text{h}$) water onttrokken. In beide simulaties wordt vanaf de uitbreiding van het Zwin steeds met hetzelfde maximale ingeschatte debiet gemodelleerd gedurende een periode van 50 jaar.

5.6.1 Zoetwaterstijghoogtes en zoutwaterpercentages bij uitbreiding met 120 ha

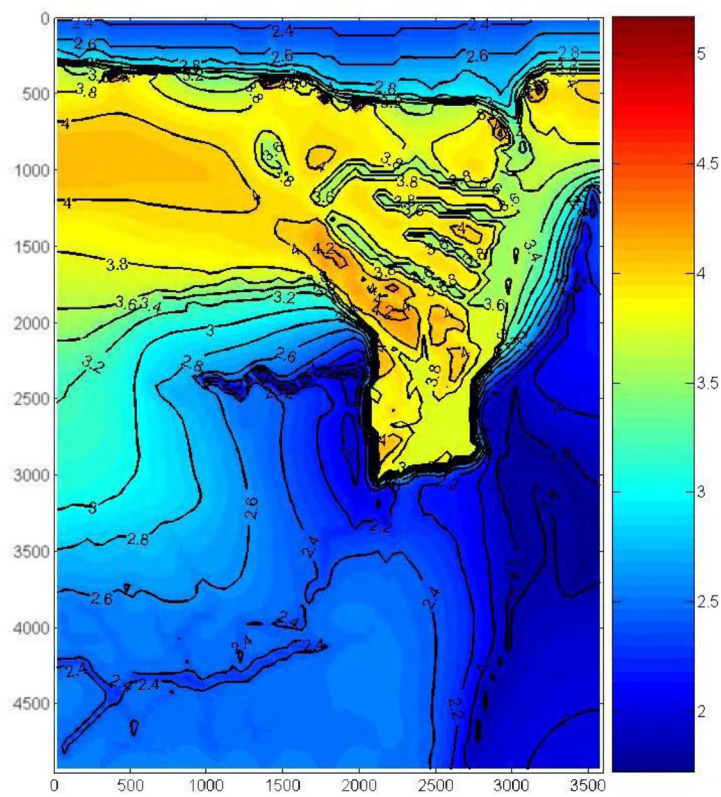
Figuren 5.26 en 5.27 geven de zoetwaterstijghoogtes van modellaag 1 na respectievelijk 10 en 30 jaar na de uitbreiding van 120 ha en met milderende maatregelen in de freatische laag. Langs de buitenrand van de dijken die het uitbreidingsgebied van het Zwin omringen is de stijghoogte door het pompen verlaagd.

De figuren 5.28 en 5.29 tonen de zoet/zoutwaterverdelingen en de zoetwaterstijghoogtes respectievelijk na 10 en 30 jaar na de uitbreiding van 120 ha en met milderende maatregel. Uit deze figuren kan afgeleid worden dat de laterale verbreiding van het infiltrerende zoutwater afkomstig van de uitbreiding van het Zwin in de freatische laag tot in zekere mate kan bedwongen worden. Verdere studie kan gedaan worden naar het onttrekken van het zoute water in het noorden van de Nieuwe Hazegraspolder.

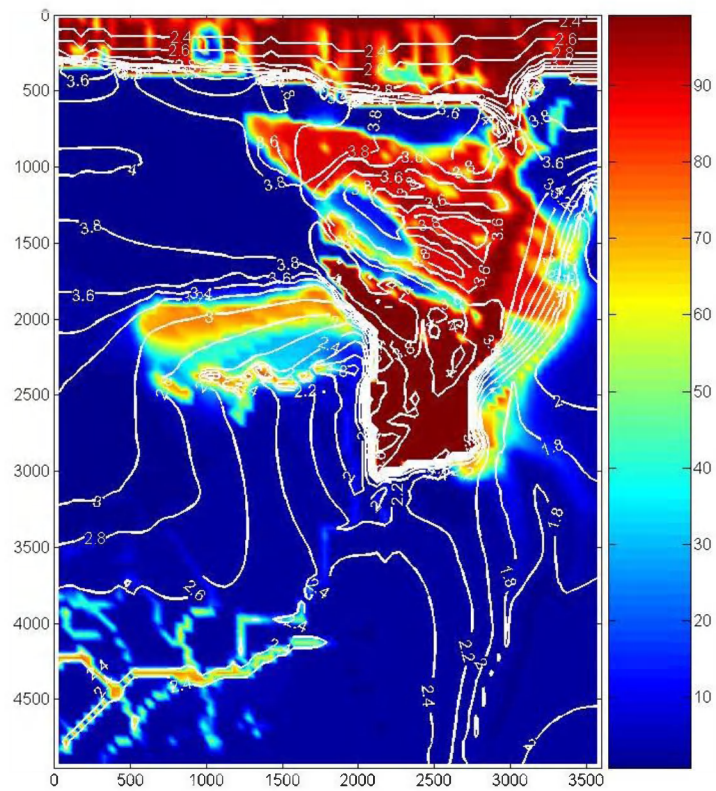
Figuren 5.30 en 5.31 geven in een horizontale doorsnede de zoutwaterpercentages na 10 jaar weer voor de uitbreiding met 120 ha en met milderende maatregelen volgens respectievelijk laag 3 (-1.5 mTAW) en laag 7 (-7.5 mTAW). Bij het vergelijken van figuur 5.30 met figuur 5.12 kan vastgesteld worden dat de laterale uitbreiding van het zoute water in laag 3 vermindert is. Er wordt ook minder opwelling van zoet water vastgesteld.



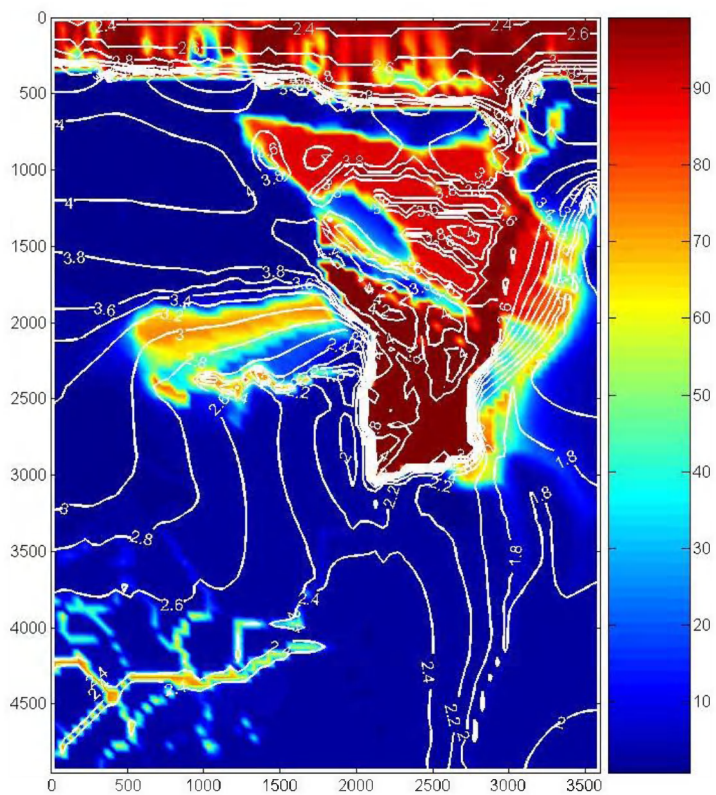
Figuur 5.26 Zoetwaterstijghoogtes na 10 jaar na de uitbreiding van 120 ha met milderende maatregelen in de freatische laag van modellaag 1 (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



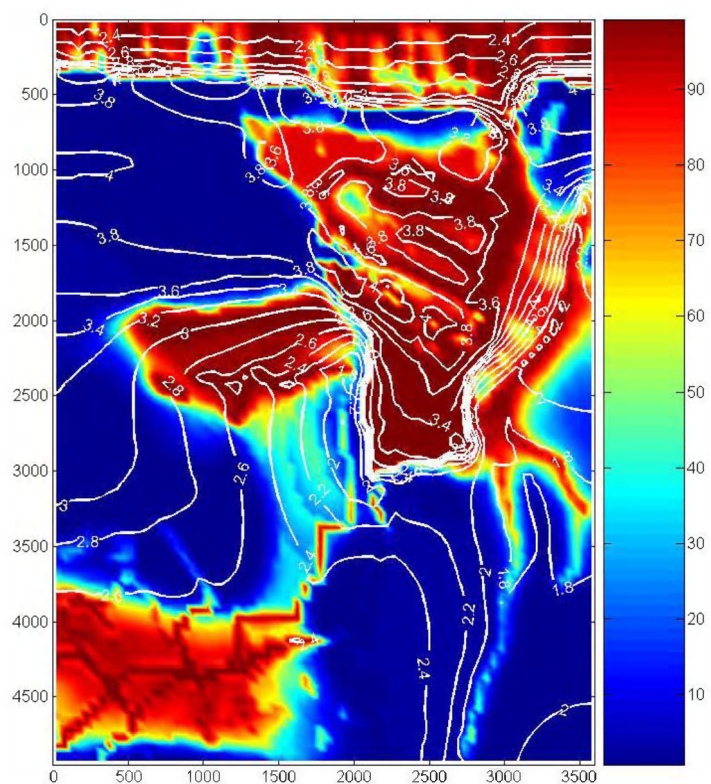
Figuur 5.27 Zoetwaterstijghoogtes na 30 jaar na de uitbreiding van 120 ha met milderende maatregelen in de freatische laag van modellaag 1 (kleurschaal) op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



