

---

# Zoet-zout verdeling onder het strand: niet zo evident als het lijkt.

Alexander Vandenbohede<sup>1</sup>, Luc Lebbe<sup>2</sup>

---

## Inleiding

In kustgebieden komt zoet grondwater, dat van het land naar de zee stroomt, in contact met zout zeewater. Tussen dit zoete en zoute grondwater ontstaat een overgangszone en de positie daarvan is afhankelijk van verschillende factoren. Een 'klassieke' situatie is deze waarbij een zoetwaterlens aan de kust zich zeewaarts uitstrekt boven het zoute poriënwater. Dit ontstaat op de volgende manier: zoet water infiltreert op het land zoals in bijvoorbeeld duingebied, stroomt naar zee en stroomt uit op het strand. Dit is echter maar één van de vele mogelijke zoet-zout overgangen die kunnen worden aangetroffen.

Een opmerkelijke overgang tussen zoet en zout grondwater wordt bijvoorbeeld aangetroffen onder het strand van de Belgische westelijke kustvlakte. Dit gebied wordt gekenmerkt door het voorkomen van een strand, duingordel en achterliggend poldergebied (figuur 1). Het strand is relatief breed, ongeveer 420 meter bij laagwater gedurende springtij. Verder wordt het gekarakteriseerd door een zeer zwakke helling van ongeveer 1,1%. De getijdenwerking op het strand is zeer belangrijk. De amplitude van de getijden bedraagt ongeveer 1,5 meter bij doottij, maar neemt toe tot 2,5 meter bij springtij. De duingordel zoals we die nu kennen ontstond gedurende de 7<sup>de</sup> en 8<sup>ste</sup> eeuw en dit gebeurde in meerdere fases. Vóór deze periode van duinvorming had de zee vrij toegang tot het achterland. De vorming van de duingordel en de gestage inpoldering van het gebied achter de duingordel zorgde ervoor dat de zee veel minder frequent toegang had tot het gebied.

Het watervoerend pakket onder de duinen en het strand bestaat uit medium tot medium grof zand uit het Eemien met daarboven medium fijn zand. De polders kennen een complexe afwisseling van slecht doorlatende sedimenten van klei en leem en goed doorlatende sedimenten. Dit zorgt voor een complexe verdeling van zoet en zout water. Het freatisch pakket onder strand, duinen en polder wordt aan de basis begrensd door de zware klei van de Formatie van Kortrijk. Deze klei heeft een Eocene ouderdom.

Uit onder andere geo-elektrische boorgatmetingen is de globale verdeling tussen zoet en zout water in het gebied bekend (figuur 2). De bemeten doorsnede ligt ongeveer twee kilometer ten oosten van de Frans-Belgische grens en staat loodrecht op de kustlijn.

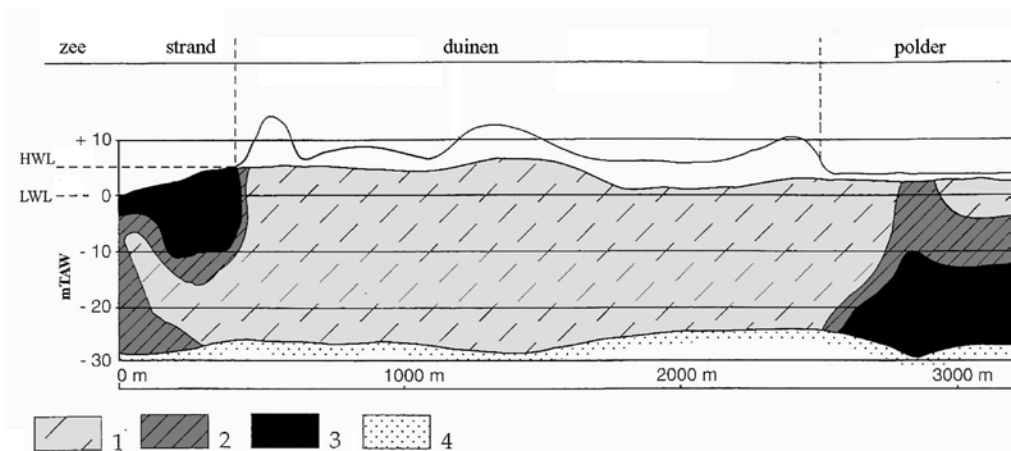
---

1 Onderzoekseenheid Grondwatermodellering, Universiteit Gent, Krijgslaan 281 (S8), B-9000 Gent, België, Tel: 32-9-2644652, Fax: 32-9-2644653, alexander.vandenbohede@ugent.be

2 Onderzoekseenheid Grondwatermodellering, Universiteit Gent, Krijgslaan 281 (S8), B-9000 Gent, België, Tel: 32-9-2644652, Fax: 32-9-2644653, luc.lebbe@ugent.be



Figuur 1: Luchtfoto van het studiegebied, grenzend aan de Frans-Belgische grens.



