



Universiteit Utrecht

Deltares

De invloed van gebiedseigenschappen en klimaatverandering op de dikte en vorm van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland

Een 3D modelstudie op perceelsschaal

Bernard Voortman

Titel

De dynamiek van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland

Opdrachtgever

Provincie Zeeland

Pagina's

56

Samenvatting

De enige bron van zoet water in de Provincie Zeeland wordt gevormd door de accumulatie van regenwater in de ondiepe ondergrond. Door dichtheidsverschillen tussen zoet en zout water blijft geïnfiltreerd regenwater drijven op het zoute grondwater. Hierdoor ontstaan zogenaamde regenwaterlenzen. In infiltratiegebieden zijn regenwaterlenzen tientallen meters dik. Deze zoetwatervoorraden komen voornamelijk voor in kreekruigen en mogen gebruikt worden voor beregening wanneer de lens dikker is dan vijftien meter. In kwelgebieden beschermen regenwaterlenzen van enkele meters dik de wortelzone van agrarische gewassen tegen zout kwelwater. Door zeespiegelstijging en veranderingen in het neerslag- en verdampingspatroon zou de dikte van regenwaterlenzen kunnen afnemen, wat mogelijk leidt tot economische schade in de agrarische sector. Deltares onderzoekt het voorkomen en de dynamiek van regenwaterlenzen. Naast een monitoringscampagne vindt de ontwikkeling plaats van verschillende modelinstrumentaria om de effecten van klimaatverandering en mogelijke compenserende maatregelen te kwantificeren. In deze studie zijn veldmetingen en detail kennis van een gebied op Schouwen gebruikt om een lokaal 3D dichtheidsafhankelijk grondwatermodel te ontwikkelen. Het studiegebied bestaat uit een laaggelegen komgebied en een hoger gelegen kreekrug. Het grondwatermodel is gebruikt om meer inzicht te krijgen in de dynamiek van regenwaterlenzen en processen en gebiedseigenschappen die effect hebben op de vorming van regenwaterlenzen. Daarnaast is een schatting gemaakt van de effecten van klimaatverandering op de dikte van regenwaterlenzen.

Het ontwikkelde lokale grondwatermodel is eerst gebruikt om de huidige situatie te benaderen. Model berekeningen komen bijzonder goed overeen met metingen van de zoutconcentratie binnen het gebied. Door de hoogteligging van het maaiveld en opbouw van de deklaag ontstaan grote verschillen in dikte van de regenwaterlens ($Cl^- < 3000$ mg/l) tussen de kreekrug (18,75 m) en in het komgebied (1 m).

Met behulp van een gevoeligheidsanalyse is de invloed van verschillende gebiedseigenschappen en modelparameters op de dikte van regenwaterlenzen bepaald. Het doorlaatvermogen en de diepteligging van drainagebuizen hebben een groot effect op de dikte van regenwaterlenzen. Een ondiepere ligging van drainagebuizen en een kleiner doorlaatvermogen leiden tot dikkere regenwaterlenzen. De vorm van regenwaterlenzen wordt voornamelijk bepaald door bodemparameters. In gebieden met een hoge horizontale stromingsnelheid ontstaan platte regenwaterlenzen. Uit simulaties van het jaar 1976 tot 2006 blijkt dat de seizoenale dynamiek van regenwaterlenzen lager is dan de jaarlijkse dynamiek. Dit is het gevolg van grote variaties in grondwateraanvulling op jaarlijkse basis.

Twee KNMI'06 klimaatscenario's zijn gebruikt om de effecten van klimaatverandering te berekenen voor het klimaat in 2050 en 2100. Volgens het meest extreme W+ KNMI'06 klimaatscenario neemt de dikte van de regenwaterlens in de kreekrug af met 4 m (21%) in 2050 en met 7 m (37%) in 2100. De zoutconcentratie in het komgebied dicht tegen het maaiveld neemt gemiddeld toe met 4000 mg/l (90%) in 2050 en met 7000 mg/l (157%) in 2100. In 2100 is de zoutconcentratie in het komgebied voor bijna alle jaren in het zomerseizoen hoger dan 10000 mg/l. Volgens het G KNMI'06 klimaatscenario treden weinig veranderingen op in het neerslag- en verdampingspatroon waardoor de dikte van regenwaterlenzen volgens dit scenario onveranderd blijft rond het jaar 2050 en 2100.

De waarschijnlijkheid van de verschillende klimaatscenario's van het KNMI wordt tot nu toe gelijkwaardig geschat. Dit betekent dat in de toekomst de huidige situatie blijft bestaan (G scenario) of dat klimaatverandering leidt tot een substantiële afname van de zoetwatervoorraad in de ondiepe ondergrond (W+ scenario). Volgens het W+ scenario wordt de lens in de kreekrug in 2050 dunner dan 15 m waardoor de norm voor het onttrekken

Titel

De dynamiek van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland

Opdrachtgever

Provincie Zeeland

Pagina's

56

van zoet grondwater in dit gebied wordt overschreden. In vergelijkbare kreekruggen in de Provincie Zeeland is te verwachten dat klimaatverandering eenzelfde effect heeft op de zoetwatervoorraad in de ondergrond. Om de zoetwatervoorziening in de Provincie Zeeland te verbeteren en in te spelen op mogelijke effecten van klimaatverandering is het van belang om de groei van regenwaterlenzen in kreekruggen te bevorderen. De effecten van verschillende beheersmaatregelen op de dikte van regenwaterlenzen kunnen met het ontwikkelde perceelsmodel onderzocht worden. Ingrepen in het netwerk van drainagebuizen waarbij de afvoer van zoetwater zoveel mogelijk wordt beperkt en de freatische grondwaterstand wordt verhoogd zou de groei van regenwaterlenzen kunnen bevorderen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	mrt. 2010	Bernard Voortman					

Status

voorlopig

Dit document is een voorlopig rapport en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Inhoud

_Toc257266572

1 Inleiding	3
1.1 Achtergrond en probleemstelling	3
1.2 Doelstelling	3
1.3 Leeswijzer	4
2 Gebiedsbeschrijving	5
3 Methoden	6
3.1 Model beschrijving en modelinvoer	6
3.1.1 Randvoorwaarden	6
3.1.2 Drainage	7
3.1.3 Bodem parameters	8
3.1.4 Grondwateraanvulling	10
3.2 Gevoeligheidsanalyse	12
3.3 Opschalen naar een grotere rastercel grootte	13
3.4 Klimaatscenario's	14
4 Resultaten	17
4.1 Tijdsresolutie grondwateraanvulling	17
4.2 Benadering van het huidige systeem	18
4.3 Gevoeligheidsanalyse	23
4.4 Opschalen naar een grotere rastercel grootte	27
4.5 Effecten van klimaatverandering	28
5 Discussie	32
6 Conclusies en aanbevelingen	36
7 Referenties	37

Lijst van tabellen

- Tabel 3.1 Verticale en horizontale hydraulische doorlatendheid voor klei, veen en zand in het studiegebied. 10
- Tabel 3.2 Gewasfactoren per decade. 11
- Tabel 3.3 De verandering van model parameters tijdens de gevoeligheidsanalyse. 13
- Tabel 3.4 Procentuele verandering van de potentiële verdamping in 2050 en 2100 per maand. 15
- Tabel 4.1 Resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor het gehele perceel. 26

Lijst van figuren

- Figuur 1.1 Locatie van het onderzoeksgebied. 4
- Figuur 3.1 Lithologie in het grondwatermodel. 9
- Figuur 3.2 Gemiddelde grondwateraanvulling voor de termijn 1906-2008 op verschillende tijdschalen. 12
- Figuur 3.3 Verdelingen van de grondwateraanvulling voor de termijn 1906-2008 op verschillende tijdschalen. 12
- Figuur 3.4 Gebieden waarvoor modeluitvoer van de gevoeligheidsanalyse wordt berekend. 14
- Figuur 3.5 Neerslag in Nederland (gemiddelde van 13 stations) tussen 1906 en 2005, en de vier klimaatscenario's voor 2050 (bron: van den Hurk et al., 2006). 15
- Figuur 3.6 Jaarlijkse grondwateraanvulling (mm) voor de verschillende klimaatscenario's per referentie jaar. 16
- Figuur 4.1 De diepte van het brak-zout grensvlak voor verschillende gebieden binnen het modeldomein. 18
- Figuur 4.2 Vergelijking van de zoutconcentratie met metingen op verschillende punten in het perceel. 19
- Figuur 4.3 De gemeten en berekende zoetwaterstijghoogte voor vier verschillende locaties in het perceel op 2.2 m en 4.5 meter beneden het maaiveld. 20
- Figuur 4.4 Een vergelijking van de gemeten zoutconcentratie van een uitstroompunt van een drainagebuis en de berekende concentratie op het uitstroompunt volgens het model. 21
- Figuur 4.5 Een CEVS doorsnede in het perceel met op dezelfde locatie een doorsnede van de concentratie berekend door het model op hetzelfde moment in de tijd (maart 2007). 22
- Figuur 4.6 De gemiddelde zoutconcentratie tot zes meter beneden het maaiveld volgens het model en de gemeten gemiddelde elektromagnetische geleidbaarheid tot 6 m beneden het maaiveld. 22
- Figuur 4.7 De zwaartepuntdiepte van het bereik van de gebruikte frequenties, de bijbehorende schijnbare weerstand en de concentratie op een constante diepte volgens het model in september 2009. 23
- Figuur 4.8 Vergelijking van de diepte van het zout-brak grensvlak voor modelsimulaties op met een andere rastercel grootte. 27
- Figuur 4.9 Een 3D beeld van de zoutconcentratie van het grondwater voor de referentie simulatie en het W+ klimaatscenario. 28
- Figuur 4.10 De effecten van klimaatverandering voor het komgebied en de kreekrug voor het W+ scenario. 29
- Figuur 4.11 De effecten van klimaatverandering voor het komgebied en de kreekrug voor het G scenario. 30
- Figuur 4.12 De effecten van klimaatverandering voor het komgebied en de kreekrug voor het W+2100 en W+2100 scenario inclusief zeespiegelstijging. 31

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en probleemstelling

De geologische en hydrologische ontwikkeling van de Provincie Zeeland is in hoge mate bepaald door transgressies uit het Holoceen (Berendsen, 1997). Tijdens het Holoceen ontstond een open kust systeem waarbij zeearmen ver landinwaarts van de huidige kustlijn reikten. In deze periode ontstond een zout tot brak milieu. Het huidige grondwater in grote delen van de Provincie Zeeland heeft een hoge zoutconcentratie afkomstig van deze periode uit het Holoceen. In infiltratiegebieden waar oude, met zand opgevulde geulen tegenwoordig als kreekruigen hoog in het landschap liggen, heeft de langdurige infiltratie van regenwater geleid tot de vorming van lenzen zoet grondwater. Deze zogenaamde regenwaterlenzen drijven op het zwaardere, zoute, diepe grondwater en kunnen een dikte van tientallen meters bereiken. In kwelgebieden zijn regenwaterlenzen aanzienlijk dunner. In deze lage delen waar veen- en klei-op-veen-gebieden sterk zijn ingeklonken is de zoutconcentratie enkele meters beneden het maaiveld bijna equivalent aan zeewater (Oude Essink *et al.*, 2009). Doordat de wortelzone van gewassen in deze gebieden beschermd wordt door een dunne regenwaterlens ondervindt de agrarische sector momenteel geen gewasschade door zoute kwel.

Vanwege de hoge zoutconcentratie in het oppervlaktewater zijn regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland veelal de enige bron van zoet water. Waar lenzen in kreekruigen dikker zijn dan 15 meter mag zoet water worden onttrokken voor beregening. Deze beperkte voorraad zoet grondwater zou kunnen afnemen door veranderingen in het neerslag- en verdampingspatroon en zeespiegelstijging. Klimaatscenario's van het KNMI voorspellen een toename van de temperatuur, een toename van extreme neerslag buien, nattere winters en langere periodes van droogte in de zomer (Van den Hurk *et al.*, 2006). Vooral een toename van de verdamping zou een negatief effect kunnen hebben op de dikte van regenwaterlenzen. Daarnaast zou zeespiegelstijging kunnen leiden tot een toename van de kweldruk onder de deklaag waardoor de dikte van regenwaterlenzen zou kunnen afnemen. Deze veranderingen in het klimaat kunnen leiden tot verzilting van de wortelzone in gebieden met een dunne regenwaterlens. Naast deze directe schade door verzilting zouden zoetwatervoorraden in kreekruigen kunnen afnemen waardoor deze bronnen niet meer bruikbaar zijn voor beregening. Door beheersmaatregelen toe te passen die de vorming van regenwaterlenzen bevorderen zou de zoetwatervoorziening in de Provincie Zeeland verbeterd kunnen worden, waardoor toekomstige schade door verzilting beperkt kan blijven.

Voor een beter begrip en onderzoek naar verziltingsvraagstukken in de Provincie Zeeland is het nodig om meer inzicht te krijgen in de dynamiek van regenwaterlenzen. In opdracht van de Provincie Zeeland is op regionale schaal een 3D modelstudie uitgevoerd. Op deze schaal is de parameterisatie van kleinschalige modeleenheden die essentieel zijn voor de vorming van regenwaterlenzen, zoals sloten en drainagebuizen moeilijk. In deze studie is voor een gebied van 1 km² gelegen op Schouwen (figuur 1.1) een lokaal 3D dichtheidsafhankelijk grondwatermodel ontwikkeld. De schaal van dit model is geschikt om lokale stromingspatronen veroorzaakt door drainagebuizen en sloten te modelleren.

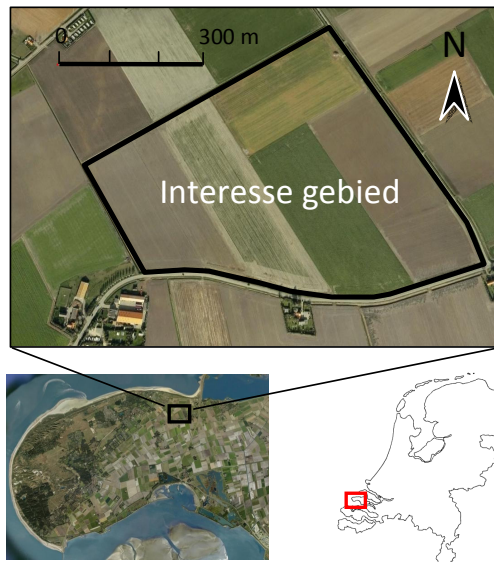
1.2 Doelstelling

Het doel van deze studie is:

- Inzicht geven in de processen en gebiedseigenschappen die de dikte en vorm van regenwaterlenzen beïnvloeden.
- Een schatting maken van de effecten van klimaatverandering op de dikte van regenwaterlenzen rond het jaar 2050 en 2100.

1.3 Leeswijzer

In het eerst volgende hoofdstuk wordt het onderzoeksgebied beschreven. Klimatologische en hydrologische eigenschappen worden beschreven met een kort overzicht van beschikbare velddata. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de toegepaste methodes. Binnen dit hoofdstuk wordt het grondwatermodel beschreven en worden verschillende keuzes omtrent model parameters toegelicht. Verder wordt beschreven hoe een gevoeligheidsanalyse is opgezet om verschillende gebiedseigenschappen en processen te onderzoeken die invloed hebben op de vorm en dikte van de regenwaterlens. In dit hoofdstuk worden ook de klimaatscenario's beschreven die zijn gebruikt om een schatting te maken van de effecten van klimaatveranderingen. In hoofdstuk 4 worden de modelresultaten gepresenteerd. Voor de huidige situatie worden modelresultaten vergeleken met veldmetingen. Na de resultaten volgt een hoofdstuk met een discussie en een interpretatie van de modelresultaten. Dit rapport eindigt met een samenvatting van de conclusies en aanbevelingen.



Figuur 1.1 Locatie van het onderzoeksgebied.

2 Gebiedsbeschrijving

Het onderzoeksgebied is gelegen op Schouwen (figuur 1.1) op een afstand 1.5 km van de kust. Het is een van de droogste gebieden van Nederland met een gemiddeld jaarlijks potentieel neerslagoverschot van 120-180 mm voor de termijn 1971-2000 (KNMI, 2003). Gewassen als suikerbieten, aardappels, uien en granen worden geteeld in dit gebied. Regionale grondwaterstroming is in zuid-oostelijke richting. Deze richting wordt veroorzaakt door de hoge zoetwaterstijghoogte in het duingebied aan de noord en west zijden van Schouwen (Vernes *et al.*, 2009).

De lithologie van de eerste 5 meter onder het maaiveld is heterogeen (appendix 6) met een groot contrast tussen het komgebied, in Zeeland ook genaamd als poelen, en kreekkrug. De kreekkrug bestaat uit zandige geulafzettingen die de Holocene deklaag van zware klei en veen hebben doorsneden (Vernes *et al.*, 2009). De kreekkrug ligt door differentiële klink hoger in het landschap (0 tot 1 m NAP) dan het komgebied (-0.7 tot -0.5 m NAP) (appendix 2).

In het interesse gebied wordt sinds 2008 de stijghoogte en de zoutconcentratie van het grondwater gemeten. Het meetnet is geïnstalleerd naar aanleiding van een uitgebreide meetcampagne naar het voorkomen van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland, die is uitgevoerd van 2006 tot 2008 (Oude Essink *et al.*, 2009). Voor het betreffende perceel is gekozen om te continueren met meten om de seizoenale dynamiek in de dikte van regenwaterlenzen te kunnen meten. Naast metingen van de stijghoogte en de zoutconcentratie van het grondwater zijn er verschillende elektromagnetische metingen verricht om binnen het perceel een ruimtelijk beeld te krijgen van de zoutverdeling in het grondwater. De geleidbaarheid van zout water is hoger dan de geleidbaarheid van zoet water waardoor met elektromagnetische metingen kwalitatief bepaald kan worden of een hoge of lage zoutconcentratie aanwezig is in het grondwater.

3 Methoden

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het grondwatermodel. Voor verschillende onderdelen van het model wordt beschreven welke bronnen zijn gebruikt en hoe ze zijn bewerkt om te dienen als invoer voor het model. Verder wordt beschreven hoe een gevoeligheidsanalyse is opgezet om verschillende gebiedseigenschappen en processen te onderzoeken die invloed hebben op de vorm en dikte van de regenwaterlens. Dit hoofdstuk eindigt met een overzicht van de klimaatscenario's die zijn gebruikt om de effecten van klimaatverandering te onderzoeken.

3.1 Model beschrijving en modelinvoer

Het 3D numerieke model is gemaakt met behulp van de MOCDENS3D rekencode. MOCDENS3D is een integratie van MODFLOW en MOC3D. Door dichtheidsverschillen uit te drukken in het drijfvermogen en deze term toe te voegen aan de grondwaterstromingsvergelijking wordt dichtheidsafhankelijke stroming gesimuleerd. MOCDENS3D maakt gebruik van de eindige-differentiemethode om de grondwaterstromingsvergelijking op te lossen en de methode der karakteristieken om stoftransport te simuleren. Advectief stof transport wordt gemodelleerd met behulp van "particle tracking" en dispersief transport met de eindige-differentiemethode (Oude Essink, 1998). De MOC module laat het niet toe om cellen in de bovenste modellagen nat en droog te laten vallen waardoor alle cellen opgegeven worden als verzadigd. Voor deze studie is gekozen om tijdsafhankelijk te rekenen.

Grondwatermodellen waarmee alleen de stroming van zoet grondwater wordt gemodelleerd rekenen met 'gewone' stijghoogten. In een situatie met zoet, brak en zout grondwater wordt echter gerekend met drukken. Opgeloste stoffen verhogen de druk waardoor dichtheidsafhankelijke stroming plaatsvindt. De meeste hydro(geo)logen vinden het werken met stijghoogten echter prettiger. Daarom is de zogenaamde equivalente *zoetwaterstijghoogte* geïntroduceerd. De zoetwaterstijghoogte is eigenlijk een fictieve parameter zonder fysische betekenis. De fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten patronen is niet gemakkelijk. Zo staan zoetwaterstijghoogten niet meer loodrecht op stroomlijnen als de dichtheid varieert, en betekent een gradiënt in zoetwaterstijghoogte niet automatisch dat er stroming van grondwater optreedt. Gemodelleerde zoetwaterstijghoogten kunnen vergeleken worden met metingen zodra gemeten stijghoogten gecorrigeerd worden voor de dichtheid van het grondwater in de peilbuis. De noodzakelijke correcties voor de dichtheid kunnen significant zijn: een filterbuis gevuld met 20 m zout grondwater heeft een equivalente zoetwaterstijghoogte van 20.5 m: een verschil van 0.5 m (Santing, 1980; Oude Essink, 2001).

De invoer van het model kan gescheiden worden in vier verschillende categorieën; randvoorwaarden, drainage, bodemparameters, en grondwateraanvulling. In de volgende paragrafen wordt per categorie beschreven hoe de modelinvoer voor deze categorieën is opgebouwd.

3.1.1 Randvoorwaarden

Om de invloed van randvoorwaarden op het interesse gebied te beperken is het modeldomein zo gekozen dat de grens van het interesse gebied in figuur 1.1 op honderd meter afstand van het modeldomein ligt. Hierdoor is de totale breedte 1010 m en de totale lengte 720 m. Dit oppervlak is verdeeld in 202x158 raster cellen van 5x5 m. In de

vertikaal bestaat het model uit 41 lagen (zie appendix 1 voor de dimensies). De laagdikte is in de bovenste lagen dunner dan in de diepere lagen om meer detail te kunnen waarnemen waar regenwaterlenzen voorkomen. De top van een slecht doorlatende laag tussen -34 en -39 m NAP van 5 tot 10 m dik (Vernes *et al.*, 2009) is genomen als basis van het modeldomein (voor eigenschappen van deze laag zie de paragraaf 3.1.2 bodemparameters). Aan de randen van het modeldomein is een zogenaamde 'general head boundary' (ghb) opgelegd. Een ghb geeft de zoetwaterstijghoogte en de zoutconcentratie aan de rand van het model. Met behulp van een weerstand kan bepaald worden in hoeverre de ghb bepalend is voor grondwaterstroming binnen het model. De opgelegde zoetwaterstijghoogte van de ghb is gebaseerd op interpolaties van peilbuismetingen uitgevoerd in de winter van 1993 en zomer van 1994 (appendix 4 en 5). Deze interpolaties laten zien dat regionale grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket in zuidoostelijke richting is. Deze richting wordt veroorzaakt door een hoge zoetwaterstijghoogte in het duingebied aan de noord en west zijden van Schouwen. Er is voor gekozen om in de zomer en winter perioden een verschillende ghb op te geven. Voor de maanden oktober, november, december, januari, februari en maart is de winter zoetwaterstijghoogte opgelegd van 1993 en in de overige maanden is de zomer zoetwaterstijghoogte van 1994 opgelegd, die ongeveer 20 cm lager ligt dan de winter zoetwaterstijghoogte.