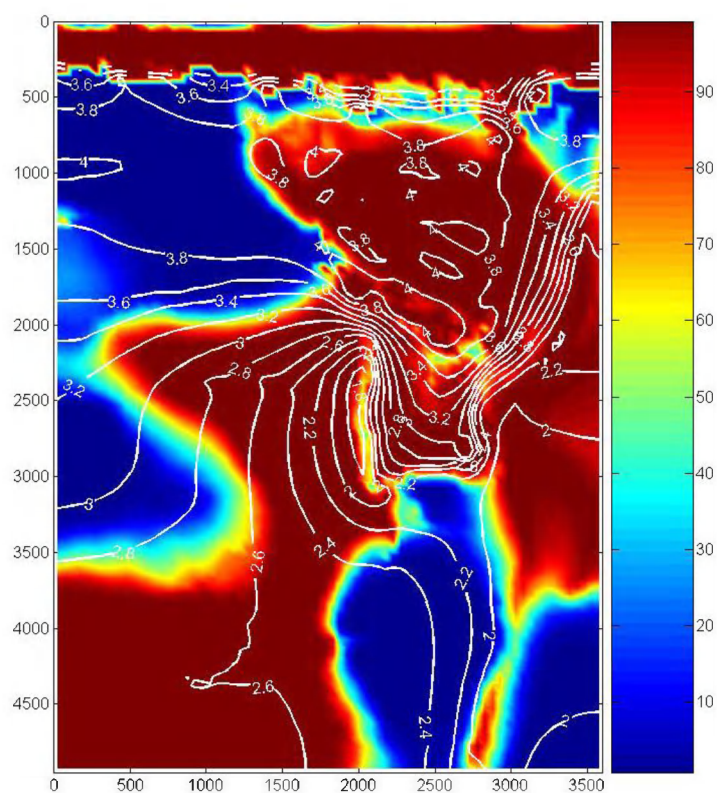
Figuur 5.28 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) met uitbreiding van 120 ha met milderende maatregelen na 10 jaar. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water).



Figuur 5.29 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) met uitbreiding van 120 ha met milderende maatregelen na 30 jaar. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water).



Figuur 5.30 Horizontale doorsnede volgens laag 3 (-1.5 mTAW) van het modelgebied na 10 jaar uitbreiding met 120 ha met milderende maatregelen. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.

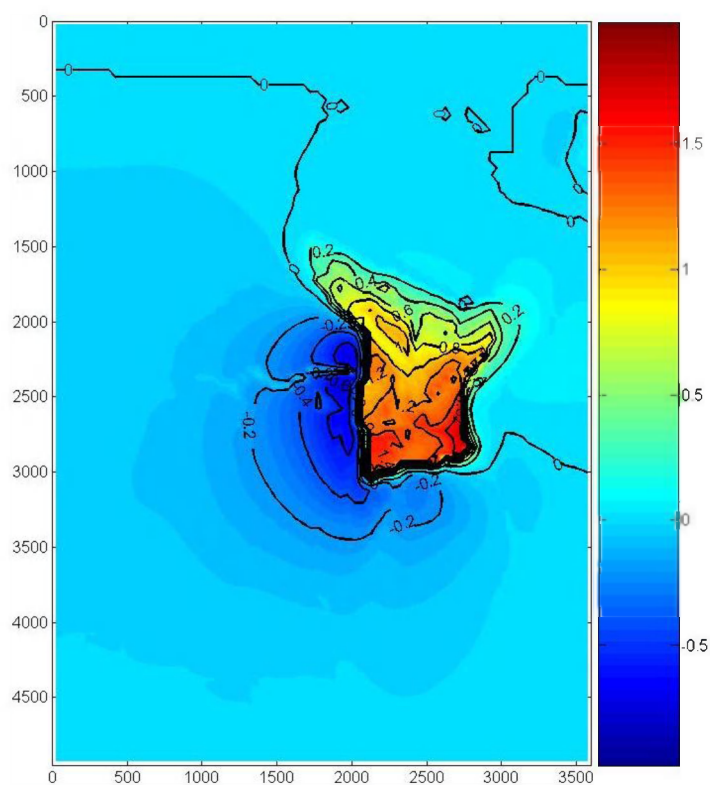


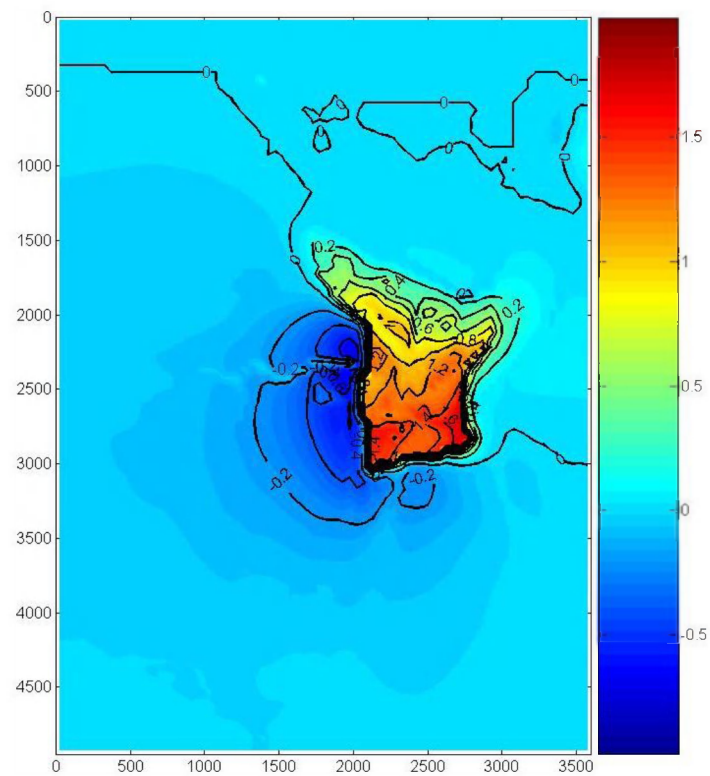
Figuur 5.31 Horizontale doorsnede volgens laag 7 (-7.5 mTAW) van het modelgebied na 10 jaar uitbreiding met 120 ha met milderende maatregelen. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water). Witte lijnen stellen de zoetwaterstijghoogtes voor.

5.6.2 Toename van zoetwaterstijghoogtes en zoutwaterpercentages bij uitbreiding met 120 ha

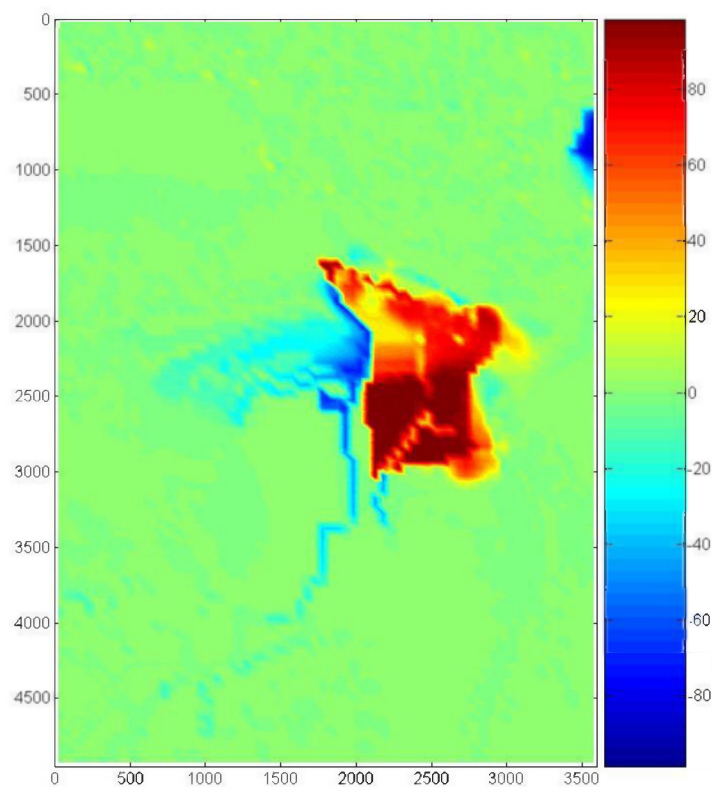
Figuren 5.32 en 5.33 tonen de toename van de zoetwaterstijghoogte in modellaag 1 t.g.v. een Zwinuitbreiding met 120 ha en met milderende maatregelen na respectievelijk 10 en 30 jaar. Ter hoogte van de westelijke helft van de ringdijk omheen het uitbreidingsgebied is er een afname van de zoetwaterstijghoogte (negatieve toename in donkerblauwe kleur). Dit is het gevolg dat het onttrokken debiet aan zout water in het onderste gedeelte van de freatische aquifer er iets te groot is. Zoals hierboven reeds vermeld kan enkel door een gedetailleerd aanvullend veldonderzoek bepaald worden hoe het onttrokken debiet er vermindert kan worden zodanig dat deze afname van de zoetwaterstijghoogte kan geminimaliseerd worden zonder het gevaar te lopen van een laterale uitbreiding van de zoutwaterkwelzone in het aangrenzende poldergebied.

Figuren 5.34 en 5.35 tonen de toename van het zoutwaterpercentage in modellaag 1 t.g.v. de Zwinuitbreiding met 120 ha en met milderende maatregelen na respectievelijk 10 en 30 jaar. In deze figuren is ten westen van het uitbreidingsgebied verzoeting opgetreden (negatieve toename van het zoutwaterpercentage in de blauwe kleur). Deze verzoeting neemt toe in de loop van de tijd. Ten zuidoosten van het uitbreidingsgebied is er in de loop van de tijd een uitbreiding van de zoutwaterkwelzone. Deze uitbreiding is het gevolg van het feit dat het ingevoerde onttrokken debiet op deze plaats te klein is, d.i. t.g.v. van de grote horizontale zoetwaterstijghoogtegradiënt tussen het uitbreidingsgebied en het Uitwateringskanaal naar de Wielingen. Ook hier kan dit grotere optimale debiet bepaald worden door een gedetailleerd aanvullend veldonderzoek.