**Figuur 2:** Verdeling tussen zoet (1), brak (2) en zout (3) water onder het strand, duinen en polders van het westelijke Belgische duingebied (naar Lebbe en Pede, 1986). Basis van het freatische pakket is de Formatie van Kortrijk (4), mTAW is het Belgische referentieniveau (2,36 meter onder gemiddeld zeeniveau), HWL en LWL zijn respectievelijk de hoogwater- en laagwaterlijn.

Onder de duinen treft men een zoetwaterlens aan. Deze lens reikt tot op de Formatie van Kortrijk. Een belangrijk gegeven voor modellering is dat er in de duinen een waterscheiding voorkomt. Water dat ten noorden van deze waterscheiding infiltreert, stroomt naar zee. Water dat ten zuiden ervan infiltreert, stroomt naar de polder. Onder het

strand komt een lens van zout water voor boven een tong van zoet water. Deze laatste strekt zich uit van de duinen naar een zone rond de laagwaterlijn. Deze opmerkelijke zoet-zout verdeling blijkt tevens in een dynamisch evenwicht te verkeren. Het zoute water zakt dus niet dieper in het watervoerend pakket.

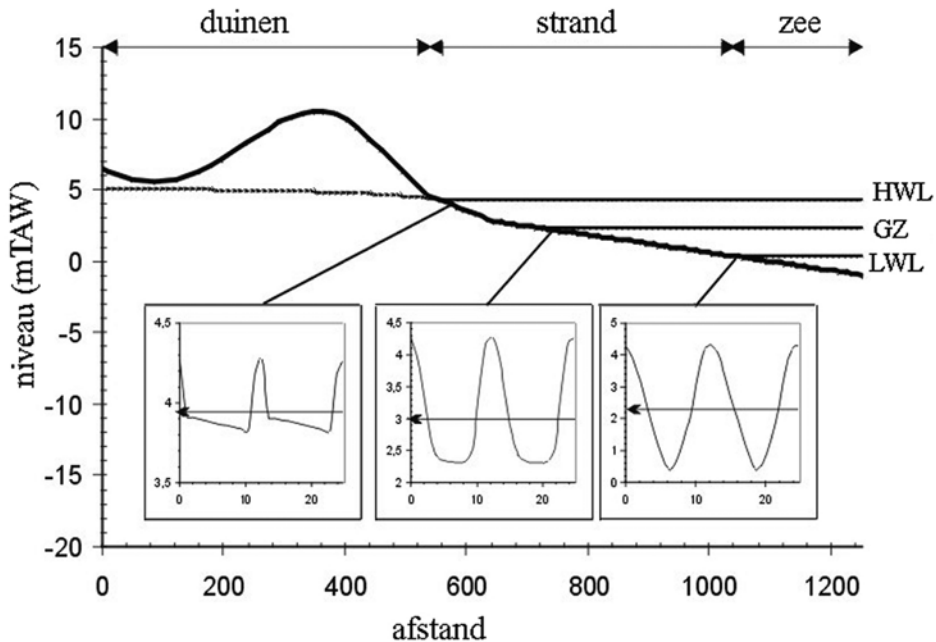
## **Modellering**

Om het ontstaan van deze inverse dichtheidsverdeling te begrijpen, is de grondwaterstroming en de evolutie van de zoet-zout overgang gemodelleerd. Hiervoor werd het 3-dimensionaal dichtheidsafhankelijk model MOCDENS3D (Oude Essink, 1998) gebruikt en ter visualisering het programmapakket Visual MOCDENS3D (Vandenbohede, 2007).

Van het freatische pakket onder de zee, het strand en een deel van de duinen is een 2-dimensionaal model gemaakt (Vandenbohede en Lebbe, 2006). Lengte van de doorsnede is 1260 meter bestaande uit 540 meter in de duinen, een strand van 420 meter en 300 meter zee. De dikte van het watervoerend pakket is 30 meter. Dit is onderverdeeld in een eindig differentie grid van 30 lagen met elk een dikte van 1 meter, en 126 kolommen met elk een breedte van 10 m. Het model is begrensd door de waterscheiding in de duinen als een ondoorlatende modelrand. De rand van het model aan zeezijde heeft een vaste stijghoogte, namelijk het gemiddeld zeeniveau met een zoetwaterstijghoogte van 2,36 mTAW. Ter toelichting: mTAW is het Belgische referentieniveau waarbij 0 mTAW 2,33 meter onder gemiddeld zeeniveau ligt. De waarde voor de vaste stijghoogte neemt toe met de diepte daar er in het model een waarde voor een vaste zoetwaterstijghoogte moet worden opgeheven. Aangezien er over de volledige diepte zout water wordt aangetroffen neemt de zoetwaterstijghoogte toe met 0,02 meter per meter. Een vaste stijghoogte van 2,36 mTAW is eveneens opgelegd in de bovenste laag voor cellen die in zee liggen. In de duinen wordt het pakket gevoed door infiltratie met een gemiddeld neerslagoverschot van 280 mm per jaar.

