

# NUMERISCHE SIMULATIE VAN GRONDWATERKWALITEITSPROBLEMEN ALS HULP BIJ HET BEHEER VAN DE WATERVOORRADEN IN HET VLAAMSE KUSTGEBIED

door

L. LEBBE, dr. sc., bevoegd verklaard navorser bij het N.F.W.O.,  
Leerstoel voor Toegepaste Geologie (Prof. dr. W. DE BREUCK),  
Rijksuniversiteit Gent, Krijgslaan 281, 9000-Gent.

## SAMENVATTING

Bij de studie van de kwaliteit van het grondwater in het Vlaamse kustgebied worden numerische simulaties betrokken. Hiervoor wordt het model van L.F. KONIKOW & J.D. BREDEHOEFT (1978) aangepast zodat dichtheidsverschillen in rekening kunnen gebracht worden. Het model wordt getoetst met enkele zoutwaterproblemen die eveneens opgelost werden met de methode van de vortexbeleggingen. De natuurlijke evolutie van de grondwaterstroming, de zoetwaterstijghoogteconfiguratie en de waterkwaliteitsverdeling onder de duinen, het strand en de zee werd berekend na het ontstaan van de duingordel. Daarop werd de verdere evolutie van deze parameters bij sterke pomping in het duingebied berekend. Verder wordt uitgelegd hoe numerische simulatie een hulp kan zijn bij de uitvoering van een hydrogeologische studie en hoe ze als een syntese van de kennis kan beschouwd worden. Tenslotte wordt geïllustreerd hoe de numerische simulatie kan aangewend worden om te komen tot een optimaal beheer van de watervoorraden in het Vlaamse kustgebied.

## 1. INLEIDING

In het Vlaamse kustgebied zijn de mogelijkheden om zoet grondwater te winnen zeer beperkt. Ofwel dient men een beroep te doen op de diepe artesisch-watervoerende lagen ofwel op de ondiepe freatisch-watervoerende laag. Door hun diepte, hun specifiek putdebië en hun mindere kwaliteit zijn de artesisch-watervoerende lagen slechts interessant voor kleine waterwinningen met welbepaalde kwaliteitseisen. In de freatisch-watervoerende laag komt er zowel zoet water voor, ontstaan door infiltratie van regenwater, als zout water met ongeveer dezelfde samenstelling als die van zeewater. In de zoetgrondwatervoorraden onder de duinen in het westelijk gedeelte werden waterwinningen aangelegd. Tevens komt op sommige plaatsen zoute kwel voor. Gezien het belang voor de landbouw en de drinkwatervoorziening is een hydrogeologische kennis van het kustgebied noodzakelijk.

R. d'ANDRIMONT (1902) is de eerste die de hydrogeologie van het Belgische kustgebied uitvoerig behandelde. Hij poogde het voor zijn tijd nieuwe principe van B. HERZBERG (1901) toe te passen. Eén van zijn besluiten uit die theoretische benadering is dat het freatische reservoir volledig gevuld is met zoet water. Dat lokte zeer hevige discussie uit met O. van ERTBORN (1903) die hem erop wees dat er zeer weinig goed grondwater in het poldergebied voorhanden is. Men was er vooral aangewezen op het gebruik van opgevangen regenwater. O. van ERTBORN was zelfs van mening dat „Furnes” (Veurne) van naam zou moeten veranderen, namelijk in „Citerneville”.

H. THIELE (1943) heeft als eerste gepoogd de kontaktdiepte tussen het zoete en het zoute grondwater te karteren door middel van geoëlektrische sonderingen in de polders van Frans-Vlaanderen en van West-Vlaanderen. Deze kontaktdiepte werd uiteindelijk voor het ganse Belgische kustgebied in kaart gebracht door W. DE BREUCK et al. (1974). Hun werk steunde op gegevens afgeleid uit resistiviteitssonderingen en -profileringen, uit diepe boringen en uit chemische analyses op grondwatermonsters.

M. GULINCK plaatste peilbuizen tussen de waterwinning van Oostduinkerke en de zee (J. SCHITTEKAT, 1972) en eveneens in De Panne, waar hij een pompproef uitvoerde als voorbereidende studie voor de waterwinning van De Panne.

Een gedetailleerde hydrogeologische studie van de duinen ten westen van De Panne (fig. 1) werd pas in de periode 1974-1978 uitgevoerd (L. LEBBE, 1978). Hierbij werd een litostratigrafische kennis van het grondwaterreservoir verworven door het uitvoeren

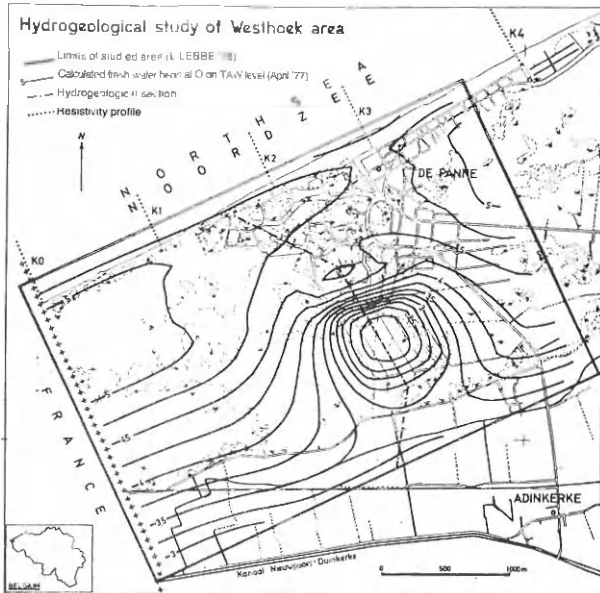


Fig. 1 – Lokalizatie van de hydrogeologische studie van de duinen ten westen van De Panne (L. LEBBE, 1978) met de berekende lijnen van gelijke stijghoogte, de hydrogeologische doorsnede en de resistiviteitsprofielen.

van droge boringen, resistiviteitsboorgatmetingen en korrelgrootte-analyses. Uit pompproeven, getijden- en seizoenfluctuaties van de stijghoogten werden hydraulische parameters afgeleid. Door de vergelijking van de gemeten stijghoogte met de berekende stijghoogte werd de kennis van de hydraulische parameters verder aangevuld. De kwaliteit van het grondwater werd door resistiviteitsboorgatmetingen en chemische analyses van grondwatermonsters onderzocht. Zo werd vastgesteld dat, onder het strand nabij de hoogwaterlijn, zout water in het bovenste gedeelte van de watervoerende laag voorkomt, zoet water in het onderste gedeelte. Omwille van dit eerder ongevoorkomen van zout water boven zoet water werd een meer gedetailleerde studie uitgevoerd op het strand (L. LEBBE, 1981).

Daartoe werden dertig spoelboringen met resistiviteitsboorgatmetingen uitgevoerd. Zo werd het mogelijk vijf resistiviteitsprofileringen loodrecht op de kustlijn op te stellen (fig. 2). Deze geven ons een beeld van de verspreiding van de verschillende grondwaterkwaliteiten. Bij één van de resistiviteitsprofileringen werd continu de stijghoogte opgemeten in peilbuizen geplaatst in het bovenste (fig. 3) en in het onderste (fig. 4) gedeelte van de watervoerende laag.