De opgegeven concentratie aan de modelranden is bepaald aan de hand van EC metingen van observatiebuizen binnen het perceel. De EC is omgerekend naar zoutconcentratie met behulp van een calibratie curve (appendix 8). Een gemiddelde concentratie is genomen voor elke modellaag waarvoor metingen zijn verricht binnen het perceel. Dit betekent dat voor modellaag 1 t/m 9 (tot -1.7 m NAP) de zoutconcentratie kleiner is dan 1000 mg/l. Tussen modellaag 10 en 16 (tot -4 m NAP) neemt de zoutconcentratie toe tot 15000 mg/l. Voor diepere lagen wordt aangenomen dat de concentratie lineair toe neemt tot 16500 mg/l.

3.1.2 Drainage

De dimensies van sloten binnen het perceel zijn op millimeters nauwkeurig ingemeten met een DGPS instrument. Binnen het model zijn deze ingevoerd met de "river package" van MODFLOW. De diepte van de sloot, het slootpeil en het doorlaatvermogen van de slootbodem moeten hierbij worden opgegeven. Het slootpeil is gebaseerd op data van divers die het slootpeil gedurende het jaar 2008 en 2009 hebben gemeten. Er is weinig dynamiek in het slootpeil en er is geen sprake van een verschil in zomer en winter peil. Daarom is gekozen om een gemiddeld slootpeil van -1.94 m NAP op te geven voor het gehele jaar. De weerstand van de slootbodem is gemeten met kwelvangens geïnstalleerd in de sloten aan de noord- en zuidzijde van het perceel. Aan de noordzijde van het perceel is een weerstand van 38 dagen gemeten en aan de zuidzijde van het perceel is een weerstand van 1.5 dagen gemeten. Dit grote verschil wordt bepaald door de opbouw van de slootbodem. Aan de noordzijde is de kwelvangens geïnstalleerd in klei en veen en aan de zuidzijde is deze geïnstalleerd in geulafzettingen van de kreekkrug. Daarom is er gekozen om de slootbodem weerstand waar geulafzettingen van de kreekkrug aanwezig zijn op 1.5 dagen te zetten en de weerstand van overige sloten op 38 dagen te zetten. Het doorlaatvermogen van de slootbodem in vierkante meters per dag wordt berekend door het oppervlak van de slootbodem binnen een rastercel te vermenigvuldigen met de inverse van de weerstand. De breedte van sloten is ongeveer 1.5 m, en de lengte van een rastercel is 5 m. Dit komt neer op een doorlaatvermogen van 5 m²/d voor sloten in de kreekkrug en 0.2 m²/d voor sloten in de rest van het gebied.

In bijna alle percelen zijn drainagebuizen aangelegd (appendix 3). Voor de meeste percelen op een afstand van 10 meter. Op sommige percelen is deze afstand 15

meter en voor een enkel perceel is geen buisdrainage aanwezig. De locatie en de diepte van de drainage buizen is bepaald aan de hand van een kaart van een boer. De diepte ligt tussen de -1.1 m en -0.75 m beneden het maaiveld. In het perceel zijn verschillende typen drainagebuizen aanwezig van beton en pvc met een verschillende ouderdom. Het doorlaatvermogen van buisdrainage is afhankelijk van omringende formaties, vulmateriaal waarin drainagebuizen zijn aangelegd, de grote en hoeveelheid aan openingen in de buis, de frequentie van onderhoud aan de drainagebuizen en het type materiaal dat mogelijk tot verstoppingen kan leiden. Deze informatie is niet beschikbaar. Het doorlaatvermogen is gebaseerd op een aantal modeltestruns en bepaald op 0.05 m/d per meter drainagebuis. Om voor een modelcel het doorlaatvermogen te berekenen wordt deze waarde vermenigvuldigd met de lengte van de buis binnen een cel.

3.1.3 Bodem parameters

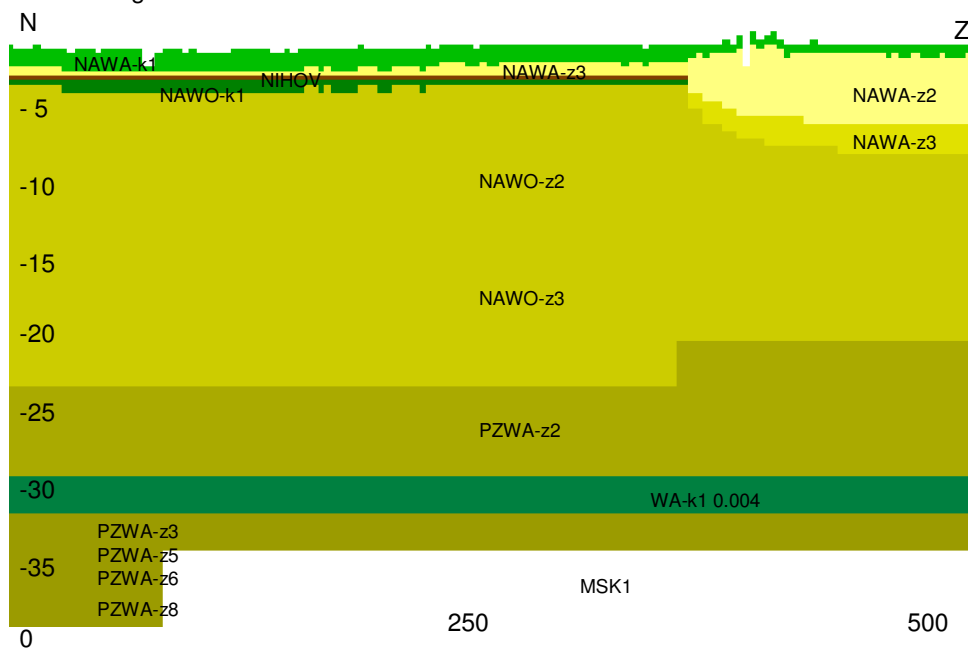
De lithologie van de diepe ondergrond is gebaseerd op het REGIS Zeeland bestand (Vernes *et al.*, 2009). Figuur 2 laat een doorsnede zien van de lithologie zoals deze is ingevoerd in het model. De formatie van Maassluis met een verticale hydraulische doorlatendheid van 0.001 m/d en een dikte van 5 tot 10 m is gekozen als ondoorlatende basis (op -34 tot -39 m NAP) en is in de figuur afwezig als formatie. Afzettingen van Peize (PZ) en Waalre (WA) komen vertand voor bovenop de formatie van Maassluis. Het top systeem bestaat uit een dik pakket van ongeveer 20 meter aan afzettingen van de Naaldwijk (NA) formatie. Geulafzettingen (NAWA-z2 en NAWA-z3) van de kreekrug komen in deze doorsnede tot een diepte van -8 m NAP. De deklaag in het komgebied bestaat uit drie verschillende formaties; de Wormer formatie, Holland veen van de Nieuwkoop formatie en afzettingen van de formatie van Waalre.

De lithologie van de Holocene deklaag (eerste vier meter van de bodem) is niet overgenomen uit het REGIS Zeeland bestand. Het REGIS Zeeland bestand is opgebouwd in rastercellen van 100x100 m. Op deze schaal wordt geen onderscheid gemaakt tussen oeverafzettingen nabij de kreekrug en worden voor sommige gebieden hoogtes opgevuld met kleiige afzettingen. Hierdoor ontstaan dikke pakketten klei in hoge gebieden nabij de kreekrug. In werkelijkheid zijn in deze hoge gebieden zandig of zavelig. Op basis van handboringen met een edelmanboor en een guts (appendix 6) is de lithologie van de deklaag bepaald. Voor hoge delen nabij de kreekrug is aangenomen dat de bodem uit meer zavel en fijn zand bestaat, zoals te zien is in appendix 6. De hydraulische doorlatendheid van deze oeverafzettingen is toegekend door de oorspronkelijke doorlatendheid volgens het REGIS Zeeland bestand met tien te vermenigvuldigen. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de verticale hydraulische doorlatendheid voor klei en veen afzettingen en de horizontale hydraulische doorlatendheid van zandige afzettingen. Voor alle formaties is de hydraulische doorlatendheid constant behalve voor Peize en Waalre (PZWA) formaties. Voor deze formaties zijn de horizontale hydraulische doorlatendheden direct uit het REGIS Zeeland bestand genomen. Met een anisotropie factor van 5 is de hydraulische doorlatendheid in de andere richting bepaald dan aangegeven in tabel 3.1. Een anisotropie factor van vijf betekent dat de hydraulische doorlatendheid in de horizontaal vijf keer groter is dan in de vertikaal.

Voor de effectieve porositeit zijn representatieve waarden opgegeven. Voor klei en veen ligt de waarde doorgaans tussen de 0.35 en 0.65 en voor zand tussen 0.2 en 0.5 (Fits, 2002). Voor dit model is een porositeit van 0.45 voor klei en veen toegekend en voor zand een porositeit van 0.3. Voor de eerste actieve cel is een freatische bergingscoëfficiënt opgegeven van 0.1 representatief voor zavel (Johnson, 1967). Door een freatische bergingscoëfficiënt op te geven voor de eerste actieve cel wordt een

onverzadigde zone geïmiteerd ondanks dat alle cellen opgegeven zijn als verzadigd. Voor de andere cellen is een elastische bergingscoëfficiënt opgegeven. Deze wordt gedefinieerd als de specifieke berging vermenigvuldigd met de modellaag dikte. Voor zand is een specifieke berging van 0.001 opgegeven en voor klei 0.0001.

Hydrodynamische dispersie veroorzaakt menging van zoet, brak en zout grondwater en bestaat uit twee processen: mechanische dispersie, veroorzaakt door variaties in effectieve snelheid op microscopische schaal, en moleculaire diffusie (willekeurige Brownse beweging van moleculen, afhankelijk van concentratie gradiënten). De longitudinale dispersiviteit is een parameter die afhankelijk is van het niveau van detail in de geologie binnen het numerieke model (Davis, 1986) en de stromingslengte van de stof (Gelhar *et al.* 1992). Als de stromingslengte toeneemt, heeft grondwater de kans om door meer verschillende formaties te stromen met een verschillende hydraulische doorlatendheid en een verschillende porositeit. Hierdoor is dispersiviteit afhankelijk van de schaal wat tot uiting komt in de verschillen tussen gemeten dispersiviteit in het lab en gemeten dispersiviteit in het veld. Uit labexperimenten blijkt de dispersiviteit meestal tussen de 0.0001 m en 0.06 m ligt (Anderson, 1979; Klotz *et al.*, 1980 en Sternberg, 2004) op veldschaal ligt deze waarde vaak een factor 2 tot 3 hoger (Anderson, 1979 en Koltz 1980). In het topsysteem, waar de interactie tussen zoet en zout grondwater plaatsvindt, zijn stromingsafstanden klein door de aanwezigheid van buisdrainage en sloten. Daarom is voor dit model gekozen om de longitudinale dispersiviteit op kleine waarde van 0.01 m te houden. De transversale dispersiviteit is een factor 10 lager.



Figuur 3.1 Lithologie in het grondwatermodel. Groene lagen zijn kleiige formaties, gele lagen zijn zandige formaties en de bruine laag in het topsysteem (nihov) is veen.

Tabel 3.1 Verticale en horizontale hydraulische doorlatendheid voor klei, veen en zand in het studiegebied.

Klei en Veen	Kv (m/d)
NAWAk1 kom	0.034
NAWAk1 oever	0.34
NAWA k1 geul	0.39
NIHO v1	0.029
NAWO k1	0.020
WA-k1	0.004
MS k1	0.001
Zand	Kh (m/d)
NAWA z2	2.520
NAWA z3 plaat	1.400
NAWA z3 geul	2.542
NAWO z2	3.300
NAWO z3	3.300
PZWA z2	6 - 10
PZWA z3 - z8	11-13

3.1.4 Grondwateraanvulling

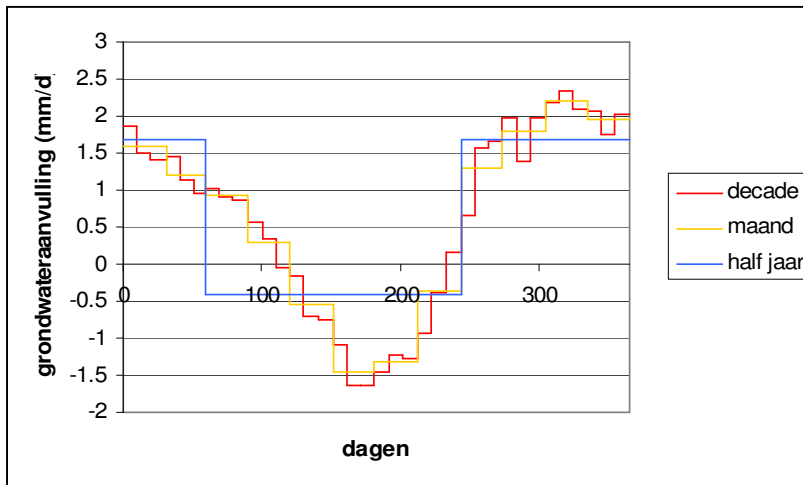
Neerslag van het KNMI klimaatstation Kerkwerpe (8 km verwijderd van het onderzoeksgebied) en de referentie gewas verdamping van het KNMI klimaatstation Wilhelminadorp (23 km verwijderd van het onderzoeksgebied) zijn gebruikt om de grondwateraanvulling te schatten. Het Kerkwerpe klimaatstation heeft sinds 1906 de neerslag gemeten in het gebied en is daarom geschikt om meerjarige scenario's van grondwateraanvulling te schatten. Het Wilhelminadorp klimaatstation is het dichtstbijzijnde station met gegevens om de Makkink referentie gewasverdamping te bepalen. Omgevingsfactoren die mede bepalend zijn voor de hoeveelheid verdamping zoals bodemtextuur (klei en zavel) en landgebruik (polder gebied en akkerbouw) van dit klimaatstation zijn vergelijkbaar met het onderzoeksgebied. Door de referentie gewasverdamping te vermenigvuldigen met een gewasfactor wordt de evapotranspiratie bepaald. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de gebruikte gewasfactoren per decade. Voor de zomermaanden is een gemiddelde gewasfactor van suikerbieten, uien, aardappels en granen genomen per decade (Hooghart en Lablans, 1988). Voor de winter maanden is de factor representatief voor een teelt van wintergranen. Door de Makkink gewasverdamping af te trekken van de neerslag wordt de grondwateraanvulling geschat. Bij deze bepaling wordt aangenomen dat verdamping niet beperkt wordt door een bodemvocht tekort in de zomer periode en er tijdens intense neerslag buien geen "surface runoff" ontstaat.

Om het huidige systeem te benaderen zijn scenario's met grondwateraanvulling van afgelopen eeuw gesimuleerd. Er zijn echter pas vanaf 1990 gegevens van de Makkink gewasverdamping beschikbaar. Daarom is gekozen om met de gemiddelde verdamping van 1990 tot 2008 te rekenen en met gemeten neerslag vanaf 1906 tot 2008. Door een gemiddelde waarde voor de verdamping te gebruiken in de bepaling van de grondwateraanvulling neemt de variabiliteit in grondwateraanvulling af. Deze afname is echter gering (appendix 7) en de variabiliteit wordt voornamelijk veroorzaakt door de variatie in neerslag. Daarnaast zijn klimaatvoorspellingen van het KNMI voor veranderingen in verdamping uitgedrukt in procentuele veranderingen ten opzichte van het gemiddelde klimaat in 1990. Daarom zijn gemiddelde waarden van de verdamping nodig om veranderingen in grondwateraanvulling in de toekomst te schatten.

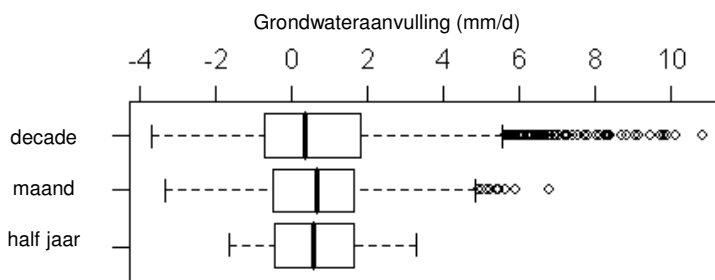
Variaties in grondwateraanvulling zorgen voor variaties in stijghoogte binnen het model. De pieken in de stijghoogte kunnen door drainagebuizen worden afgetopt of leiden tot een verandering in stromingspatroon. Bij een schatting van de grondwateraanvulling op een lange tijdschaal neemt de variatie in grondwateraanvulling af. Daarmee neemt ook de variatie in stijghoogte af binnen het model waardoor de ontwikkeling en dynamiek van regenwaterlenzen verschillend kan zijn bij berekeningen met grondwateraanvulling op een andere tijdsresolutie. Daarom is onderzocht wat het effect van een verschillende tijdsresolutie van de grondwateraanvulling is op de ontwikkeling van regenwaterlenzen voordat de gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd. Per decade, maand en halfjaar is met een opeenvolging van 2x100 jaar met de gemiddelde grondwateraanvulling van afgelopen 100 jaar en met "echte" grondwateraanvulling gerekend. In totaal zijn dit zes simulaties van 200 jaar. Figuur 3.2 laat de gemiddelde grondwateraanvulling per half jaar, maand en decade van afgelopen eeuw zien. Figuur 3.3 laat de verdeling zien van echte grondwateraanvulling van de afgelopen 100 jaar. De initiële zoutconcentratie van het grondwater tijdens deze simulaties is afgeleid van metingen in het komgebied. In dit gebied is een dunne regenwaterlens aanwezig waardoor deze modelsimulaties starten met een relatief zout grondwatersysteem.

Tabel 3.2 Gewasfactoren per decade.

januari	I	1.2	Mei	I	0.625	september	I	0.75
	II	1		II	0.725		II	0.575
	III	0.9		III	0.775		III	0.575
februari	I	0.8	Juni	I	0.95	oktober	I	0.6
	II	0.6		II	1.05		II	0.7
	III	0.6		III	1.075		III	0.8
maart	I	0.6	Juli	I	1.1	november	I	0.9
	II	0.5		II	1.025		II	1
	III	0.5		III	1		III	1
april	I	0.475	augustus	I	0.95	december	I	1
	II	0.5		II	0.95		II	1.2
	III	0.6		III	0.925		III	1.2



Figuur 3.2 Gemiddelde grondwateraanvulling voor de termijn 1906-2008 op verschillende tijdschalen.



Figuur 3.3 Verdelingen van de grondwateraanvulling voor de termijn 1906-2008 op verschillende tijdschalen. De box geeft de locatie van het eerste kwartiel en het derde kwartiel, de dikgedrukte lijn de mediaan. Met de stippellijnen is de waarde van het minimum en het maximum aangegeven. Wanneer observaties buiten 1.5 keer de interkwartielafstand van het eerste of derde kwartiel liggen worden ze beschouwd als uitschieter (cirkels).

3.2 Gevoeligheidsanalyse

Voor de gevoeligheidsanalyse zijn een groot aantal modelsimulaties gedraaid waarbij per simulatie een parameter is veranderd ten opzichte van een referentie simulatie die voornamelijk is gebaseerd op veldmetingen, beschikbare data en een aantal test runs. (zie voor resultaten van de referentie simulatie paragraaf 4.2). Voor alle simulaties is 58 jaar gerekend met een grondwateraanvulling vanaf 1950 tot 2009 waarbij het initiële zoutgehalte en de initiële zoetwaterstijghoogte gelijk is aan het systeem in 1950 volgens de referentie simulatie. Tabel 3.3 geeft een overzicht van de parameters die zijn veranderd tijdens de gevoeligheidsanalyse. De factor waarmee een parameter is veranderd, is gebaseerd op de mogelijke range van de waarde van de parameter. De parameters worden niet allen met een constante factor veranderd. De gevoeligheidsanalyse zal meer inzicht geven in de processen en eigenschappen binnen

een gebied die de vorming van regenwaterlenzen beïnvloeden. Met deze kennis kan geëvalueerd worden tot welk detail een 3D dichtheidsafhankelijk grondwatermodel op perceelsschaal opgebouwd moet worden en in hoeverre dezelfde methode toepasbaar is voor andere gebieden. Daarnaast zal deze gevoeligheidsanalyse uitwijzen welke parameters met meer zekerheid bepaald moeten worden om meer zekerheid te krijgen van de betrouwbaarheid van modeluitkomsten.

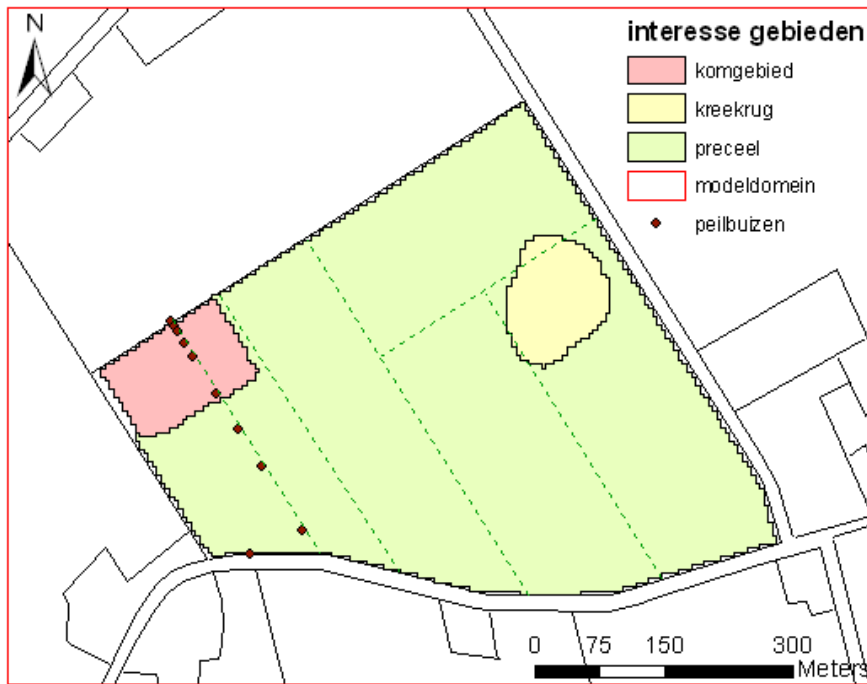
Tabel 3.3 De verandering van model parameters tijdens de gevoeligheidsanalyse

Parameter	Ondergrens	Bovengrens
Model parameters		
Doorrekenen Grondwater tijdstap	dag	decade
Bodemparameters		
Hor. hydraulische doorlatendheid Kh	/3	*3
Ver. hydraulische doorlatendheid Kv	/5	*5
Anisotropie factor	1	10
Freatisch bergingscoëfficiënt	0.05	0.2
Bergingscoëfficiënt	/10	*10
Porositeit	-0.1	+0.1
Randvoorwaarden en modelementen		
Doorlaatvermogen General Head Boundary	1 m ² /d	625 m ² /d
Drainage doorlaatvermogen	0.25 d/m	0.025 d/m
Drainage diepte	-10 cm	+10 cm
Slootbodem doorlaatvermogen	/4	*4

De gevoeligheid van het model is bepaald voor drie verschillende gebieden in het model. Het komgebied, de kreekkrug, en het gehele perceel (figuur 4.3). Door verschillen in eigenschappen tussen de verschillende gebieden kan de modelgevoeligheid variabel zijn binnen het modeldomein. Voor alle drie de gebieden is de gemiddelde diepteligging van het brak-zout grensvlak (3000 mg Cl⁻/l), de gemiddelde zoetwaterstijghoogte van modellaag 11 (-2.15 m NAP) en de gemiddelde zoetwaterstijghoogte van modellaag 17 (-4.25 m NAP) bepaald.

