

3D-SIMULERING VAN DE EFFECTEN VAN EEN ZEESPIEGELSTIJGING OP DE VERDELING VAN ZOET EN ZOUT WATER ROND DE HAAN.

Nathalie Van Meir & Luc Lebbe

Dr. Nathalie Van Meir. Huidig werkzaam bij de Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH) Ingenieurgeologie. Email: vanmeir@erdw.ethz.ch

Prof. Dr. Luc Lebbe. Universiteit Gent, Geologisch Instituut, Krijgslaan, 281 (S8) B-9000 Gent

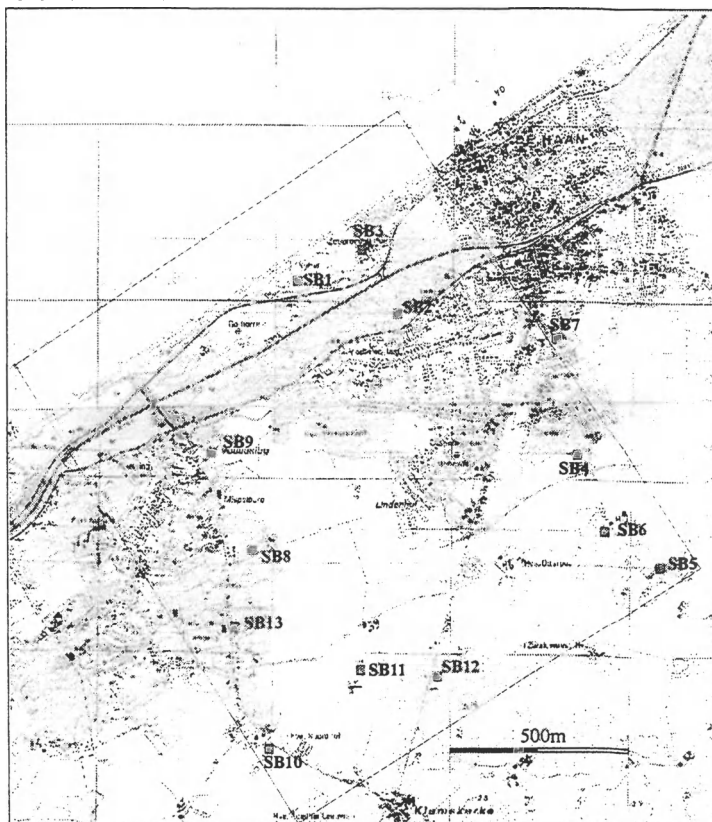
Inleiding

Een 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstromingsmodellering van een zeespiegelseijging wordt voorgesteld. In deze simulatie is veel aandacht besteed aan de geologische context, dwz aan een realistische invoer van de complexiteit van de Quartair watervoerende laag. Om tot deze invoerparameters te komen is een grondige studie van het gebied uitgevoerd met nieuwe boringen, geofysische boorgatmetingen en een inverse modellering van een pomp-upconing test. Deze laatste proef bestaat uit het naar omhoog pompen van de overgangszone tussen zoet en zout water. Door tegelijkertijd de verandering in verlaging en concentratie te meten kan men door een niet-lineaire regressie parameterwaarden aan de belangrijkste hydrogeologische eenheden toekennen. Deze parameterwaarden zijn dan gebruikt in een eerste 3D-simulatie om tot de huidige verdeling van zoet en zout water te komen en vervolgens in een simulatie om het effect van een zeespiegelverandering op deze verdeling te begrijpen.

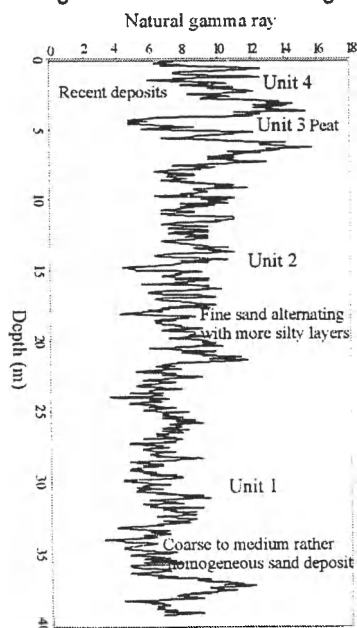
Geologische karakteristieken van het studiegebied