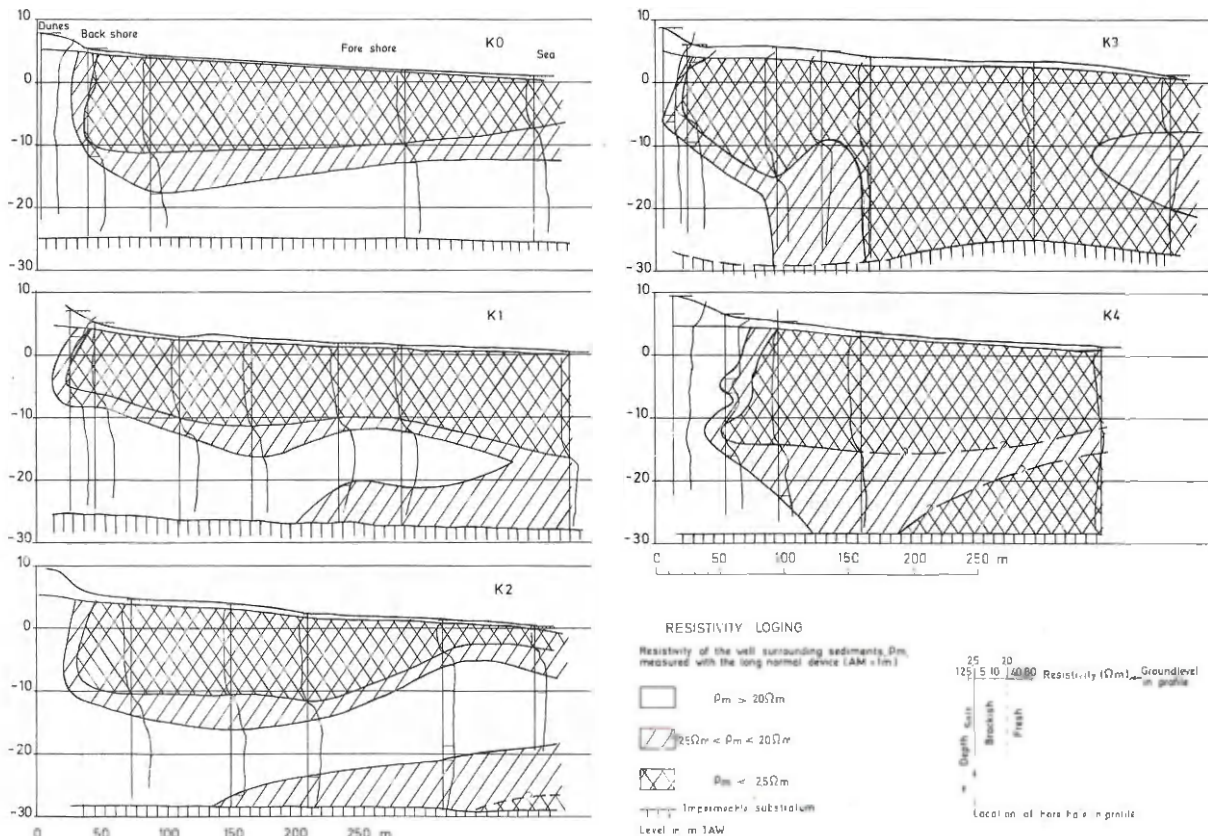


Fig. 2 – De resistiviteitsprofielen loodrecht op de kustlijn op het strand van De Panne.

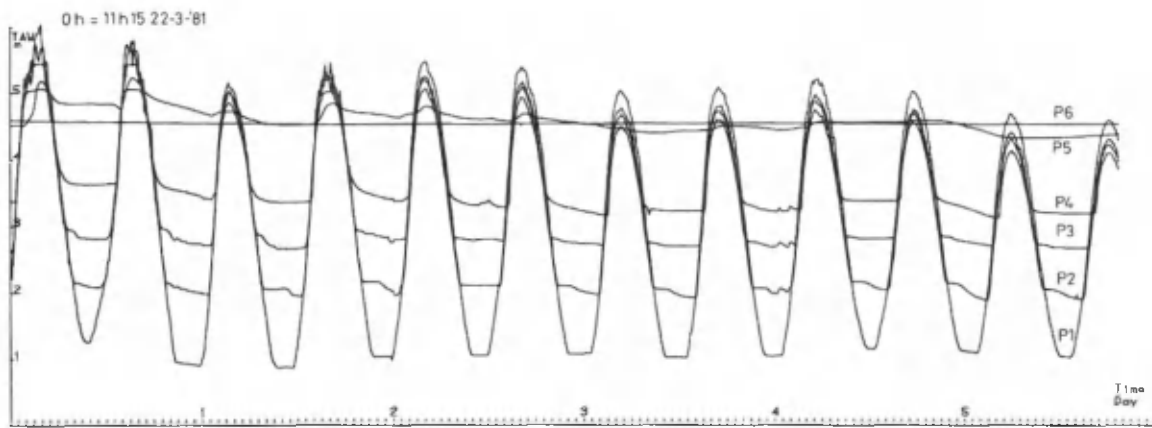


Fig. 3—Fluktuatie van de zoetwaterstijghoogte gemeten in de piëzometers P1, P2, P3, P4 en P5 geplaatst rond het peil - 2 op respectievelijk 360, 245, 165, 90 en 5 m van de hoog-hoogwaterlijn in de zeewaartse richting en in P6 op 70 m van de hoog-hoogwaterlijn in de landwaartse richting. Alle piëzometers komen voor in het vlak van resistiviteitsprofiel K Ø.

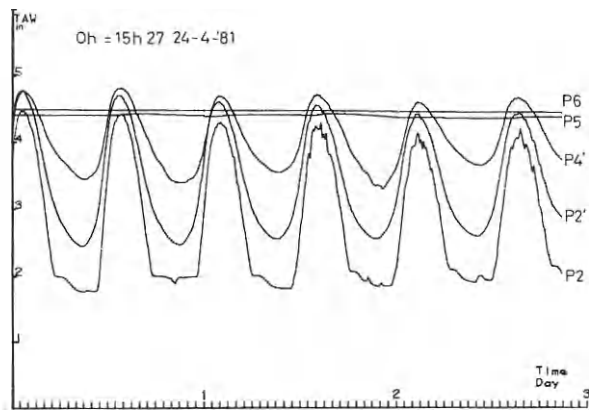


Fig. 4—Fluktuatie van de zoetwaterstijghoogte gemeten in de piëzometers P2' en P4' geplaatst rond het peil - 22 en in P2, P5 en P6 rond het peil - 2. De piëzometers P2' en P4' liggen op dezelfde afstand van de hoog-hoogwaterlijn als de piëzometers P2 en P4. Alle piëzometers komen voor in het vlak van resistiviteitsprofiel K Ø.

Uit deze peilbuizen werden grondwatermonsters verzameld om de belangrijkste anionen- en kationenconcentraties te bepalen. Met deze veldgegevens werd een mathematisch model opgesteld. Het behandelt de permanente grondwaterstroming van zoet en zout water waartussen een scherpe grens verondersteld wordt. Aldus konden de belangrijkste verspreidingswijzen van de verschillende grondwaters verklaard worden.

Verscheidene voorbeelden van verschillen in grootte van de stroming van de duinen naar de zee werden behandeld. De resultaten worden voorgesteld in fig. 5. In het verticale vlak van het tweedimensionele model worden de lijnen van gelijke zoetwaterstijghoogte voorgesteld tezamen met de stroomlijnen. De constante-doorsijpelingsgrensvoorwaarden worden aan-

gegeven door een letter: Q voor de horizontale zoetwaterstroming van de duinen naar de zee en N voor de verticale zoetwaterstroming onder de duinen, d.w.z. de infiltratie. De constante-stijghoogtegrensvoorwaarden worden gegeven door de waarden van de constante zoetwaterstijghoogte. Deze laatste werden bekomen door interpolatie tussen de gemeten zoetwaterstijghoogten (dit zijn de gemiddelden over de meetperiode tegenover de afstanden tot de hoogwaterlijn), waaruit duidelijk blijkt dat de gemiddelde doorsijpeling behandeld wordt. Op deze gemiddelde doorsijpeling is de schommeling t.o.v. de getijden van de zee gesuperponeerd. Ze werden in de studie buiten beschouwing gelaten. De gemiddelde Darcy-snelheid van in- en uitsijpeling door de doorlatende grenzen van het in het mathematisch behandelde gebied, wordt voorgesteld naast deze grenzen. De stroomlijnen van de instromende waterdeeltjes, die zich bevinden op de grenzen van de nodale cellen, worden gevolgd en weergegeven. De pijltjes op de stroomlijnen duiden het aantal even jaren aan dat een waterdruppel onderweg is vanaf de doorlatende grens van het beschouwde gebied. Hiervoor wordt een waterdoorlatende porositeit van 0,30 aangenomen.

In fig. 5a worden de resultaten voorgesteld van een berekening waarbij een aanzienlijke zoetwaterstroming naar de zee geschiedt. Hierdoor is de hydraulische gradiënt onder de duinen hoofdzakelijk horizontaal. Op het droge strand en op het hoogste gedeelte van het natte strand infiltreert zout water tijdens de vloed. Dit zout water stroomt boven het zoete duinwater in de richting van de zee. Op het grootste gedeelte van het natte strand is er uitsijpeling van zout water tijdens de eb. Het zoete water sijpelt uit de wattervoerende laag onder de zeebodem.