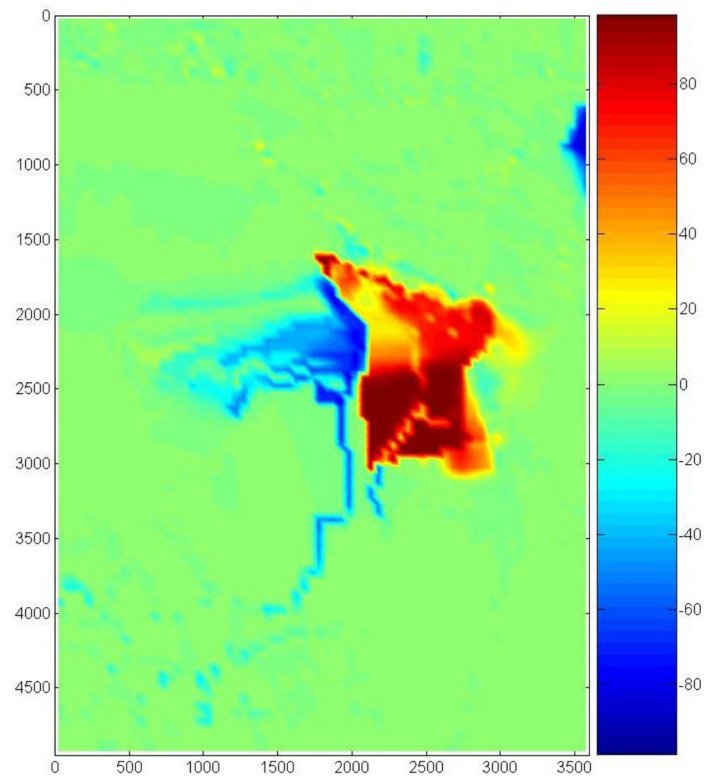




Figuur 5.33 Toename in zoetwaterstijghoogte (in m) in modellaag 1 na 30 jaar t.g.v. de Zwinuitbreiding van 120ha en met de milderende maatregelen van diepe drainage (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.34 Toename van zoutwaterpercentage in modellaag 1 na 10 jaar t.g.v. de Zwinuitbreiding met 120ha en met de milderende maatregelen van diepe drainage (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).

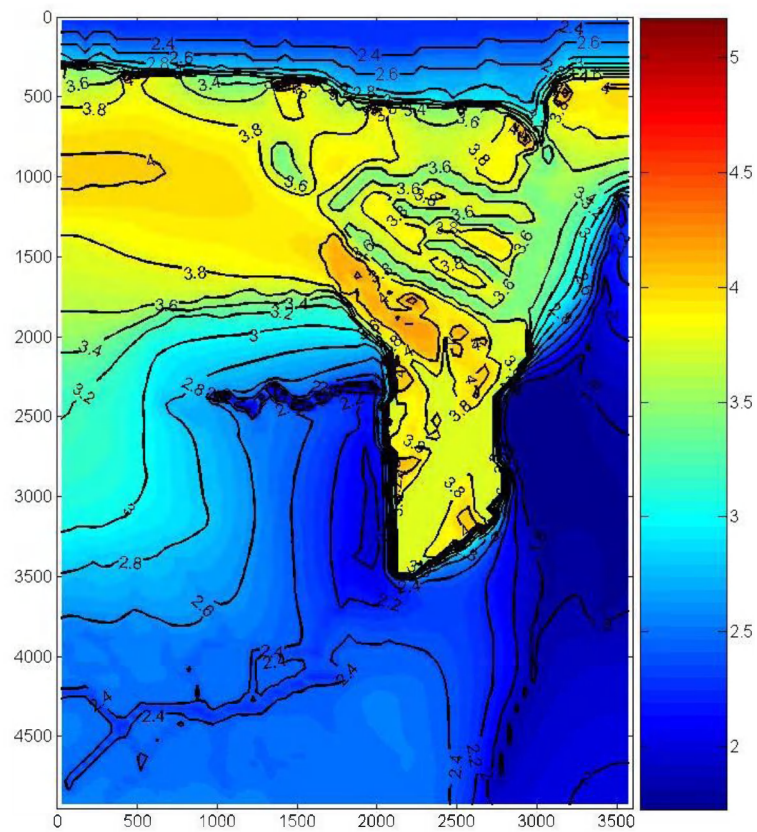


Figuur 5.35 Toename in zoutwaterpercentage in modellaag 1 na 30 jaar t.g.v. de Zwinuitbreiding met 120ha en met de milderende maatregelen van diepe drainage (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).

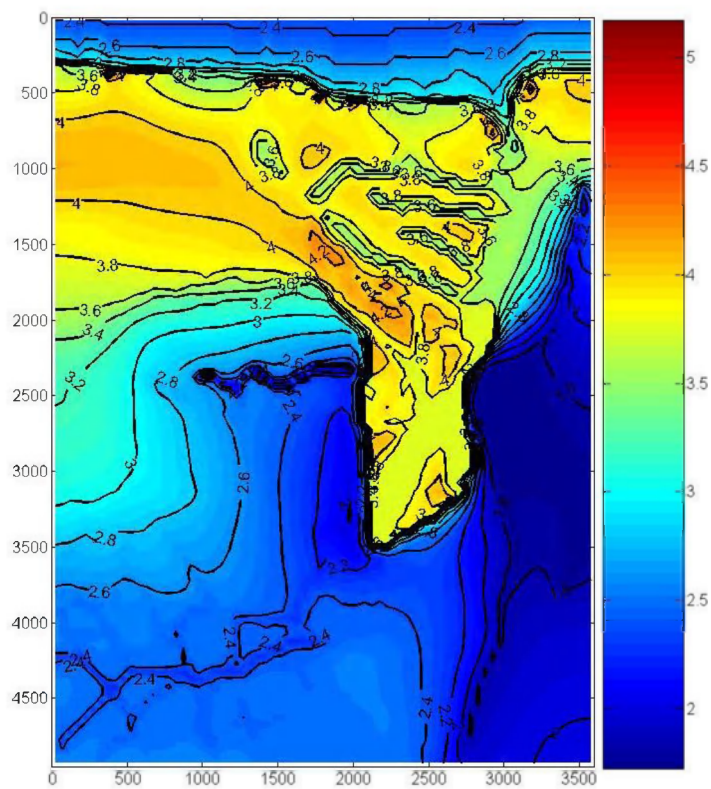
5.6.3 Zoetwaterstijghoogtes en zoutwaterpercentages bij uitbreiding met 180 ha

Figuren 5.36 en 5.37 geven de zoetwaterstijghoogtes in modellaag 1 na respectievelijk 10 en 30 jaar na de Zwinuitbreiding met 180 ha en met de milderende maatregelen van de diepe drainage. Langs de buitenrand van de westelijke helft van de ringdijken omheen het uitbreidingsgebied is de stijghoogte door het pompen verlaagd.

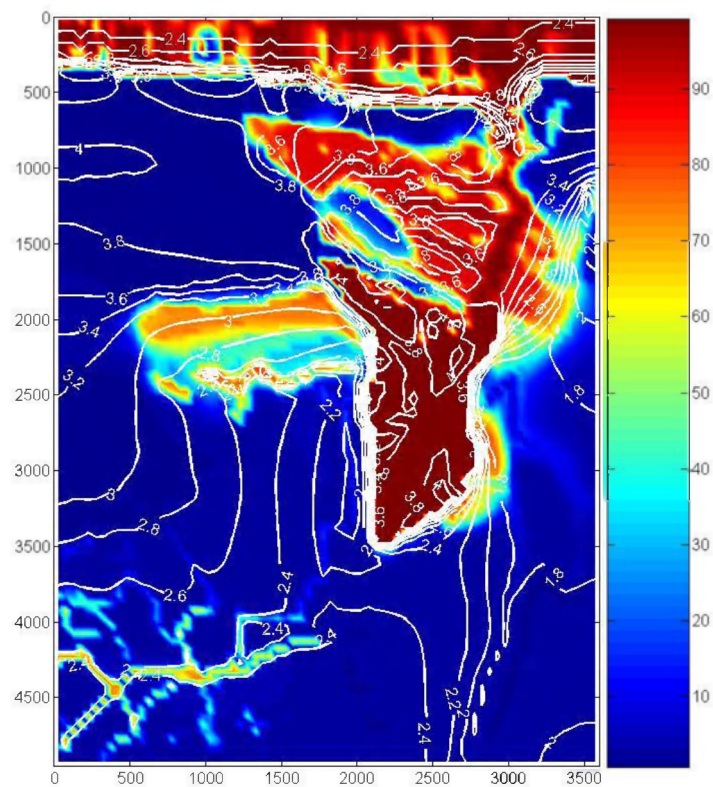
De figuren 5.38 en 5.39 tonen de zoet/zoutwaterverdeling en de zoetwaterstijghoogte respectievelijk na 10 en 30 jaar na de Zwinuitbreiding met 180 ha en met milderende maatregel van de diepe drainage. Uit deze figuren kan afgeleid worden dat het bedwingen van de laterale verbreiding van het infiltrerende zoutwater onder de oostelijke helft van de ringdijk reeds geringer is dan bij de simulatie van de Zwinuitbreiding met 120 ha en met milderende maatregelen. Hieruit blijkt dus dat in deze simulatie er nog steeds een te kleine onttrekking is onder dit gedeelte van de ringdijk.