3.3 Opschalen naar een grotere rastercel grootte

Om regenwaterlenzen in drie ruimtelijke dimensies voor een groter gebied te kunnen modelleren is het van belang om op te kunnen schalen naar een grotere rastercel grootte vanwege de lange rekentijd van kleinschalige modellen. Deze mogelijkheid is binnen dit model onderzocht door lineair op te schalen. Dat wil zeggen dat de het doorlaatvermogen van sloten en drainagebuizen is aangepast door te corrigeren voor de toename in lengte van een sloot element of drainagebuis die binnen een cel valt bij een grotere rastercel grootte. Voor dit model is opgeschaald van een rastercel grootte van 5x5 m naar 10x10 m en 25x25 m. De verspreiding van verschillende geologische formaties binnen het model is opgeschaald doormiddel van een "cubic resampling" techniek waarbij de formatie met het grootste percentage dat binnen een grotere rastercel valt is toegekend aan de cel. Dezelfde getallen voor de bodemparameters als beschreven in de vorige paragrafen zijn toegekend aan deze formaties. Voor beide vergrotingen van de raster cel grootte is 58 jaar gerekend met een grondwateraanvulling vanaf 1950 tot 2009 waarbij het initiële zoutgehalte van het systeem in 1950 van de simulatie met een rastercel grootte van 5x5 m is gebruikt.



Figuur 3.4 Gebieden waarvoor modeluitvoer van de gevoeligheidsanalyse wordt berekend

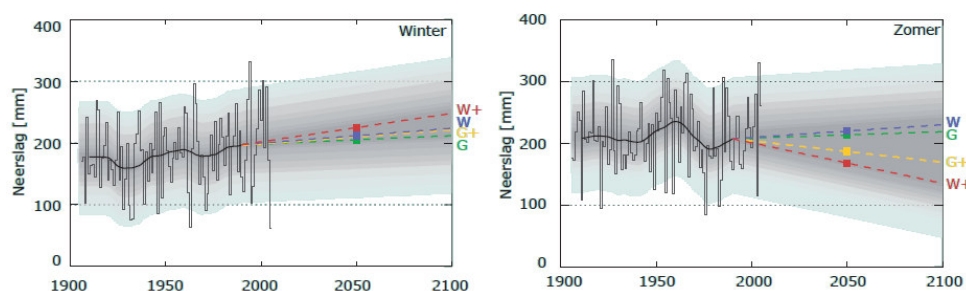
3.4 Klimaatscenario's

Om de effecten van klimaatverandering op de dikte van regenwaterlenzen in het studiegebied te bepalen is de grondwateraanvulling geschat op basis van twee KNMI '06 klimaatscenario's (van den Hurk *et al.*, 2006). De klimaatscenario's van het KNMI zijn in vier categorieën verdeeld waarbij er wel of geen verandering in het luchtstromingspatroon optreedt en de temperatuur 1 of 2 °C stijgt in het jaar 2050. Bij een verandering in luchtstromingspatroon is uitgegaan van een sterkere westelijke stroming in de winter en een sterkere oostelijke stroming in de zomer. Dit zal resulteren in zachte, nattere winters en warme, drogere zomers. De vier KNMI'06 klimaatscenario's worden beschouwd als de meest waarschijnlijke klimaatscenario's voor Nederland. Momenteel zijn echter twijfels ontstaan over de waarschijnlijkheid van het G en G+ klimaatscenario (1 °C temperatuurstijging). De temperatuurstijging van afgelopen 10 jaar is zo groot (0.8 °C in vergelijking met het klimaat in 1990) dat de temperatuur in de komende decennia lager zou moeten zijn dan afgelopen decennium om in overeenstemming te komen met het G 2050 klimaatscenario (Klein Tank *et al.*, 2009). De G en G+ KNMI'06 klimaatscenario's zijn echter nog niet ondermijnd door recente ontwikkelingen in de wetenschap en zijn daarom niet uitgesloten van de mogelijke klimaatscenario's.

Voor deze studie is gekozen om het meest gunstige en het meest nadelige scenario te simuleren. Het meest gunstige scenario heeft geen verandering in luchtstromingspatroon en 1 °C temperatuurstijging (scenario G). Dit scenario heeft de kleinste toename in potentiële verdamping en een toename van de jaarlijkse neerslag som. Het klimaatscenario met een verandering in luchtstromingspatroon en 2 °C temperatuurstijging (scenario W+) heeft de grootste toename in verdamping en een afname van de jaarlijkse neerslag som. Dit scenario wordt gebruikt als meest nadelige scenario. Figuur 3.5 laat de verandering in neerslag zien in de winter- en zomerperiode in

de komende eeuw voor de verschillende scenario's. De verandering in potentiële verdamping is samengevat in tabel 3.4. Klimaatscenario's van het KNMI doen alleen voorspellingen voor de zomer en winter periode. Het is echter mogelijk om verandering in potentiële verdamping voor elke maand te bepalen met behulp van een simpele interpolatie techniek (Lenderink, 2006). In alle scenario's neemt de verdamping toe.

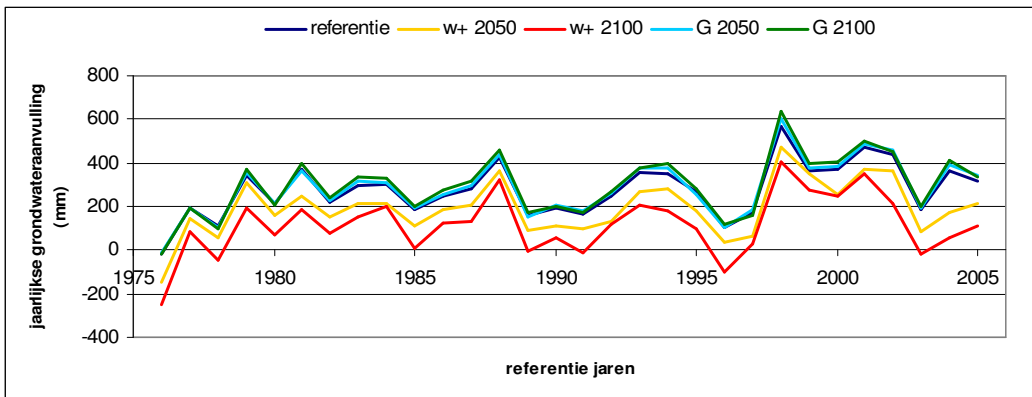
De gemeten neerslag van de jaren 1976 tot en met 2005 van het Kerkwerve KNMI klimaatstation zijn getransformeerd naar het klimaat in 2050 en 2100 voor het W+ klimaatscenario en het G scenario met behulp van het transformatie programma van het KNMI (KNMI, 2008, http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/index.cgi). Bij deze transformatie is rekening gehouden met de verandering in het aantal droge en natte dagen en een verandering van de mediane hoeveelheid neerslag en de variatie. Een referentie simulatie met grondwateraanvulling van de jaren 1976 tot 2005 wordt gebruikt om de uitkomsten te vergelijken met het huidige systeem. Figuur 3.6 geeft een overzicht van de grondwateraanvulling per jaar voor de verschillende scenario's.



Figuur 3.5 Neerslag in Nederland (gemiddelde van 13 stations) tussen 1906 en 2005, en de vier klimaatscenario's voor 2050. De dikte van de zwarte lijn volgt een voorschrijdend 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen. De gekleurde stippellijnen verbinden elk klimaatscenario met het basisjaar 1990. De grijze band illustreert de jaar-op-jaar variatie die is afgeleid uit de waarnemingen (bron: van den Hurk et al., 2006)

Tabel 3.4 Procentuele verandering van de potentiële verdamping in 2050 en 2100 per maand volgens verschillende KNMI'06 klimaatscenario's. (bron: Lenderink, 2006)

	procentuele verandering potentiële verdamping in 2050 t.o.v. 1990				procentuele verandering potentiële verdamping in 2100 t.o.v. 1990			
	G	G+	W	W+	G	G+	W	W+
Januari	1.4	1.3	2.8	2.6	2.8	2.6	5.6	5.2
Februari	1.5	1.5	3.1	3	3.1	3	6.2	6
Maart	1.8	2.2	3.7	4.5	3.7	4.5	7.4	9
April	2.5	3.6	4.9	7.1	4.9	7.1	9.8	14.2
Mei	3	5	6	10.1	6	10.1	12	20.2
Juni	3.4	6.5	6.7	13	6.7	13	13.4	26
Juli	3.5	7.8	7	15.7	7	15.7	14	31.4
Augustus	3.4	8.5	6.7	16.9	6.7	16.9	13.4	33.8
September	3	7.6	6	15.2	6	15.2	12	30.4
Oktober	2.4	5	4.7	10.1	4.7	10.1	9.4	20.2
November	1.8	2.9	3.6	5.8	3.6	5.8	7.2	11.6
December	1.5	1.7	3.1	3.4	3.1	3.4	6.2	6.8



Figuur 3.6 Jaarlijkse grondwateraanvulling (mm) voor de verschillende klimaatscenario's per referentie jaar.

Naast deze scenario's met een verschillende grondwateraanvulling is voor het W+ 2100 scenario ook berekend wat de effecten van zeespiegelstijging zouden kunnen zijn. Voor dit scenario is in eerste instantie analytisch met een spreidingslengte bepaald wat het effect van een zeespiegelstijging van 85 cm zou zijn op de zoetwaterstijghoogte in het onderzoeksgebied (appendix 17). Uit deze berekeningen blijkt dat de invloed van deze zeespiegelstijging binnen één kilometer uitdempt. Om toch te kunnen schatten wat het effect zou kunnen zijn voor gebieden dichterbij de kust, is met een hypothetische toename van de zoetwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket van 20 cm gerekend voor het W+ 2100 scenario.

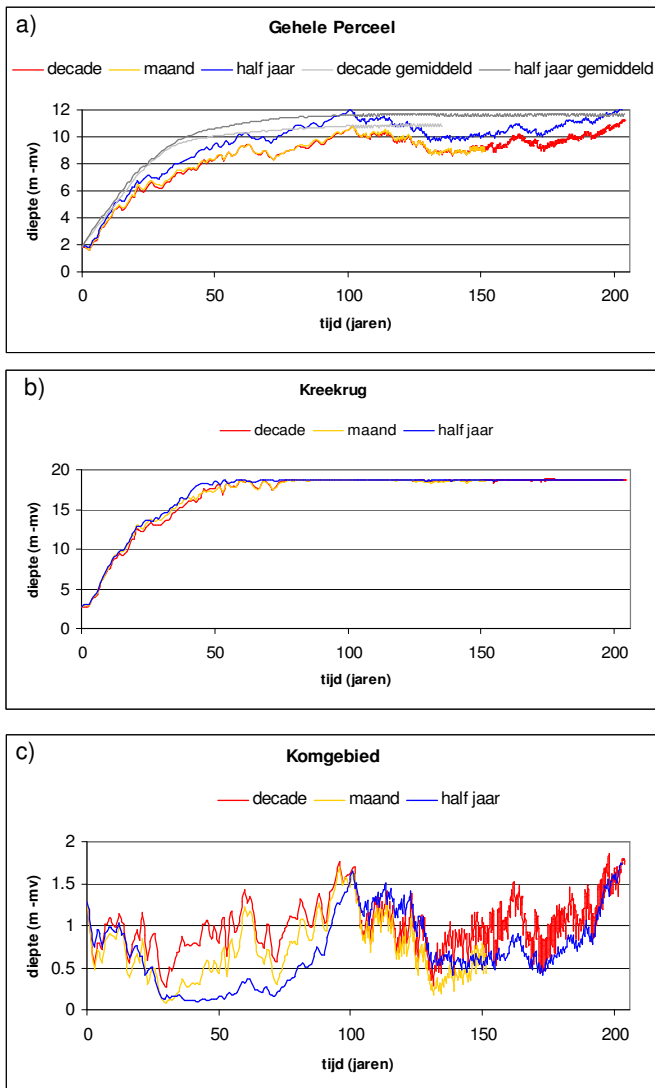
4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de modelresultaten gepresenteerd. In de eerste paragraaf wordt de invloed van de tijdsresolutie waarop grondwateraanvulling wordt geschat behandeld. In de tweede paragraaf worden modelresultaten vergeleken met veldmetingen. In de derde paragraaf volgen de resultaten van de gevoeligheidsanalyse. In de vierde paragraaf komt bondig het opschalen van perceelsmodellen naar een grotere rastercel grootte aan bod. In de vijfde paragraaf worden de effecten van klimaatverandering gepresenteerd.

4.1 Tijdsresolutie grondwateraanvulling

Figuur 4.1 laat de gemiddelde diepte van het brak-zout grensvlak (3000 mg Cl/l) zien t.o.v. het maaiveld voor het komgebied, de kreekrug en het gehele perceel tijdens modelsimulaties met een verschillende tijdsresolutie* voor de grondwateraanvulling. Binnen 60 jaar groeit de zoetwatervoorraad in de ondergrond sterk voor alle simulaties waarna het systeem een evenwicht situatie benaderd. De initiële zoutconcentratie van het grondwater is voor elke simulaties relatief zout waardoor voornamelijk in het infiltratiegebied in de kreekrug de regenwaterlens dikker wordt. Na 100 jaar rekenen start weer eenzelfde opeenvolging van grondwateraanvulling waardoor op dit tijdstip de lens ongeveer even dik is als na 200 jaar rekenen. Voor het gehele perceel is te zien dat de regenwaterlens gemiddeld dunner wordt bij een hogere variabiliteit in grondwateraanvulling en een kleinere tijdsresolutie. Het verschil tussen grondwateraanvulling op maandelijks en decade basis is echter klein. Als met een gemiddelde grondwateraanvulling wordt gerekend ontstaat een dikkere regenwaterlens. In de kreekrug (figuur 4.1 b) is weinig verschil waarneembaar voor de verschillende simulaties en ligt het brak-zout grensvlak op -18.75 m. In het komgebied is de lensdikte constanter en dikker als gerekend wordt met grondwateraanvulling op decade basis (figuur 4.1 c). Omdat er verschillen ontstaan door de tijdsresolutie waarop grondwateraanvulling wordt geschat is gekozen om vervolg simulaties op decade basis door te rekenen.

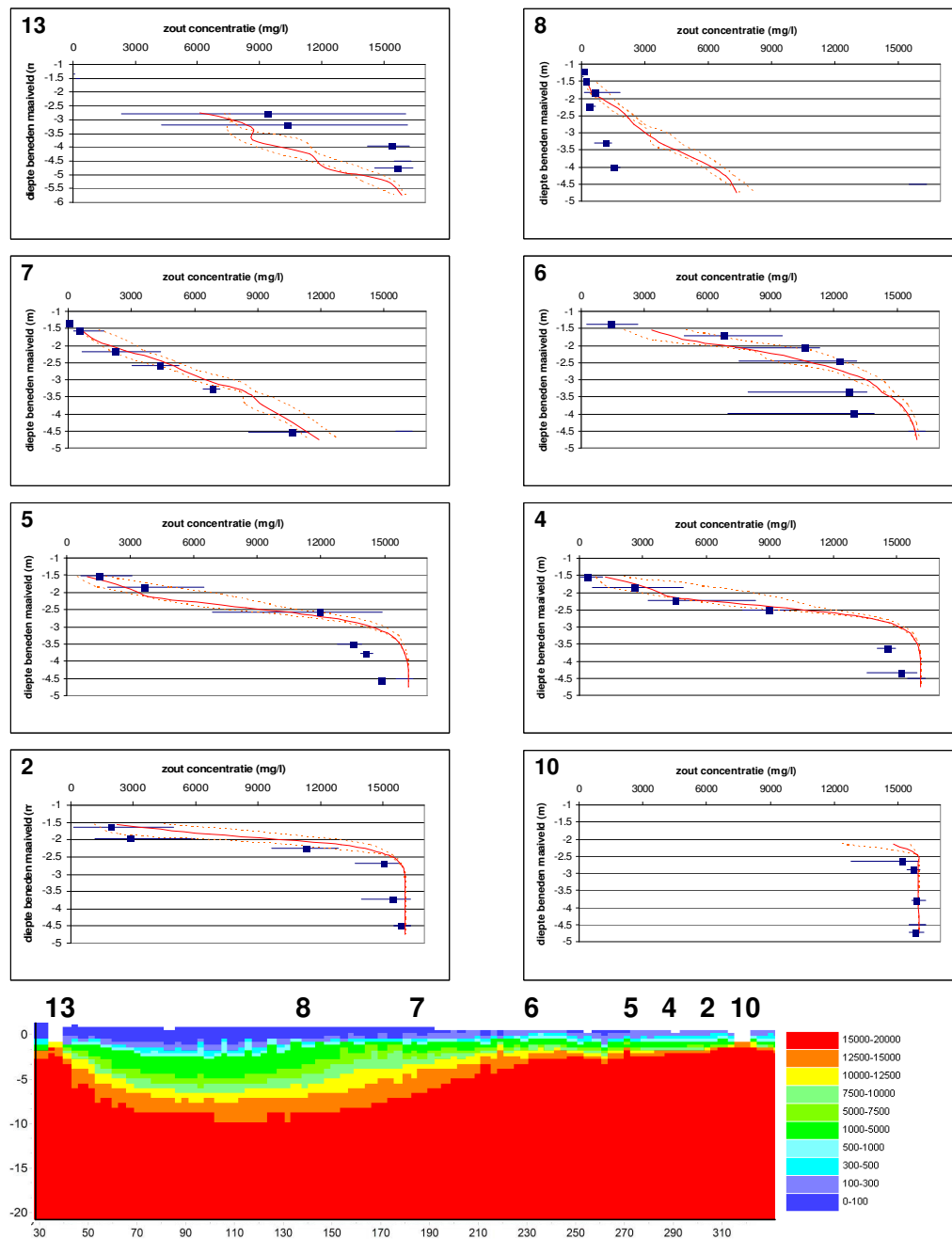
**maangemiddeld rekenen gaf numerieke problemen waardoor deze simulatie niet is uitgevoerd*



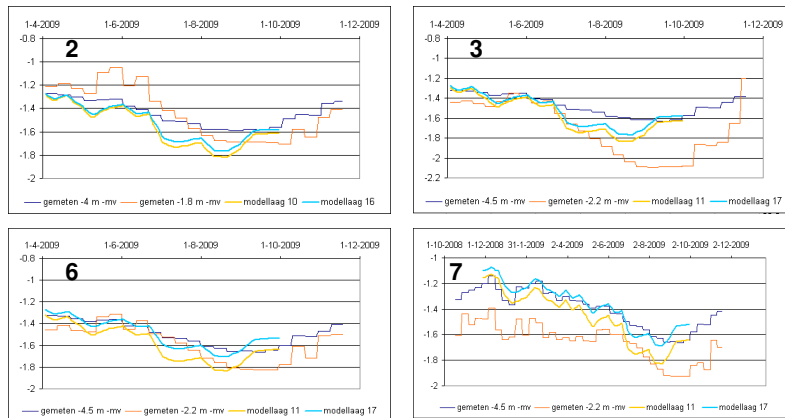
Figuur 4.1 de diepte van het brak-zout grensvlak voor het gehele perceel (a), de kreekrug (b) en het komgebied (c)

4.2 Benadering van het huidige systeem

Van de simulatie met grondwateraanvulling geschat per decade van afgelopen eeuw zijn de modelresultaten van het jaar 2008 en 2009 vergeleken met veldmetingen. In onderstaande grafieken (figuur 4.2) zijn metingen van de zoutconcentratie van het grondwater voor verschillende peilbuizen samen met modelberekeningen van de zoutconcentratie ter plaatse van het filter weergegeven. Er zijn goede overeenkomsten behaald tussen de veldmetingen en modelberekeningen.



Figuur 4.2 Vergelijking van de zoutconcentratie met metingen op verschillende punten in het perceel. Blauwe punten in de grafieken geven de gemiddelde gemeten concentratie, strepen in blauw laten de minimale en maximale gemeten waarde zien. De rode lijn geeft een gemiddelde situatie (april 2009) volgens het model en de stippellijnen een zomer (augustus 2009, hogere concentraties) en winter situatie (februari 2009, lagere concentraties).

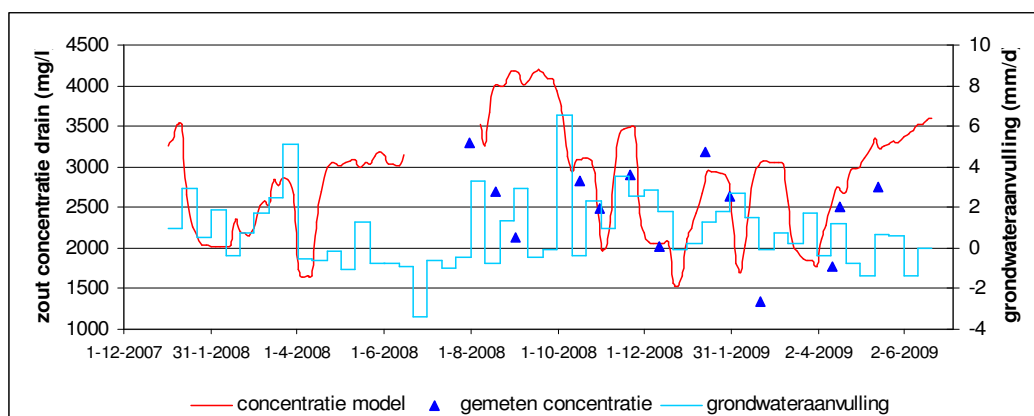


Figuur 4.3 De gemeten en berekende zoetwaterstijghoogte voor vier verschillende locaties in het perceel op 2.2 m en 4.5 meter beneden het maaiveld. De gemeten zoetwaterstijghoogte is getransformeerd naar een gemiddelde zoetwaterstijghoogte per decade om tijdseries met eenzelfde tijdsresolutie te kunnen vergelijken.