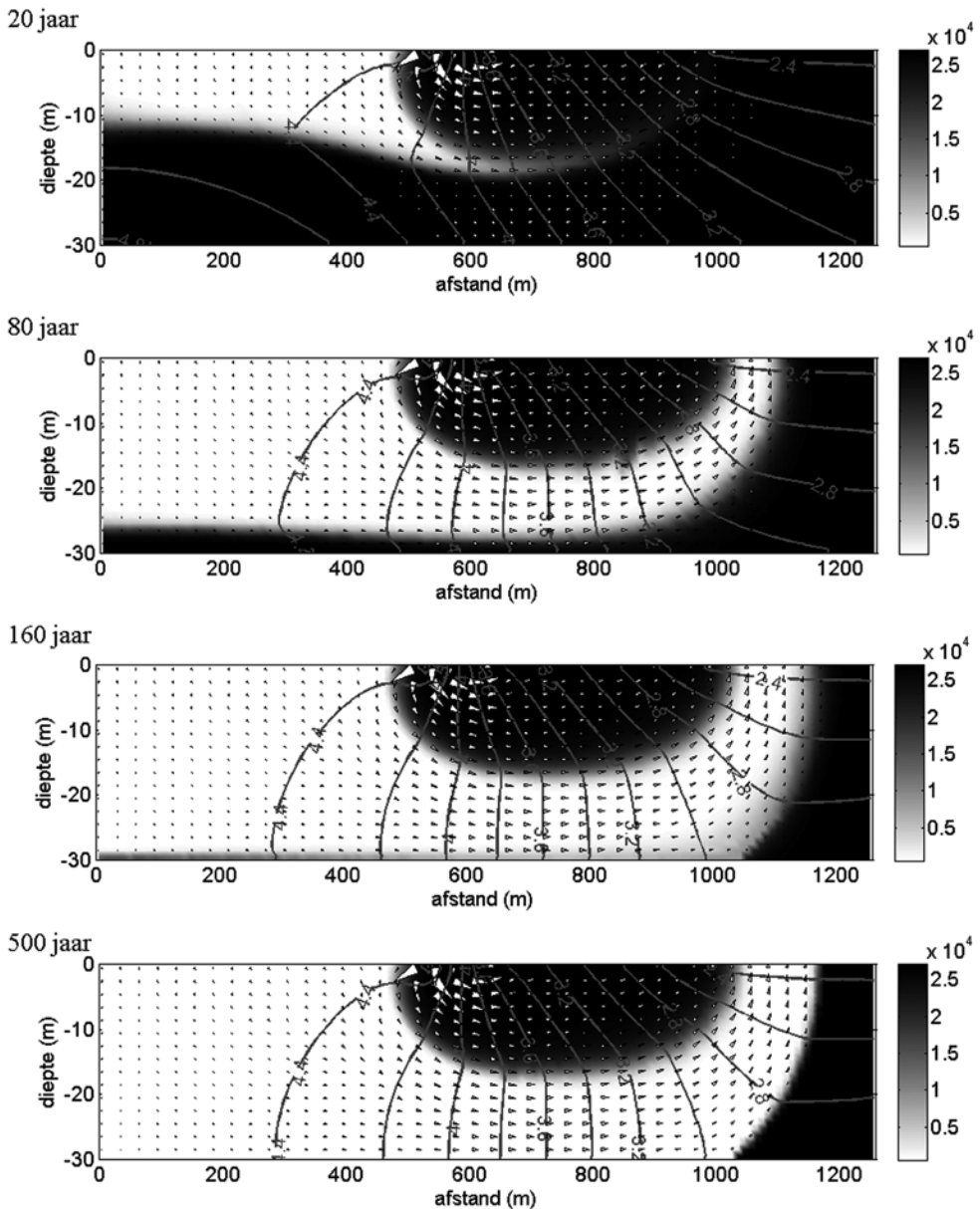
Op het strand is eveneens een vaste stijghoogte gehanteerd. Het verloop van deze vaste stijghoogte is echter iets complexer en wordt toegelicht aan de hand van figuur 3. Deze figuur toont voor een drietal punten op het strand het verloop van de stijghoogte als functie van de tijd. Dit verloop is gebaseerd op veldmetingen (Lebbe, 1981). De stijghoogte in een ondiepe observatieput op het strand wordt sterk beïnvloed door de getijden. De bedoeling is om voor de modelrand een gemiddelde stijghoogte af te leiden. We bekijken eerst het stijghoogteverloop nabij de laagwaterlijn. In dit punt is de stijghoogtefluctuatie nagenoeg gelijk aan de fluctuatie van de waterstand op zee. De gemiddelde stijghoogte nabij de laagwaterlijn is daarom gelijk aan het gemiddelde zeeniveau. De ondiepe observatieput nabij de hoogwaterlijn vertoont een ander stijghoogteverloop. Bij hoog water is de stijghoogte nagenoeg gelijk aan het hoogwaterniveau. Tijdens eb valt dit stuk van het strand droog en daalt de waterstand langzaam, met slechts enkele centimeters per uur. Het resultaat is dat de gemiddelde stijghoogte slechts net iets lager is dan een gemiddelde hoogwaterstand van de zee, namelijk 4,3 mTAW. Hierbij wordt gerekend met een getijdenamplitude van twee meter. In een observatieput midden op het strand wordt tijdens de periode dat dit deel van het strand door de zee wordt overspoeld, het zeeniveau gemeten. Tijdens eb wordt het langzaam zakken van de waterstand onder dit deel van het strand gemeten. Het resultaat is dat er een gemiddelde waterstand wordt waargenomen hoger dan het gemiddelde zeeniveau en