Het gemodelleerde gebied is zo'n 8 km² groot en omvat de belangrijkste morfologische eenheden aanwezig in het Belgische kustgebied: een zacht hellend strand, duinen met een gemiddelde hoogte, oude duinen met begroeiing, kreken en laag gelegen poelgronden met voornamelijk kleig materiaal. Dertien nieuwe boringen zijn zo geplaatst dat ze een 3D overzicht van het Quartair reservoir toelaten; twee doorsneden zijn gemaakt loodrecht op de kustlijn, een derde is evenwijdig met de kustlijn (Figuur 1). De boorbeschrijvingen in combinatie met de natuurlijke gamma logs laten een onderverdeling in 4 Hydrogeologische Eenheden toe. Een Hydrogeologische Eenheid is een verzameling van sedimenten met vergelijkbare hydrogeologische karakteristieken, zoals bv. horizontale en verticale doorlatendheid, anisotropie, porositeit enz. De grenzen van een Hydrogeologische Eenheid moeten bijgevolg niet overeenstemmen met een chronologische grens. De eerste Eenheid is gelegen bovenop het Tertiair substraat en bestaat uit grof tot medium redelijk homogeen zand. Dit wordt gekenmerkt door een laag natuurlijk gamma signaal; deze laag is met de natuurlijke gamma logs vervolgbaar over het hele studiegebied. De tweede Eenheid bestaat uit een afwisseling van siltige en fijnzandige lagen en wordt in het algemeen gekenmerkt door een hogere natuurlijk gamma. De derde Eenheid is het Subboreale Veen en is ook vervolgbaar in het landwaarts gelegen gedeelte van het studiegebied, nabij de duinen is er minder bewijs voor deze veenlaag, dit geeft typisch een zeer lage natuurlijke gamma (Figuur 2). De laatste eenheid, Eenheid 4 omvat de recente afzettingen en de samenstelling van deze eenheid hangt af van de morfologie; nabij de duinen bestaat deze eenheid uit zand, terwijl het in de polders zowel

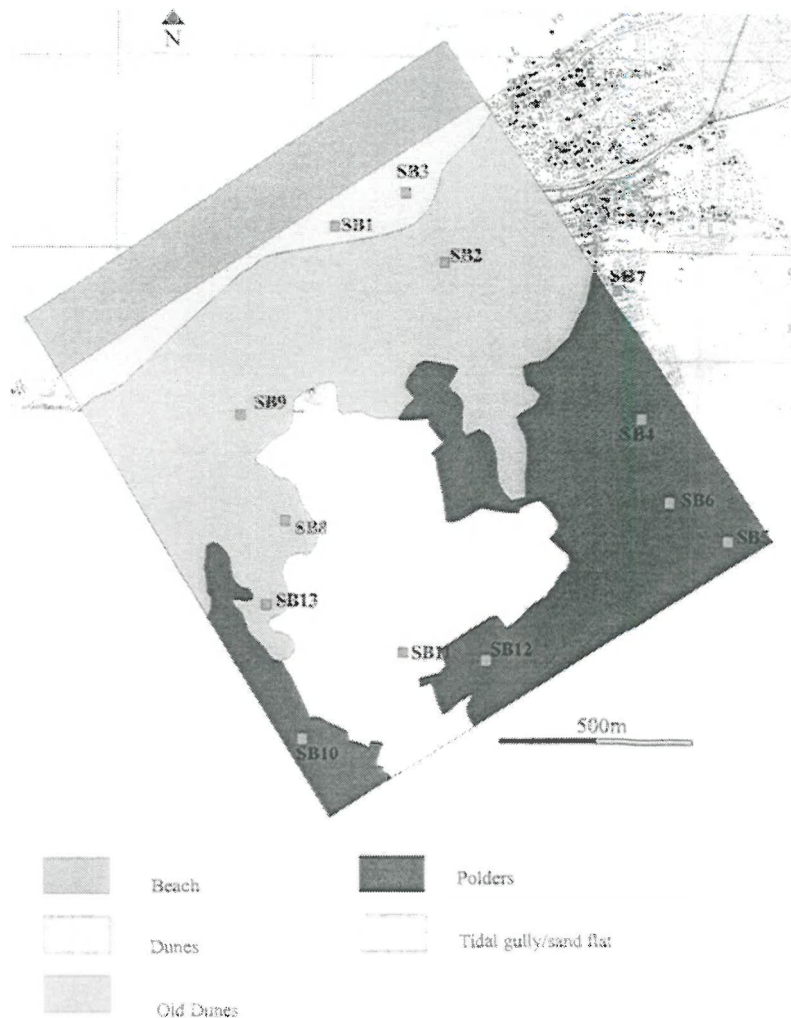
kleilig als zandig kan zijn. De morfolgie speelt een zeer belangrijke rol in de hydrogeologie en de afbakening van deze gebieden is dan ook belangrijk (Figuur 3).