Vermindert de zoetwaterstroming vanuit de duinen dan verhoogt de infiltratie van zout water tijdens de vloed (fig. 5b). Hierdoor neemt de zoutwaterlens toe



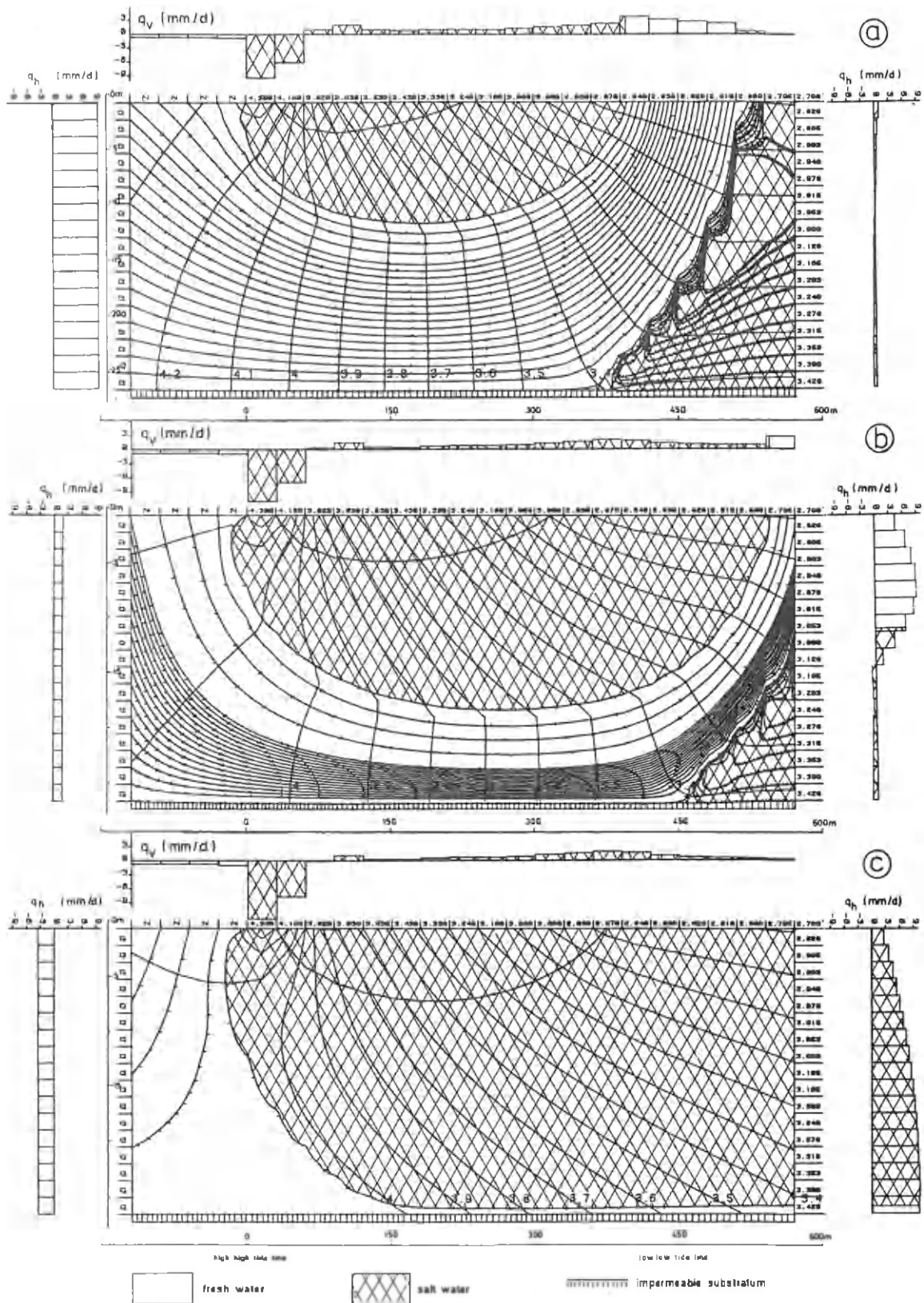


Fig. 5 – Stroming van zout en zoet water en lijnen van gelijke zoetwaterstijghoogte met een zeewaartse zoetwaterstroming van (a)  $0,25 \text{ m}^2/\text{d}$ , (b)  $0,05 \text{ m}^2/\text{d}$  en (c)  $0,09 \text{ m}^2/\text{d}$ .

zowel in de diepte als in de breedte. Het zoete water sijpelt nu nog verder zeewaarts uit de watervoerende laag. De zone waar zoet water stroomt wordt nauwer. De onderste zoute voet trekt zich zeewaarts terug.

In het laatste berekende voorbeeld (fig. 5c) is de zoetwaterstroming door de verticale grens onder de duinen omgekeerd. Bijna al het infiltrerende zoete water op de duinvoet stroomt naar die grens. Alleen een klein gedeelte zoet water blijft in de richting van de zee stromen. Op het droge strand en op het hoogste gedeelte van het natte strand wordt de infiltratie van zout water zo groot dat de zoutwaterlens nu de volledige dikte van de watervoerende laag inneemt. Alhoewel de stroming van het zoet water naar de zee sterk beperkt is, blijft een voet van zoet water aanwezig waarin de grondwaterbeweging zeer gering is.

De verspreiding van de verschillende grondwaterkwaliteiten, afgeleid uit de resistiviteitsprofielen K0, K1 en K2 (fig. 2), kan in overeenstemming gebracht worden met de resultaten van de tweede berekening (fig. 5b); die afgeleid uit resistiviteitsprofielen K3 en K4 (fig. 2) met de resultaten van de laatste berekeningen (fig. 5c). Bij deze laatste vergelijkingen valt het echter moeilijk de aanwezigheid van een zoete tot brakke waterlens in het midden van de watervoerende laag onder de laagwaterlijn te verklaren. Wellicht is het een typische overgangsvorm die optreedt bij de evolutie van een permanente toestand, waarbij zoet water in de richting van de zee stroomt, naar een permanente toestand waarbij deze zoetwaterstroming omkeert. Om de vraag te beantwoorden hoe lang het duurt eer een bepaalde permanente toestand in een andere evolueert en welke overgangsvormen optreden, drong zich de toepassing op van een niet-permanent stromingsmodel dat tevens het opgeloste-stoffentransport en de dispersie behandelt. Daartoe werd het mathematisch model van KONIKOW & BREDEHOEFT (1978) toegepast. Daar in dit mathematische model de gradiënt van de hydraulische stijghoogte als enig drijvend mechanisme voor de stroming aangenomen werd, was het eerst nodig het effect van de vloeistofdichtheid op de snelheidsverdeling in te bouwen.

In deze publikatie wordt in het kort weergegeven op welke wijze dit model van KONIKOW & BREDEHOEFT (1978) gewijzigd werd. Vervolgens wordt het model getoetst aan enkele typische zoet-zoutwaterproblemen. Het eerste probleem is de stijging van het grensvlak tussen zoet en zout water onder een „drain” in een afgesloten watervoerende laag. Het tweede probleem is de injectie van zoet water in een afgesloten zoutwatervoerende laag. Deze problemen werden eveneens behandeld door J.H. PETERS (1983a; 1983b) met behulp van de vortexmethode. Door de vergelijking van beide resultaten zullen de specifieke eigenschappen van de numerische methode besproken worden. De grondwaterstromingen onder

het strand van De Panne worden daarna behandeld. De resultaten laten toe de spreiding van de grondwaterkwaliteiten van de resistiviteitsprofielen K3 en K4 te verklaren als overgangsvormen (L. LEBBE, 1983b). Tenslotte zal aan de hand van een voorbeeld gepoogd worden te illustreren hoe deze mathematische modellen gekoppeld aan hydrogeologisch onderzoek kunnen bijdragen tot een optimaal beheer van de watervoorraden in het Vlaamse kustgebied.

## 2. AANPASSING VAN HET MATEMATISCHE MODEL

Het mathematische model van opgeloste-stoffentransport en van dispersie in grondwater (L.F. KONIKOW & J.D. BREDEHOEFT, 1978) werd toegepast. Het berekent de opeenvolgende concentratieveranderingen van een niet-reaktief opgeloste stof in het stromende grondwater. Het computerprogramma lost simultaan twee partieel-differentiaalvergelijkingen op. De eerste vergelijking is de grondwaterstromingsvergelijking, die de stijghoogteconfiguratie in de watervoerende laag bepaalt. De tweede vergelijking is de opgeloste-stoffentransportvergelijking, die de concentraties van de opgeloste stoffen in het systeem bepaalt.

Het computerprogramma werd gewijzigd zodat het effect van dichtheidsverschillen in rekening werd gebracht. Hiervoor werd de grondwaterstromingsvergelijking aangepast. De horizontale en verticale Darcy-snelheid in een punt *i* van het grondwaterreservoir werd afgeleid uit de vergelijkingen (1) en (2).

$$q_{hi} = k_{hi} \frac{\rho_f}{\rho_i} \frac{\delta h_{if}}{\delta x} \quad (1)$$

$$q_{vi} = k_{vi} \frac{\rho_f}{\rho_t} \left( \frac{\delta h_{if}}{\delta z} + \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} \right) \quad (2)$$

waarin:

- $q_{hi}$  : de horizontale Darcy-snelheid ( $LT^{-1}$ ),
- $k_{hi}$  : de horizontale hydraulische doorlatendheid ( $LT^{-1}$ ),
- $\rho_f$  : de dichtheid van zoet water ( $ML^{-3}$ ),
- $\rho_i$  : de dichtheid van water in een punt *i* ( $ML^{-3}$ ),
- $\delta h_{if} / \delta x$  : de horizontale zoetwaterstijghoogtegradiënt (dimensieloos),
- $q_{vi}$  : de verticale Darcy-snelheid ( $LT^{-1}$ ),
- $k_{vi}$  : de verticale hydraulische doorlatendheid ( $LT^{-1}$ ),
- $\delta h_{if} / \delta z$  : de verticale zoetwaterstijghoogtegradiënt (dimensieloos),
- $(\rho_i - \rho_f) / \rho_f$  : drijfvermogen in het punt *i*, (dimensieloos).