lager dan de hoogwaterstand. De interactie tussen een breed, zwak hellend strand en getijden zorgt er dus voor dat er een stijghoogtegradiënt aanwezig is, gaande van het gemiddelde zeeniveau nabij de laagwaterlijn tot net iets minder dan de hoogwaterstand nabij de hoogwaterlijn. Dit gemiddeld stijghoogteverloop is in het model gebruikt als vaste stijghoogte op het strand. Op die manier is de invloed van getijden op het strand in de randvoorwaarde van het permanente model verwerkt.



**Figuur 3:** Overzicht van de gemodelleerde doorsnede met indicatie van de hoogwaterlijn (HWL), laagwaterlijn (LWL), gemiddeld zeeniveau (GZ) en het verloop van de stijghoogte in drie ondiepe peilputten op het strand (Vandenbohede en Lebbe, 2006).

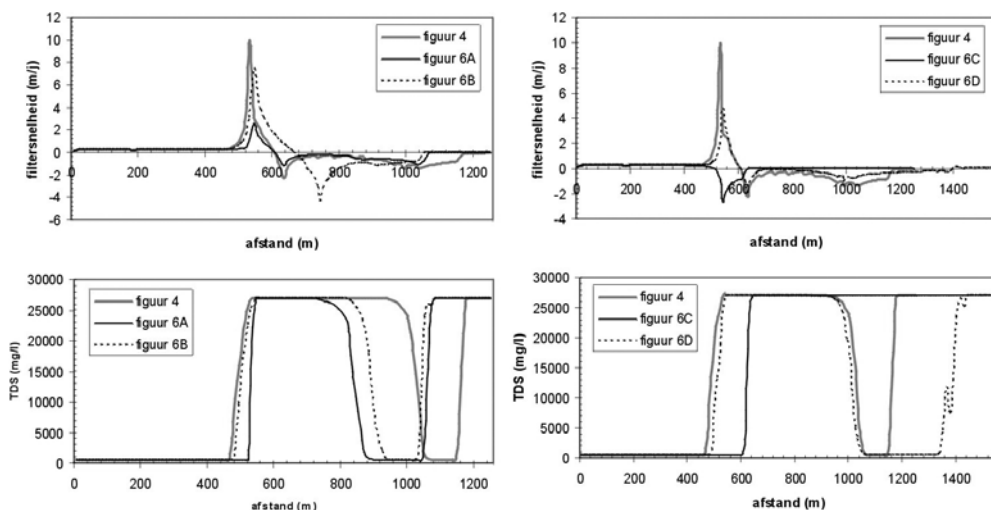
Andere belangrijke parameters zijn de doorlatendheden van de afzettingen. De horizontale doorlatendheid is 10 m/d en de verticale doorlatendheid is 0,1 m/d. Longitudinale en transversale dispersiviteit in x- en y-richting zijn respectievelijk 0,2 meter, 0,02 meter en 0,002 meter. De effectieve porositeit bedraagt 0,38. Het zoete infiltratiewater heeft een TDS van 500 mg/l. Het zoute poriënwater heeft een totaal zoutgehalte, TDS, van 27 g/l, wat resulteert in een drijfvermogen van 0,02. Het drijfvermogen is de verhouding van het verschil tussen de dichtheden van zout en zoet water tot de dichtheid van zoet water. Er is uitgegaan van een pakket dat volledig gevuld is met zout poriënwater en vervolgens is de verdringing van dit water door zoet infiltratiewater in de duinen gesimuleerd. Het permanente model is berekend met een belastingsperiode van 500 jaar, opgedeeld in tijdstappen van 0,1 jaar. Na iedere tijdstap volgt er een update van het stromingsveld, rekening houdend met een nieuwe verdeling van zoet en zout water.