In het grondwater onder de zuidelijke sloot (punt 13, figuur 4.2) is een hoge variatie gemeten in zoutconcentratie. Op deze locatie vindt horizontale instroming van zoet grondwater plaats vanuit het perceel en verticale instroming van zout kwelwater. Door het samenkomen van deze verschillende concentraties is binnen de sloot een zeer hoge variatie aan zoutconcentraties gemeten. Het model is enkel in staat om de achtergrondwaarde in de diepte en een gemiddelde concentratie in de ondiepe lagen te benaderen (punt 13, figuur 4.2). Dit complexe systeem met grote ruimtelijke variaties in zoutconcentraties is voor het model met een rastercel grootte van 5x5 meter moeilijk te benaderen. Voor punt 8 ligt de gemeten concentratie in diepere lagen lager dan het model heeft berekend. Voor ditzelfde punt is de zoetwaterstijghoogte weergegeven in figuur 4.3. De onderschatting van de dikte van de regenwaterlens is ook terug te vinden in een onderschatting van de zoetwaterstijghoogte op -2.2 m beneden het maaiveld waardoor er op dit punt in het model minder infiltratie van zoet regenwater plaatsvindt. Model berekeningen van de zoutconcentratie voor het punt op de overgang van een dikke naar een dunne lens (punt 7), midden in het perceel, komen bijzonder goed overeen met de metingen op deze locatie. Voor ditzelfde punt komen berekende zoetwaterstijghoogten en gemeten zoetwaterstijghoogten (stijghoogten gecorrigeerd voor dichtheid) goed overeen voor de eerste paar maanden afgebeeld in figuur 4.3. In de zomerperiode wordt echter de zoetwaterstijghoogte in modellaag 11 (-2.2 m NAP) overschat. Richting het komgebied komen modelberekeningen van zoutconcentratie goed overeen met metingen van de zoutconcentratie. De vorm en de dynamiek wordt voor de meeste punten goed benaderd. In diepe lagen is de zoutconcentratie volgens metingen nagenoeg constant. In deze lagen is volgens het model geen verschil in zoutconcentratie tussen zomer en winter situatie. In de toplagen neemt de dynamiek toe evenals in het model. Enkel voor punt 6 zijn de variaties in zoutconcentratie van het model lager dan de gemeten waarden wordt de concentratie in diepe lagen overschat. De zoetwaterstijghoogte in het komgebied wordt voor punt 4 ook goed benaderd. Er is een verschil van ongeveer 10 tot 20 cm (kwel) tussen modellaag 11 en modellaag 17 wat goed overeenkomt met de metingen van de zoetwaterstijghoogte op dit punt.

Van een van de drainagebuizen in het komgebied is de zoutconcentratie gemeten op verschillende momenten in de tijd. In figuur 4.4 zijn deze metingen afgebeeld tegen de

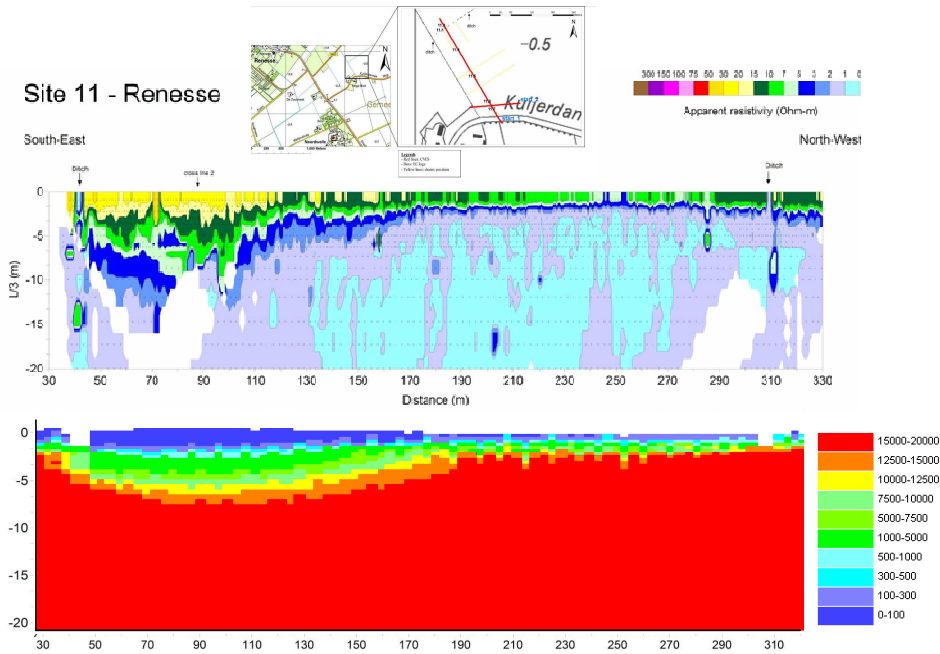
zoutconcentratie in het uitstroomwater volgens het model. De betreffende drainagebuis loopt door 23 model cellen van zuid naar noord in de richting van de noordelijke sloot. Op een overschatting van de concentratie in de late zomerperiode van 2008 na, is er een goede overeenkomst tussen de gemeten en berekende concentraties. Afwijkingen liggen voor 9 van de 13 punten binnen de 500 mg/l.



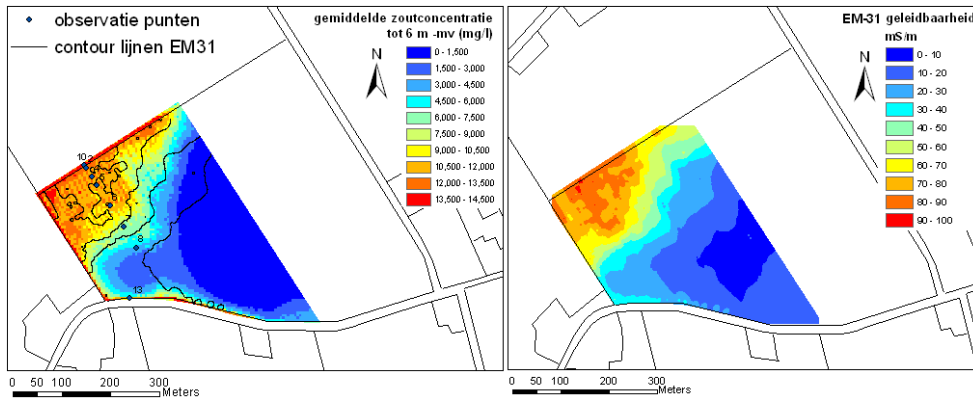
figuur 4.4 Een vergelijking van de gemeten zoutconcentratie van een uitstroompunt van een drainagebuis en de berekende concentratie op het uitstroompunt volgens het model.

Naast deze puntmetingen, zijn binnen het studiegebied op verschillende schaal elektromagnetische metingen verricht om een ruimtelijk beeld te krijgen van de verdeling van zoet en zout grondwater. Deze metingen geven in tegenstelling tot de puntmetingen alleen een kwalitatief beeld. Figuur 4.5 laat een CVES doorsnede zien van de schijnbare weerstand van de ondergrond (Goes *et al.*, 2009). Daaronder is van dezelfde doorsnede de zoutconcentratie afgebeeld die door het model is berekend op hetzelfde moment in de tijd (maart 2007). Het ruimtelijk beeld van het model komt overeen met de CVES meting. In het komgebied is een dunne lens aanwezig die ongeveer op de helft van de doorsnede dikker wordt richting het zuiden.

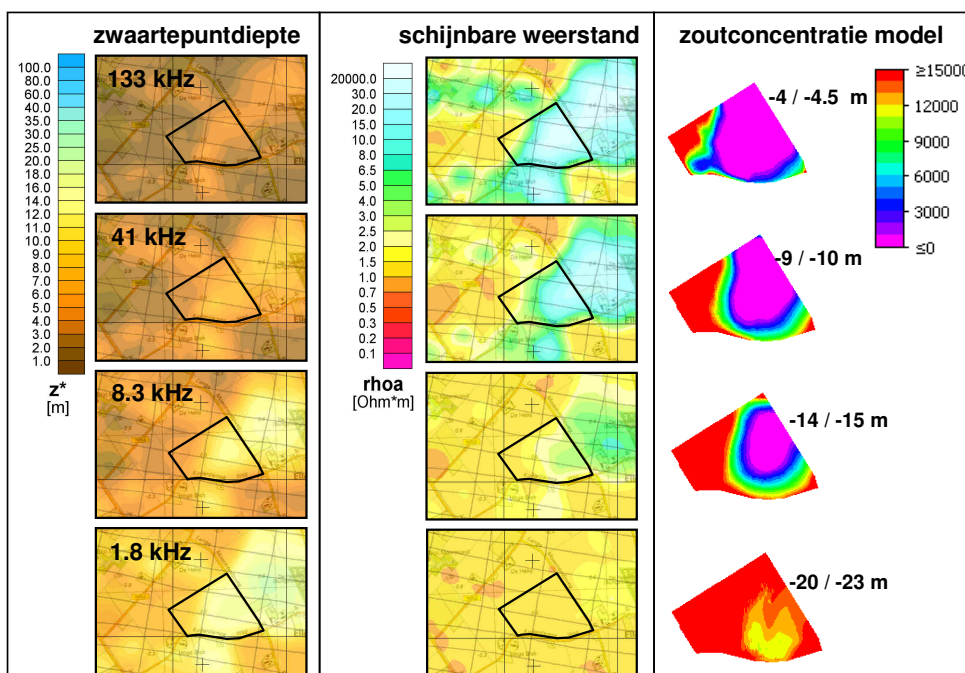
Van het westelijk deel van het perceel is een tweedimensionaal beeld van de gemiddelde geleidbaarheid tot 6 m beneden het maaiveld verkregen met een EM31 instrument. In figuur 4.6 wordt dit beeld vergeleken met modelberekeningen van de gemiddelde zoutconcentratie tot 6 m beneden het maaiveld in september 2009. De berekende ligging van de overgangszone tussen een zeer dunne regenwaterlens in het komgebied en een dikkere lens in het zuiden komt goed overeen met het beeld van de EM31 metingen. De bijbehorende puntmeting is punt 7 (figuur 4.2). In het zuidoostelijk deel doorsnijden geulafzettingen van de kreekrug het perceel en is het mogelijk dat het verschil in de geleidbaarheid tussen de klassen 0-10 mS/m en 10-20 mS/m wordt veroorzaakt door een verschil in lithologie (zandige geulafzettingen hebben een lagere geleidbaarheid dan zavelige oeverafzettingen).



Figuur 4.5 Een CEVS doorsnede in het perceel met op dezelfde locatie een doorsnede van de concentratie berekend door het model op hetzelfde moment in de tijd (maart 2007).



Figuur 4.6 Links de gemiddelde zoutconcentratie tot zes meter beneden het maaiveld volgens het model en rechts de gemeten gemiddelde elektromagnetische geleidbaarheid tot 6 m beneden het maaiveld.



Figuur 4.7 De zwaartepuntdiepte van het bereik van de gebruikte frequenties, de bijbehorende schijnbare weerstand en de concentratie op een constante diepte volgens het model in september 2009.

Op een grotere schaal is met actieve “remote sensing” de elektromagnetische weerstand van de ondergrond van Schouwen bepaald (binnen het Interreg IVB project CLIWAT (www.climat.eu)). Met behulp van een helikopter uitgerust met een sensor en een transmitter is een magnetisch veld gecreëerd vanaf 30 m tot 40 m boven het maaiveld. Met verschillende frequenties is de elektromagnetische weerstand van de ondergrond tot verschillende dieptes bepaald. In figuur 4.7 zijn de resultaten van deze metingen afgebeeld voor het onderzoeksgebied. In deze metingen is te zien dat er in het oosten van het gebied tot ongeveer 18 m diep een hoge weerstand gemeten wordt wat duidt op de aanwezigheid van een dikke regenwaterlens. Volgens het model is in dit gebied een regenwaterlens ($Cl^- < 3000$ mg/l) van 18.75 m dik aanwezig. Naast de afbeeldingen van de schijnbare weerstand is de concentratie voor verschillende modellagen afgebeeld met de daarbij behorende onder- en bovenkant van deze laag. Het ruimtelijke beeld van de zoet-zout verdeling en de bijbehorende weerstand komt voor elk beeld goed overeen.

4.3 Gevoeligheidsanalyse

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de gevoeligheid van het model voor de verschillende veranderingen van parameter waarden. De gemiddelde absolute verandering van het brak-zout grensvlak (3000 mg Cl^-/l) voor het jaar 2008 is berekend per modelsimulatie. Voor het komgebied en de kreekrug is nader bepaald wat veranderingen van parameter waarden voor effect hebben op de dikte van de regenwaterlens en de zoetwaterstijghoogte in modellaag 11 (-2 tot -2.3 m NAP) en 17 (-4 tot -4.5 m NAP) (appendix 13 en 14). In appendix 15 is een ruimtelijk beeld van de verandering van de diepteligging van het brak-zout grensvlak afgebeeld per modelsimulatie.

Bij verschillende modelsimulaties waarbij bodemparameters zijn aangepast treden veranderingen op in de positie en de vorm van de regenwaterlens. Vooral de horizontale hydraulische doorlatendheid heeft een groot effect op de vorm. De lens wordt bij een verhoging van de hydraulische doorlatendheid met een factor 3, gemiddeld 151 cm dunner voor het gehele perceel. Voornamelijk in de kreekkrug wordt dit verschil veroorzaakt waar een afname van 505 cm is waargenomen (appendix 15). In een systeem waar sterke horizontale grondwaterstroming plaatsvindt, treedt minder diepe infiltratie van zoet grondwater plaats. Grondwater wordt in deze situatie versneld afgevoerd naar het oppervlakte water. De lens wordt in vergelijking met het referentie scenario platter. Bij een verlaging van de horizontale hydraulische doorlatendheid met een factor 3 blijft de lensdikte in de kreekkrug ongeveer even dik. In dit gebied zijn modellagen op de diepte van het brak-zout grensvlak 2 tot 3 meter dik. Hierdoor zijn verschillen van enkele meters niet waarneembaar in dit gebied. De lens wordt tijdens deze simulatie dunner in het overgangsgebied van kreekkrug naar komgebied. Bij een lagere horizontale hydraulische doorlatendheid ontstaat een groter contrast in lensdikte tussen het infiltratiegebied (kreekkrug) en het kwelgebied (komgebied). Door een lagere horizontale hydraulische doorlatendheid krijgen verticale stromingspatronen meer invloed op de vorm van de regenwaterlens. In het komgebied leidt een verlaging van de horizontale hydraulische doorlatendheid tot een dikkere regenwaterlens. Normaliter neemt de stijghoogte bij een verlaging van de horizontale hydraulische doorlatendheid toe. Deze toename is echter niet merkbaar door verzoeting waardoor de zoetwaterstijghoogte afneemt in het komgebied (appendix 13).

Bij een verlaging van de verticale hydraulische doorlatendheid verschuift de locatie van de dikke lens in de kreekkrug en wordt de lens dunner in gebieden waar de lens tot onder de deklaag komt (appendix 15). Bij een vergroting van de verticale hydraulische doorlatendheid wordt de lens in bijna het hele gebied dikker doordat regenwater makkelijker dieper de ondergrond kan indringen. In het komgebied waar een dunne lens aanwezig is heeft een verandering van de verticale hydraulische doorlatendheid weinig effect (tabel 4.2). Een aanpassing van de anisotropie verandert de horizontale hydraulische doorlatendheid van kleiige afzettingen en de verticale hydraulische doorlatendheid voor zandige afzettingen. Bij een factor van 1 is er geen verschil in de hydraulische doorlatendheid in horizontale en verticale richting en neemt de horizontale hydraulische doorlatendheid in kleiige afzettingen af en neemt de verticale hydraulische doorlatendheid in zand toe. In deze situatie wordt de lens in bijna het hele perceel dikker (appendix 15) wat overeenkomt met de simulatie met een hogere verticale hydraulische doorlatendheid. Andersom, als de anisotropie factor wordt verhoogd, neemt de lensdikte af. In het komgebied heeft een verlaging van de factor en daarmee een verlaging van de horizontale hydraulische doorlatendheid van kleilagen, minder effect dan een verhoging van de anisotropie factor.

De porositeit heeft effect op de stromingssnelheid binnen het model. Bij een lagere porositeit neemt de absolute stromingssnelheid toe en wordt de regenwaterlens platter net als het voorbeeld van de horizontale hydraulische doorlatendheid. Bij hogere porositeit neemt de absolute stromingssnelheid af en wordt de lens dikker in de kreekkrug.

Een hoge bergingscoëfficiënt heeft een dempende werking op grondwater stroming. Zoetwaterstijghoogteverschillen in de tijd worden gecompenseerd door het leegstromen of vullen van de berging. Bij een hogere bergingscoëfficiënt ontstaat daardoor een stabielere regenwaterlens. In dit systeem leidt een tien keer grotere elastische bergingscoëfficiënt tot een dikkere lens en een tien keer kleinere bergingscoëfficiënt tot een dunner lens. In het komgebied heeft een verandering van de bergingscoëfficiënt weinig effect (tabel 4.2). De freatische bergingscoëfficiënt van de eerste actieve modelcel heeft weinig invloed op de vorming van de lens.

Een verandering van het doorlaatvermogen van drainagebuizen heeft een grote invloed op de dikte van regenwaterlenzen. Door een verlaging van het doorlaatvermogen van 0.050 m/d naar 0.025 m/d neemt de zoetwaterstijghoogte toe in de toplagen van het model wat leidt tot meer infiltratie van zoet regenwater. Bij een verhoging van het doorlaatvermogen van drainagebuizen naar 0.250 m/d neemt de dikte van regenwaterlenzen af. Door een groter doorlaatvermogen neemt de zoetwaterstijghoogte in de bovenste lagen van het model af waardoor er meer kwel optreedt. De diepteligging van buisdrainage heeft ook een grote invloed op de vorming van regenwaterlenzen. Als de drainagebuizen 10 cm hoger liggen neemt voor het hele perceel gemiddeld de dikte van de regenwaterlens toe met 134 cm. Dit wordt veroorzaakt door een toename van de zoetwaterstijghoogte in het topsysteem waardoor zoute kwel wordt beperkt. Als de drainagebuizen 10 cm dieper worden gelegd neemt de dikte van de lens af met 95 cm door een afname van de zoetwaterstijghoogte in het topsysteem en een toename van zoute kwel. In de kreekrug hebben veranderingen van buisdrainage parameters weinig invloed door de afwezigheid van buisdrainage op dit punt binnen het model (tabel 4.3). In het komgebied hebben verhogingen van het doorlaatvermogen en de diepte van drainagebuizen een groter effect dan verlagingen van het doorlaatvermogen en de diepte van drainagebuizen (tabel 4.2). Een verandering van buisdrainage parameters heeft voornamelijk invloed op de dikte van de lens. De ruimtelijke verdeling en positie van de lens blijft onveranderd.

Het doorlaatvermogen van de slootbodem heeft effect op de dikte van de lens, zelfs tot midden in het perceel (appendix 15). Bij een vier keer groter doorlaatvermogen neemt de dikte van de lens in het midden van het perceel toe. Deze toename is het resultaat van een afname van de kweldruk onder de deklaag die ontsnapt richting de sloot. Echter, de dikte neemt dichtbij de sloot (± 10 m afstand) af. In deze gebieden zorgt het hoge doorlaatvermogen van de sloot voor meer kwel van zout grondwater. Het tegengestelde gebeurt bij een verlaging van het doorlaatvermogen.

Modelparameters zoals de frequentie van het oplossen van de grondwaterstromingsvergelijking binnen een stressperiode en het doorlaatvermogen van de ghb hebben weinig effect op de regenwaterlens. Alleen bij een grondwatertijdstep van 10 dagen per decade neemt de lensdikte gemiddeld toe met 78 cm.

referentie:

diepte brak-zout grensvlak 905 cm beneden maaiveld,

zoetwaterstijghoogte modellaag 11 -107.9 cm NAP, zoetwaterstijghoogte modellaag 17 - 106.9 cm NAP

Tabel 4.1 Resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor het gehele perceel. Per parameterverandering is de gemiddelde absolute verandering van de diepteligging van het brak-zout grensvlak voor het jaar 2008 bepaald

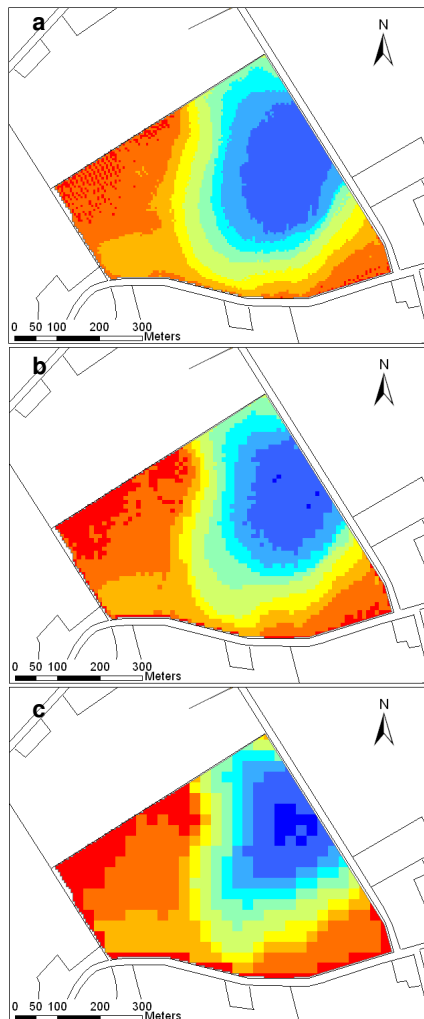
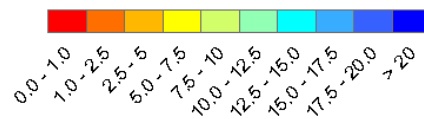
Parameter	verandering	Abs. Verandering (m)	
		Diepte brak-zout	Diepte brak-zout
doorlaatvermogen buisdrainage	0.025 m/d	2.09	1.87
Kh	*3	2.43	1.18
diepte drainagebasis	+ 10 cm	1.34	0.95
Kv	/ 5	1.00	0.64
grondwater tijdstap	decade	0.87	0.19
Anistropy	1	0.75	0.34
Porositeit	+ 0.1	0.75	0.61
Begingscoefficient	*10	0.72	0.34
doorlaatvermogen slootbodern	*4	0.53	0.52
freatische bergingscoefficient	0.2	0.37	0.25
ghb doorlaatvermogen	1	0.32	0.15

4.4 Opschalen naar een grotere rastercel grootte

Figuur 4.8 geeft een overzicht van het brak-zout grensvlak (3000 mg Cl/l) voor modelsimulaties met een verschillende rastercel grootte. De vorm van de regenwaterlens blijft voor de verschillende simulaties hetzelfde bij het gebruik van een rastercel grootte van 10x10 m en 25x25 m. Als met een rastercel grootte van 5x5 m wordt gerekend is de ligging van drainage buizen in het komgebied zichtbaar. Bij een vergroting van de rastercel grootte verdwijnt dit contrast. Voor de dikke lens in de kreekkrug wordt de lens met een grotere rastercel grootte dieper.