Figuur 1. Aanduiding van de verschillende boringen en situatie in het Belgisch kustgebied



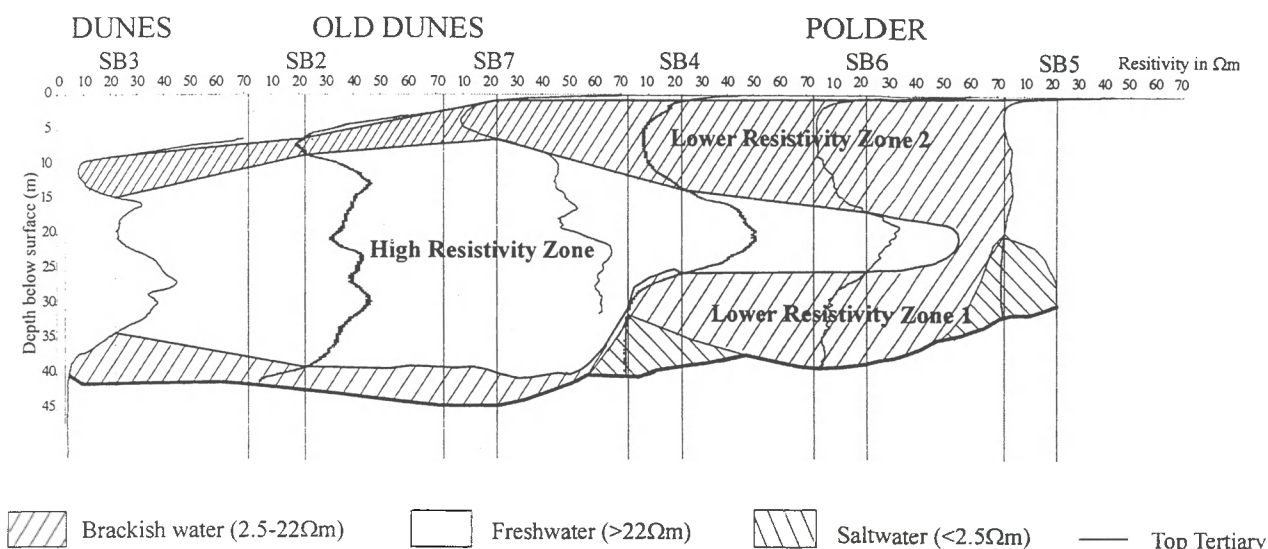
Figuur 2. De onderverdeling van de watervoerende laag in 4 Hydrogeologische Eenheden.



Figuur 3. De verschillende morfologieën in het studiegebied

Een andere hydrogeologische karakterisatie bestaat uit het definiëren van zones met zoet en zones met zout water. Deze interpolatie is gedaan aan de hand van Lang Normale (LN) resistiviteitsmetingen. Een hoge resistiviteit wijst op zoet water, een lage op zout water in een zandige afzetting. In een kleiige of siltige afzettingen zal de afzetting zelf de resistiviteit gedeeltelijk verlagen. De algemene hypothese over het ontstaan van de huidige verdeling van zoet en zout water begint bij de ontwikkeling van de recente duinen zo'n 1000 jaar geleden. Vóór deze periode wordt er vanuit gegaan dat alle Quartaire sedimenten met zout water verzadigd zijn, op het moment dat de duinen zich ontwikkelen, fungeren ze als infiltratiegebied en begint de verzoeting van het Quartair grondwaterreservoir. Zoet water stroomt van de duinen die de waterscheidingskam vormen naar zee en landwaarts, op deze manier ontstaat er een zoetwaterlens onder de duinen en een zoetwatertong die zich landwaarts uitstrekt. Deze hypothese kunnen we inderdaad terug zien in het LN resistiviteitsprofiel (Figuur 3). Hierin zien we een hoge resistiviteitszone die zich uitstrekt onder de duinen, de zoetwaterlens, een overgang naar een hoge resistiviteitszone diep in het Quartair, dit is de overgangszone van zoet naar zout water, deze overgangszone komt naar boven naarmate we meer

landwaarts gaan of anders gezegd de zoetwatertong strekt zich landwaarts uit, maar versmalt om uiteindelijk op 2300 m (voorbij SB6) te verdwijnen. De lage resistiviteitszone die we onder de duinen op kleine diepte zien is een gevolg van het hogere siltgehalte in de afzettingen en is geen gevolg van de aanwezigheid van zout water, aangezien het hier een infiltratiegebied betreft. Meer landwaarts is de tweede resistiviteitszone gedeeltelijk door een hoger silt of kleigehalte veroorzaakt maar ook door nog resterend zout water.



Figuur 4. De Lang Normale respons in één doorsnede loodrecht op de kust, de verdeling in zoet, zout en brak water.