**Figuur 4:** Evolutie van de stijghoogtes (mTAW) en de zoet-zout water verdeling (grijschaal in mg/l) voor vier periodes.

Figuur 4 toont op vier verschillende tijdstippen het resultaat van de berekening. De grijschaal geeft de verdeling van zoet (wit) en zout (zwart) water in mg/l weer. Daarnaast zijn telkens lijnen van gelijke stijghoogte en de stromingsvectoren aangegeven. De bovenste figuur toont de situatie na 20 jaar. Onder de duinen is het begin van de ontwikkeling van de zoetwaterlens te zien. Door de infiltratie van zoet water wordt het zoute poriënwater verdrongen. Het zoete water dat in de duinen infiltreert, heeft

daarbij ook een stromingscomponent zeewaarts. Deze zeewaartse stroming van zoet water interfereert echter met een ondiepe stromingscyclus onder het strand. Op het hoge deel van het strand infiltreert er, hoofdzakelijk gedurende vloed, zout zeewater. Door de gradiënt die aanwezig is stroomt dit water naar het lage deel van het strand waar het, hoofdzakelijk gedurende eb, terug uitstroomt naar zee. De gradiënt op het strand ligt dus aan de basis van deze ondiepe cyclus van zout water onder het strand. Het zoete water dat in de duinen infiltreert, is gedwongen om onder deze lens van zout water naar zee te stromen. Na 80 jaar is de diepte van de zoetwaterlens onder de duinen al flink toegenomen en is de kenmerkende zoet-zout verdeling te zien. Onder het strand is een lens van zout water aanwezig en daaronder komt een tong van zoet water voor die zich uitstrekt van de duinen naar de laagwaterlijn. De zoetwaterlens onder de duinen is echter nog niet helemaal ontwikkeld daar er onder het zoete water nog zout water voorkomt. In de volgende tientallen jaren breidt deze zoetwaterlens zich uit. Na ongeveer 160 jaar is de zoetwaterlens bijna volledig ontwikkeld. In de laatste 300 jaar van de simulatie vinden slechts zeer kleine veranderingen in de verdeling van zoet en zout water plaats. De onderste figuur van figuur 4 toont de simulatie van de huidige situatie met de zoetwaterlens in de duinen, de zoutwaterlens onder het strand en een tong van zoet water die zich uitstrekt vanuit de duinen naar de laagwaterlijn.



**Figuur 5:** Verticale filtersnelheid en TDS van de stroming tussen modellagen 1 en 2 voor de waargenomen situatie en een aantal varianten. De legende verwijst naar de verschillende situaties in figuren 4 en 6. De waargenomen situatie (figuur 4) is telkens als referentiesituatie weergegeven.

Uit de simulatie valt af te leiden dat de inverse dichtheidsverdeling onder het strand in een dynamisch evenwicht verkeert. Dit wil zeggen dat het niet zo is dat het zwaardere zoute water dieper in het pakket dringt. De reden hiervoor is de stroomsnelheid. Deze is voldoende groot in zowel de zoutwaterlens als in de zoetwatertong om uitzakking van zwaarder zout water in het zoete water te vermijden. De overgangen tussen zoet en

zout water zijn om dezelfde reden zeer scherp, wat overeenkomt met de geo-elektrische boorgatmetingen.