Het volume water met een Cl concentratie kleiner dan 3000 mg/l binnen het gehele perceel is voor de referentie simulatie $2.39 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, bij een rastercel grootte van 10x10 is dit volume 10% kleiner ($2.15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). Bij een rastercel grootte van 25x25 is dit volume 18% kleiner ($1.97 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). Deze afname van het volume wordt voornamelijk veroorzaakt in het grensgebied tussen de kreekkrug en het komgebied waar het brak-zout grensvlak op 7.5 tot 15 m diepte ligt (figuur 4.8).

Legenda



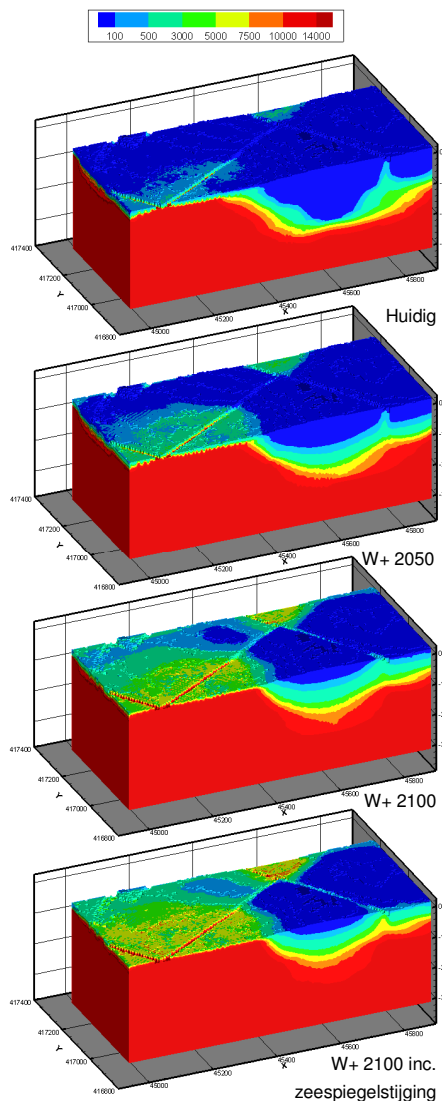
Figuur 4.8. Vergelijking van de diepte van het zout-brak grensvlak voor modelsimulaties op met een andere rastercel grootte, a) 5x5, b) 10x10, c) 25x25.

4.5 Effecten van klimaatverandering

De effecten van klimaatverandering zijn voor het komgebied en de kreekrug nader bepaald. Voor het komgebied is voor elk scenario de gemiddelde zoutconcentratie voor modellaag 9 (± 90 cm onder het maaiveld) berekend. Voor de kreekrug is de diepte van het brak-zout grensvlak ($3000 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$) bepaald. Volgens het G scenario verandert er weinig aan de huidige situatie (figuur 4.11). Volgens het W+ 2050 scenario neemt de zoutconcentratie in het komgebied gemiddeld toe met 4000 mg/l . In het klimaat van 2100 zou deze toename gemiddeld nog eens $3000 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$ hoger liggen. In de zomerperiode is volgens dit scenario de zoutconcentratie in het komgebied voor bijna alle jaren hoger dan 10000 mg/l (figuur 4.10a). De verhoging van de concentratie in het komgebied is gerelateerd aan een stijging van de kwelintensiteit in dit gebied (appendix 16). In het komgebied stijgt de kwelintensiteit gemiddeld met 1.2 mm/d in de zomermaanden. In de wintermaanden neemt de kwelintensiteit af met gemiddeld 0.1 mm/d . In de kreekrug treden ook grote veranderingen op. De dikte van de regenwaterlens in dit gebied neemt volgens het W+ 2050 scenario gemiddeld af met 4 m . Voor het W+ 2100 scenario neemt deze dikte nog verder af met 3 meter (7 m in totaal in vergelijking met het huidige systeem)(figuur 4.10b). Een impressie van deze veranderingen wordt gegeven in figuur 4.9.

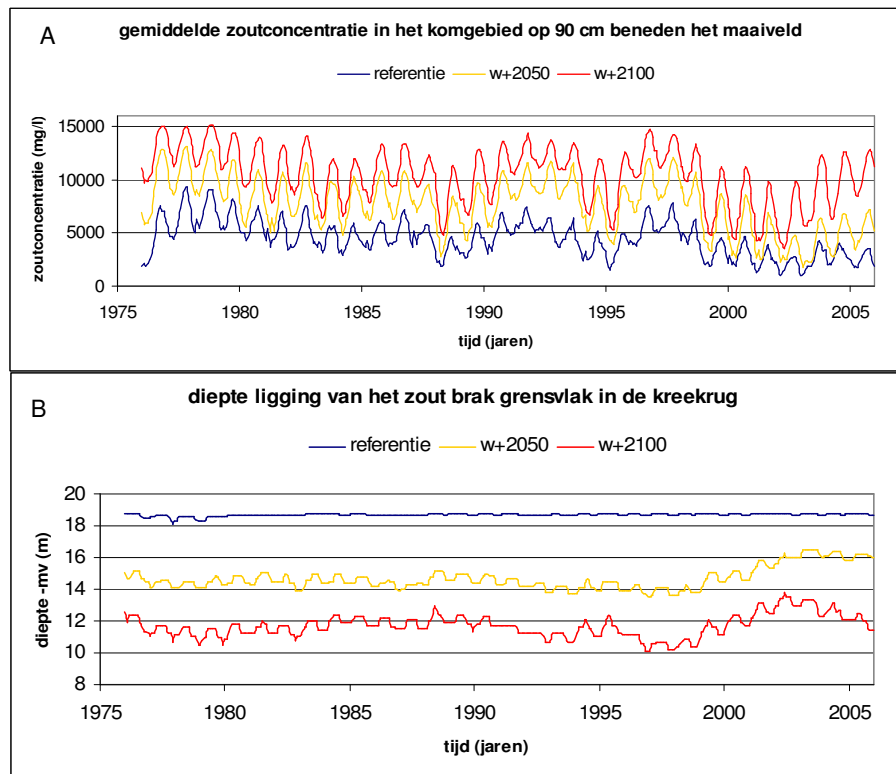
Uit deze modelsimulaties is ook op te maken dat seizoenale variaties in lensdikte kleiner zijn dan jaarlijkse variaties. Voor de referentie simulatie van 1976 tot en met 2005 stijgt de zoutconcentratie van het grondwater wanneer een opeenvolging van droge jaren heeft plaatsgevonden (1976-1978 en 1989-1991). In deze droge perioden is de winterconcentratie hoger dan de zomerconcentratie in natte perioden (1998-2002). Bij een verandering van het klimaat naar nattere winters en drogere zomers zoals het W+ scenario neemt de seizoenale dynamiek toe in 2050 en 2100 (figuur 4.10).

Door zeespiegelstijging zou de zoetwaterstijgheighte onder de deklaag kunnen toenemen. Met behulp van een analytische vergelijking is bepaald dat een zeespiegelstijging van 85 cm niet merkbaar is binnen het modelgebied (appendix 17).

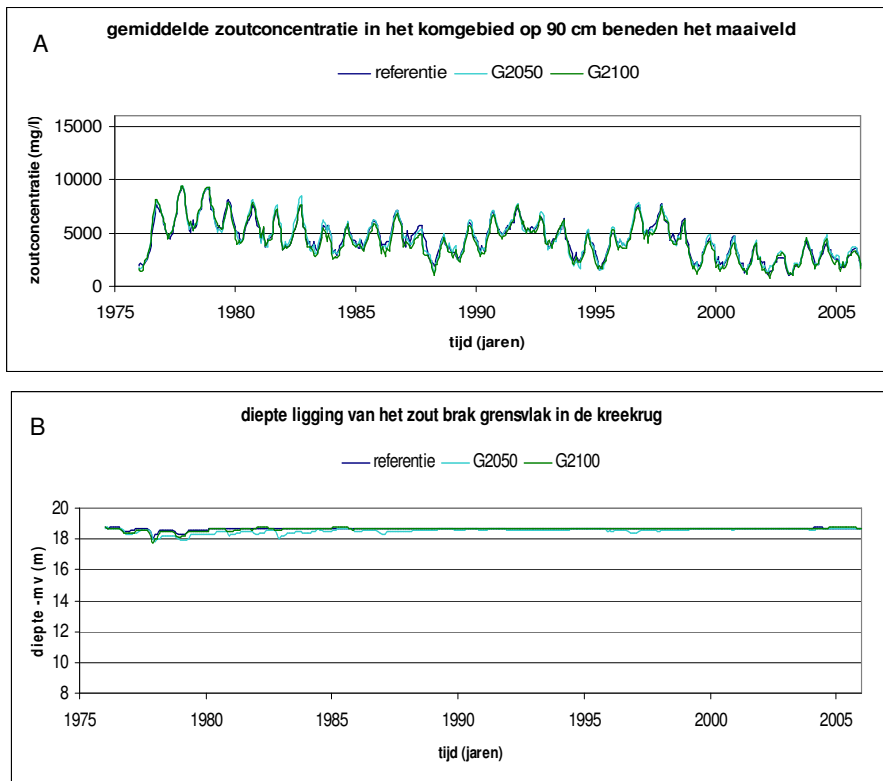


Figuur 4.9 Een 3D beeld van de zoutconcentratie van het grondwater voor de referentie simulatie en het w+ scenario

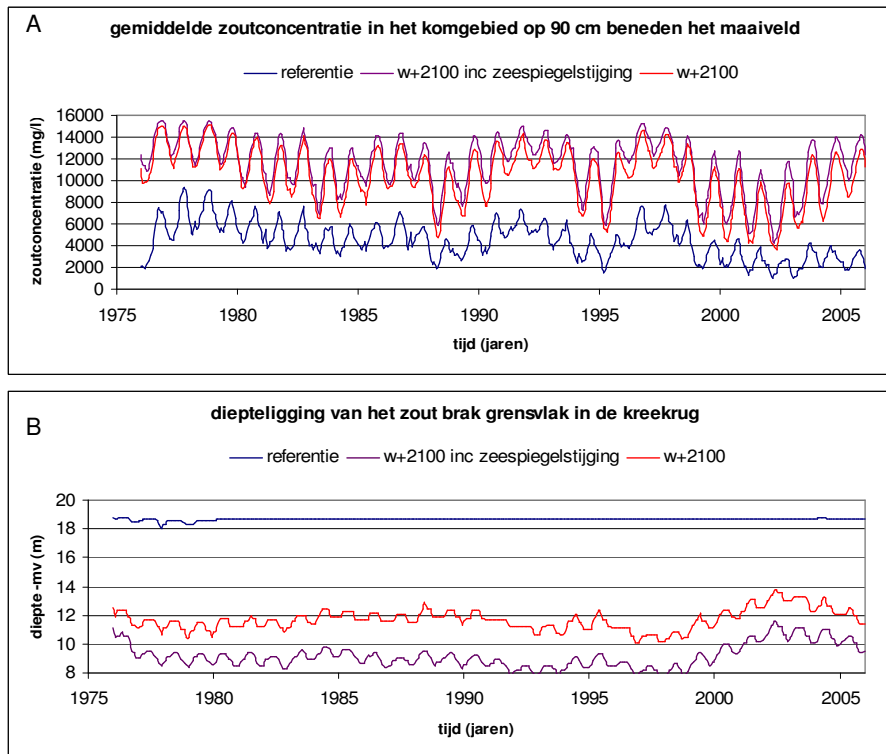
Om toch de effecten van zeespiegelstijging te onderzoeken is met een toename van 20 cm voor de winter en zomer zoetwaterstijghoogte gerekend. Deze toename leidt in het komgebied tot weinig veranderingen maar in de kreekrug wordt de regenwaterlens gemiddeld 2.5 m dunner dan voor het W+2100 scenario (figuur 4.12).



Figuur 4.10 De effecten van klimaatverandering op de zoutconcentratie in het komgebied op 90 cm beneden het maaiveld (A) en op het brak-zout grensvlak in de kreekrug (B) voor het W+klimaatscenario.



Figuur 4.11 De effecten van klimaatverandering op de zoutconcentratie in het komgebied op 90 cm beneden het maaiveld (A) en op het brak-zout grensvlak in de kreekrug (B) voor het G klimaatscenario.



Figuur 4.12 De effecten van klimaatverandering op de zoutconcentratie in het komgebied op 90 cm beneden het maaiveld (A) en op het brak-zout grensvlak in de kreekrug (B) voor het W+2100 en W+2100 scenario inclusief zeespiegelstijging.

5 Discussie

In het komgebied worden regenwaterlenzen dikker als gerekend wordt met grondwateraanvulling op een kleine tijdsresolutie. Op decade basis zijn neerslagextremen groter dan op halfjaarlijkse basis wat resulteert in hogere zoetwaterstijghoogten in het topsysteem en een omslag van een kwel systeem naar tijdelijk een infiltratie systeem in de bovenste modellagen. Zonder deze extremen in grondwateraanvulling is de zoetwaterstijghoogte in de diepere lagen altijd groter dan de zoetwaterstijghoogte in het top systeem. Hierdoor kan zoet regenwater bij een grote tijdsresolutie in grondwateraanvulling minder diep infiltreren. Het overtreffen van de kweldruk in het komgebied tijdens extremen in grondwateraanvulling is meer bepalend voor de vorming van de lens dan het aftoppen van deze neerslag extremen door buisdrainage. Het tegengaan van de kweldruk in infiltratiegebieden met een regenwaterlens dikker dan 5 m speelt echter een minder grote rol. In deze gebieden resulteert het rekenen op een lagere tijdsresolutie tot meer afvoer van zoet regenwater door buisdrainage. Hierdoor zijn regenwaterlenzen in deze gebieden dunner bij het rekenen met grondwateraanvulling op kleine tijdsresolutie. In de kreekrug, waar de lens het dikste is, zijn geen verschillen merkbaar tussen de verschillende tijdsresoluties waarop grondwateraanvulling is geschat. In dit gebied zijn geen drainagebuizen aanwezig waardoor er geen aftopping van pieken in de grondwateraanvulling plaatsvindt. Daarnaast worden modellagen dikker op een grotere diepte waardoor verschillen van 2 meter in lensdikte niet meer merkbaar zijn. Het rekenen met een kleine tijdsresolutie in grondwateraanvulling is voornamelijk van belang voor het komgebied waar een verschil van een halve meter in lensdikte kan worden veroorzaakt door deze tijdsresolutie. Deze relatief kleine afname kan in dit gebied grote gevolgen hebben voor de landbouw waardoor het van belang is om te rekenen met grondwateraanvulling op een kleine tijdsresolutie.

De overeenkomsten tussen modelresultaten en veldmetingen geven een indicatie van de kwaliteit van het model. Voor het komgebied benadert het model voor de meeste punten de veldmetingen van de zoutconcentratie. Voor de meeste punten wordt echter de zoutconcentratie in diepere lagen structureel overschat. Voor een ruimtelijk beeld van de overeenkomst tussen modelresultaten en de veldsituatie zijn verschillende elektromagnetische metingen kwalitatief vergeleken met modelresultaten. Bij het meten van de elektromagnetische geleidbaarheid of weerstand van de ondergrond wordt naast de verschillen in zoutconcentratie in het grondwater ook de verschillen in lithologie gedetecteerd (klei heeft een hogere elektromagnetische geleidbaarheid dan zand). Deze signalen zijn niet uit de beelden van de elektromagnetische metingen gefilterd die vergeleken worden met modelresultaten (figuur 4.6, 4.7 en 4.8). Hierdoor is het vooralsnog niet mogelijk om een directe correlatie te leggen tussen gemeten elektromagnetische geleidbaarheid of weerstand en gemodelleerde zoutconcentratie in het grondwater. Echter, de lithologie bestaat binnen het modelgebied op drie meter beneden het maaiveld voornamelijk uit zand waardoor de invloed van de lithologie in de beelden van de elektromagnetische geleidbaarheid op een grotere diepte beperkt blijft. Voornamelijk in het beeld verkregen met de EM-31 (figuur 4.6) is te verwachten dat het signaal verstoort wordt door de lithologie omdat de EM-31 de gemiddelde geleidbaarheid tot zes meter diep heeft gemeten waarbinnen de lithologie van de deklaag varieert. Over het algemeen is er een goede overeenkomst tussen de ruimtelijke beelden van de elektromagnetische metingen en het model. Onzekerheid bestaat nog over de exacte dikte van de lens in het noordoostelijk deel van het modeldomein. In dit gebied waar de

lens volgens het model een grotere dikte dan 18 m bereikt zijn geen metingen van de zoutconcentratie in het grondwater verricht. In dit gebied zijn alleen de beelden van de elektromagnetische weerstand beschikbaar (figuur 4.8). Deze beelden laten zien dat het contrast in elektromagnetische weerstand op 18 m is verdwenen waar volgens het model dit contrast niet in modellaag 35 (18 tot 20 m NAP) maar in modellaag 36 (tussen 20 en 23 m NAP) is verdwenen.

De variatie in gemeten zoetwaterstijghoogte op 2.2 m beneden het maaiveld in tijd en ruimte is groter dan de gemodelleerde zoetwaterstijghoogte (figuur 4.3). Deze afwijkingen kunnen worden veroorzaakt door; een grotere heterogeniteit in hydraulische doorlatendheid van de bodem in de veldsituatie dan in het model, afwijkingen in de schatting van de grondwateraanvulling door het gebruik van een gemiddelde gewasfactor representatief voor suikerbieten, granen, aardappels en uien, en het rekenen met enkel een verzadigde zone vanaf het maaiveld waardoor grondwateraanvulling aangrijpt vanaf het maaiveld terwijl in de veldsituatie deze grondwateraanvulling zou moeten plaatsvinden op de diepte van de grondwaterstand. De gemodelleerde zoetwaterstijghoogte op 4.5 m beneden het maaiveld komt beter overeen met de metingen. De vergelijkingen van de gemeten en gemodelleerde zoetwaterstijghoogten bestrijken maar een kleine periode in de tijd, waardoor nog niet eenduidig de afwijking van het model kan worden bepaald. Echter, de zoutconcentratie is door het model goed benaderd, en deze is sterk afhankelijk van de zoetwaterstijghoogte van afgelopen jaren.

De uitgevoerde gevoeligheidsanalyse geeft geen indicatie van de relatieve gevoeligheid voor verschillende parameters, maar heeft als doel om meer inzicht te krijgen in de processen en eigenschappen binnen een gebied die de vorming van regenwaterlenzen beïnvloeden. Met deze kennis kan geëvalueerd worden tot welk detail een 3D dichtheidsafhankelijk grondwatermodel op perceelsschaal opgebouwd moet worden en in hoeverre dezelfde methode toepasbaar is voor andere gebieden. Uit deze analyse blijkt dat veranderingen in de waarde van buisdrainage parameters (doorlaatvermogen en diepteligging) een grote invloed hebben op modeluitkomsten. Het doorlaatvermogen van buisdrainage is afhankelijk van omringende formaties, vulmateriaal waarin drainagebuizen zijn aangelegd, de grote en hoeveelheid aan openingen in de buis, de frequentie van onderhoud aan de drainagebuizen en het type materiaal dat mogelijk tot verstoppingen kan leiden. Door deze verschillende factoren is het moeilijk om het doorlaatvermogen te bepalen en is deze niet voor alle buizen en percelen gelijk. Voor het modelgebied is een constant doorlaatvermogen van 0.05 m/d per meter drainagebuis bepaald door middel van een aantal teststruns. Om meer zekerheid te hebben van deze waarde zou de afvoer van drainagebuizen moeten worden gemeten. Naast het doorlaatvermogen heeft de diepteligging van drainagebuizen eveneens een groot effect op de vorming van regenwaterlenzen. Door het gebruik van een digitaal hoogtemodel kan een schatting gemaakt worden van deze diepteligging. Echter, een afwijking van 10 cm kan leiden tot een verandering van de lensdikte in de orde van meters (appendix 15). Deze veranderingen treden voornamelijk op in gebieden met een regenwaterlens tot onder de deklaag (dikker dan 3 m). In het komgebied leidt een 10 cm ondiepere ligging van drainagebuizen tot een toename van 34 cm in lens dikte. Dit wordt veroorzaakt door een toename van de zoetwaterstijghoogte in het topstysteem waardoor zoute kwel wordt beperkt. Bij een 10 cm diepere ligging neemt de lens in dikte slechts af met 3 cm.

Bij een verhoging van het doorlaatvermogen van de slootbodembodem neemt de regenwaterlens in dikte toe. Deze toename is het resultaat van een afname van de kweldruk onder de deklaag die ontsnapt richting de sloot. Eenzelfde proces wordt veroorzaakt als het peil in de sloot omlaag wordt gebracht. In de deelstroomgebiedsvisie Zeeland wordt gesuggereerd dat de dikte van regenwaterlenzen toeneemt bij een

toename van de grondwaterstand in het perceel en het behoud van het huidige peil in de hoofdwaterlopen. Deze bewering wordt bevestigd door de simulaties met een hoger doorlaatvermogen van de slootbodem waarbij de afvoer van zout kwelwater via sloten wordt bevorderd en een ondiepere ligging van drainagebuizen waardoor de grondwaterstand toeneemt.