Het model MOCDENS3D

Het gebruikte model is een driedimensionaal, eindig-verschil, dichtheidsafhankelijk opgeloste stoffen transport model (Oude Essink 1998). De belangrijkste karakteristieken zijn dat het blok-gecentreerd is, dat het een numerieke oplossingstechniek gebruikt voor het oplossen van de grondwaterstromingsvergelijking afkomstig uit het model Modflow; dat het de advectie-dispersie vergelijking in twee delen oplost waardoor numerieke dispersie verminderd wordt, zo wordt advectie met een deeltjes-vervolg methode opgelost (particle tracking) en wordt het dispersie gedeelte door een eindig-verschil methode opgelost. De modelstructuur is gelijkend op de Modflow structuur met pakketten die men kan toevoegen naargelang het gestelde probleem; omdat het niet massa-conservatief is, maakt het model gebruik van drie verschillende stabiliteitscriteria en is het belangrijk een uniforme grid te gebruiken om volumeveranderingen van cel naar cel te vermijden.

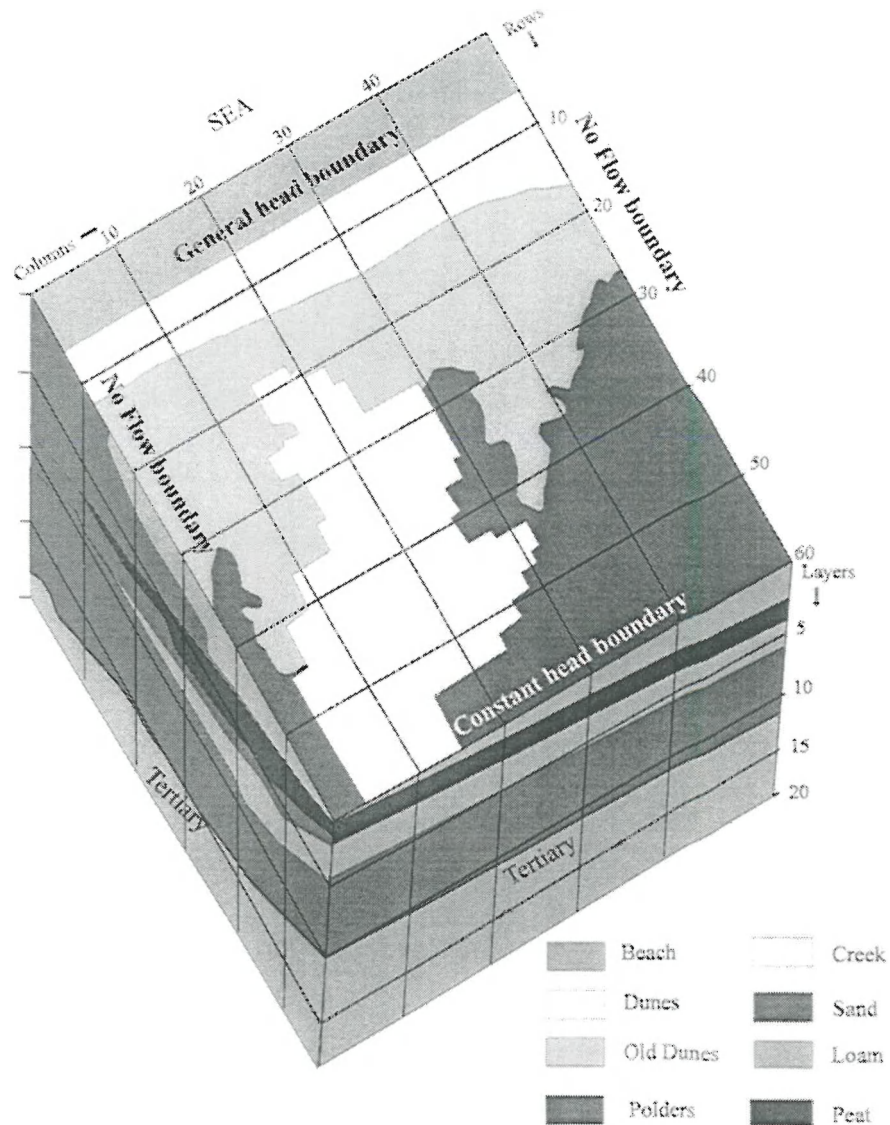
Bij een eindig-verschil model moet het gesimuleerde gebied onderveeld worden in een aantal rijen, kolommen en lagen. Van noord naar zuid is het model 3000 m lang en wordt het onderverdeeld in 60 rijen, van west naar oost is het modelgebied 2600 m lang en wordt het onderverdeeld in 52 kolommen. Over het algemeen is het Quartaire reservoir ongeveer 40 m dik en dit wordt onderverdeeld in 20 lagen van 2 m. Eén cel is bijgevolg 50 m lang, 50 m breed en 2 m dik, een volume 5000 m³.