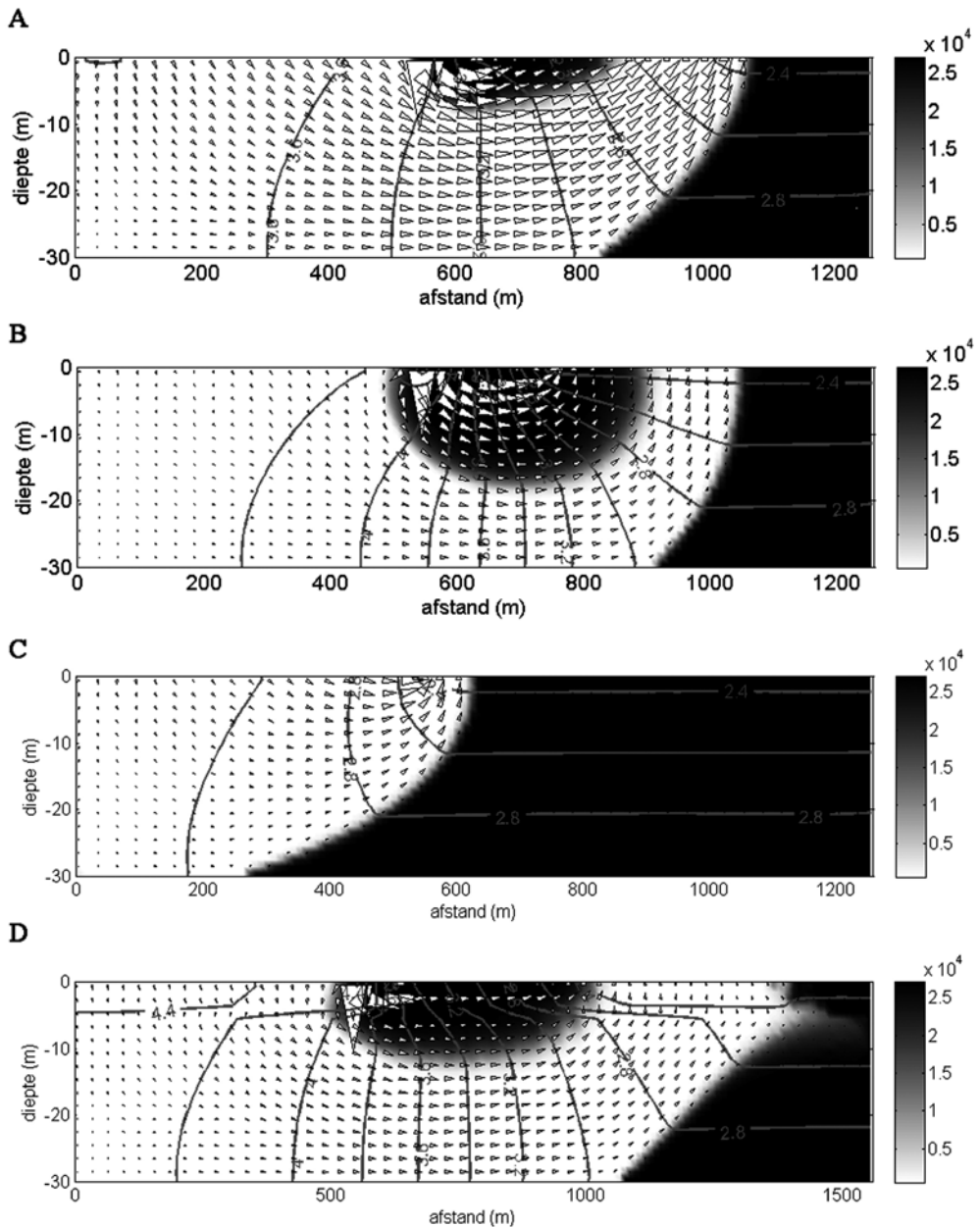
Figuur 5 toont de filtersnelheid en de TDS van het water dat stroomt tussen de modellen 1 en 2 voor de situatie na 500 jaar. Dit kan praktisch gelijk gesteld worden aan de oppervlakkige infiltratie- en kwelsnelheid. Positieve waarden duiden op infiltratie, negatieve waarden betekenen opwaartse stroming. In de duinen is de infiltratie net iets minder dan 0,28 m/jaar. Op het strand zijn twee zones te zien. Het hoge deel van het strand kent infiltratie, terwijl het lage deel van het strand uitstroming kent. De infiltratie op het hoge deel is het hoogst nabij de duinen. De zone waar zoet water uitstroomt heeft een breedte van 90 meter.