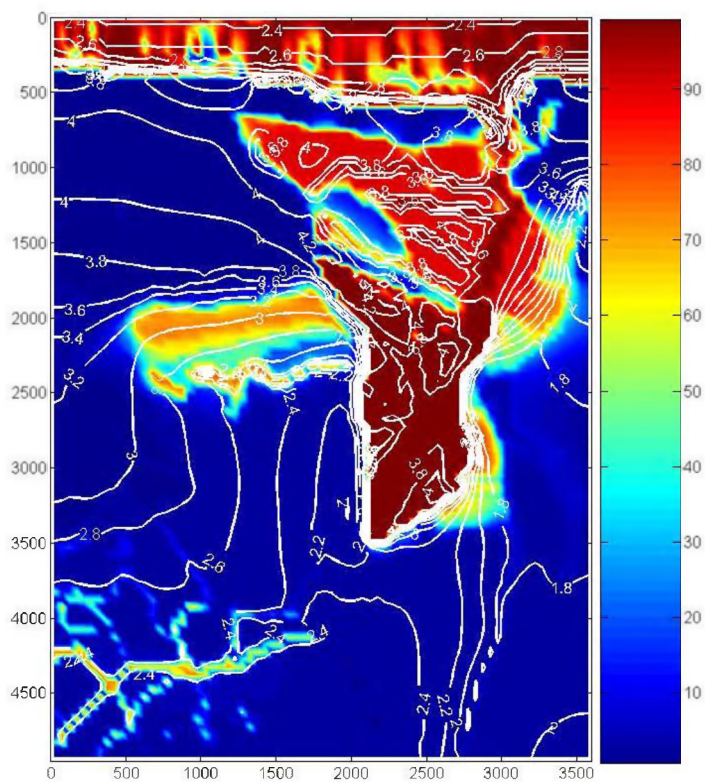
Figuur 5.36 Zoetwaterstijghoogtes na 10 jaar Zwinuitbreiding met 180 ha en met milderende maatregelen van diepe drainage (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.37 Zoetwaterstijghoogtes in modellaag 1 en dit na 30 jaar Zwinuitbreiding met 180 ha en met de milderende maatregelen van de diepe drainage (kleurschaal, d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.38 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) met Zwinuitbreiding van 180 ha en met milderende maatregel van de diepe drainage na 10 jaar. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water).

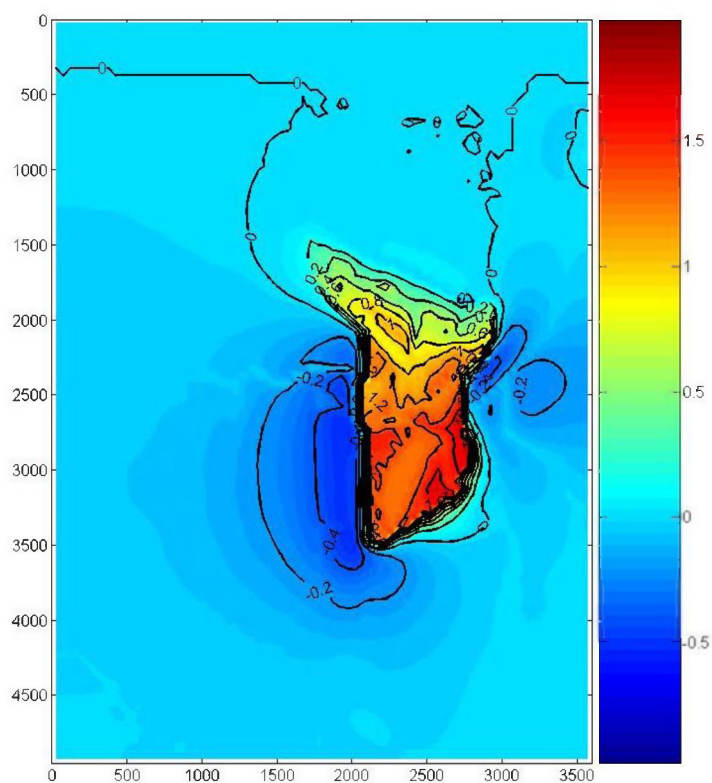


Figuur 5.39 Horizontale doorsnede volgens laag 1 (1.5 mTAW) met Zwinuitbreiding van 180 ha en met de milderende maatregel van diepe drainage na 30 jaar. Kleurenschaal geeft zoutwaterpercentages weer (blauw 0% = zoet water, rood 100% = zout water).

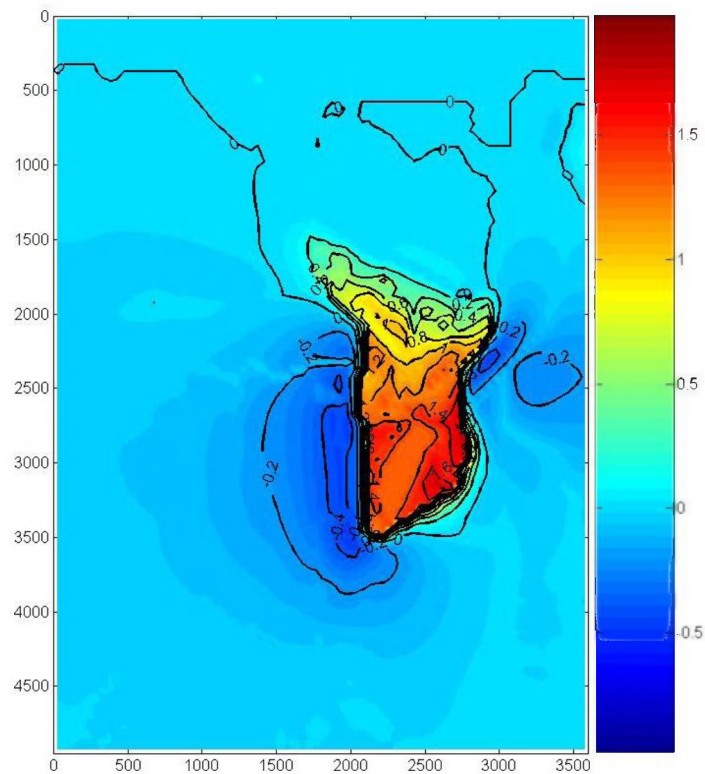
5.6.4 Toename van zoetwaterstijghoogtes en zoutwaterpercentages bij uitbreiding met 180 ha

Figuren 5.40 en 5.41 tonen de toename van de zoetwaterstijghoogte in modellaag 1 t.g.v. de Zwinuitbreiding met 180 ha en met de milderende maatregel van de diepe drainage na respectievelijk 10 en 30 jaar. Dezelfde conclusies kunnen getrokken worden als voor figuren 5.32 en 5.33. Ook hier is ter hoogte van de westelijke ringdijk een afname van de zoetwaterstijghoogte (negatieve toename in donker blauwe kleur). Het ingevoerde onttrokken debiet aan zout water is er eveneens te groot. Het optimale onttrekkingsdebiet kan ook hier enkel bepaald worden door een gedetailleerd aanvullend veldonderzoek. Dan pas kan het minimale debiet bepaald worden waardoor de zoetwaterstijghoogteverlaging kan geminimaliseerd worden waarbij nog steeds een laterale uitbreiding van de zoutwaterkwelzone in het aangrenzende poldergebied verhinderd wordt.

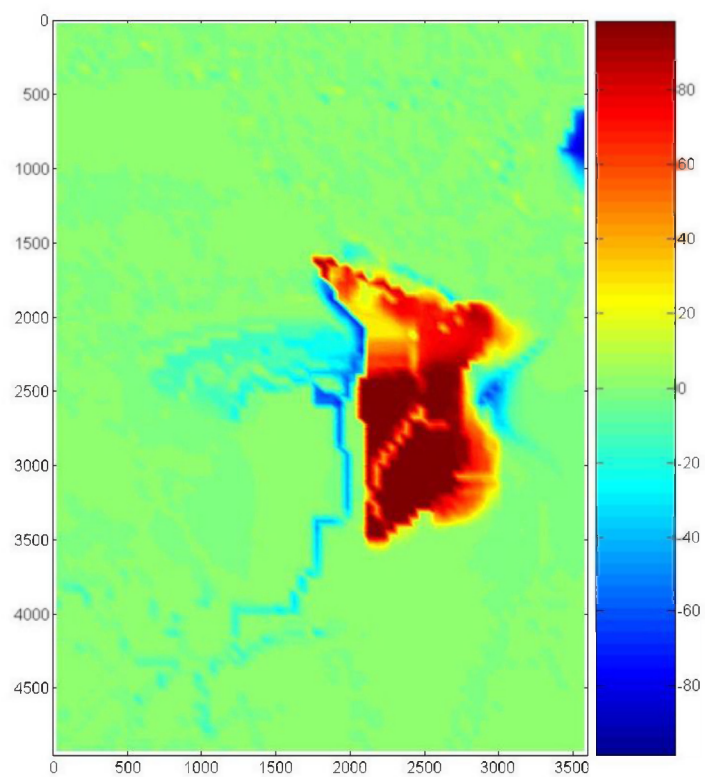
Figuren 5.42 en 5.43 tonen de toename van het zoutwaterpercentage in modellaag 1 t.g.v. de Zwinuitbreiding met 180 ha en met de milderende maatregelen van de diepe drainage na respectievelijk 10 en 30 jaar. Hetzelfde kan vastgesteld worden als bij figuren 5.34 en 5.35 met als enige verschil dat er verzoeting optreedt ten noordoosten van het uit te breiden gebied.



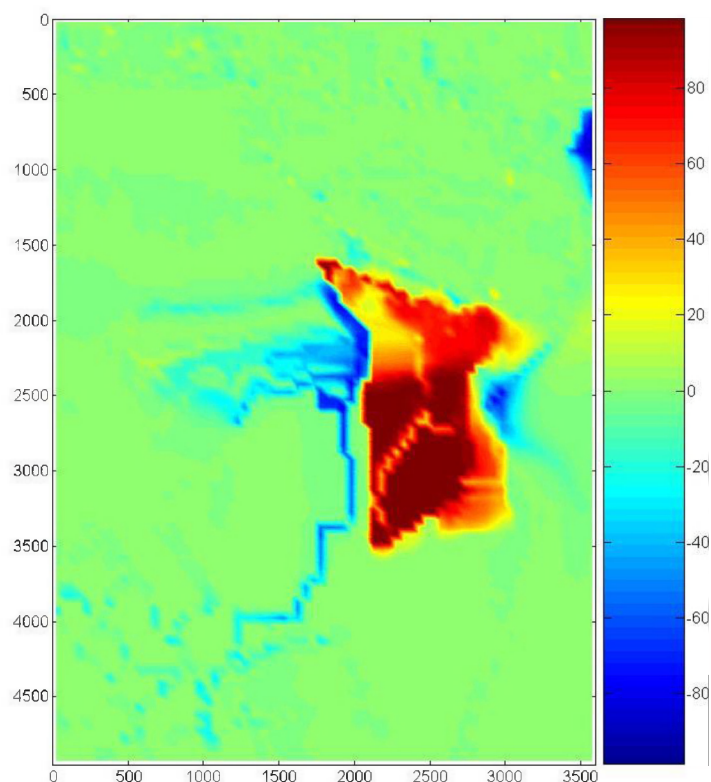
Figuur 5.40 Toename in zoetwaterstijghoogte (in m) in modellaag 1 na 10 jaar Zwinuitbreiding met 180ha en met de milderende maatregel van diepe drainage (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.41 Toename in zoetwaterstijghoogte (in m) in modellaag 1 na 30 jaar Zwinuitbreiding met 180ha en met de milderende maatregel van de diepe drainage (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.42 Toename in zoutwaterpercentage in modellaag 1 na 10 jaar Zwinuitbreiding met 180ha en met de milderende maatregel van de diepe drainage (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).