Aan elke cel moeten geologische parameterwaarden worden toegekend, maar in het algemeen heeft het model ook een aantal modelparameterwaarden nodig. Deze modelparameters zijn getest op hun gevoeligheid en volgende waarden zijn aangenomen: in elke cel worden 8 deeltjes geplaatst; gedurende 1 tijdstap kan een deeltje 90% van de dimensie van de cel afleggen, in dit geval 45m van een lengte van 50 m; en het sluitingscriterium ligt op $5 \cdot 10^{-6}$ m, dit wil zeggen dat het verschil in stijghoogte tussen twee opeenvolgende iteraties kleiner moet zijn dan 0.5 mm voor er een oplossing wordt neergeschreven. Een tijdstap is een onderdeel van een stressperiode. Tijdens een stressperiode veranderen er geen randvoorwaarden, na elke tijdstap wordt het snelheidsveld opnieuw berekend aan de hand van de nieuwe concentratieverdeling die is ontstaan door de verplaatsing van concentratiedeeltjes. Wanneer één van de drie stabiliteitscriteria overschreden wordt, deelt het programma de tijdstap nog verder op in een aantal deeltjes-verplaatsingen. Wanneer alle tijdstappen van een stressperiode zijn berekend, kunnen de randvoorwaarden opnieuw veranderen.

Uiteraard heeft het model ook nood aan grensvoorwaarden. In dit geval worden de oost- en westgrens evenals de benedengrens van het model als ondoorlatend beschouwd. Dit is mogelijk doordat de grondwaterstroming hoofdzakelijk in een noord-zuid richting stroomt vanaf de waterscheidingskam in de duinen naar zee en naar de polders. De ondergrens wordt gevormd door het Tertiair substraat dat uit een zware klei bestaat, ten opzichte van de bovenliggende Quartaire afzettingen kan dit bijgevolg als ondoorlatend beschouwd worden. De noordgrens of de kustlijn is een algemene stijghoogte grens, dit wil zeggen dat vanaf rij 7 tot rij 1 er een grens wordt gehouden van 4.2 mTAW tot 2.36 mTAW. Een algemene stijghoogte grens laat infiltratie toe naar de cel wanneer de omliggende cellen een hogere stijghoogte hebben en drainage wanneer de omliggende cellen een lagere stijghoogte hebben. Op de zuidrand is er een constante stijghoogte grens die gebaseerd is op waarnemingen in de geboorde piezometers en op topografische veranderingen. Aangezien het een "steady state" simulatie betreft en aangezien het drainageniveau in de polders hetzelfde blijft, is dit een aanvaardbare grensvoorwaarde.

Simulatie van huidige toestand

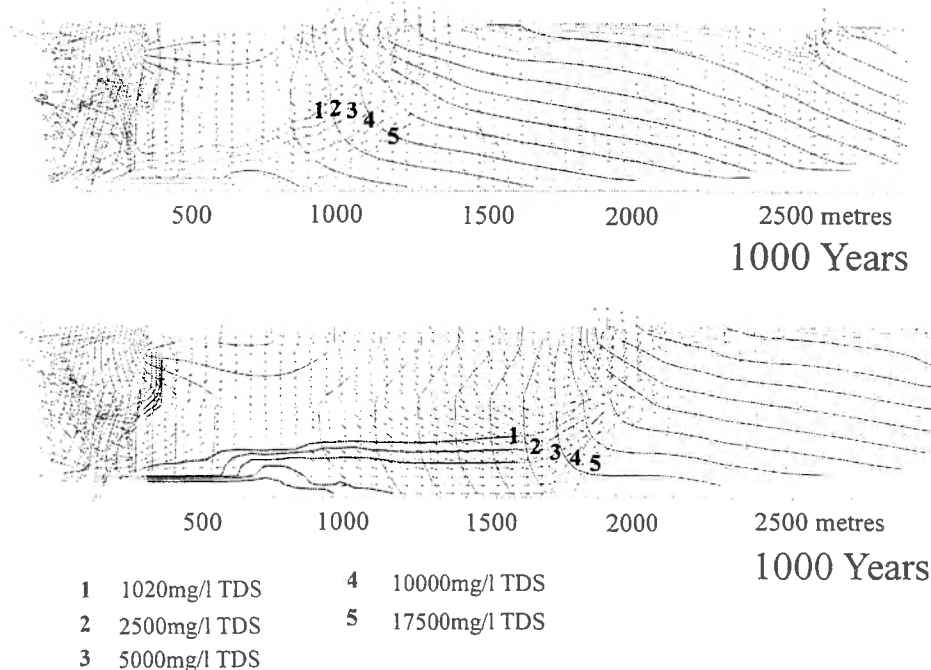
MOCSENS3D eist een uniform grid, maar in realiteit zijn de afzettingen niet zo uniform verdeeld, daarom is er een methode bedacht om de variatie van het Quartair in te brengen in het model, maar het grid uniform te laten. In een eerste stap wordt de geologische informatie uit de boorbeschrijvingen met elkaar gecorreleerd en worden kaarten van dikte voor de verschillende eenheden gemaakt. De interpolatie voor dikte is eerst manueel en dan met Surfer software uitgevoerd. In een tweede stap worden parameterwaarden aan de verschillende Hydrogeologische eenheden toegekend. Deze parameterwaarden zijn afkomstig van een pomp-upconingsproef en staan samengevat in Tabel 1. Vervolgens is een Fortran programma geschreven dat het uniforme grid van MOCSENS3D over de geologische werkelijkheid plaatst (Figuur 5). Het programma berekent de gemiddelde horizontale doorlatendheid en de gemiddelde hydraulische weerstand van elke cel. Deze waarden worden dan vermenigvuldigd met de dikte van elke cel (2 m), dit is de transmissiviteit (uitgedrukt in m^2/dag) en gedeeld door de dikte van elke cel, dit geeft de verticale geleidbaarheid (uitgedrukt in $1/dag$); deze twee parameters zijn nodig voor MOCSENS3D.