Het drijfvermogen wordt afgeleid uit de zoutconcentratie of saliniteit die op haar beurt afgeleid wordt uit de opgeloste-stoffentransportvergelijking. Er wordt een eenvoudig lineair verband tussen de salinitet in een punt  $i$  en de dichtheid in dat punt aangenomen. De invloed van termen van hogere graad in deze vergelijking wordt hier buiten beschouwing gelaten evenals de invloed van de temperatuur en de druk. Die invloed kan immers als verwaarloosbaar aangenomen worden binnen de variatie van de saliniteit, de temperatuur en de druk in het bestudeerde gebied.

De dichtheid van het zoet water met een saliniteit  $C_i$  is  $\rho_i$  en de dichtheid van zout water met een saliniteit  $C_s$  is  $\rho_s$ . Het lineair verband tussen de dichtheid  $\rho_i$  en de saliniteit  $C_i$  die door de punten  $\rho_f, C_f$  en  $\rho_s, C_s$  gaat, kan uitgedrukt worden als

$$\rho_i = (C_i \cdot (\rho_s - \rho_f) + \rho_f C_s - \rho_s C_f) / (C_s - C_f). \quad (3)$$

Het drijfvermogen kan uitgedrukt worden t.o.v. de saliniteit met de hulp van vergelijking (3):

$$(\rho_i - \rho_f) / \rho_f = ((C_i - C_f) \cdot (\rho_s - \rho_f)) / ((C_s - C_f) \cdot \rho_f) \quad (4)$$

Nu kan het zoutwaterpercentage uitgedrukt worden met betrekking tot de saliniteit:

$$P_{si} = 100 \cdot (C_i - C_f) / (C_s - C_f). \quad (5)$$

Door substitutie van vergelijking (5) in vergelijking (4) ontstaat een eenvoudig verband tussen het drijfvermogen en het zoutwaterpercentage:

$$(\rho_i - \rho_f) / \rho_f = [P_{si} \cdot (\rho_s - \rho_f)] / (\rho_f \cdot 100) \quad (6)$$

Het computerprogramma gebruikt een afwisselende-richting-impliciete procedure om een bepaald-verschil-benadering van de grondwaterstromingsvergelijking op te lossen. De opgeloste-stoffentransportvergelijking wordt opgelost door de toepassing van de methode van de karakteristieken.

Deze methode bestaat erin deeltjes te volgen om het convectieve transport na te bootsen en een tweestaps-expliciete procedure te gebruiken om met een bepaald-verschil-benadering het effect van de hydrodynamische dispersie, de vloeistof toe- of afname en de snelheidsdivergentie op de concentraties te berekenen.

### 3. TOETSEN VAN HET MODEL

Het model wordt getoetst aan twee zoet-zoutwaterproblemen. Deze problemen werden eveneens behandeld door J.H. PETERS (1983a; 1983b) met de methode van de vortexbeleggingen. Daar beide werk-

wijzen sterk verschillen doch hetzelfde doel nastreven, nl. de beschrijving van zoet- en zoutwaterstroming, is het interessant hun resultaten te vergelijken. Vooraleer tot deze vergelijking over te gaan, wordt het verschil tussen de methode van vortexbelegging en de door ons gebruikte numerische methode in het kort behandeld.

De methode van de vortexbelegging is een semi-analytische methode. Het probleem wordt in grote mate analytisch opgelost. Pas op het einde van de analyse wordt het grensvlak vereenvoudigd tot een beperkt aantal rechte stukjes die elkaar beïnvloeden. Het hoogteverschil  $\Delta y$  van een stukje van het grensvlak tussen twee punten bepaalt de vortex-sterkte tezamen met de zoetwaterdoorlatendheid ( $k$ ) en het drijfvermogen of het relatief dichtheidsverschil ( $\Delta \rho / \rho$ ) (fig. 6). Een vortex die met de klok meedraait, heeft een negatieve sterkte (J.H. PETERS, 1983b). Door een afwijking van het grensvlak ten opzichte van de horizontale of door een verandering van dichtheid in de horizontale richting wordt hier als het ware een supplementaire stroming beschouwd die het grensvlak naar een horizontale positie terugdraait. In het door ons gebruikte numerische model wordt naast het drijvende mechanische van de zoetwaterstijfhoogtegradiënt een supplementaire verticale stroming beschouwd. Deze is een gevolg van een relatieve afwijking van de dichtheid ten opzichte van de dichtheid van zoet water (zie vergelijking 2).

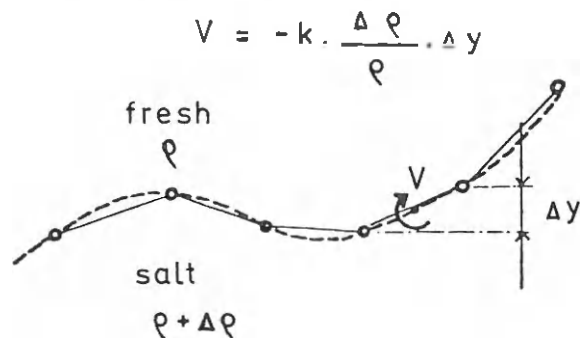


Fig. 6 – De sterkte van een punt-vortex (J.H. PETERS, 1983b).

Als resultaat van de berekeningen met de vortexbeleggingen krijgen we voor de opeenvolgende tijdschappen de coördinaten van een aantal punten van het grensvlak. Aan de hand van deze gegevens kan men ofwel de ligging van het grensvlak uitzetten op één bepaald tijdstip ofwel de ligging van een bepaald punt tegenover de tijd (J.H. PETERS, 1983b). De resultaten van het numerisch model van opgeloste-stoffentransport en dispersie in grondwater zijn de opeenvolgende concentraties van opgeloste stoffen in de nodale punten. Daardoor kunnen we ofwel de concentratie op een bepaald tijdstip uitzetten, ofwel de evolutie van de concentratie in een bepaald nodaal

punt. Dit kan gebeuren door het drukken van de waarden van de stijghoogten en concentraties zoals oorspronkelijk voorzien in het model van L.F. KONIKOW & J.A. BREDEHOEFT (1978). Een grafische voorstelling van de concentratie in de verschillende nodale punten op één welbepaald tijdstip kan op verschillende wijzen gebeuren. U. BULGARELLI et al. (1983) kent aan het oppervlak van de nodale cel een grijs tint toe die recht evenredig is met de concentratie. Een andere werkwijze wordt in dit werk gebruikt: het trekken van lijnen van gelijke concentratie. Deze bekomen we door een bilineaire interpolatie binnen de rechthoek waarvan de hoekpunten de nodale punten met hun overeenkomstige concentraties zijn. De grafische voorstelling van de spreiding van de concentraties wordt alleen betekenisvol als de concentratieverschillen tussen de aangrenzende nodale cellen voldoende klein zijn. Dit is meestal het geval indien de dispersie in rekening gebracht wordt. Indien geen dispersie beschouwd wordt, is deze grafische voorstelling minder geschikt.

Daar we het eerste zoet-zoutwaterprobleem van J.H. PETERS zo goed mogelijk willen benaderen, zijn we genoodzaakt de dispersie buiten beschouwing te laten. Een aanvullend programma werd opgesteld om de grondwaterdeeltjes te volgen en hun beweging grafisch voor te stellen. Daardoor wordt een nauwkeurige vergelijking tussen de twee methoden mogelijk.

### 3.1. Zoet- en zoutwaterstroming tengevolge van de afvoer van water door middel van een „drain” in een afgesloten watervoerende laag

J.H. PETERS (1983b) berekende met behulp van vortexbeleggingen de tijdsafhankelijke positie van het grensvlak onder een „drain”. De ligging van de „drain” en van het grensvlak tussen zoet en zout water tegenover de ondoorlatende grenzen in het tweedimensionaal model wordt weergegeven in fig. 7. De doorlatende laag wordt homogeen, isotroop en met een zoetwaterdoorlatendheid van 10 m/d verondersteld. De waterdoorlatende porositeit heeft een waarde van 0,35. De dichtheid van zoet water is 1 g/cm<sup>3</sup> en van zout water 1,025 g/cm<sup>3</sup>. Het grensvlak wordt verondersteld in evenwicht te zijn vóór de start van de drainage. Gedurende 50 dagen wordt 10 m<sup>3</sup>/d per meter „drain” onttrokken waarna de onttrekking stopt.