Figuur 5.43 Toename in zoutwaterpercentage in modellaag 1 na 30 jaar Zwinuitbreiding met 180ha en met de milderende maatregel van de diepe drainage (kleurschaal), d.i. op het 1.5mTAW niveau (x- en y-coördinaten in m).

6. Interpretatie van de modelresultaten naar verwachte effecten op de landbouwgewassen

6.1 Inleiding

Op basis van de modelresultaten is het mogelijk om een inschatting te maken van de effecten van een zich in de toekomst eventueel wijzigend kwaliteit en regime van het ondiepe grondwater op de gebruikelijke landbouwteelten in het studiegebied. Het betreft meer in het bijzonder de effecten van een eventuele verzilting op verschillende relevante landbouwgewassen in het bijzonder graanteelten (tarwe) en consumptieardappelen. Volledigheidshalve zullen ook de gras- en maïsteelt en voeder- en suikerbieten worden beschouwd.

Om de eventuele verziltingseffecten te kunnen inschatten is het van belang om te weten vanaf welke zoutconcentratie schade te verwachten is bij de verschillende gewassen, en hoe deze beperkt of voorkomen kan worden. Daarom zal voor elk van deze teelten, op basis van de huidige beschikbare informatie (o.a. van Dam et al., 2007), een overzicht worden gegeven vanaf welke concentraties aan Na^+Cl^- in het grondwater schade mag verwacht worden en wat de verwachte opbrengstderving is voor een gegeven schadeklasse. Daarbij zal gepoogd worden om gradaties aan te brengen in de schade-effecten indien dit mogelijk is bv. hoe varieert de kwaliteit en/of de groei van het gewas volgens de zoutconcentratie. Waar geen kennis voor handen is, zal dit ook duidelijk worden aangegeven.

In een tweede stap zullen deze resultaten gebruikt worden om te toetsen aan de verschillende modeluitkomsten. Per relevant tijdstip zal een cartografische analyse gebeuren van het studiegebied voor wat betreft de geschiktheid ervan voor de beschouwde landbouwgewassen in relatie tot de berekende zoutconcentraties op basis van de modelstudie. Deze kaarten zullen, per teeltgroep, toelaten om, in vergelijking tot een situatie zonder uitbreiding van het Zwin, een kwantitatieve inschatting te maken van de oppervlaktes met risico op opbrengstderving of de onmogelijkheid tot het verbouwen

van bepaalde teelten. Daarnaast zal een gelijkaardige analyse gebeuren voor een situatie met mitigerende maatregelen ten aanzien van de ingreep.

Het type informatie dat zal gebruikt worden voor de geschiktheidsanalyse van het studiegebied bestaat uit de tolerantie van een selectie aan gewassen voor constante zoutgehalten in het wortelmilieu.

Tenslotte zal op beperkte schaal aangegeven worden in welke mate een eventuele verzilting ook positieve effecten kan hebben op de landbouwbedrijfsvoering i.e. door het wijzigen van teelten b.v. het inzetten op zouttolerante soorten en rassen voor specifieke marktsegmenten (lamsoor, zeekraal...). Het valt echter buiten de studieopdracht om hieromtrent economische aspecten in rekening te nemen. Het wordt eerder gezien als een mogelijke maatregel om met eventuele verzilting om te gaan.

6.2 Effecten van verzilting van het wortelmilieu

De meeste landbouwgewassen, maar ook veel wilde plantensoorten zijn niet aangepast aan groei onder zeer zoute omstandigheden. Zout water bij de wortels veroorzaakt in hoofdzaak twee problemen voor planten:

Ten eerste wordt de osmotische potentiaal van het bodemvocht verhoogd, waardoor water minder makkelijk kan worden opgenomen.

Ten tweede bevat het bodemvocht potentieel giftige ionen zoals met name natrium (Na^+) en chloride (Cl^-), of ongunstige verhoudingen tussen verschillende ionen, bv. een hoge $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ -verhouding.

Het buitensluiten van zout verkleint de toxiciteit maar vergroot het watergebrek. Opname van zouten vergemakkelijkt aanpassing van de osmotische potentiaal van de plant aan de omgeving, maar leidt tot toxiciteit en ionen-onbalans. Als planten gedurende een korte periode worden bloot gesteld aan een hoge zoutconcentratie, is watergebrek de belangrijkste beperking. Naar verwachting is dit effect gelijk voor zouttolerante en zoutgevoelige gewassen. Als planten gedurende langere tijd aan zout worden bloot gesteld, wat meestal het geval is, hopen ionen op, en is de toxiciteit het voornaamste probleem. Dan komen de verschillen in zouttolerantie naar voren. Gevoelige planten hopen sneller ionen op dan tolerante planten.

Remming van de groei treedt in het algemeen dan ook vooral op door toxiciteit van ionen. Er treedt een verlaging op van de fotosynthetische werking door watergebrek en directe schade door Cl^- . Na lange blootstelling aan zout neemt de concentratie chlorofyl per eenheid bladoppervlak af. Daarnaast wordt de wortelrespiratie verhoogd, waarschijnlijk door verhoogde uitscheiding van ionen, compartimentering van ionen in cellen of celdelen en schadeherstel aan cellen. Deze verhoogde respiratie verklaart ca. 25% van de groeiremming, de rest wordt toegeschreven aan de gereduceerde fotosynthesewerking. Ook treedt verlaging van de eiwitsynthese op. Daarnaast kunnen voedingsstoffen-gerelateerde problemen ontstaan, als gevolg van gewijzigde ionenbalansen. Er zijn in dat geval zelfde schadefenomenen te zien als het geval is bij een gebrekkige aanwezigheid van de mineralen in kwestie.

Uit tabel 6.1 blijken aanzienlijke verschillen in zouttolerantie tussen gewassen. Binnen een gewas kunnen er ook verschillen zijn tussen cultivars en daarnaast verandert de tolerantie tijdens de ontwikkeling van de plant. Bijvoorbeeld suikerbieten zijn tijdens het grootste deel van hun levenscyclus behoorlijk zouttolerant, maar juist gevoelig tijdens de kieming. Maar zelfs binnen eenzelfde soort kan het lastig zijn om te veralgemenen m.b.t. verandering in zouttolerantie tijdens de ontwikkeling. Dit aspect maakt het lastig zoutschadedrempels en -functies tijdens de hele ontwikkeling te vertalen naar schaderelaties bij tijdelijke blootstelling.

Ter conclusie zullen modelresultaten noodzakelijk met de nodige omzichtigheid moeten geïnterpreteerd worden. We zullen daarom in eerste instantie, op basis van de modelresultaten, binnen het studiegebied zones afbakenen waar zoutgevoeligheid een rol kan spelen en aangeven welke teelten risicovol zijn door een overzicht te presenteren van de zouttolerantie van representatieve teelten.

De interpretatie van de modeluitkomsten in functie van praktische teeltmogelijkheden zal best gebeuren op basis van een becommentarieerde vergelijking van de modeluitkomsten onder de huidige situatie (2009).

6.3 Zouttolerantie bij gelijkblijvende zoutconcentratie in het wortelmilieu

In tabel 6.1 zijn een aantal landbouwgewassen opgenomen die vaak in het studiegebied worden verbouwd (tarwe, aardappelen) of die vandaag een belangrijk aandeel hebben in het geheel van landbouwteelten (gras, maïs, suiker- en voederbieten) .

De gevoeligheid van deze gewassen voor zout in het wortelmilieu verschilt aanzienlijk. Om de zoutgevoeligheid van gewassen te karakteriseren is een *shadedrempel* en een *schadefunctie* vastgesteld.

De shadedrempel is het chloridegehalte of de EC waaronder géén schade aan het gewas optreedt. De schadefunctie geeft aan hoe de gewasopbrengst of –kwaliteit afneemt bij toenemende chlorideconcentratie of de EC. Er wordt een lineair verband verondersteld. De schadefunctie is weergegeven in gewichtsprocenten van de opbrengst per eenheid toename van de EC (in decisiemens per m) of per 100 mg per liter toename van de chloridenconcentratie.

De shadedrempels en schadefuncties zijn in proeven vastgesteld in relatie tot de EC of chloridenconcentratie in bodemvocht.

Landbouwgewassen kunnen ook ingedeeld worden in categorieën van zoutgevoeligheid (Maas 1985). Het gaat hier eveneens om gevoeligheid voor zout in het wortelmilieu. Er is geen rekening gehouden met gevoeligheid voor zout water op het blad. De zoutgevoeligheidsklassen geven in functie van de conductiviteit de grenzen aan waarbinnen een bepaald gewas nog kan groeien, eventueel met opbrengstverlies.