Bij verschillende modelsimulaties waarbij bodemparameters zijn aangepast treden veranderingen op in de positie en de vorm van de lens. Als bij een aanpassing van een bodemparameter de stromingssnelheid van grondwater in horizontale richting toeneemt, leidt dit in alle gevallen tot een plattere regenwaterlens. Dit is merkbaar bij een verhoging van de horizontale hydraulische doorlatendheid, een verlaging van de verticale hydraulische doorlatendheid, een toename van de anisotropie factor en een afname van de porositeit. Een afname in de verticale hydraulische doorlatendheid kanaliseert grondwaterstroming in horizontale richting. Hierbij verschuift het zwaartepunt van de lens naar het zuiden in de richting van de regionale grondwaterstroming. Daarnaast treedt minder verticale stroming op in infiltratiegebieden waardoor de lensdikte afneemt. Ditzelfde proces is in mindere mate zichtbaar bij een toename van de anisotropie factor. Bij een hoge horizontale hydraulische doorlatendheid ontstaat een platte lens en wordt de lens op het diepste punt in de kreekrug ongeveer vijf meter dunner. Het zoete water uit de kreekrug verspreidt zich over een groter gebied waardoor in de nabijheid van de kreekrug de lens dikker wordt. Bij een verlaging van de porositeit verandert de vorm op eenzelfde manier, echter zijn de veranderingen minder groot. Bij een lagere horizontale stromingssnelheid ontstaat een groter contrast in lensdikte tussen de kreekrug en het komgebied. Door een lagere horizontale stromingssnelheid krijgen verticale stromingspatronen meer invloed op de vorm van de regenwaterlens en dijt de regenwaterlens in de kreekrug minder uit in horizontale richting. Hierdoor neemt de lensdikte af in de nabijheid van het zwaartepunt van de lens.

Voor het gebruikte model is veel gebruik gemaakt van velddata. Voor andere gebieden binnen de Provincie Zeeland is deze data vaak niet beschikbaar. Om dezelfde methode toe te passen voor een ander gebied is het van belang een goed beeld te krijgen van de parameters die veel effect hebben op modeluitkomsten. Buisdrainage parameters hebben veel invloed op modeluitkomsten en daarom is het van belang de ligging en dichtheid van drainagebuizen met zekerheid te bepalen. Het gebruik van het REGIS Zeeland bestand voor het bepalen van de lithologie en hydraulische doorlatendheid van de diepe ondergrond heeft binnen het modeldomein geleid tot een goede overeenkomst tussen de verdeling van zoet en zout grondwater in het modeldomein en het ruimtelijke beeld van elektromagnetische metingen. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de verdeling van zoet en zout grondwater sterk afhangt van de migratie van zoet grondwater uit de kreekrug richting andere gebieden binnen het perceel. Door de stroming van zoet grondwater vanuit het infiltratiegebied in verschillende richtingen is het moeilijk om een dergelijk systeem in twee ruimtelijke dimensies te modelleren. Het is daarom aan te bevelen om in drie ruimtelijk dimensies te modelleren wanneer een groot contrast (>10 m) bestaat in dikte van de regenwaterlens binnen het modeldomein. In drie dimensies modelleren is mogelijk voor grote gebieden als een grotere rastercel grootte wordt gebruikt. De vorm van de regenwaterlens blijft behouden bij een rastercel grootte van 25x25 m. Het totale volume water met een Cl⁻ concentratie van 3000 mg/l neemt echter af bij deze rastercel grootte met 18 %. Waarschijnlijk wordt deze afname niet veroorzaakt door een verkeerde opschaling van sloten en drainagebuizen aangezien de diepteligging van het brak-zout grensvlak in het komgebied goed overeenkomt met de referentie simulatie. Verschillen worden voornamelijk veroorzaakt in gebieden nabij de kreekrug waar de vorm en dikte volgens de gevoeligheidsanalyse voornamelijk bepaald wordt door bodemparameters. De

opschaling van deze bodemparameters zou geëvalueerd moeten worden om te kunnen bepalen waardoor de verschillen in volumes worden veroorzaakt. Ondanks de verschillen in volumes is de gelijkenis in vorm en diepteligging van het brak-zout grensvlak (figuur 4.8) voor een groot deel van het gebied zeer sterk. Dit is hoopgevend voor 3D modellering van regenwaterlenzen voor grootte gebieden met een rastercel grootte van 25x25 m. Een dergelijk model zou met eenzelfde efficiëntie in rekentijd als het huidige perceelsmodel voor grote gebieden van 25x25 km modelsimulaties kunnen uitvoeren om de ondiepe zoetwatervoorraad te modelleren.

De effecten van klimaatverandering zijn berekend voor twee KNMI'06 klimaatscenario's. Volgens het G KNMI'06 klimaatscenario treden weinig veranderingen op in het neerslag- en verdampingspatroon waardoor de dikte van regenwaterlenzen volgens dit scenario onveranderd blijft rond het jaar 2050 en 2100. Volgens het W+ scenario neemt de zoetwatervoorraad in het ondiepe grondwatersysteem sterk af. De dikte van de regenwaterlens in de kreekrug wordt in dit scenario gereduceerd in 2050 met 4 m en in 2100 met nog eens 3 m. Als een zeespiegelstijging merkbaar is binnen het studiegebied dan zou dit voornamelijk effect hebben op de dikte van de regenwaterlens in de kreekrug. Bij een verhoging van de zoetwaterstijghoogte onder de deklaag van 20 cm door zeespiegelstijging neemt de dikte van de regenwaterlens met een extra 2.5 m af in vergelijking met het extreme W+ 2100 scenario. Uit metingen van de elektromagnetische weerstand van de ondergrond voor heel Schouwen (appendix 9, 10, 11 en 12) blijkt dat het bestudeerde gebied mogelijk een van de dikste regenwaterlenzen (± 18 m) heeft op Schouwen. Bij een dikte groter dan 15 m valt deze voorraad zoet grondwater binnen de richtlijnen voor het onttrekken van zoet grondwater uit kreekruggen geformuleerd in de deelstroomgebiedsvisie Zeeland. Volgens het W+ scenario wordt de lens in de kreekrug in 2050 dunner dan 15 m waardoor deze norm in dit gebied wordt overschreden. In vergelijkbare kreekruggen in de Provincie Zeeland is te verwachten dat klimaatverandering eenzelfde effect heeft op de zoetwatervoorraad in de ondergrond.

Ook in het komgebied treden grote veranderingen op volgens het meest extreme W+ KNMI'06 klimaatscenario. De zoutconcentratie op 90 cm beneden het maaiveld is in bijna alle zomers hoger dan 10000 mg/l. Deze piek concentraties in het grondwater zouden door capillaire opstijging de zoutconcentratie in de wortelzone van agrarische gewassen kunnen verhogen. Een korte blootstelling aan dergelijke hoge zoutconcentraties leidt voor de meeste gewassen tot zoutschade (van Dam *et al.* 2007). Het gebruikte grondwatermodel kan alleen gebruikt worden om voor de verzadigde zone uitspraken te doen over de veranderingen in zoutconcentratie. Het is echter waarschijnlijk dat bij een gemiddelde toename van de zoutconcentratie in het grondwater op 90 cm beneden het maaiveld van 4000 tot 7000 mg/l voor respectievelijk het W+ 2050 en W+ 2100 scenario, deze toename merkbaar is in de wortelzone. Als de zoetwaterstijghoogte toeneemt met 20 cm in het eerste watervoerende pakket door zeespiegelstijging heeft dit weinig effect op de concentratie in het grondwater in het komgebied.

Naast deze veranderingen in lensdikte neemt ook de seizoenale dynamiek in chloride concentratie toe. Voor het huidige systeem zijn seizoenvariëaties kleiner dan jaarlijkse variëaties. Bij een verandering van het klimaat naar nattere winters en drogere zomers zoals in het W+ scenario neemt de seizoenale dynamiek toe in 2050 en 2100 (figuur 4.10).

6 Conclusies en aanbevelingen

- Het huidige 3D perceelsmodel is in staat om voor het onderzoeksgebied de veldmetingen te benaderen. Voor een benadering van het huidige systeem is het belangrijk om op een kleine tijdsresolutie de grondwateraanvulling te schatten. Als gerekend wordt met grondwateraanvulling op een te grote tijdsresolutie worden regenwaterlenzen in het komgebied dunner en in infiltratiegebieden dikker.
- De stromingssnelheid in verticale en horizontale richting bepaald voornamelijk de positie en de diepte van de lens in de kreekkrug. Bij een hoge horizontale snelheid worden regenwaterlenzen platter en wordt het zoete water verspreid over een groter gebied. Bij een lage horizontale stromingssnelheid krijgen verticale stromingspatronen meer invloed op de vorm van de regenwaterlens en dijt de regenwaterlens in de kreekkrug minder uit in horizontale richting.
- Buisdrainage parameters (doorlaatvermogen en diepteligging) hebben een groot effect op de dikte van regenwaterlenzen. Bij een ondiepe ligging worden regenwaterlenzen dikker en bij een diepe ligging dunner. Om meer zekerheid te hebben van de gebruikte waarde voor het doorlaatvermogen van drainagebuizen is het aan te bevelen om de afvoer van verschillende drainagebuizen binnen het perceel te meten.
- Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de verdeling van zoet en zout grondwater binnen het modeldomein sterk afhangt van de migratie van zoet grondwater uit de kreekkrug richting andere gebieden binnen het perceel. Door de stroming van zoet grondwater vanuit het infiltratiegebied in verschillende richtingen is het moeilijk om een dergelijk systeem in twee ruimtelijke dimensies te modelleren. Het is daarom aan te bevelen om in drie ruimtelijk dimensies te blijven modelleren wanneer binnen het modeldomein een groot contrast (>10 m) bestaat in dikte van de regenwaterlens.
- In drie ruimtelijke dimensies modelleren is mogelijk voor grote gebieden als een grotere rastercel grootte wordt gebruikt. De vorm van de regenwaterlens blijft behouden bij een rastercel grootte van 25x25 m. Het volume grondwater met een concentratie lager dan 3000 mg Cl neemt echter af bij deze rastercel grootte met 18% ten opzichte van de referentie simulatie met een rastercel grootte van 5x5 m. Het verschil in volume wordt waarschijnlijk bepaald door de opschaling van bodemparameters, maar dit zou nader onderzocht moeten worden. Een dergelijk model zou met eenzelfde efficiëntie in rekentijd als het huidige perceelsmodel voor grote gebieden van 25x25 km modelsimulaties kunnen uitvoeren om de ondiepe zoetwatervoorraad te modelleren.
- Door klimaatverandering zou de dikte van de regenwaterlens kunnen afnemen. Volgens het G KNMI'06 klimaatscenario treden weinig veranderingen op in het neerslag- en verdampingspatroon waardoor de dikte van regenwaterlenzen volgens dit scenario onveranderd blijft rond het jaar 2050 en 2100. Volgens het W+ 2050 scenario neemt de dikte van de lens in de kreekkrug af met 4 m en neemt de zoutconcentratie dicht onder het maaiveld gemiddeld toe met 4000 mg/l. Volgens het W+ 2100 scenario zou de dikte van de regenwaterlens in de kreekkrug met 7 m afnemen in vergelijking met de huidige situatie. In het komgebied neemt voor dit scenario de zoutconcentratie gemiddeld toe met 7000 mg/l. In het klimaat van het W+ 2100 scenario is de zoutconcentratie in het grondwater dicht tegen het

maaiveld in het komgebied voor bijna alle jaren in het zomerseizoen hoger dan 10000 mg/l.

- Binnen het bestudeerde gebied met mogelijk een van de dikste regenwaterlenzen (± 18 m) op Schouwen zal volgens het W+ scenario in 2100 de lensdikte in de kreekrug afnemen met 7 m in vergelijking met het huidige systeem. Door deze afname wordt de regenwaterlens te dun om te gebruiken voor beregening...
- De waarschijnlijkheid van de verschillende klimaatscenario's van het KNMI wordt tot nu toe gelijkwaardig geschat, wat betekent dat in de toekomst de huidige situatie blijft bestaan of dat klimaatverandering leidt tot een substantiële afname van de zoetwatervoorraad in de ondiepe ondergrond. Naast de problematiek van verzilting speelt het probleem van verdroging. Door een toename van de verdamping in het zomerseizoen neemt in de toekomst waarschijnlijk de zoetwatervraag toe. Om aan deze vraag te voldoen en in te spelen op mogelijke effecten van klimaatverandering is het van belang om de groei van regenwaterlenzen in kreekruggen te bevorderen.

7 Referenties

Anderson, M.P. (1979). Using models to simulate the movement of contaminants through groundwater flow systems. *Critical Reviews in Environmental Controls*. V. 9 no. 2 pp 97-156

Berendsen, H.J.A. (1997) *Landschappelijk Nederland*. Van Gorcum & Comp, Assen.

Davis, A.D. (1986). Deterministic Modeling of Dispersion in Heterogeneous Permeable Media. *Ground water* 24, no 5. pp. 609-615

Fits, C. L. (2002). *Groundwater science*. Elsevier science, p. 25

Gelhar, L. W., Welty, C. & Rehfeldt (1992), A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers, *Water Resources Research*. Vol 28 (7), pp 1955-1974.

Goes, B.J.M., Oude Essink, G.H.P., Vernes, R.W. and Sergi, F. 2009. Estimating the depth of fresh and brackish groundwater in a predominantly saline region using geophysical and hydrological methods, Zeeland, the Netherlands, *Near Surface Geophysics* 401-412.

Hooghart, J.C., Lablans, W.N. (1988). Van Penman naar Makkink: een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen. Technisch rapport TR-111, KNMI de Bilt.

Johnson, A.I. (1967). Specific yield - compilation of specific yields for various materials. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1662-D

Klein Tank, A., Lenderink, G., Bakker, A. (2009). Climate change in The Netherlands: supplements to the KNMI'06 scenarios. *Royal Netherlands Meteorological Institute*.

Koltz, D., Seiler, Moser, H. and Neumaier, F. (1980) Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments.

KNMI, (2003). *Klimaat Klimaatatlas van Nederland, normaalperiode 1971-2000*. Uitgeverij Elmar, Rijswijk.

KNMI, (2008). Toelichting getransformeerde tijdreeksen. KNMI

Lenderink, G., (2006). KNMI'06 scenarios: interpolation to monthly changes. KNMI

Oude Essink, G.H.P., (1998). MOC3D adapted to simulate 3D density-dependent groundwater flow. *Proc. of the MODFLOW'98 Conf., Oct. 4-8, 1998, Golden, Colorado, USA, vol. 1, pp. 291-303.*

Oude Essink, G. H. P. (2001). Density dependent groundwater flow: salt water intrusion and heat transport. Lecture notes, Utrecht University, Institute of Earth Sciences, The Netherlands, p. 136

Oude Essink, G.H.P., 2007, Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied, H2O, nr 19, 60-64.

Oude Essink, G.H.P., Stevens, S., de Veen, B., Prevo, C., Marconi, V., Goes, B. de Louw, P., Heerdink, R. (2009). Meetcampagne naar het voorkomen van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland. TNO-rapport 2007-U-R0925/A

Santing, G. (1980), Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correcties op de stijghoogten, H₂O 13(22): 544-548

Sternberg, S.P.K. (2004). Dispersion Measurements in Highly Heterogeneous laboratory Scale Porous Media. *Transport in Porous Media 54: 107-124*

Van Dam, A.M., Clevering, O.A., Voogt, W., Aendekerk, Th.G.L. & van der Maas, M.P. (2007). Zouttolerantie van landbouwgewassen, Deelrapport Leven met zout water. Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Van den Hurk B., Klein-Tank A. & Co-Authors, (2006). KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands'. *Scientific Report WR-2006-01, Royal Netherlands Meteorological Institute.*

Vernes, R.W., Hummelman, H.J., Lang, F.D. de & Menkovic, A. (2009). REGIS Zeeland, Deelrapport B: Hydrogeologische opbouw en hydraulische eigenschappen van Holocene afzettingen (in preparation). Utrecht, *TNO Built Environment and Geosciences*

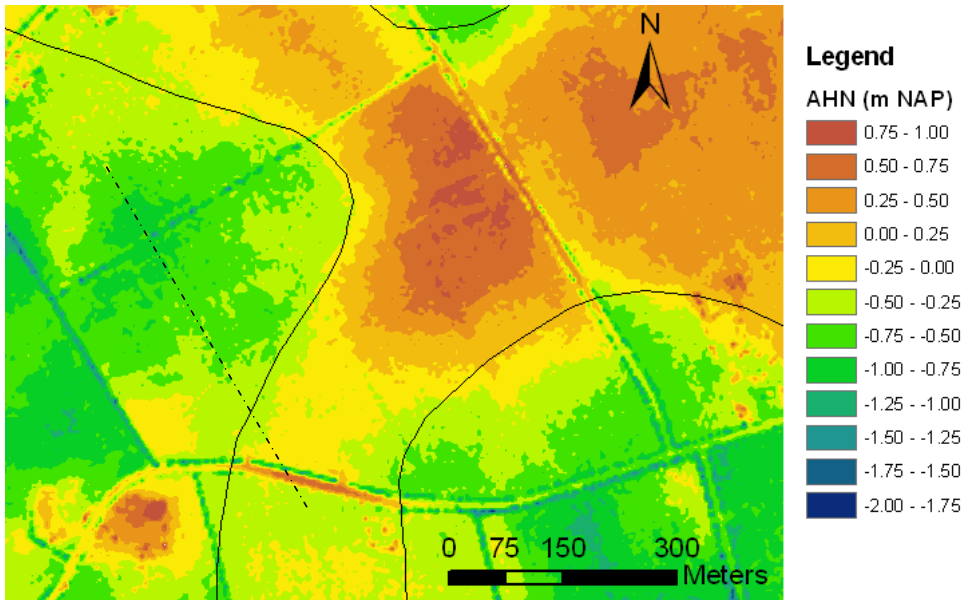
8 Appendices

Appendix 1.
Dimensies van alle modellagen.

laag	dikte (m)	top(m NAP)	basis (m NAP)
1	0.3	1	0.7
2	0.3	0.7	0.4
3	0.3	0.4	0.1
4	0.3	0.1	-0.2
5	0.3	-0.2	-0.5
6	0.3	-0.5	-0.8
7	0.3	-0.8	-1.1
8	0.3	-1.1	-1.4
9	0.3	-1.4	-1.7
10	0.3	-1.7	-2
11	0.3	-2	-2.3
12	0.3	-2.3	-2.6
13	0.3	-2.6	-2.9
14	0.3	-2.9	-3.2
15	0.3	-3.2	-3.5
16	0.5	-3.5	-4
17	0.5	-4	-4.5
18	0.5	-4.5	-5
19	0.5	-5	-5.5
20	0.5	-5.5	-6
21	0.5	-6	-6.5
22	0.5	-6.5	-7
23	0.5	-7	-7.5
24	0.5	-7.5	-8
25	0.5	-8	-8.5
26	0.5	-8.5	-9
27	1	-9	-10
28	1	-10	-11
29	1	-11	-12
30	1	-12	-13
31	1	-13	-14
32	1	-14	-15
33	1	-15	-16
34	2	-16	-18
35	2	-18	-20
36	3	-20	-23
37	3	-23	-26
38	3	-26	-29
39	2.5	-29	-31.5
40	2.5	-31.5	-34
41	5	-34	-39

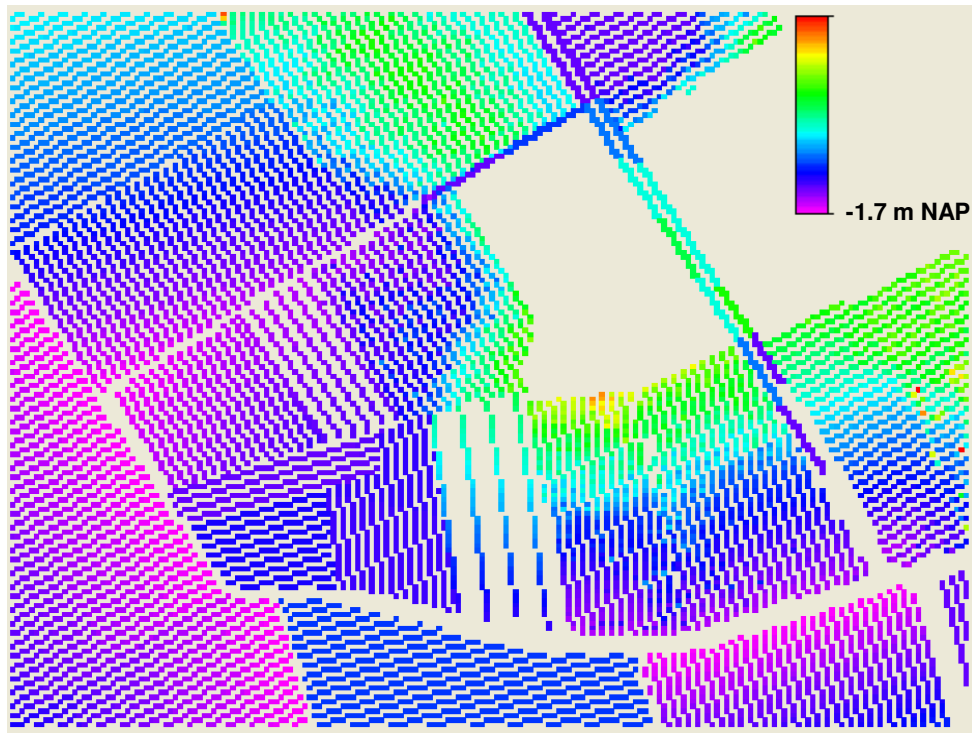
Appendix 2.

Ligging van de kreekkrug in het perceel (zwart omlijnt) en de hoogte volgens het AHN. De stippellijn laat de locatie zien van de doorsnede van figuur 3.1.



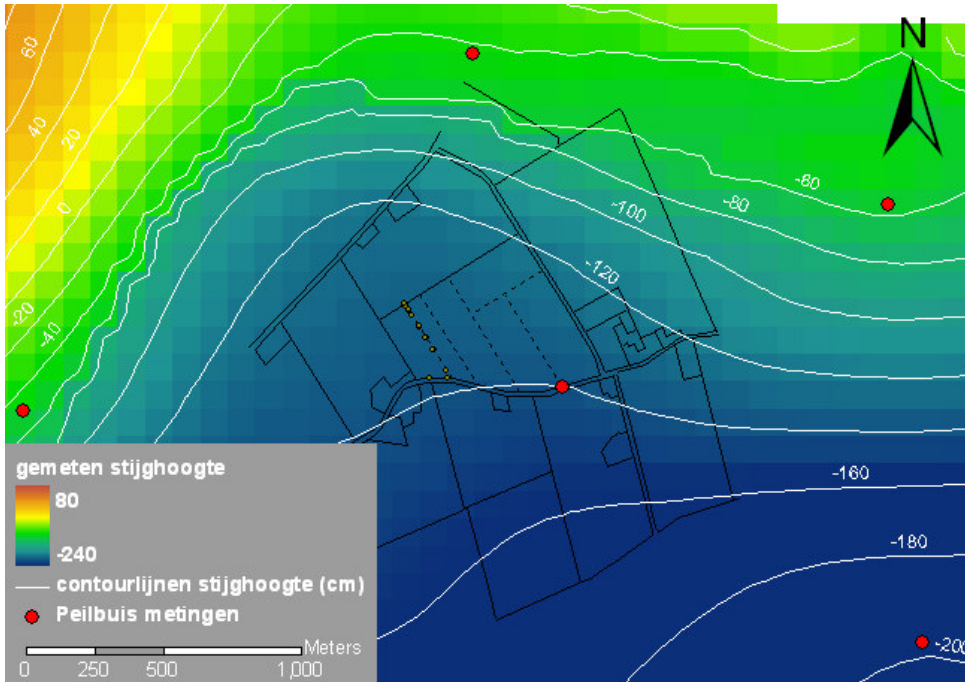
Appendix 3

Diepteligging van drainage buizen binnen het modeldomein.