Figuur 5. Het eindig-verschil model met de invoergegevens voor MOCDENS3D, de geologie zoals ze staat weergegeven op de figuur is ook de werkelijke invoer voor het model.

De simulatie om de huidige verdeling van zoet en zout water te berekenen begint bij een model gevuld met zout water, dwz een TDS gehalte van 25000 mg/l. Er is een infiltratie van 280mm/jaar zoet water in het duingebied en 60% van 280 mm/jaar in het oude duingebied, omdat deze begroeing hebben. Na een simulatie van 1000 jaar is de huidige situatie bereikt. De belangrijkste karakteristieken die we in de waarnemingen zien (Figuur 3), worden ook weerspiegeld in de modelresultaten (Figuur 6). Deze figuur geeft twee doorsneden loodrecht op de kustlijn, 3000 m landwaarts van de kustlijn. De pijlen geven de stromingsrichting aan en de grootte van de pijlen is evenredig met de grondwatersnelheid. De volle lijnen geven de isoconcentratielijnen weer. Zo zien we opnieuw de zoetwatertong die

landwaarts gaat en de zoetwaterlens onder de duinen die bijna het Tertiair substraat bereikt, er is de redelijk smalle overgangszone die we ook in waarnemingen zagen en de afhankelijkheid voor de zoet-zout waterverdeling van de morfologie is ook zichtbaar, wanneer men twee uiterste situaties vergelijkt zoals in figuur 6. Kolom 20 is een doorsnede door een zone waar er geen oude duinen zijn en er een rechtstreeks overgang is van de duinen naar een kreekgebied dat gedraineerd wordt op 2.9 mTAW, kolom 40 aan de oostzijde van het modelgebied heeft dan weer een groot oppervlak met duin en oude duinen en bijgevolg een groot infiltratiegebied en een langzamere overgang van stijghoogtes in de oude duinen naar poldergebied met een drainagehoogte van 2.5 mTAW. Op figuur 6 kan verder ook waargenomen worden dat de zoetwatertong zich landwaarts uitstrekt in Eenheid 1, de meest doorlatende laag. Het wordt ook duidelijk waarom er in de polders nog steeds zout water aanwezig is, ondanks zoet water infiltratie. Het zoete water dat van de duinen landwaarts stroomt verdwijnt door drainage aan de grens tussen oude duinen en polders of kreek/zandwad. Uit deze bevindingen kan men bijgevolg besluiten dat het mogelijk is gebleken de complexiteit van het Quartair voldoende in te brengen en tegelijkertijd realistische parameterwaarden in te geven.



Figuur 6. Modelresultaat voor de eerste simulatie, voor kolom 20 (boven) en kolom 40 (onder) loodrecht op de kustlijn. Voor de positie van de verschillende kolommen zie figuur 5.