Bij de numerische simulatie werd de doorlatende laag ingedeeld in 15 lagen van elk 2,5 m dikte. Daar het opgegeven probleem symmetrische eigenschappen bezit, werd slechts de helft van het probleemgebied beschouwd. Het symmetrievlak is aangegeven in fig. 7 en werd vervangen door een fictieve ondoorlatende grens (zie fig. 8). Vanaf deze grens werden 20 kolommen beschouwd waarvan de breedte zo gekozen werd

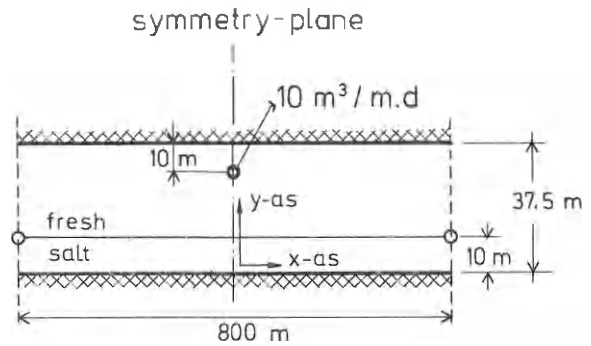


Fig. 7—Doorsnede van de afgesloten watervoerende laag en ligging van de afvoer en het grensvlak zoet-zout in het toetsprobleem van J.H. PETERS (1983b).

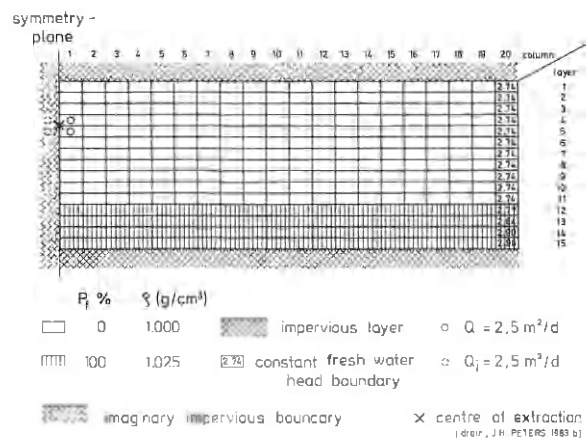


Fig. 8—Schematische voorstelling van de ingebrachte gegevens in het numerische model van het toetsprobleem van J.H. PETERS (1983b).

dat de vaste stijghoogtegrens gesitueerd is op 100 m van de „drain”. Het invoeren van deze grens heeft een kleine afwijking ten opzichte van het door J.H. PETERS (1983b) behandelde probleem. De horizontale en verticale doorlatendheid, de waterdoorlatende porositeit, de dichtheid van zoet en zout water werden gelijk genomen als hierboven.

Het onttrekken van 10 m<sup>3</sup>/d per meter „drain” op 10 m van de top van de doorlatende laag wordt gesimuleerd door het onttrekken van 2,5 m<sup>3</sup>/d uit twee nodale cellen van de vierde en vijfde laag (tellend van boven naar onder) in de eerste kolom (tellend van rechts naar links). Zo werd de onttrekking in de numerische methode gespreid over vier nodale cellen. Het zwaartepunt van de onttrekking in het probleem van J.H. PETERS (1983 b) ligt op de plaats van de „drain”.

Bij de toepassing van de methode van de karakteristieken werden negen te volgen deeltjes per nodale cel van het bepaaldverschilnetwerk met een bepaalde concentratie beschouwd. Tenslotte werd telkens een permanente stroming naar de afvoer gedurende de

periode van onttrekkingen beschouwd (bergings-  
 koëfficiënt wordt gelijk aan nul gesteld). Na iedere  
 periode van 2,5 dagen wordt telkens de drijfver-  
 mengfaktor berekend uit de bekomen concentratie.  
 Hiermee wordt dan een nieuwe stroomsnelheidskon-  
 figuratie berekend. De verandering van de stroming  
 in de tijd is dus uitsluitend te wijten aan de verande-  
 rende dichtheidsverschillen. Die probleemstelling  
 komt overeen met die van J.H. PETERS (1983b) die  
 aanneemt dat zowel het korrelskelet als de vloeistof-  
 fen niet-samendrukbaar zijn.

In fig. 9 wordt het grensvlak op vier tijdstippen weer-  
 gegeven zoals berekend met de vortexbelegging en  
 met de numerische methode. Beide berekeningen ge-  
 ven praktisch dezelfde resultaten voor de punten die  
 voldoende ver van de grenzen van het numerisch mo-  
 del verwijderd zijn. Onder de „drain” vertoont het  
 numerisch model evenals het semi-analytische model  
 een onstabieliteit, die echter bij het numerische model  
 groter is. Dat is te wijten aan de sterke puntvormige  
 onttrekking die men in het numerische model ver-  
 werkt heeft. Daardoor wordt de snelheid in de nabij-  
 heid van de onttrekking overschat. Nabij de vaste  
 stijghoogtegrens van het numerische model bestaat  
 eveneens een afwijking ten opzichte van het semi-  
 analytische model, tengevolge van de verschillende  
 randvoorwaarden.

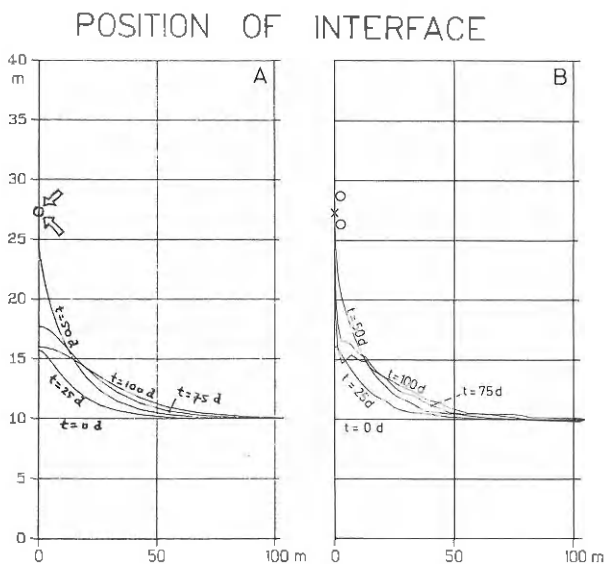


Fig. 9—De positie van het grensvlak op tijdstippen  
 van 0,25, 50, 75 en 100 dagen.

A, berekend met vortexbeleggingen (J.H.  
 PETERS, 1983b),

B, berekend met de numerische methode, met  
 de bepaald-verschillenadering om de grond-  
 waterstromingsvergelijking op te lossen waar-  
 in de zoetwaterstijghoogtegradiënt en het  
 drijfvermogen als drijvend mechanisme  
 wordt beschouwd en de methode van de karak-  
 teristieken om de opgeloste-stoffentransport-  
 vergelijking op te lossen.

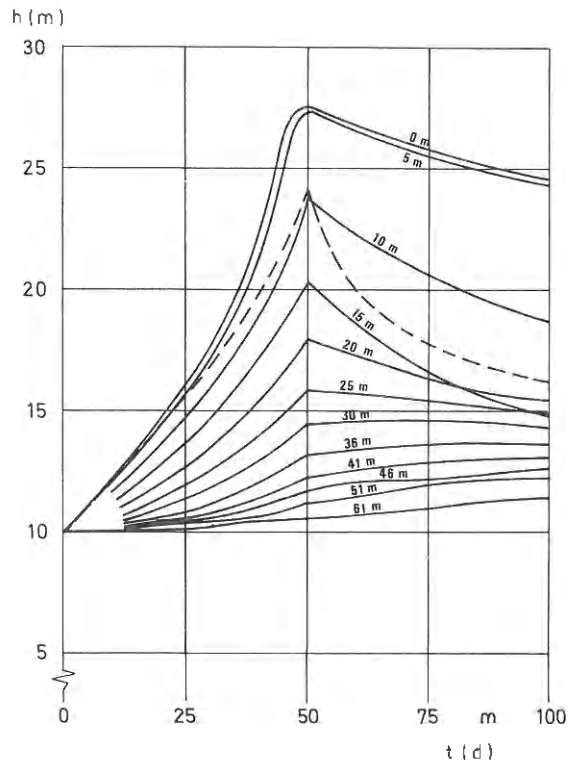


Fig. 10—De hoogte van het punt van het grensvlak  
 juist onder de „drain”; — — , berekend met  
 vortexbeleggingen (J.H. PETERS, 1983b);  
 0<sub>m</sub> berekend met de numerische methode.

De hoogte van enkele andere punten van het  
 grensvlak op respectievelijk 5, 10, 15, 20, 25,  
 30, 36, 41, 46, 51, 61 m van het punt juist on-  
 der de „drain” onmiddellijk vóór de aanvang  
 van de onttrekking berekend met de numeri-  
 sche methode.