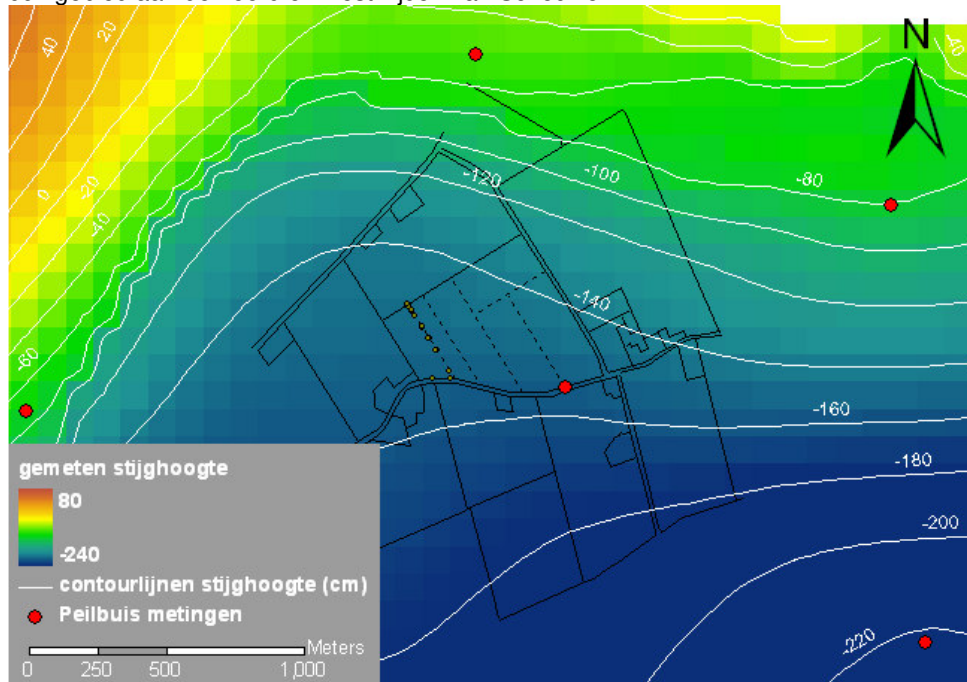
Appendix 4

Gemeten zoetwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket in de winter van 1993. Regionale grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket is in zuidoostelijke richting. Deze richting wordt veroorzaakt door de hoge zoetwaterstijghoogte in het duingebied aan de noord en west zijden van Schouwen.



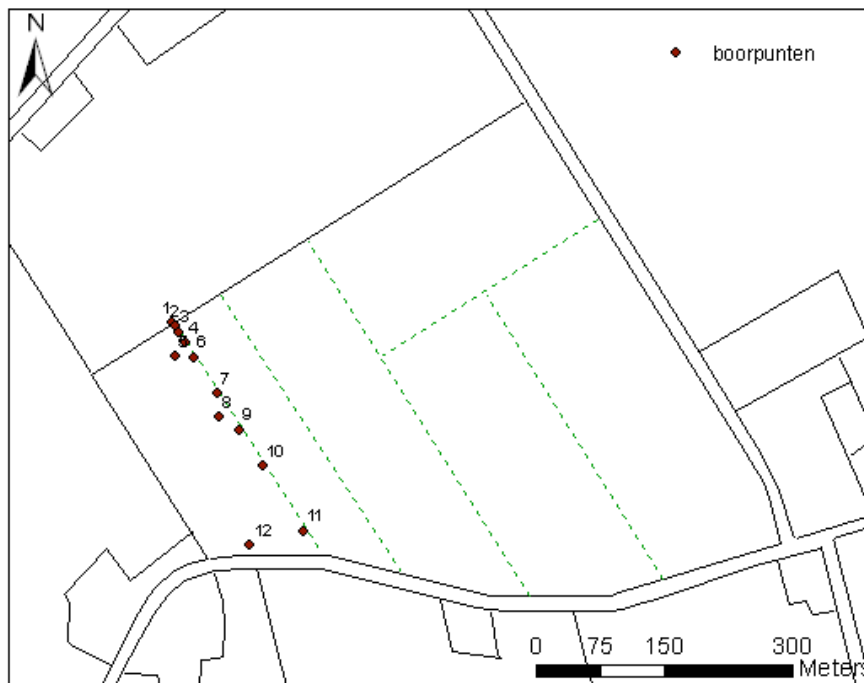
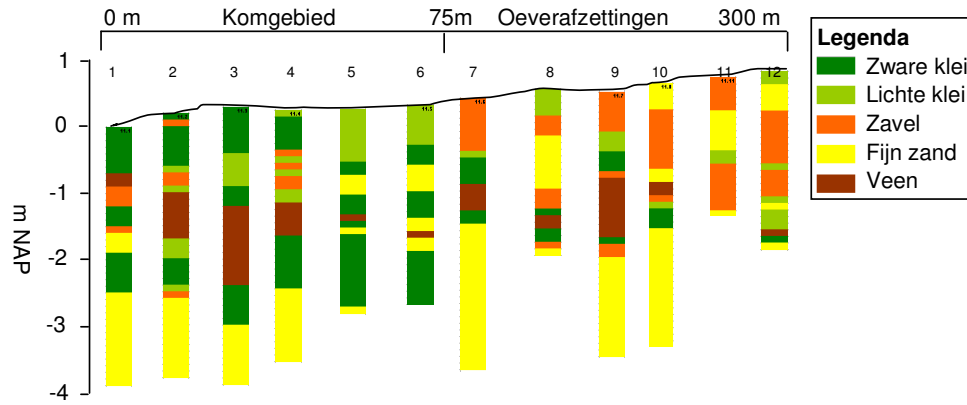
Appendix 5

Gemeten zoetwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket in de zomer 1994. Regionale grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket is in zuidoostelijke richting. Deze richting wordt veroorzaakt door de hoge zoetwaterstijghoogte in het duingebied aan de noord en west zijden van Schouwen.



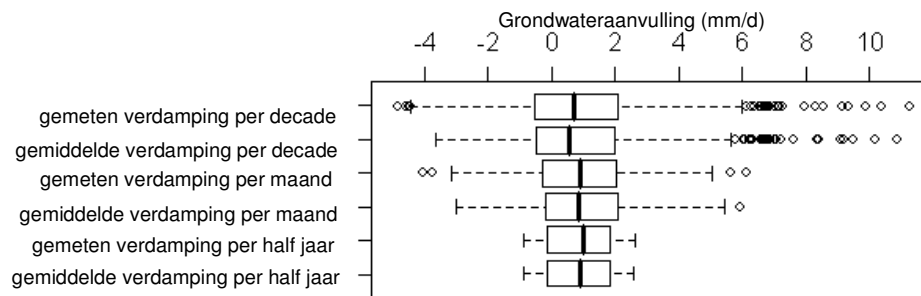
Appendix 6

Boorprofielen voor verschillende punten in het perceel.



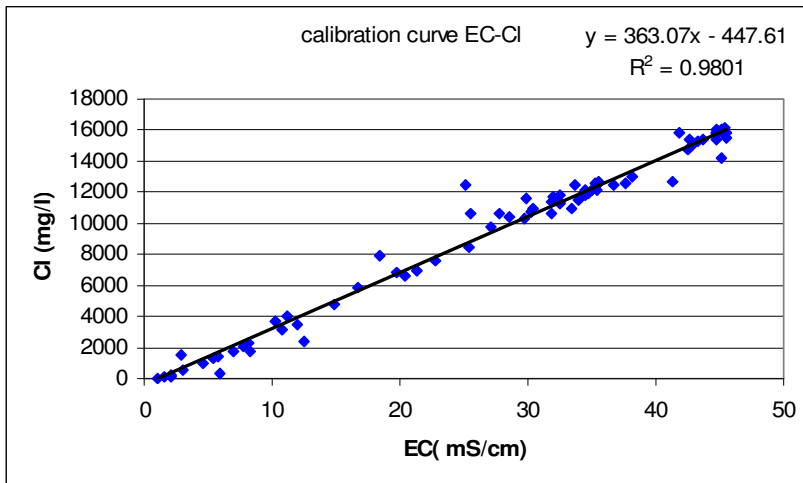
Appendix 7

Grondwateraanvulling per half jaar, maand en decade berekend met gemeten verdamping en gemiddelde verdamping voor de termijn 1990-2008. De box geeft de locatie van het eerste kwartiel en het derde kwartiel, de dikgedrukte lijn de mediaan. Met de stippellijnen is de waarde van het minimum en het maximum aangegeven. Wanneer observaties buiten 1.5 keer de interkwartielafstand van het eerste of derde kwartiel liggen worden ze beschouwd als uitschieter (cirkels).



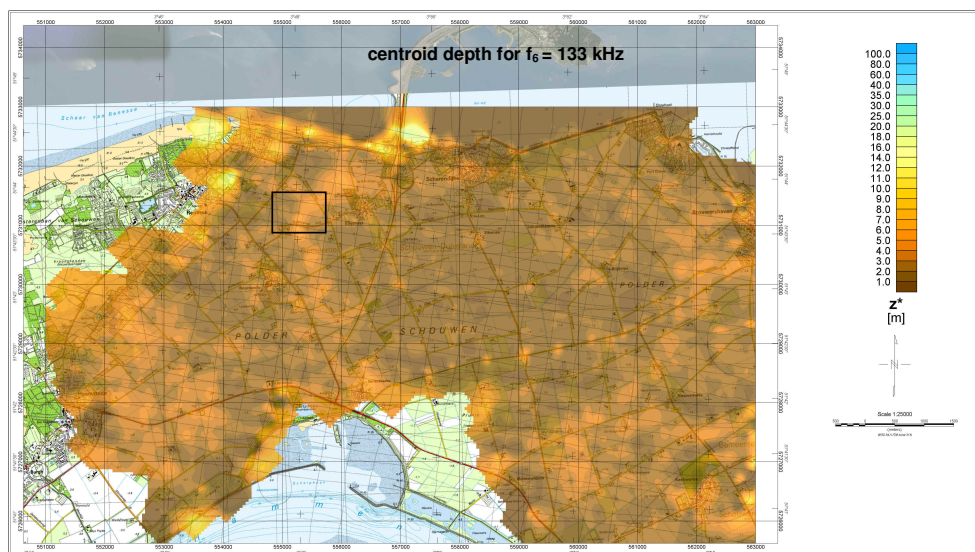
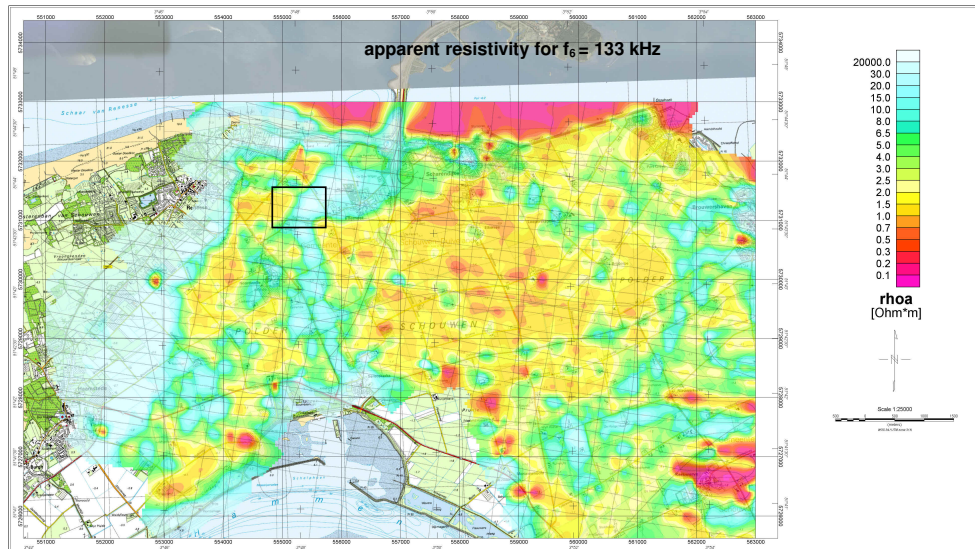
Appendix 8

Calibratie curve om gemeten EC van het grondwater om te rekenen naar zoutconcentratie. Deze calibratie curve is afgeleid van laboratoriumanalyses van zouten in het grondwater in het studiegebied.



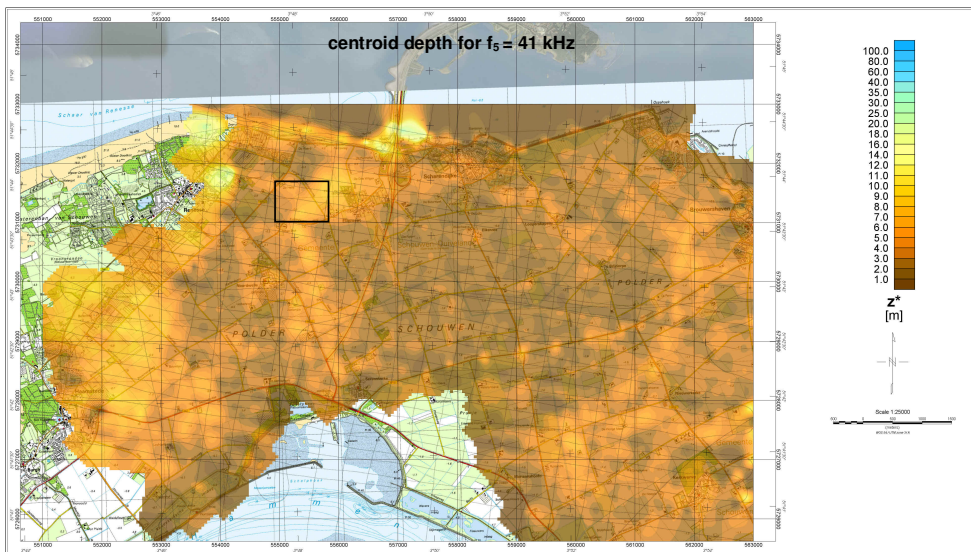
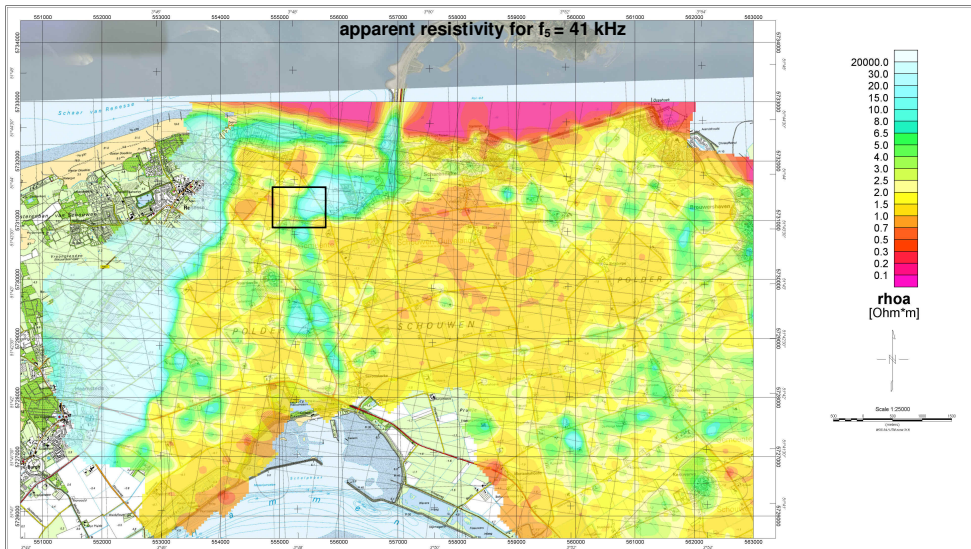
Appendix 9

Schijnbare elektromagnetische weerstand en zwaartepunt diepte voor een frequentie van 133 kHz. Het zwarte kader is de locatie van het studiegebied



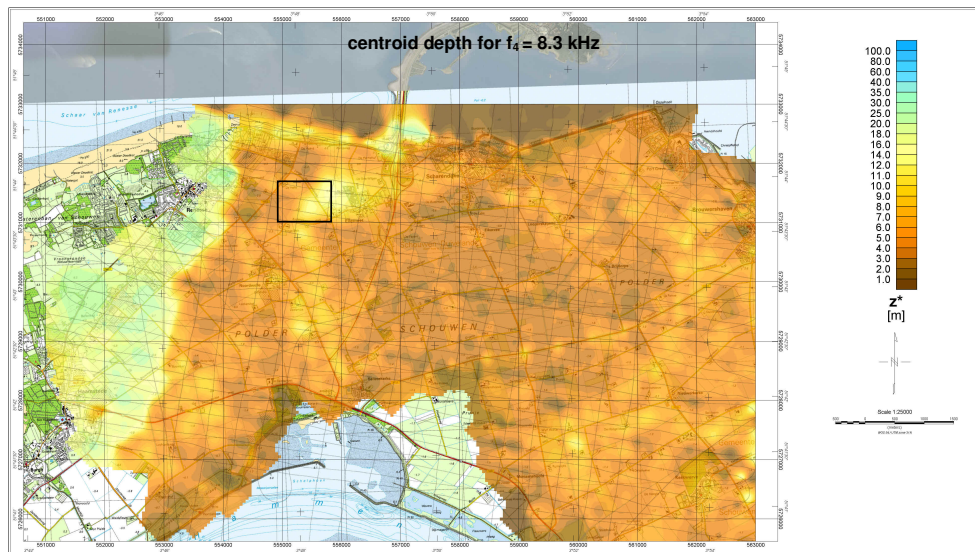
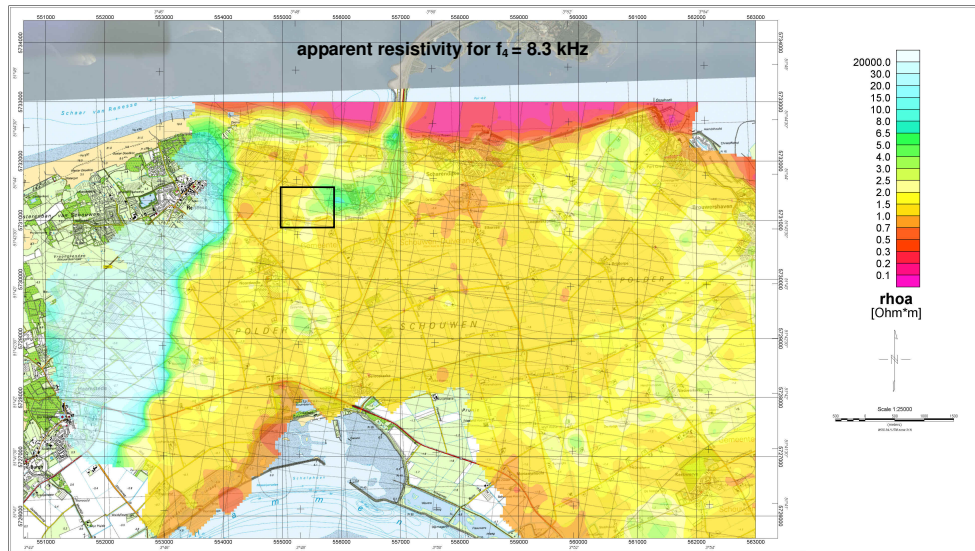
Appendix 10

Schijnbare elektromagnetische weerstand en zwaartepunt diepte voor een frequentie van 41 kHz. Het zwarte kader is de locatie van het studiegebied



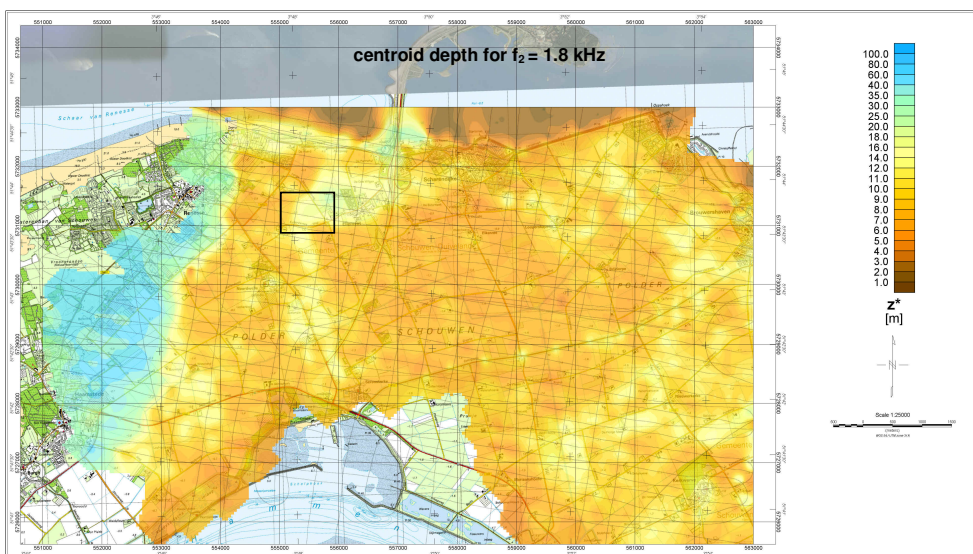
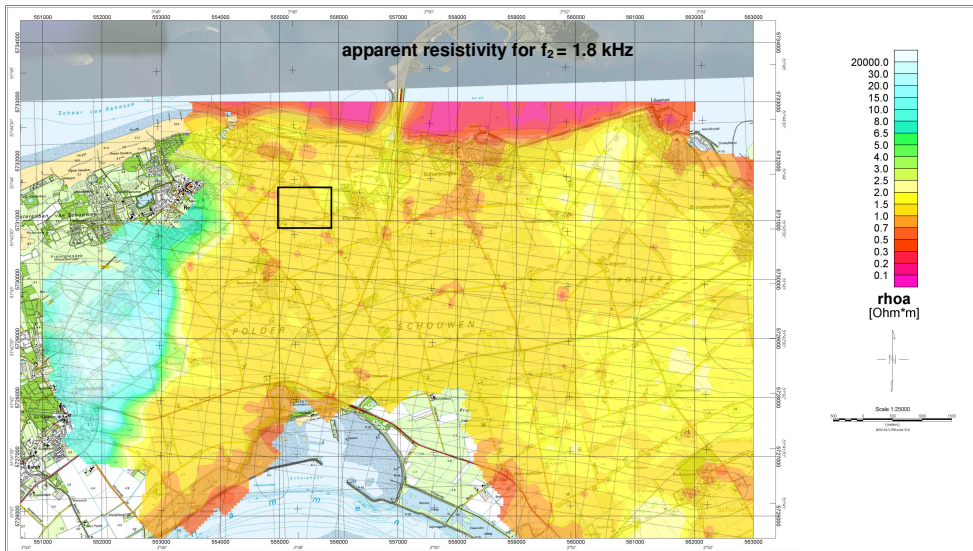
Appendix 11