Gewas	mg Cl per l	% opbrengstderving per mg/l	EC (dS/m)	% opbrengstderving per EC	categorie zoutgevoeligheid
Grasland	3606	0.0078	14	3	MT
Wintertarwe	3947	0.0072	15	2.8	T
Zomertarwe	3947	0.0072	15	2.8	T
Zomertarwe			18.2	3.6	
Wintergerst	5754	0.0046	20	2	T
Zomergerst	5754	0.0046	20	2	T
Zomergerst			31	1.4	
Triticale	4034	0.0022	15.3	1	T
Consumptieaardappelen	756	0.0163	4.3	4.8	MS
Suikerbieten	4831	0.0057	17.5	2.4	MT
Suikerbieten			6.5	1.9	
Voederbieten			17.5	2.4	MT
Snijmaïs	815	0.0091	4.5	3	MS
Korrelmaïs	756	0.0163	4.3	4.8	MS
Vlas	756	0.019	4.3	4.8	MS
Plantui			1.2	16	S

Tabel 6.1. Zouttolerantie van enkele relevante landbouwgewassen voor het studiegebied.

Met “Gewas” wordt de onderscheiden categorie van teelt aangeduid. De shadedrempel en schadefunctie m.b.t. bodemvocht worden zowel weergegeven in functie van (gemeten) chloorconcentraties in het bodemvocht in mg Cl per liter en in functie van de elektrische conductiviteit (EC). Met Ec uitgedrukt in dS (deci-Siemens) per meter. De categorie zoutgevoeligheid wordt op basis van 5 onderscheiden klassen (Maas, 1985) als volgt aangeduid: S: gevoelig ($EC < 7 \text{ dS/m}$), MS – matig gevoelig ($EC < 16 \text{ dS/m}$), MT – matig tolerant ($EC < 25 \text{ dS/m}$), T – tolerant ($EC < 30 \text{ dS/m}$), en ongeschikt voor gewassen

6.4 Zouttolerantie in relatie tot de modelresultaten

6.4.1 Hydrologisch model huidige situatie en landbouwteelten 2009 in het studiegebied

In het teeltseizoen 2009 zijn naar oppervlaktebezetting twee teelten dominant: consumptieaardappelen en wintertarwe. Verder is in de meest noordelijke zone een perceel plantui aanwezig en in de zuidwestelijke rand van het studiegebied (langs de Schapersdijk) is weiland aanwezig en een zeer geringe oppervlakte maïs. Er is voor wat de twee hoofdteelten betreft, geen differentiatie in het grondgebruik in functie van de berekende zoutconcentraties in de bodem. Men zou immers op basis van de modeluitkomsten enerzijds en de gevoeligheid van aardappelen anderzijds kunnen verwachten dat aardappelen niet zouden (kunnen) verbouwd worden in de matig verzilte gronden (114 ha) ten noorden van het radiogeleidingsstation Costa en de zuidwest-noordoost verlopende watergang (tabel 6.2 + model + kaart 1 – verziltingsrisico 2009). Dit blijkt volgens onze terreinwaarnemingen niet het geval te zijn.

Gewas + tijdstip	Drempel mg Cl per l	Berekend mg Cl per l	Verschil	Schadefunctie	Opbrengst derving %
2009	50% Cl (modelresult)				
Wintergerst	5754	7700	1946	0.0046	9
Wintertarwe	3947	7700	3753	0.0072	27
Snijmaïs	815	7700	6885	0.0091	63
Suikerbieten	4831	7700	2869	0.0057	16
Aardappelen	756	7700	6944	0,0163	113
zoutctr > 10 jaar	70% Cl (modelresult)				
Wintergerst	5754	10780	5026	0.0046	23
Wintertarwe	3947	10780	6833	0.0072	49
Snijmaïs	815	10780	9965	0.0091	91
Suikerbieten	4831	10780	5949	0.0057	34
zoutctr > 50 jaar	70% Cl (modelresult)				
Wintergerst	5754	10780	5026	0.0046	23
Wintertarwe	3947	10780	6833	0.0072	49
Snijmaïs	815	10780	9965	0.0091	91
Suikerbieten	4831	10780	5949	0.0057	34
zoutctr > 50 jaar	85% Cl (modelresult)				
Wintergerst	5754	13090	7336	0.0046	34
Wintertarwe	3947	13090	9143	0.0072	66
Snijmaïs	815	13090	12275	0.0091	112
Suikerbieten	4831	13090	8259	0.0057	47

Tabel 6.2. Berekende opbrengstderving voor een aantal teelten in de zones in verziltingsgevoelige zones van het studiegebied, op basis van de hydrologische modeluitkomsten voor resp. de huidige situatie (2009), de situatie met uitbreiding 120ha na 10 resp. 50 jaar. De opbrengstderving werd berekend op basis van de schadefunctie die vermenigvuldigd wordt met het verschil tussen schadedrempel en NaCl-concentratie in het bodemvocht (hier volgens het model).

In de veronderstelling dat zout water, met de berekende hoeveelheden, in het wortelmilieu aanwezig is, mag nochtans verondersteld worden dat zeker in het geval van consumptieaardappelen en plantui dit tot zware opbrengstverliezen zou leiden. Dit lijkt voorsnog niet het geval te zijn. Ook voor een zelfde teelt werden medio juni 2009, in het studiegebied geen waarneembare verschillen in gewasgroei vastgesteld tussen teelten verbouwd ten noorden van Costa (met verhoogde zoutconcentratie) en ten zuiden hiervan.

Mogelijke verklaringen voor deze schijnbare contradictie zijn de volgende:

- De gebruikte schadedrempels zijn indicatieve waarden waarop een zekere “foutenmarge” zit, die ondermeer te maken heeft met bv. rasverschillen (zie 6.2), proefomstandigheden (in vergelijking tot situatie doelgebied). Tevens gaan deze drempelwaarden uit van de permanente aanwezigheid van zout water in het wortelmilieu. De wortelzone situeert zich voor de beschouwde gewassen tussen ca. 0 en 50 cm. Deze zone wordt door het gebruikte model niet in beeld gebracht omdat ze in het studiegebied doorgaans onverzadigd is aan (grond)water. Het water dat in de bodemporiën, door capillaire werking, aanwezig is, is meestal zoet maar kan onder “extreme omstandigheden” bv. lange droogte perioden of te sterk doorgevoerde drainage toch zout zijn. Op dat moment zal zoutstress optreden met schade voor het gewas als gevolg.
- In de praktijk blijken zout en zoet water niet zomaar te vermengen; vaak vormt zich onder invloed van hemelwater, een zoet waterlens bovenop het zout water. De zoutconcentratie in de wortelzone is daardoor in het studiegebied meestal zeer laag of onbestaande. Zoals al aangegeven is het precies de aanwezigheid van deze zoetwaterlens die toelaat om zelfs boven ondiep verzilte grondlagen nog landbouw te bedrijven. Echter houdt het ondiep aanwezig zijn van zout grondwater risico's in. De modeluitkomsten in het bijzonder deze voor laag 1,5 m TAW, geven duidelijk aan waar zich de huidige risicozones voor verziltingseffecten bevinden.

6.4.2 Landbouwteelten in relatie tot het hydrologisch model voor enkele toekomstige situaties

6.4.2.1 Uitbreiding Zwin en de mogelijke effecten ervan na 30 jaar op een selectie van landbouwteelten

Dertig jaar na de uitbreiding van het Zwin, zonder mitigerende maatregelen, zal, volgens het hydrologisch model, zich in een aanzienlijk deel van de Hazegraspolder in de ondiepe grondlagen zout water bevinden (1,5 mTAW). Ten noorden van Costa is de zoutconcentratie verder toegenomen tot ca 60-80% (9240 – 12320 mg/l Cl⁻). Ten zuiden hiervan heeft zich als gevolg van de Zwinuitbreiding een nieuwe ondiep verzilte zone ontwikkeld. De zoutconcentratie bedraagt er ca 50% (7700 mg/l Cl⁻) met uitschieters tot meer dan 70% (10780 mg/l Cl⁻) tegen de toekomstige nieuwe zeedijk.

Naast de toegenomen verzilting van het ondiepe grondwater, is er in het meest oostelijk deel van de polder een toename van de zoetwater stijghoogte met 20 tot 50 cm. De zoetwaterlens komt in die zone hoger in het terrein te zitten.

Voor de landbouwvoering betekent de toegenomen hoeveelheid ondiep zout grondwater ondermeer:

- Een groter risico op zoutschade over een groter deel van de polder.
- Een groter risico op zoutschade door de toegenomen concentratie.

De vernatting van het oostelijk deel van de polder houdt tevens een verhoogde kans in op verminderde opbrengst door verdichting van de bouwvoor door het berijden van de bodem onder natte(re) omstandigheden. Tevens bestaat het risico dat door een ondoordachte drainagereflex zout grondwater toch in het wortelmilieu terecht komt.

Een precieze inschatting van de verwachte rendementsverliezen is moeilijk omdat deze van jaar tot jaar zullen verschillen ondermeer in relatie tot de weersomstandigheden. Volgens de huidige prognoses neemt het risico op extreme weersomstandigheden ten gevolge van de klimaatwijziging toe. Wanneer er meer en langere perioden van droogte zullen zijn, zal het risico op zoutschade toenemen omdat precies dan zout water door capillariteit in het wortelmilieu kan terecht komen. Uit tabel 6.2 kan afgeleid worden wat de maximale rendementsverliezen kunnen zijn in de veronderstelling dat de opgegeven zoutconcentraties in het wortelmilieu zouden aanwezig zijn. Deze zoutconcentraties zijn afgeleid uit het hydrologisch model (laag 1 op 1,5 mTAW).

Anderzijds neemt onder perioden van langdurige natte omstandigheden in het bijzonder in het voorjaar de kans op bodemverdichting en dus de belemmering van de wortelgroei toe.

6.4.2.2 Uitbreiding Zwin en de mogelijke effecten ervan na 50 jaar op een selectie van landbouwteelten

Vijftig jaar na de uitbreiding van het Zwin, zonder mitigerende maatregelen, zal, volgens het hydrologisch model, zich over het grootste deel van de Hazegraspolder in de ondiepe grondlagen zout water bevinden (1,5 m TAW). Ten noorden van Costa is de zoutconcentratie globaal genomen gestabiliseerd rond dezelfde waarden als na 30 jaar namelijk ca 60-80% (9240 – 12320 mg/l Cl⁻). Centraal in deze zone zal lokaal een daling van de concentratie opgetreden zijn (tot ca. 30%).