In fig. 10 wordt de hoogte van het punt van het grens-  
 vlak juist onder de „drain” weergegeven in de loop  
 van de tijd zoals berekend door J.H. PETERS (1983  
 b), samen met de hoogte van een reeks punten van  
 het grensvlak op verschillende afstanden van het punt  
 onder de „drain”. In de rechthoek wordt eveneens de  
 wijziging van de x-koordinaat weergegeven. Weer  
 stellen we dezelfde te hoge opwaartse snelheid vast  
 van de punten die aankomen op de grens van de cel  
 waar een puntvormige onttrekking plaats heeft. De  
 daling van het grensvlak bij het stoppen van de ont-  
 trekking is bij de vortexbelegging iets groter dan bij  
 het numerisch model. Dit kan toegeschreven worden  
 aan het feit dat bij het numerische model de supple-  
 mentaire stroming bepaald wordt door de grootte en  
 de variatie van het drijfvermogen tussen een groep  
 nodale cellen. Als we daarbij nog weten dat het drijf-  
 vermogen bepaald wordt uit het gemiddelde zoutwa-  
 terpercentage tussen twee nodale punten, kunnen we  
 gemakkelijk begrijpen dat deze supplementaire strom-  
 ing een functie is van de zoet-zoutwaterverdeling  
 gezien op de schaal van een groep cellen. Het numeri-  
 sche model zal dus eerder geschikt zijn voor de simu-



latie van stromingen waar de grondwaterkwaliteit graduele overgangen vertoont dan voor de simulatie van scherpe grensvlakken. Bij de vortexbelegging wordt de supplementaire stroming afgeleid uit korte lijnstukken terwijl de dichtheitsgradiënt in de omgeving van het lijnstuk zeer groot verondersteld wordt. Deze dichtheitsgradiënt is in het numerische model meestal gespreid over drie nodale cellen.

### 3.2. Stroming van geïnjecteerd zoet water in een afgesloten zoutwatervoerende laag

Dit probleem werd eveneens door J.H. PETERS (1983a) behandeld met behulp van vortexbeleggingen. De stromingen werden berekend in een axiaal symmetrisch model. Het zoet water werd geïnjecteerd in een watervoerende laag op een diepte van 90 m. Het injectiedebiet bedroeg  $480 \text{ m}^3/\text{d}$  in een filter van 15 m lengte die begon op een diepte van 101 m. De zoetwaterdoorlatendheid was  $40 \text{ m/d}$ , de porositeit 0,38 en de drijfvermogenfaktor 0,025. De ligging van het grensvlak werd berekend na 60 dagen injectie. Als de injectie ophield, steeg het grensvlak zodat reeds na drie weken het filterelement omgeven was met zout water (fig. 11).

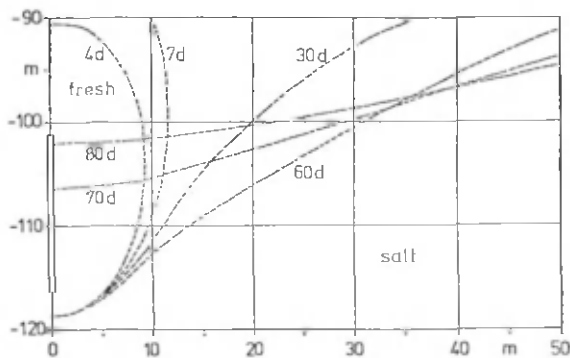


Fig. 11 – Beweging van het grensvlak indien het zoet water geïnjecteerd wordt in een afgesloten zoutwatervoerende laag gedurende een periode van 60 dagen (tweedimensionaal, axiaal symmetrisch model) (J.H. PETERS, 1983a).

Een gelijkaardig probleem werd uitgewerkt met het tweedimensionaal numerische model. De afgesloten watervoerende laag had een dikte van 30 m en was onderverdeeld in tien lagen van gelijke dikte. Aangezien het probleem symmetrische eigenschappen vertoont, werd slechts de helft van het probleemgebied beschouwd. Het symmetrievlak werd vervangen door een denkbeeldige ondoorlatende grens. Vanaf deze grens werden 18 kolommen genomen met een breedte van ca. 6 m. In de eerste kolom werd een vaste stijghoogtegrens gekozen. Deze is gelegen op ca. 105 m van de ondoorlatende grens. De waarde van de zoetwaterstijghoogte van deze grens nam toe met de diep-

te zodat het aanwezige zout water geen verticale stroming onderging. Gedurende de eerste periode werd in de laatste kolom zoet water met één zelfde debiet geïnjecteerd in de vier middelste cellen. Het totale injectiedebiet is  $6,42 \text{ m}^3/\text{d}$  per meter watervoerende laag over een diepteinterval van 12 m. De doorlatende laag werd homogeen en anisotroop verondersteld. De horizontale hydraulische doorlatendheid was  $100 \text{ m/d}$ , de verticale  $20 \text{ m/d}$ . De waterdoorlatende porositeit was 0,30.

Voor de injectie van zoet water werd verondersteld dat de watervoerende laag volledig ingenomen was door zout water met een dichtheid van  $1,025 \text{ g/cm}^3$ . In het behandelde probleem kunnen twee perioden onderscheiden worden: een eerste tijdens dewelke zoet water geïnjecteerd werd, een tweede nadien. Beide perioden werden ingedeeld in dezelfde tijdsspannen. De eerste tijdsspanne was 8000 seconden. De duur van elk van de vijf volgende tijdsspannen werd bekomen door de vorige telkens met  $10^{0,4}$  te vermenigvuldigen. Hierna werden nog vijf tijdsspannen gekozen met een lengte die gelijk is aan de laatste tijdsspanne nl. 800.000 seconden. De totale duur van de injectieperiode was bijgevolg 61,6 d. In het probleem werd de stroming als niet-permanent beschouwd; de vloeistof en het korrelskelet werden dus als samen-drukbaar aangenomen. Daarvoor hadden we een specifieke elastische berging van  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  ingevoerd. Na iedere tijdsspanne wijzigden zich de stroomsnelheden, niet alleen ten gevolge van de bergingsveranderingen maar ook door de veranderende dichtheidsverschillen. Deze laatste werden afgeleid uit het zoutwaterpercentage (vergelijking 6). Dit zoutwaterpercentage was het resultaat uit een vorige tijdsspanne. In de opgeloste-stoffentransportvergelijking werd de hydrodynamische dispersie in rekening gebracht. De longitudinale dispersie van het poreuse midden is gelijk aan 0,15 m. De verhouding van de transversale tot de longitudinale dispersie evenals de waterdoorlatende porositeit is gelijk aan 0,3.

Als resultaat bekwamen we de zoetwaterstijghoogte, de grondwatersnelheid en de concentratie aan opgeloste stoffen na iedere tijdsspanne. De waarden zijn voorgesteld in verticale doorsneden voor de tijden 6,06, 24,6 en 61,6 dagen na het starten en het beëindigen van de injectie van zoet water (fig. 12). In deze figuur hebben de verticale en de horizontale as dezelfde schaal. De lijnen van gelijke zoetwaterstijghoogte in de voorafgaande tijdsspanne werden bekomen door bilineaire interpolatie tussen de waarden van de nodale punten. De grondwatersnelheid in de voorafgaande tijdsspanne wordt weergegeven door een vektor. Deze vektor wordt bekomen uit de verticale en de horizontale component in het nodale punt. De lengte van deze componenten wordt bekomen door de snelheden te vermenigvuldigen met een tijdsduur, in fig. 12 is dat 1 dag. Bij het tekenen van de vektoren wordt rekening gehouden met de verticale en de hori-

# INJECTION OF FRESH - WATER IN A SALAQUIFER

confined aquifer  $k_h = 100 \text{ m/d}$  ,  $k_v/k_h = 0,20$  ,  $\alpha_v = 0,15 \text{ m}$  ,  $\alpha_h / \alpha_v = 0,30$  ,  $\epsilon = 0,30$