### **Invloed van randvoorwaarden**

Uit de modellering van de bestaande toestand is duidelijk geworden dat de (hydro)geologische randvoorwaarden bepalend zijn voor de vorming van de waargenomen dichtheidsinversie. Eerst en vooral is er een breed strand nodig en een relatief grote getijdenamplitude. Het is niet de getijdenwerking op zich die een belangrijke invloed uitoefent op de zoet-zout verdeling, maar de interactie tussen de helling van het strand en de getijden (Vandenbohede en Lebbe, 2007). Dit geeft aanleiding tot de aanwezigheid van een stijghoogtegradiënt op het strand met een zoutwaterlens als gevolg. De stroming van zoet water vanuit de duinen naar zee zorgt voor de zoetwatertong. Daarnaast spelen ook parameters als doorlatendheid een rol. Een verandering in de randvoorwaarden en parameters zorgt voor een andere geometrie van de overgang tussen zoet en zout water.

Dit wordt geïllustreerd in figuur 6 door een aantal van de randvoorwaarden en/of parameters te veranderen. In de figuur is telkens het resultaat na 500 jaar gegeven. Figuur 5 toont de verticale Darciaanse snelheid en de TDS van de stroming tussen laag 1 en 2 voor de verschillende situaties. De huidige situatie na 500 jaar, zoals weergegeven in figuur 4, is telkens als referentiesituatie gebruikt.

In eerste instantie is gekeken naar de invloed van het getij. Figuur 6A toont de zoet-zout verdeling in het geval dat de getijdenamplitude gehalveerd is, dus 1 meter in plaats van 2 meter. Het gemiddelde zeeniveau van 2,36 mTAW blijft behouden, net als de breedte van het strand. Gezien de afstand tussen laag- en hoogwaterlijn niet verandert, is ook de helling van het strand kleiner geworden. Combinatie van een kleinere getijdenamplitude en een breed strand zorgt er voor dat de stijghoogtegradiënt op het strand kleiner is geworden. De stijghoogte varieert van 2,36 mTAW aan de laagwaterlijn tot 3,36 mTAW aan de hoogwaterlijn. Door deze kleinere gradiënt infiltreert er minder zout water op het hoge deel van het strand (figuur 5), wat resulteert in een kleinere zoutwaterlens. Het gevolg is een in volume grotere zoetwatertong waarin de stroomsnelheden kleiner zijn. Ook de kwelzone aan de laagwaterlijn wordt beïnvloed. Deze wordt opvallend breder, 160 meter in vergelijking met 90 meter bij de referentiesituatie. Ook schuift ze aanzienlijk landwaarts op, ongeveer 180 meter. Aangezien de hoeveelheid zoet water die in de duinen infiltreert niet is veranderd, neemt ook de uitstromingsnelheid af. De hoeveelheid zoet water die vanuit de duinen richting zee stroomt, heeft een zelfde invloed op de geometrie. Als deze hoeveelheid water vermindert, bijvoorbeeld door verandering van de positie van de waterscheiding onder invloed van een waterwinning of seizoensinvloeden, breidt de zoutwaterlens onder het strand zich uit.



**Figuur 6:** Zoet-zout water verdeling na 500 jaar in geval de getijdenamplitude gehalveerd wordt (A), de breedte van het strand gehalveerd wordt (B), één stijghoogte aanwezig is op zowel het strand als in zee (C) en bij het voorkomen van een slecht doorlatende laag (D).

In een tweede simulatie (figuur 6B) is de breedte van het strand gehalveerd. Alle andere randvoorwaarden en parameters blijven identiek. De stijghoogten op het strand variëren weer van 2,36 mTAW op de laagwaterlijn tot 4,5 mTAW op de hoogwaterlijn.



De stijghoogtegradiënt op het strand is echter groter daar de strandbreedte nu 210 meter in plaats van 420 meter bedraagt. Het gevolg is dat de horizontale dimensies van de zoutwaterlens afnemen en dat de lens iets dieper wordt. De breedte van de zone waar zoet water uit stroomt verandert niet maar deze zone schuift ongeveer 100 meter landwaarts op.

In een derde simulatie (figuur 6C) is de vaste stijghoogte op het strand en in zee gelijk aan het gemiddelde zeeniveau. Deze modelmatige beschrijving komt overeen met twee veldsituaties die ook veel worden aangetroffen langs kustlijnen. Enerzijds is dit een situatie waarbij er geen getijden aanwezig zijn, het zeeniveau is dan in dit geval gelijk aan 2,36 mTAW. In het model is er een zone waar het gemiddelde zeeniveau voorkomt, 540 tot 1260 meter, en een zone die uitgemaakt wordt door de duinen en eventueel een klein stukje strand dat nooit door de zee wordt overstromd, 0 tot 540 meter. Een tweede situatie is deze waarbij er geen strand aanwezig is en het zeeniveau varieert onder invloed van de getijden tegen een dijk of een klif. Zelfs gedurende laag water reikt de zee tot aan deze barrière. Dit levert de 'klassieke' verdeling van zoet en zout water op, namelijk een zoetwaterlens en zoutwaterwig. Zoet water dat in de duinen infiltreert vormt de zoetwaterlens en stroomt uit in zee. Waar zoet en zout water elkaar ontmoeten ontstaat een wig van zout water onder de zoetwaterlens.