Schijnbare elektromagnetische weerstand en zwaartepunt diepte voor een frequentie van 8.3 kHz. Het zwarte kader is de locatie van het studiegebied



Appendix 12

Schijnbare elektromagnetische weerstand en zwaartepunt diepte voor een frequentie van 1.8 KHZ. Het zwarte kader is de locatie van het studiegebied



Appendix 13

Resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor het komgebied. Verschillen in diepteligging van het brak-zout grensvlak en verschillen in zoetwaterstijghoogte zijn afgebeeld in cm en zijn bepaald voor de gemiddelde situatie van het jaar 2008.

referentie:

diepte brak-zout grensvlak 103 cm beneden maaiveld,
zoetwaterstijghoogte modellaag 11 -133.3 cm NAP, zoetwaterstijghoogte modellaag 17 -
128 cm NAP

Parameter	verandering	diepte brak-zout zoetwater- stijghoogte modellaag			verandering	diepte brak-zout zoetwater- stijghoogte modellaag		
		11	17			11	17	
Doorlaatvermogen buisdrainage	0.025 m/d	208	12.3	8.2	0.25 m/d	-31	-13.7	-11.2
Hor. hydraulische doorlatendheid, Kh	/3	39	-1.6	-2.9	*3	-13	2.5	2.1
Anisotropie	1	36	0.3	-0.3	10	-10	-0.5	-0.3
diepte drainagebasis	+10 cm	34	5.0	3.0	-10 cm	-3	-4.6	-3.8
grondwater tijdstap	Decade	13	0.0	-0.5	Dag	-9	0.1	0.0
doorlaatvermogen slootbodem	*4	12	-3.4	-4.1	/4	-5	2.8	2.6
Bergingscoëfficiënt	*10	7	0.7	-0.1	/10	-2	0.1	0.0
freatische bergingscoëfficiënt	0.2	5	0.2	0.1	0.05	-3	0.0	-0.5
Ver. hydraulische doorlatendheid, Kv	*5	6	0.9	-0.5	/5	2	-3.1	0.4
porositeit	+0.1	-3	0.0	-0.1	-0.1	-1	0.0	0.0

Appendix 14

Resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor de kreekrug. Verschillen in diepte ligging van het brak-zout grensvlak en verschillen in zoetwaterstijghoogte zijn afgebeeld in cm en zijn bepaald voor de gemiddelde situatie van het jaar 2008.

referentie:

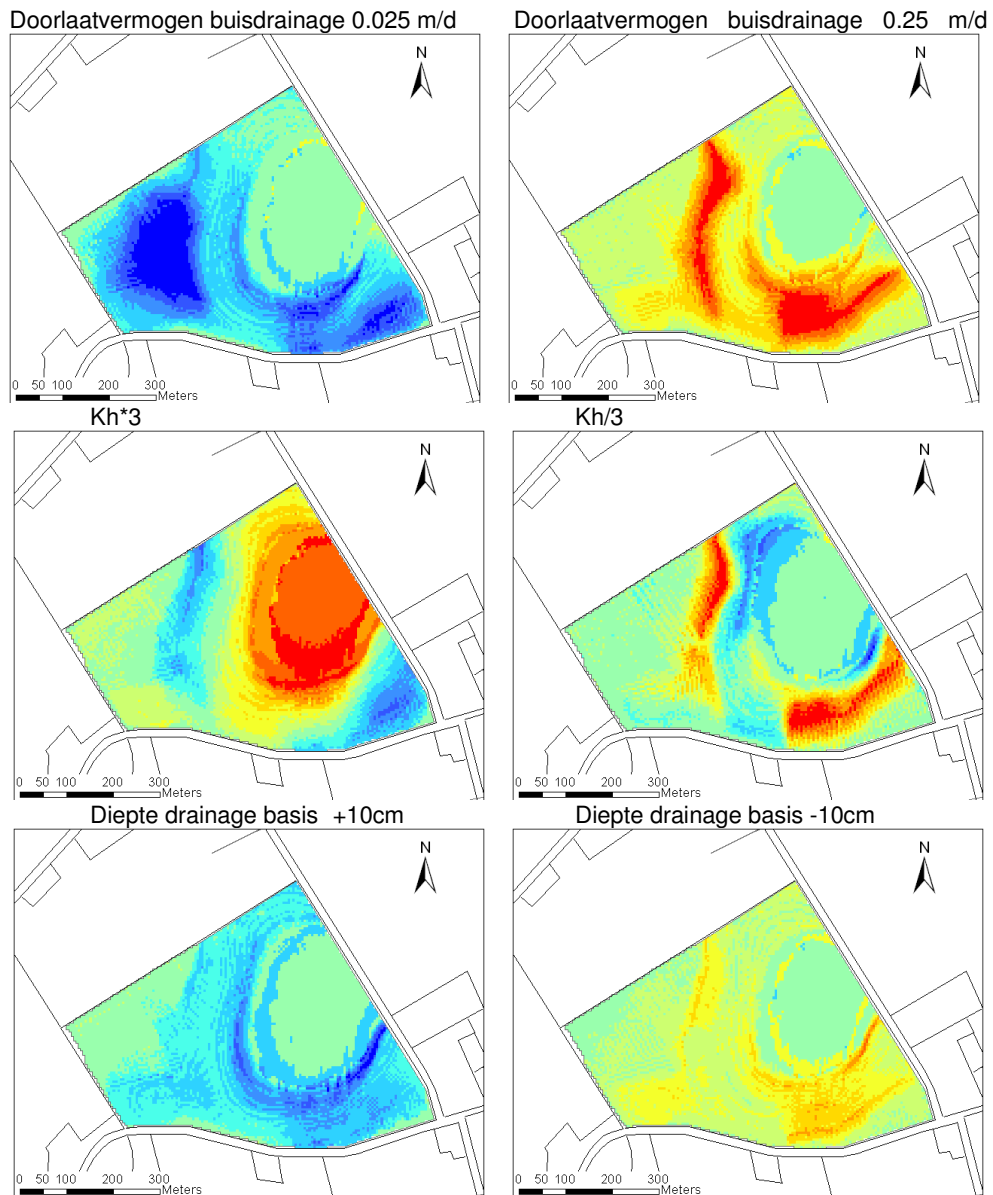
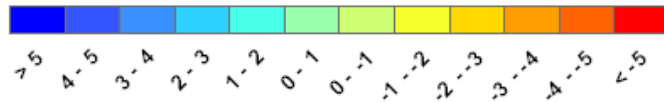
diepte brak-zout grensvlak 1872 cm beneden maaiveld,
zoetwaterstijghoogte modellaag 11 -78.7 cm NAP, zoetwaterstijghoogte modellaag17 -79.0 cm NAP

Parameter	verandering	diepte brak-zout zoetwater- stijghoogte modellaag			verandering	diepte brak-zout zoetwater- stijghoogte modellaag		
		11	17	11		17		
Hor. hydraulische doorlatendheid, Kh	/3	0	15.1	15.1	*3	-505	-13.0	-12.9
grondwater tijdstap	<i>Decade</i>	93	1.2	1.2	<i>Dag</i>	0	0.0	0.0
Ver. hydraulische doorlatendheid, Kv	*5	7	0.6	0.8	/5	-69	3.6	2.3
anisotropie	1	21	0.5	0.8	10	0	0.6	0.3
doorlaatvermogen buisdrainage	0.025 m/d	-1	3.5	3.5	0.25 m/d	0	-7.9	-7.8
ghb doorlatendheid	625	0	0.1	0.1	1	0	-1.2	-1.2
porositeit	+0.1	0	-0.3	-0.3	-0.1	0	0.3	0.3
freatische bergingscoëfficiënt	0.2	0	-0.1	-0.1	0.05	0	0.0	0.0
doorlatendheid slootbodem	*4	0	-1.8	-1.8	/4	0	1.6	1.6
diepte drainagebasis	+ 10cm	0	2.8	2.8	- 10cm	0	-3.0	-3.0
Bergingscoëfficiënt	*10	0	0.2	0.3	/10	0	0.0	0.0

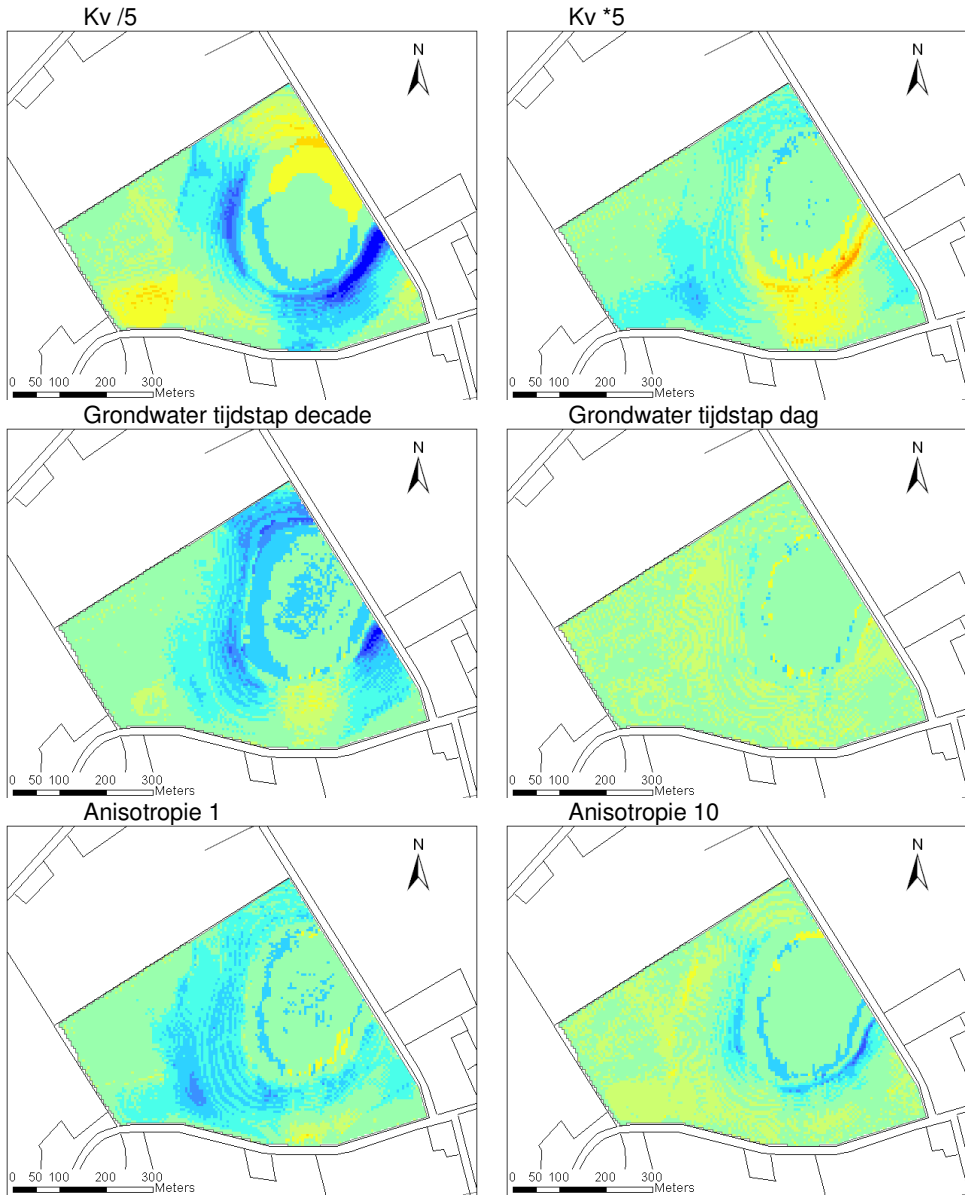
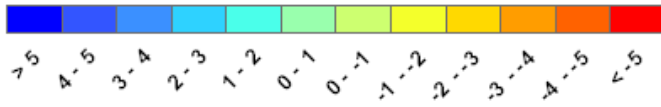
Appendix 15

Het verschil in diepteligging van het brak-zout grensvlak (m) voor de verschillende scenario's van de gevoeligheidsanalyse.

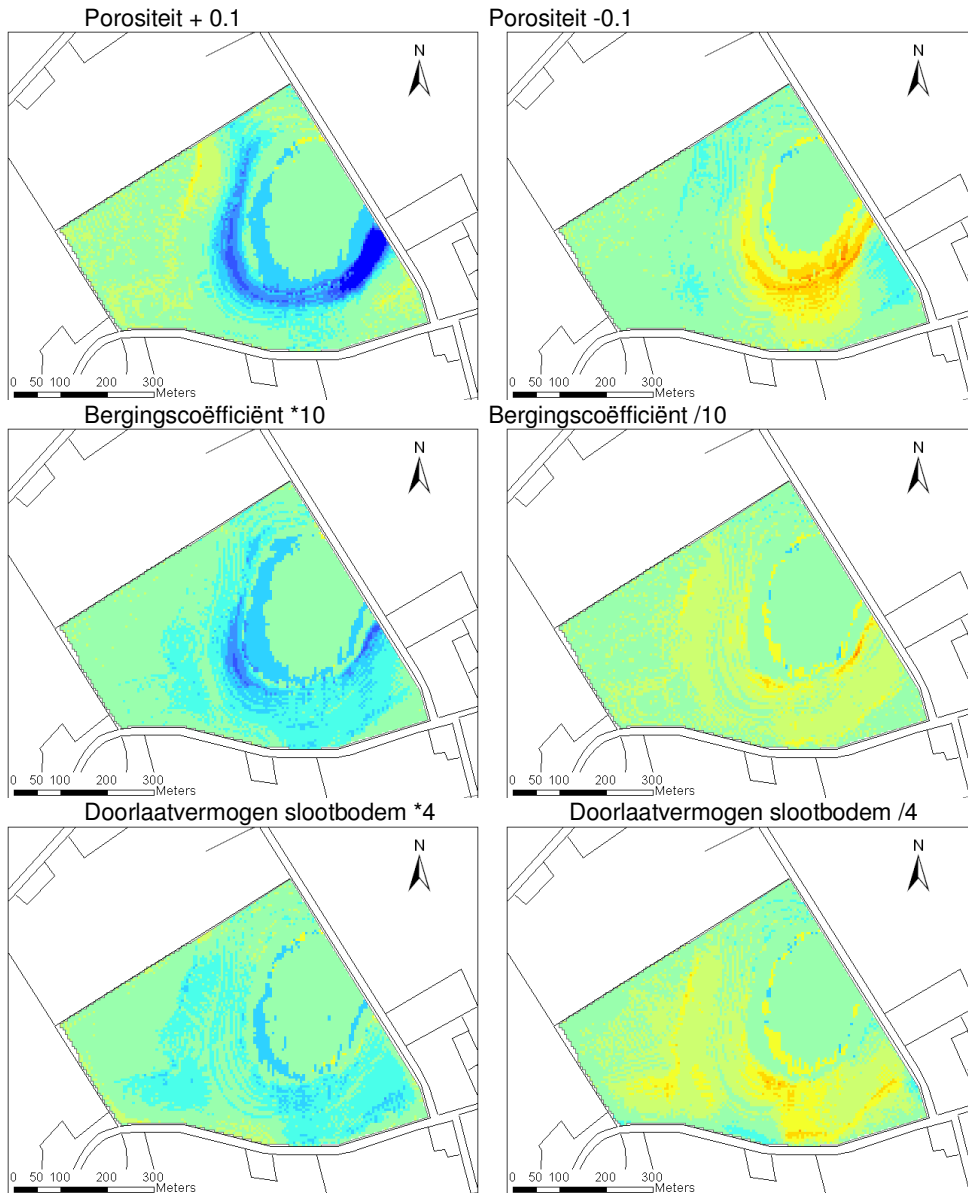
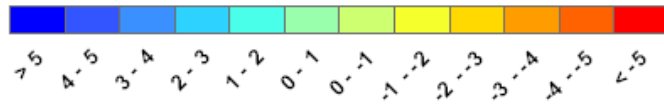
Legenda



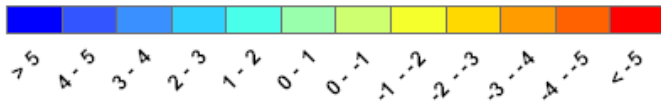
Legenda



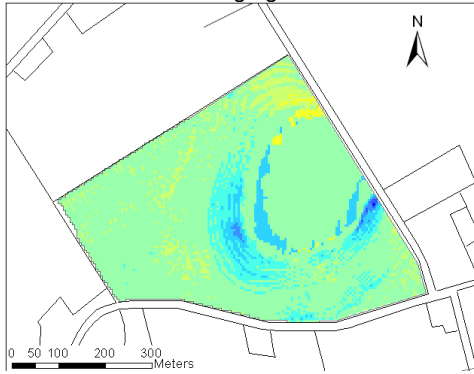
Legenda



Legenda

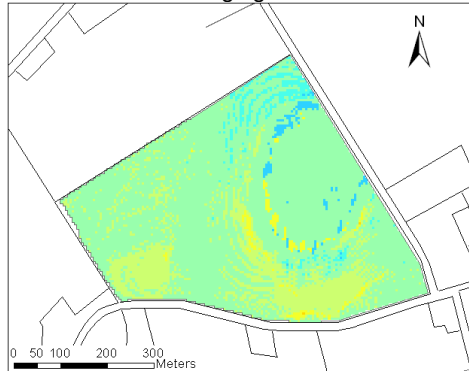


Freatische bergingscoëfficiënt 0.2

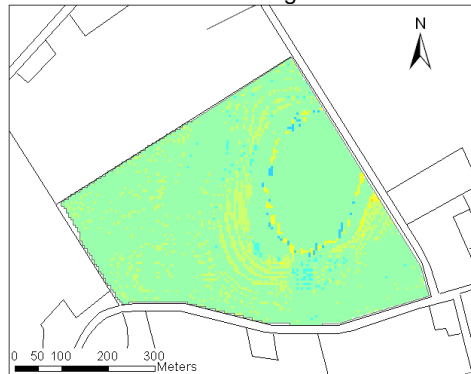
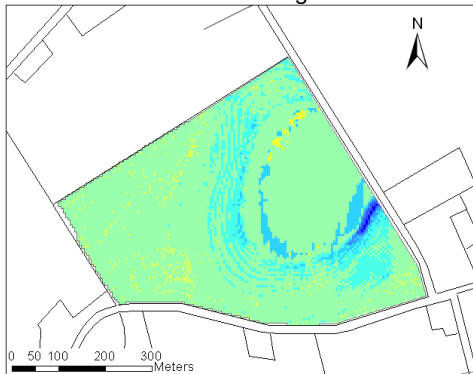


GHB doorlaatvermogen 1

Freatische bergingscoëfficiënt 0.05

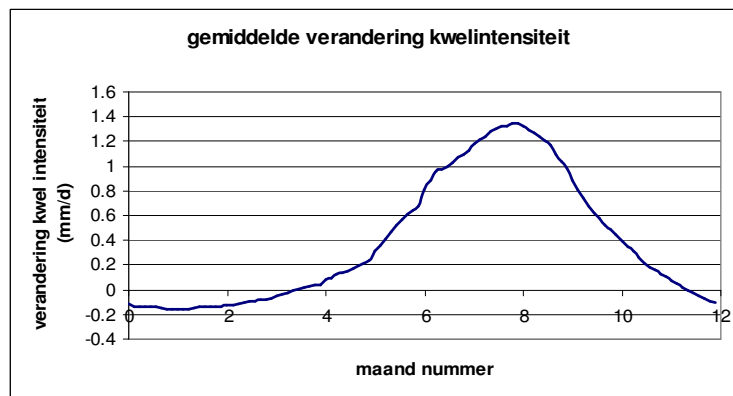
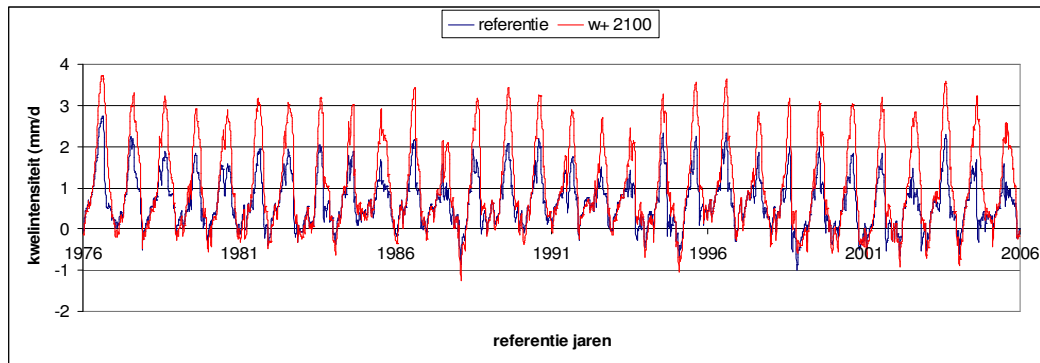


GHB doorlaatvermogen 625



Appendix 16

De kwelintensiteit in het komgebied voor het referentie scenario en het W+2100 klimaatscenario.



Appendix 17

De stijging van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket door een zeespiegelstijging van 85 cm voor verschillende afstanden tot de kust berekend met (Oude Essink, 2007):

$$\Delta\phi(x) = \phi_0 e^{-x/\lambda}$$

$$\lambda = \sqrt{kDc}$$

$\Delta\phi(x)$ = verhoging van stijghoogte in het watervoerend pakket (m);

ϕ_0 = verschil in waterpeil tussen het poldergebied en het Lauwersmeer (m);

x = lengte in het watervoerend pakket (m);

λ = karakteristieke lengte oftewel de spreidingslengte (m);

k = hydraulische conductiviteit van het watervoerend pakket (m/dag);

D = verzadigde dikte van het watervoerend pakket (m);

kD = doorlaatvermogen van het watervoerend pakket (m²/dag);

c = hydraulische weerstand van de afsluitende deklaag (dag).