Tabel 1. Parameter waarden voor de modellering

Parameter	Parameter waarde
K_h Unit1	10m/day
K_v Unit1	6.7m/day
K_h Unit2	4m/day
K_v Unit2	0.04m/day

$K_{h \text{ Unit3+4}}$	Shore and dunes	Old dunes	Creek	Polder
	8m/day	6m/day	0.6m/day	0.06m/day
$K_{v \text{ Unit3+4}}$	Shore and dunes	Old dunes	Creek	Polder
	5.3m/day	4m/day	0.4m/day	0.04m/day
α_L		0.5 m		
$\alpha_{TH}=\alpha_{TV}$		0.05 m		
n_e		0.45		

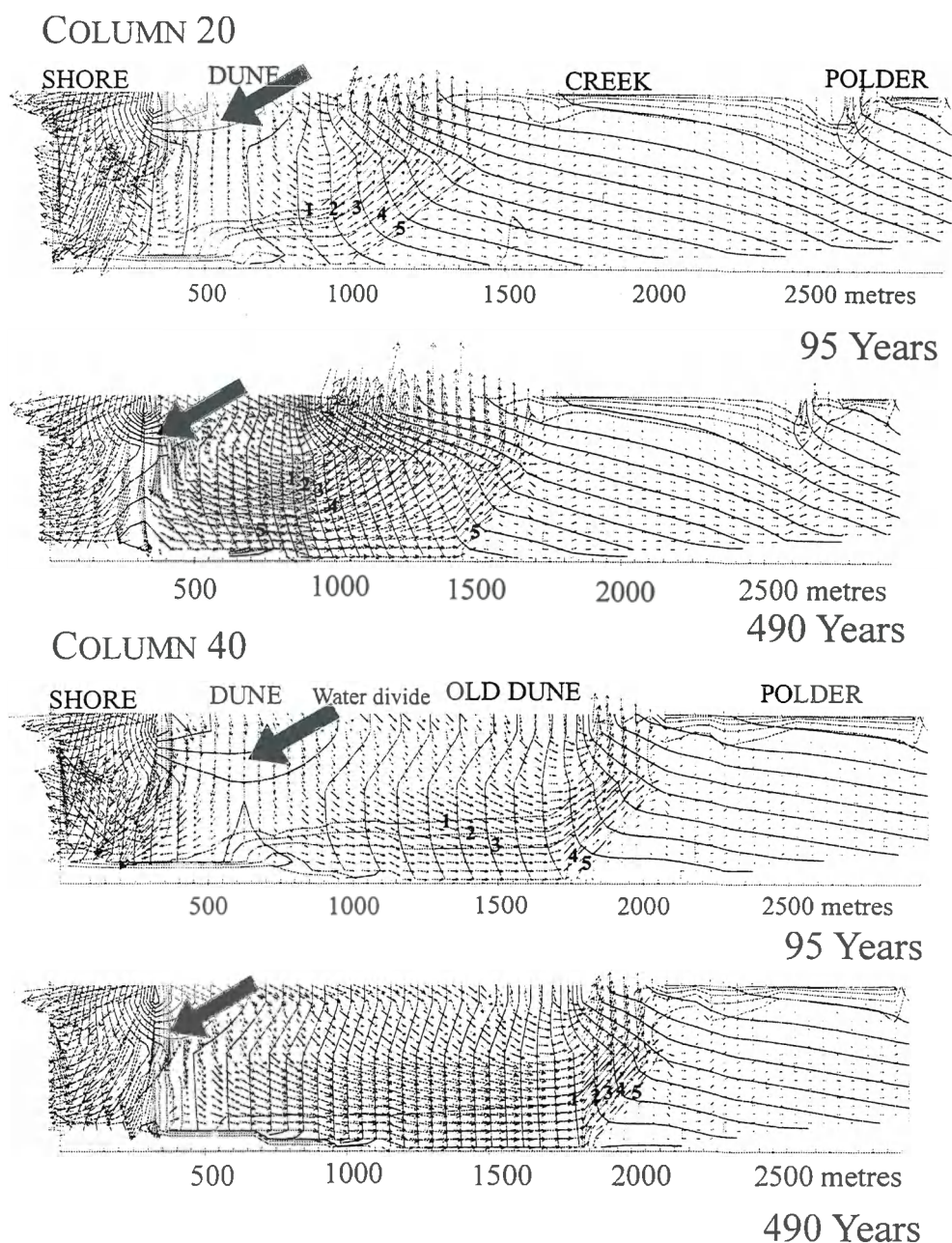
Simulatie van de gemiddeld verwachte zeespiegelstijging

Oorspronkelijk zijn drie verschillende zeespiegelstijgingsscenarios gesimuleerd (Van Meir 2001); namelijk geen zeespiegelstijging, een gemiddelde zeespiegelstijging van 0.5m/eeuw en een maximum zeespiegelstijging van 0.9m/eeuw zoals voorgesteld in het rapport van het IPCC (2001), het International Panel on Climate Change. In dit kort artikel worden echter alleen maar de resultaten van een gemiddelde zeespiegel beschreven.