In de voorgaande simulaties is het watervoerend pakket als een homogeen medium beschouwd. Figuur 6D toont tenslotte wat de invloed is van een slecht doorlatende laag in een dergelijk systeem. Op een diepte van 5 meter is een slecht doorlatende laag met een dikte van 1 meter gemodelleerd. De horizontale doorlatendheid hiervan bedraagt 0,4 m/d terwijl de verticale doorlatendheid 0,004 m/d is. Het model is zeewaarts uitgebreid met 300 meter. Ten opzichte van de referentie situatie is de zoutwaterlens in omvang afgenomen. Dit is een gevolg van het feit dat er minder zout water infiltreert op het hoge deel van het strand. Tweede vaststelling is dat de breedte van de kwelzone van zoet water toeneemt. Deze bedraagt nu 280 meter en de uitbreiding ligt hoofdzakelijk in zee. Hoe kleiner de doorlatendheid van deze slecht doorlatende laag is, hoe minder zout water er zal infiltreren en hoe kleiner de omvang van de zoutwaterlens zal zijn.

## **Conclusies**

De verdeling van zoet-zout water onder het strand is niet zo eenvoudig als het lijkt. De 'klassieke' verdeling (figuur 6C) en de verdeling aangetroffen onder het strand van de Belgische kustvlakte (figuur 4) zijn twee mogelijke verdelingen, waartussen een grote reeks overgangsvormen mogelijk zijn. Geen getijden of een fluctuatie van de zee tegen een dijk of klif resulteert in de klassieke verdeling. De interactie van getijden en een breed, weinig hellend strand resulteert in een zoutwaterlens boven een tong van zoet water. Getijden, breedte en ook morfologie van het strand, infiltratie in de duinen en opbouw van het pakket bepalen de geometrie van de zoutwaterlens en zoetwatertong. Een kleinere zeewaartse zoetwaterstroom vanuit de duinen, een grotere getijdenamplitude, een zwakke helling van het strand en een goed doorlatend watervoerend pakket resulteren in een grotere zoutwaterlens.

Het voorbeeld van de westelijke Belgische kustvlakte (figuur 4) toont tenslotte ook aan dat een goede keuze van de randvoorwaarden aan de zeewaartse kant van modellen belangrijk is. In dit geval is het niet juist om het gemiddelde zeeniveau als waarde

voor vaste stijghoogte te gebruiken op het strand. Op het hoge deel van het strand moet voor een juiste modellering de gemiddelde hoogwaterstand als vaste stijghoogte worden gebruikt. Dit is niet enkel belangrijk om de goede verdeling tussen zoet en zout water onder het strand te simuleren maar heeft ook implicaties op de grondwaterstroming in de duinen. Als een model van een duingebied wordt gemaakt en daarbij als zeewaartse grens het gemiddeld zeeniveau als vaste stijghoogte wordt gekozen in plaats van het gemiddeld hoogwaterniveau, dan worden ook de stijghoogtes in de duinen verkeerd berekend.

## Referenties

- Lebbe, L. (1981)** *The subterranean flow of fresh and salt water underneath the western Belgian beach; in: 7<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting, Uppsala, Sver. Geol. Unders. Rap. Meddel. 27, pag 193-219.*
- Lebbe, L. en K. Pede (1986)** *Salt-fresh water flow underneath old dunes and low polders influenced by pumpage and drainage in the western Belgian coastal plain; in: Proceedings 9<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, pag 199-220.*
- Oude Essink, G.P. (1998)** *MOC3D adapted to simulate 3D density-dependent groundwater flow; in: Proceedings of MODFLOW '98 Conference, October, 4-8, 1998, Golden, Colorado, USA, Volume I, pag 291-303.*
- Vandenbohede, A. (2007)** *Visual MOCDENS3D: visualisation and processing software for MOCDENS3D, a 3D density dependent groundwater flow and solute transport model - User Manual; Research Unit Groundwater Modelling, Gent University.*
- Vandenbohede, A. en L. Lebbe (2006)** *Occurrence of salt water above fresh water in dynamic equilibrium in coastal groundwater flow systems; in: Hydrogeology Journal, 14(4), pag 462-472.*
- Vandenbohede, A. en L. Lebbe (2007)** *Effects of tides on a sloping shore: groundwater dynamics and propagation of the tidal wave; in: Hydrogeology Journal, 15, pag 645-658.*