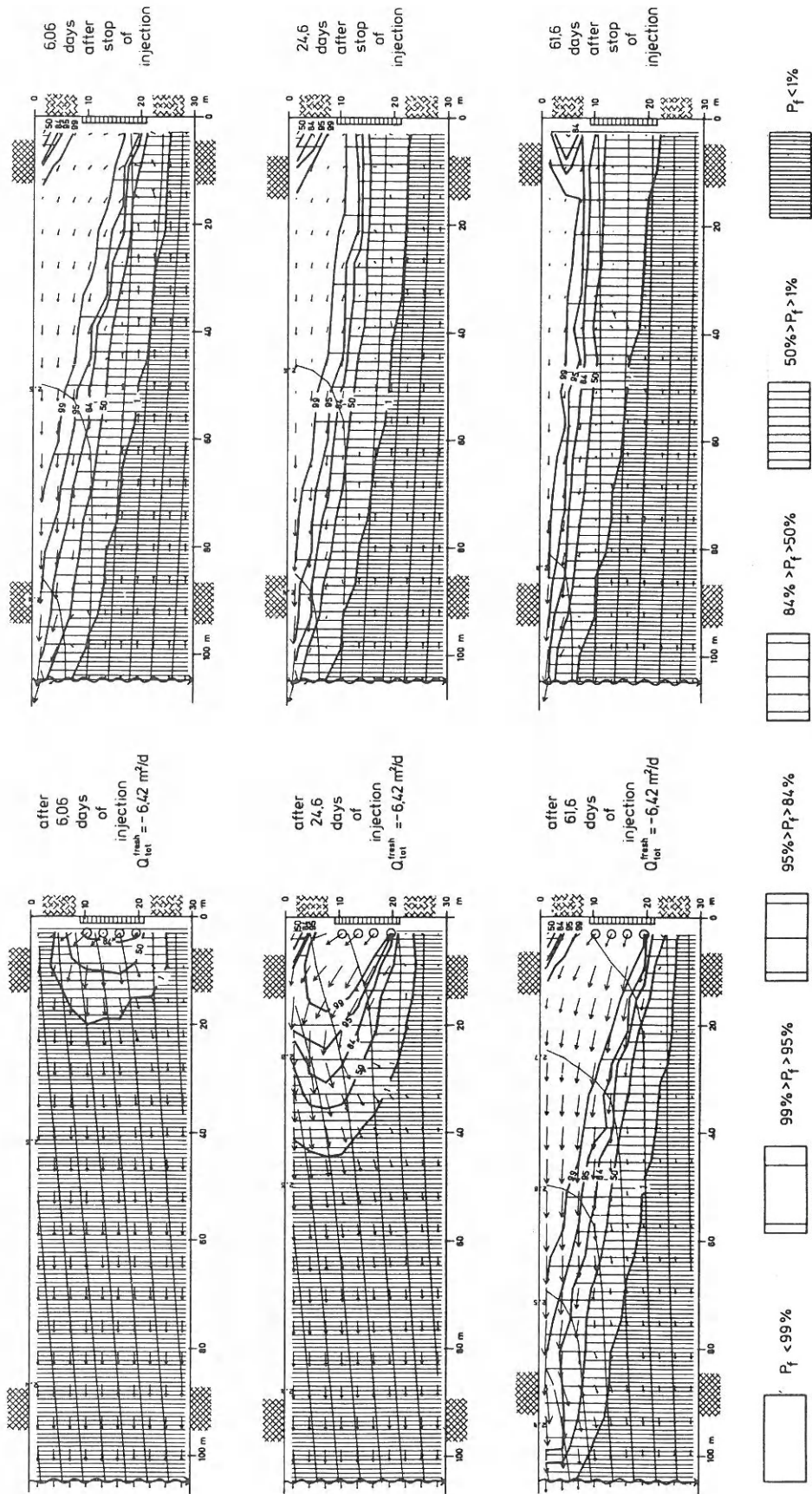


Fig. 12 – Evolutie van de grondwaterstroming, de zoetwaterijhoogteconfiguratie en de kwaliteitsverspreiding bij injectie van zoet water in een afgesloten zoutwateroerende laag gedurende een periode van 61,6 dagen (tweedimensionaal in vertikaal vlak).

zontale schaal. De concentratie aan opgeloste stoffen op het aangegeven tijdstip wordt weergegeven door lijnen van gelijk zoetwaterpercentage die eveneens verkregen worden door een bilineaire interpolatie tussen de waarden in de nodale punten.

Als resultaat zien we dat de zoetwaterlens zich in het begin van de injectie gelijkmatig horizontaal uitbreidt. Naarmate deze lens echter groter wordt, neemt de opwaartse en de horizontale snelheid in de onmiddellijke omgeving van het injectiepunt en in het bovenste gedeelte van de watervoerende laag toe, terwijl in het onderste gedeelte de grondwatersnelheid afneemt tot zeer kleine waarden. Op het einde van de injectie bestaat er een wigvormige zoetwaterlens. De grootste grondwatersnelheden komen voor in het bovenste gedeelte van de afgesloten watervoerende laag waar de dikte van de zoetwaterlens het geringst is. De stroming wordt als het ware op die plaats gekoncentreerd. Na het stilleggen van de injectie keert de stroming zich onmiddellijk om in het zout water. Het zoet water blijft echter in het bovenste gedeelte van de watervoerende laag wegstromen. Na het stoppen van de infiltratie vermindert metertijd de stroming in het zoete en zoute water. De zoetwaterlens wordt als maar dunner terwijl de overgangszone meer en meer horizontaal gaat liggen. Zoals J.H. PETERS (1983a) in zijn probleem vond, is

reeds na ongeveer drie weken de helft van de cellen waar injectie gebeurde opnieuw met brak water gevuld.

#### 4. EVOLUTIE VAN DE ZOETWATERLENS ONDER DE DUINEN EN HET STRAND IN DE PANNE

##### 4.1. Veldwaarnemingen

De vijf resistiviteitsprofielen, opgenomen loodrecht op de kustlijn (fig. 2), kunnen eveneens in zoetwaterpercentageprofielen omgezet worden (fig. 13). Daartoe wordt een eenvoudig lineair verband aangenomen tussen de totale opgeloste stoffen en de elektrische geleiding van het poriënwater en een konstante formatiefactor (L. LEBBE et al., 1983). Daar de resistiviteit sterk verandert als een kleine hoeveelheid zout water met zoet water gemengd wordt, kunnen we slechts voor de hoge waarden nauwkeurig de lijnen van gelijk zoetwaterpercentage trekken. Voor de lage percentages van zoet water gaat dit moeilijker. Die profielen laten toe de veldwaarnemingen te vergelijken met het mathematisch model van opgeloste stoffen en dispersie. Als stijghoogtegegevens gebruiken we de continue stijghoogtemetingen in peilbuizen geplaatst in het bovenste (fig. 3) en in het onder-

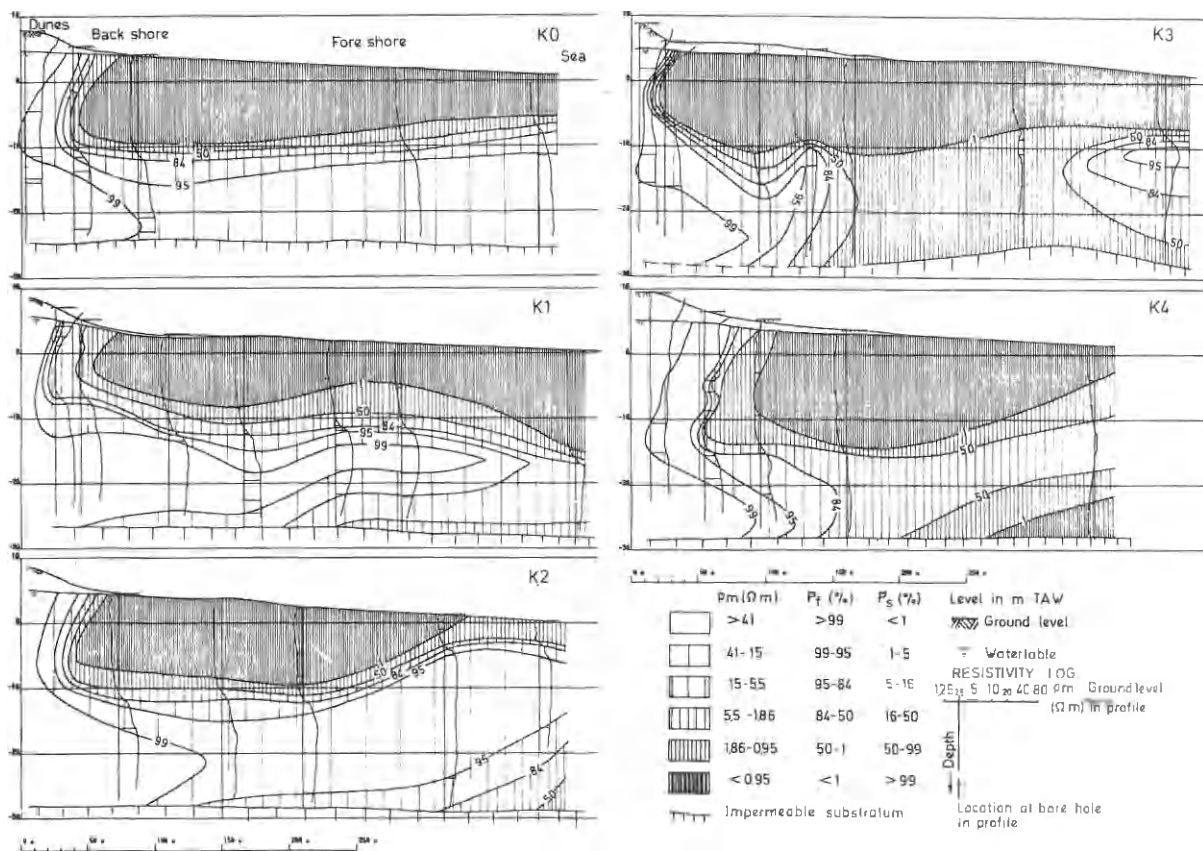


Fig. 13 – Profielen van zoetwaterpercentage.

ste (fig. 4) gedeelte van de watervoerende laag. Steunend op de hydrogeologische studie ten westen van De Panne (L. LEBBE, 1978) nemen we een infiltratie van zoet water onder het duingebied aan met een gemiddelde snelheid van  $7,4 \cdot 10^{-4}$  m/d.