Om het effect van een zeespiegelstijging te simuleren wordt de randvoorwaarde aan de noordzijde stelselmatig veranderd. De algemene stijghoogtegrens wordt er in 9 stressperioden van telkens 25 jaar met 0.125 m verhoogd, wat gevolgd wordt door een stressperiode met evenwichtsituatie van 20 jaar en opnieuw 9 stressperioden van 25 jaar waarin de zeespiegel met 0.125 m toeneemt. Dit betekent dat er een totale tijd van 490 jaar is gesimuleerd met een totale zeespiegelstijging van 2.25 m. Het is een steady state simulatie wat wil zeggen dat er een aantal zaken zijn verondersteld. Zo is er geen verandering in de gemiddelde infiltratie in de komende 490 jaar, er is ook geen verandering in drainageniveau, er wordt verondersteld dat er geen landophoping plaatsvindt en er zijn geen grote morfologische veranderingen.

Het belangrijkste zichtbare resultaat is het opschuiven van de waterscheidingskam naar de kustlijn (Figuur 7). Het is een gevolg van de toenemende gradiënt tussen de kustlijn en de landwaartse grens waar drainageniveaus hetzelfde blijven. Bijgevolg krimpt de zoetwaterlens en volgt er een directe instroom van zout water naar het landwaartse gebied. Een ander resultaat is het effect van de morfologie op de snelheid waarmee de zoetwaterlens krimpt. Wanneer we opnieuw twee extreme situaties nemen (kolom 20 en kolom 40) dan is het duidelijk dat waar het duin-oude duingebied groot is, zoals in kolom 40 en zoals in de waargenomen doorsnede (Figuur 3), de zoetwaterlens veel langer weerstand biedt omdat het infiltratiegebied nu eenmaal groter is. In kolom 20 waar het duingebied zeer eng is en gevolgd wordt door een gedraineerde kreek krimpt de zoetwaterlens onmiddellijk en verdwijnt ze zeer snel. Men kan ook waarnemen dat de situatie voorbij de kwelzones haast niet verandert op de grotere grondwatersnelheid na. Deze grotere grondwatersnelheid heeft ook een grotere kwel tot gevolg en een grotere zoutlading. Kwel is de hoeveelheid water die opwaarts stroomt en gedraineerd wordt, uitgedrukt in m³/dag. In de 490 jaar die gesimuleerd is stijgt de kwel voor de poelgronden van 5700 m³/dag tot 8300 m³/dag. Deze laag-gelegen kleiige oppervlakken bedekken in het model zo ongeveer 1 km². De grootste stijging in kwel is echter waarneembaar in het kreek/zandwad gebied met ongeveer dezelfde oppervlakte, hier stijgt het opwaartse debiet met 23800 m³/dag. Wanneer men dus het drainageniveau op 2.9 mTAW houdt in het kreek/zandwad gebied. Ook de zoutlading neemt toe, dit is het produkt

van de kwel met het TDS-gehalte van elke cel, Voor het gebied met de hoogste kwel neemt de zoutlading toe van 13000 ton/jaar naar 37000 ton/jaar. Dit betekent dat niet alleen meer water weggedraineerd wordt, maar dat dit water ook een hoger TDS gehalte heeft.



Figuur 7. Modelresultaten voor kolom 20 en kolom 40 in een simulatie met een zeespiegelstijging van 0.5m/eeuw, de concentratielijnen zijn dezelfde als in figuur 6.

Besluit

Uit een 3D dichtheidsafhankelijke simulatie waarbij de geologie zo nauwkeurig mogelijk is ingevoerd, kan het volgende afgeleid worden:

- De invloed van morfologie en geologie hebben een belangrijke invloed op de juiste voorstelling van de verdeling van zoet en zout water en op de juiste weergave van het stromingsregime rond bv. de kreek.
- Bij een gemiddelde zeespiegelstijging van 0.5m/eeuw is het belangrijkste resultaat het opschuiven van de waterscheidingskam door de stijgende gradiënt tussen kustlijn en polders
- De weerstand van een zoetwaterlens onder de duinen tegen krimpen is nauw verbonden met de morfologie
- Tengevolge van de toenemende gradiënt verhoogt ook de grondwatersnelheid en bijgevolg de kwel en zoutlading. Opnieuw is het effect van kwel en zoutlading afhankelijk van de morfologie
- De meest landwaartse situatie verandert nauwelijks omdat dit voorbij de belangrijkste gradiëntovergang ligt.

Referenties

- IPCC (2001). Summary for Policymakers. Climate Change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Report of Working Group II of the IPCC.
- Oude Essink, G., H., P. (1998). MOC3D adapted to simulate 3D density-dependent groundwater flow. Modflow'98 Conference, Golden, Colorado.
- Van Meir, N. (2001). Density-dependent groundwater flow: design of a parameter identification test and 3D-simulation of sea-level rise. Geological Institute. Ghent, Ghent University (Belgium): 319.