Ten zuiden hiervan is de zoutconcentratie een weinig verder toegenomen tot ca 55-60% (ca 9240 mg/l Cl⁻). In het oosten, tegen de zeedijk, zal de zoutconcentratie zich stabiliseren rond de 70 % (10780 mg/l Cl⁻).

Naast de toegenomen verzilting van het ondiepe grondwater, is er in het meest oostelijk deel van de polder een toename van de zoetwater stijghoogte met 20 tot 50 cm t.a.v. de situatie na 50 jaar zonder uitbreiding. De zoetwaterlens zal in die zone hoger in het terrein komen te zitten.

De risico's voor verziltingseffecten zijn nog enigszins toegenomen ten opzichte van de onder 6.3.2.1 beschreven situatie. Onder extreme weersomstandigheden of bij ondoordachte drainage-ingrepen kunnen er ten gevolge van de verzilting of van de vernatting aanzienlijke rendementsverliezen optreden (tabel 6.2).

Op kaart 2 in bijlage is aangegeven in welke delen van het studiegebied er een verhoogd risico is voor verziltingseffecten op de landbouwgewassen. Deze zones hebben een gezamenlijke oppervlakte van 192 ha.

6.4.2.3 Uitbreiding Zwin met mitigerende maatregelen en de mogelijke effecten ervan na 50 jaar op een selectie van landbouwteelten

Onder de voorgestelde mitigerende maatregelen van hydrologische aard, zal het risico op rendementsverliezen in vergelijking tot de huidige situatie afnemen. Door de voorziene dieptepomping zal de zoutconcentratie na 50 jaar in de Hazegraspolder lager zijn dan zonder uitbreiding van het Zwin het geval zou zijn op dat moment. Ook de zoetwaterstijghoogte zal enigszins dalen, wat kan bijdragen tot een verminderd risico op bodemverdichting en rendementsverliezen ten gevolge hiervan. Globaal kan daarom verwacht worden dat in het gebied op dat moment landbouw onder gunstiger voorwaarden (afgezien van andere milieu- en andere factoren) zal kunnen bedreven worden.

6.5 Theoretisch mogelijke maatregelen om zoutschade te voorkomen of te beperken

6.5.1 Maatregelen op het niveau van het gewas

Het is bekend dat de zouttolerantie tussen cultivars enigszins kan verschillen. Echter is totnogtoe amper op deze eigenschap geselecteerd. Veredeling en genetische modificatie is echter niet evident vanwege de complexe fysiologie van zouttolerantie.

Een min of meer succesvolle route om via genetische modificatie de zouttolerantie te verhogen is verhoging van de vorming van trehalose in de cellen. Deze suiker beschermt de cel tegen een verhoogd osmotisch potentiaal. De zouttolerantie van rijst werd via deze weg verhoogd. Echter een te hoog trehalose gehalte kan toxisch zijn voor de plant. Verder worden ook nog andere mogelijkheden van gen-modificatie onderzocht (hogere weerstand tegen Na⁺ en verhoging van de zoutexcretie).

Het onderzoek in deze materie staat nog in de kinderschoenen. Op korte termijn is er dus geen keuzemogelijkheid op dit niveau bij gebrek aan een markt aanbod. Echter, zoals aangegeven met tabel 6.1 bestaat er wel een aanzienlijk verschil in zouttolerantie tussen gewassoorten. Met name de granen zijn vrij zouttolerant in vergelijking tot andere teelten bv. aardappelen. Op bedrijfsniveau zou mits een doordacht teeltschema enigszins op een verhoogd verziltingsrisico kunnen ingespeeld worden. Deze mogelijkheid kent echter zowel fysische beperkingen (de zouttolerantie blijft beperkt in verhouding tot de maximaal berekende zoutconcentraties in het wortelmilieu) als bedrijfseconomische beperkingen (op het niveau van individuele bedrijven)

6.5.2 Maatregelen op het niveau van het teeltsysteem

Naast de onder 6.4.1 vermelde teeltplanning is de zorg voor goede groeiomstandigheden een ander belangrijk aandachtspunt. Indien een goede bodemstructuur en voldoende nutriënten (extra bemesting) aanwezig zijn, zullen minder groeiremmingen en gewasopbrengsten optreden.

6.5.3 Maatregelen op het niveau van de landbouwvoering

Een minder voor de hand liggende optie, is de volledige omschakeling van gangbare teelten naar deze van specifiek zouttolerante gewassen met name bv. Lamsoor en Zeekraal die als delicatessen kunnen verkocht worden. Dit alternatief heeft alleen maar perspectief als er voor deze gewassen een bredere markt kan gecreëerd worden.

7 Conclusie

In de huidige situatie wordt vastgesteld dat er reeds verzilting aanwezig is in het noorden van de Nieuwe Hazebraspolder. In de toekomst zal deze verzilting zich verder lateraal uitbreiden indien geen mitigerende maatregelen worden voltrokken.

Bij de uitbreiding van het Zwin zal niet alleen het uitbreidingsgedeelte verzilt maar ook de Nieuwe Hazebraspolder en een kleiner gebied in het zuidoosten van het uitbreidingsgebied. De omringende gebieden worden meer beïnvloed bij uitbreiding met 180 ha dan met 120 ha. Bij het doorbreken van de Internationale dijk wordt een drempel aangelegd. De breedte en het niveau van deze drempel hebben een belangrijke invloed op het uitbreidingsgebied. Op basis van deze gekozen afmetingen wordt het dichtslippen van de opening al dan niet bevordert.

Onder de polders en in het bovenste gedeelte van de freatische aquifer wordt vastgesteld dat het zoutwaterpercentage lateraal sterk kan verschillen en over het algemeen sterk toeneemt met de diepte.

Na verschillende mogelijkheden van mitigerende maatregelen onderzocht te hebben bleek de overschakeling van de huidige ondiepe drainage naar een diepe drainage de beste methode te zijn om de laterale uitbreiding van het infiltrerende zout water in het uitbreidingsgebied naar de omgeving te verminderen. Deze laterale uitbreiding van het infiltrerende zoutwater afkomstig van de uitbreiding van het Zwin in de freatische laag kan tot in zekere mate kan bedwongen worden. Verdere studie zou moeten verricht worden naar een optimaal onttrekkingsdebiet die enerzijds de laterale uitbreiding van zout water aan de watertafel verhindert in het omringende gebied en dat anderzijds de verlaging van de watertafel tot het vereiste minimum in dit gebied beperkt.

Bij interpretatie van de modelresultaten naar verwachte effecten op de landbouwgewassen moeten de modelresultaten noodzakelijk met de nodige omzichtigheid geïnterpreteerd worden. Uit de modelresultaten van de huidige situatie enerzijds en de gevoeligheid van aanwezige gewassen anderzijds kunnen we verwachten dat deze gewassen niet zouden (kunnen) verbouwd worden in de matig verzilte gronden (114 ha) ten noorden van het radiogeleidingsstation Costa en de zuidwest-noordoost verlopende watergang. In werkelijkheid is dit niet het geval.

Na 30 jaar landbouwvoering kan op basis van de modelresultaten een groter risico op zoutschade over een groter deel van de polder en door toegenomen zoutconcentratie verwacht worden. Na 50 jaar zijn de risico's voor verziltingseffecten nog toegenomen. Rendementsverliezen kunnen niet eenvoudig ingeschat worden aangezien deze in relatie staan tot de weersomstandigheden.

Door het gebruik van de mitigerende maatregel zal het risico op rendementsverlies in vergelijking tot de huidige situatie afnemen waardoor kan verwacht worden dat in het gebied op dat moment landbouw onder gunstiger voorwaarden (afgezien van andere milieu- en andere factoren) zal kunnen bedreven worden. Er bestaan ook een aantal maatregelen op niveau van het gewas, het teeltsysteem en de landbouwvoering om zoutschade te voorkomen of te beperken.

8 Referenties

De Breuck, W., De Moor, G., Maréchal R. & Tavernier R. (1975). Diepte van het grensvlak tussen zoet en zout water in de freatische laag van het Belgische kustgebied (1963-1973). Bijlage 1 van de Proceedings of the 4th Salt Water Intrusion Meeting, Gent, Oktober 1974.

De Moor, G. & De Breuck, W. (1969). De Freatische waterlaag in het Oostelijke Kustgebied en in de Vlaamse Vallei. *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift*, 51, 3-68.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). Third Assessment Report.

Konikow, L.F., Goode, D.J. & Hornberger, G.Z. (1996). A three-dimensional method of characteristics solute transport model (MOC3D). U.S. Geological Survey. Water-Resources investigations Report, 96-4267.

Lebbe, L., Lermytte, J., Vandeveld, D. Vandenbohede, A., D'hondt, D. & Thomas, P. (2008). Salt Water Intrusion Modelling in the Flemish Coastal Plain Based on a Hydrogeological Database. Proceedings of 20th Salt water Intrusion Meeting, Florida, USA, p.286-289.

Lebbe, L. & Oude Essink, G.P. (1999). MOC DENSITY/ MOC DENS3D-code (Section 12.11). p.434-439, in Chapter 12. Survey of Computer codes and Case Histories. Eds. Sorek, S. & Pinder, G.F. in *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers, Concepts, Methods and Practices*. Eds. Bear, J., Cheng, H.-D., Herrera, I. Sorek, S. and Ouazar D. Kluwer, Academic Publishers.

Lebbe, L., Vandenbohede, A. & Waeyaert, P. (2006) - Verfijning van de HCOV-indeling van het Kust- en Poldersysteem en de toepassing ervan in een lokaal axi-symmetrisch model en in een 3D model voor de simulatie van de dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming ter ondersteuning van de adviesverlening voor grondwaterwinningen in de verzilte freatische aquifer, Wetenschappelijk rapport, 30 pp. Universiteit Gent i.o.v. VMM, afdeling water.

Maas, E.V. (1986). Salt tolerance of Plants. Applied Agricultural Research 12-26.

McDonald, M.G. & Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. USGS, Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, 576p.

McNeill, J.D. (1986). Geonics EM39 Borehole conductivity meter – Theory of operation. Geonics Limited technical Note TN-20.

Risch, M. & Robinson, B. (2000). Use of borehole and surface geophysics to investigate ground water quality near a road deicing salt storage facility, Valparaiso, Indiana, Water Resources Investigations Report 00-4070 USGS.

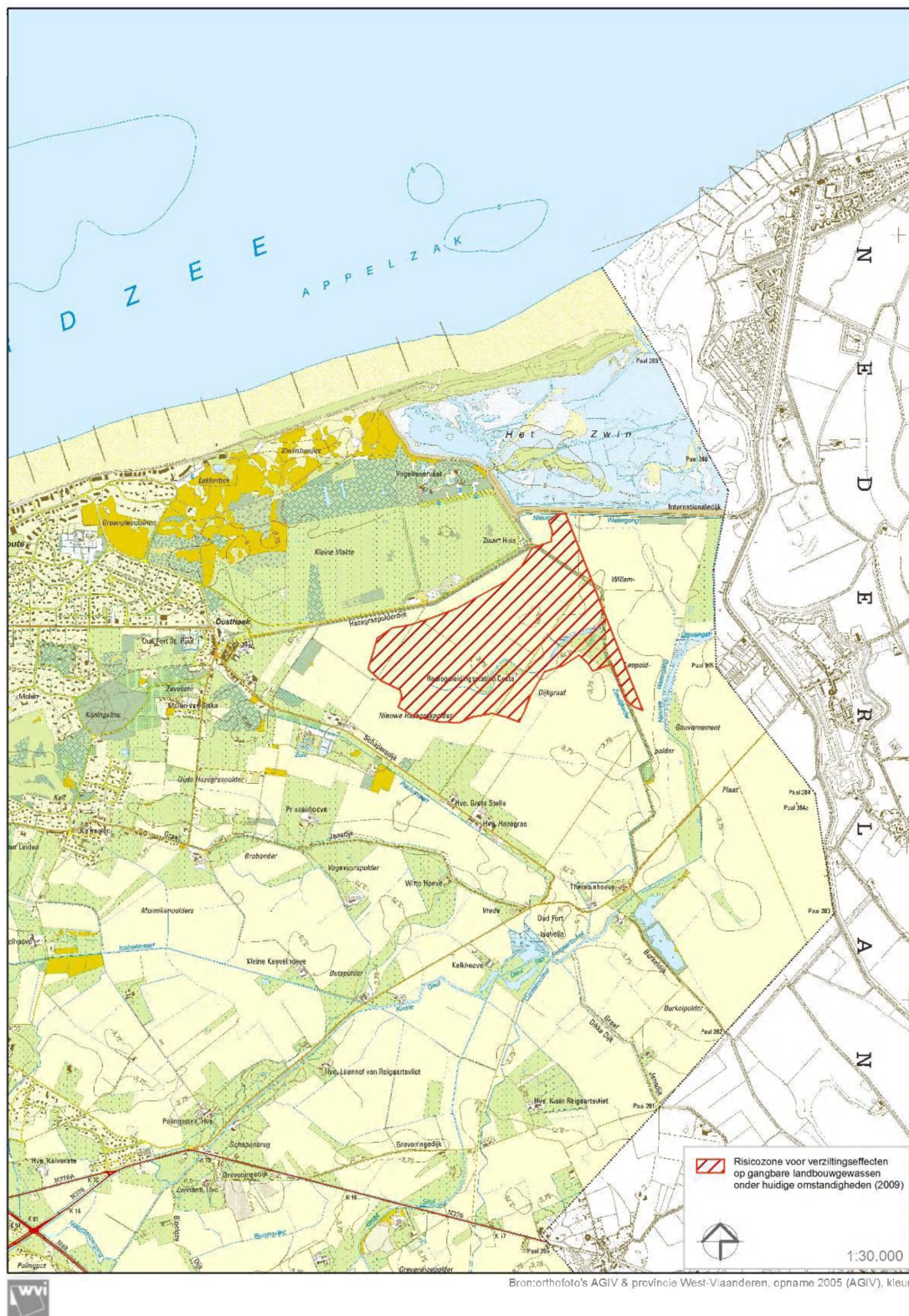
Roest, C.W.J., van Bakel, P.J.T., Smit A.A.M.F.R. (2003). Actualisering van de zouttolerantie van land- en tuinbouwgewassen ten behoeve van de berekening van de zotschade in Nederland met het RIZA-instrumentarium, Alterra 16p.

Van Dam, A.M., Clevering, W., Voogt, W. Aendekerk, Th.G.L., van der Maas M.P. (2007). Zouttolerantie van landbouwgewassen. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving – Wageningen – Lisse, rapport.

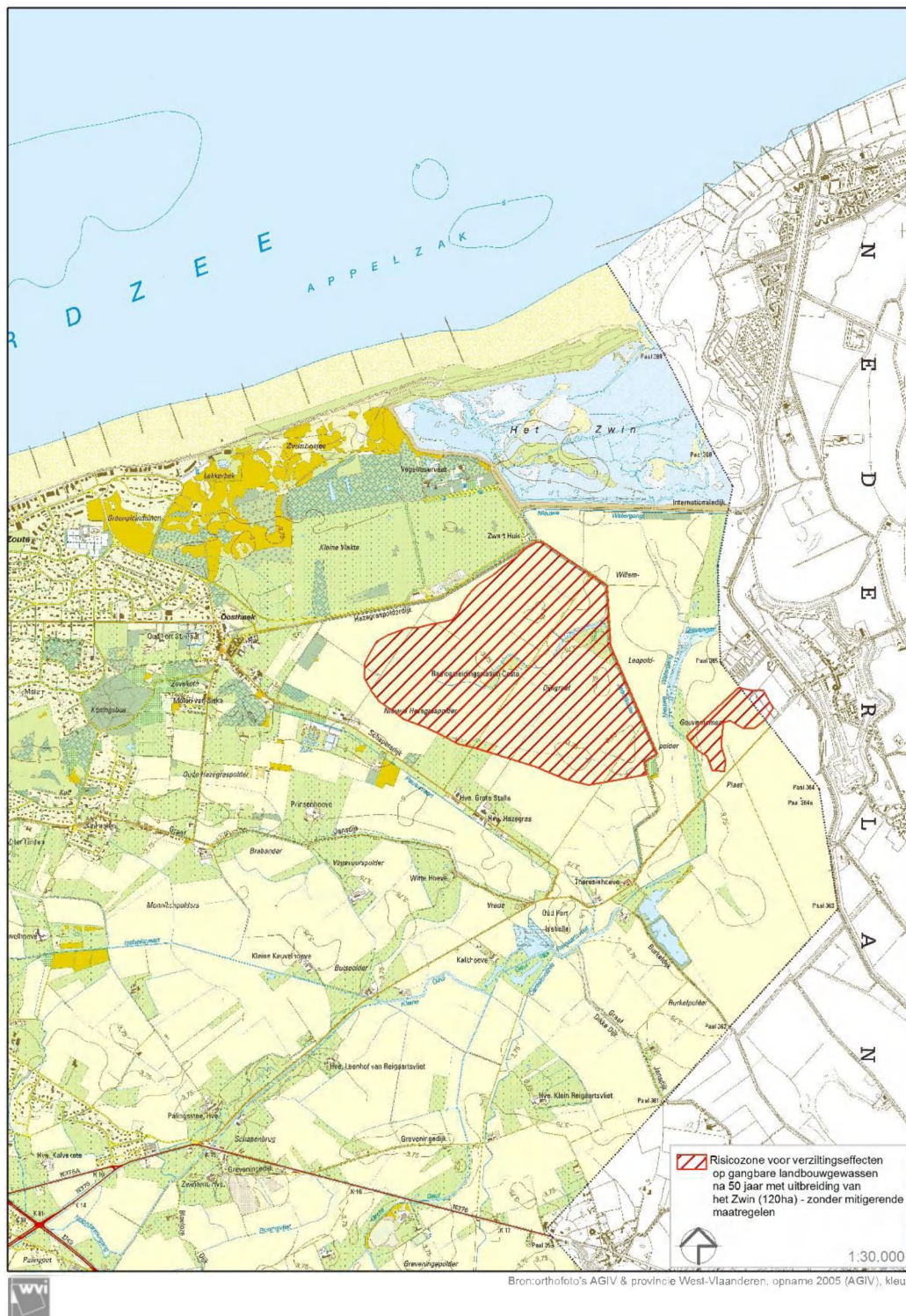
Vandenbohede, A. (2007). Visual MOC DENS3D: visualisation and processing software for MOC DENS3D, a 3D density dependent groundwater flow and solute transport model. User Manual. Research Unit Groundwater Modelling, Ghent University.

Van Meir, N. & Lebbe, L. (2002). Deriving TDS values in coarse sediments from Long Normal and electromagnetic logs. *Groundwater*, 41(1), 33-40.

9 Bijlagen: selectie van kaarten risicozone verziltingseffecten



Kaart 1: Huidige risicozone voor verziltingseffecten op landbouwgewassen volgens hydrologische modelberekeningen. In totaal bestaat er in 2009 voor 114 ha landbouwgrond een risico op opbrengstverliezen door de eventuele aanwezigheid van zout in het wortelmilieu max. 50% (7700 mg/l Cl) tot 70% (10780 mg/l Cl).



Kaart 2: Risicozone voor verziltingseffecten volgens hydrologische modelberekeningen op landbouwgewassen, na 50 jaar met uitbreiding van het Zwin (120ha) en zonder mitigerende maatregelen. In totaal bestaat er 192 ha landbouwgrond een risico op opbrengstverliezen door de eventuele aanwezigheid van zout in het wortelmilieu max. 50% (7700 mg/l Cl) tot 70% (10780 mg/l Cl).