#### 4.2. Inbrengen van gegevens

De watervoerende laag wordt behandeld in een tweedimensionaal model in een verticale doorsnede. Ze wordt onderverdeeld in tien lagen van gelijke dikte (3 m) en in achttien kolommen met gelijke breedte (30 m). Achttien kolommen zijn gelegen onder de duinen, veertien onder het strand en zes onder de zee. De verticale grens onder de duinen komt overeen met een grondwaterscheidingslijn. In het model wordt ze vervangen door een ondoorlatende grens. Aldus ligt de grondwaterscheidingslijn onder het duingebied op 540 m van de hoog-hoogwaterlijn terwijl de laag-laagwaterlijn op 420 m van de hoog-hoogwaterlijn gelegen is. De zee wordt nog over een breedte van 180 m in het model beschouwd. Onder de duinen nemen we een vaste verticale stroomsnelheidsgrens aan; onder het strand en de zee een vaste stijghoogtegrens. Onder de duinen infiltreert 100%

zoet water. Indien op het strand water infiltreert is dit 100% zout water. De verticale grens onder de zee is een vaste stijghoogtegrens. De zoutwaterstijghoogte is er konstant over de ganse diepte en wordt afgeleid uit het gemiddelde zeepeil. Indien er stroming is vanuit de vaste stijghoogtegrens naar het beschouwde gebied is het 100% zout water.

De horizontale en de verticale doorlatendheid worden over de ganse watervoerende laag als konstant genomen, n.l. respectievelijk 10 m/d en 0,2 m/d. Bij de toepassing van de methode van de karakteristieken worden negen te volgen deeltjes per cel gekozen. Aan ieder deeltje wordt een beginkoncentratie van 100% zout water toegekend. Als maximale celafstand per beweging van de deeltjes wordt 0,85 gekozen. De longitudinale dispersiviteit van het poreuse midden is 0,15 m, de verhouding transversale tot longitudinale dispersiviteit 0,3 en de waterdoorlatende porositeit 0,3. Na iedere tijdspanne van vijf jaar wordt de drijfvermogenfactor opnieuw afgeleid uit de berekende concentratie. Uit deze nieuwe drijfvermogenfactor wordt een nieuwe stijghoogteconfiguratie en de daaruitvloegende nieuwe grondwatersnelheidsverdeling afgeleid.

#### EVOLUTION OF FRESH - WATER LENS UNDER DUNES , BEACH AND SEA

$N_{in}^{max} = 10 \text{ m}^2/\text{d}$  ,  $k_v = 10 \text{ m/d}$  ,  $k_h/k_v = 01$  ,  $\alpha_x = 0,15 \text{ m}$  ,  $\alpha_y/\alpha_x = 3$  ,  $E = 3$

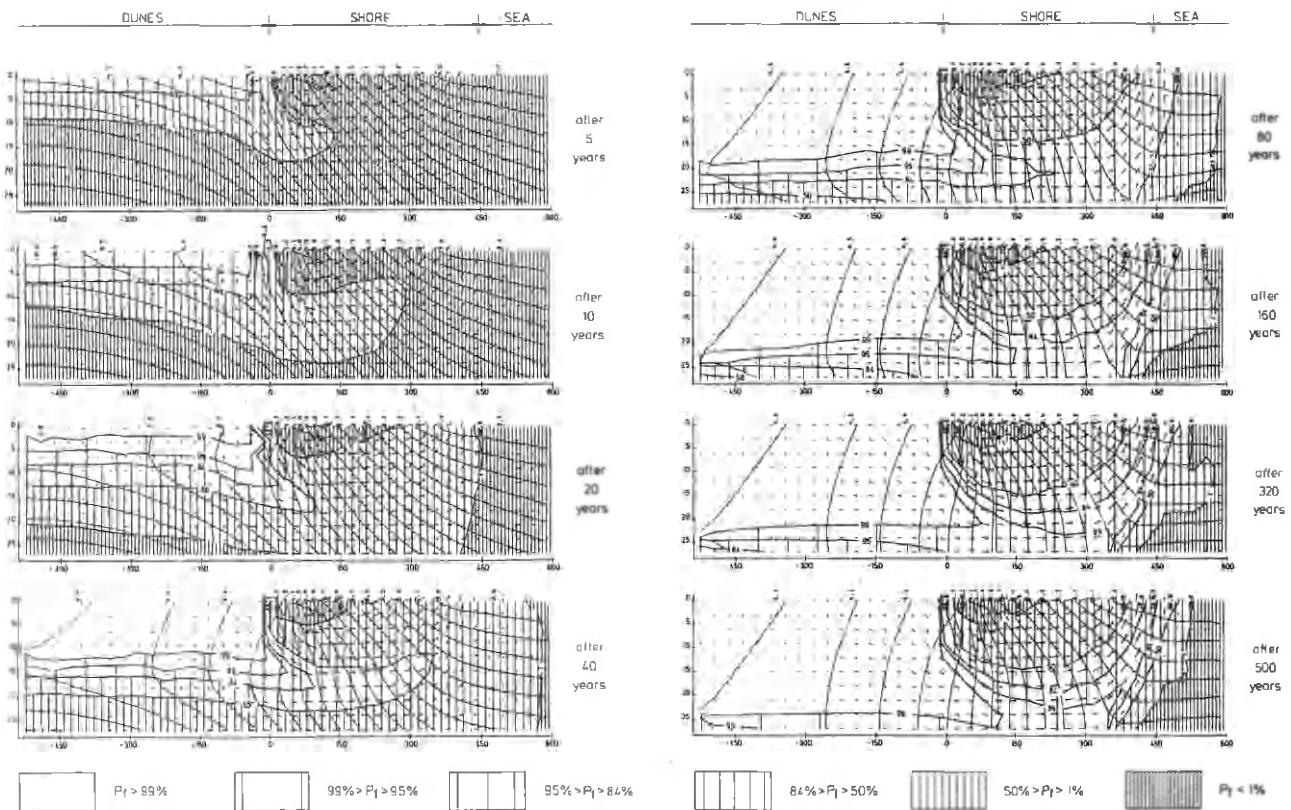


Fig. 14– Natuurlijke evolutie van de grondwaterstroming, de zoetwaterstijghoogteconfiguratie en de kwaliteitsverspreiding onder de duinen, het strand en de zee na het ontstaan van de duingordel. Berekend met de numerische methode (tweedimensionaal, in vertikaal vlak).



Eerst wordt de evolutie van de zoetwaterlens onder de duinen en het strand gesimuleerd voor een periode van vijfhonderd jaar (fig. 14). Daarna wordt het gevolg van een onttrekking van zoet water uit achttien cellen onder het duingebied gesimuleerd (fig. 15). Gedurende de eerste vijf jaar is het totale debiet van het opgepompte water  $0,10 \text{ m}^3/\text{d}$  per meter watervoerende laag. De tweede vijf jaar wordt  $0,21 \text{ m}^3/\text{d}$  per meter watervoerende laag gewonnen en tenslotte gedurende de volgende dertig jaar  $0,42 \text{ m}^3/\text{d}$  per meter watervoerende laag. Deze laatste hoeveelheid is groter dan de hoeveelheid zoet water die in het duingebied infiltreert ( $0,40 \text{ m}^3/\text{d}$  per meter watervoerende laag).

### 4.3. Voorstelling en bespreking van de resultaten

De berekende evolutie van de zoetwaterlens onder de duinen en het strand wordt voorgesteld in fig. 14. De resultaten worden op dezelfde wijze voorgesteld als die van het probleem behandeld in deel 3.2. De verticale as is er tienmaal overdreven ten opzichte van de horizontale as. De lengte van de horizontale en de verticale component van de snelheidsvektor wordt

bekomen door de snelheden te vermenigvuldigen met een tijdsduur van een half jaar.

Bij het begin veronderstellen we dat de watervoerende laag volledig gevuld is met zout water. Vanaf dit moment wordt aangenomen dat de zee de pas gevormde duingordel niet meer overstroomt. Een gedeelte van het regenwater begint te infiltreren door de onverzadigde zone naar de grondwatertafel toe. Onder de duingordel wordt het zout water verdrongen. Een lens van brak water ontstaat. Reeds in de eerste jaren vormt zich in het bovenste gedeelte van de watervoerende laag een brakwatertong onder het droge strand. In de loop van de tijd groeit de lens onder de duinen. Het zoutgehalte vermindert in het bovenste gedeelte en er ontstaat een brede overgangszone tussen zoet en zout water. De brakwatertong onder het strand groeit, het zwaartepunt ervan daalt en het zoutgehalte vermindert. Nabij het doorlatende substraat gebeurt de verwijdering van de zoutdeeltjes zeer traag. Pas na lange tijd wordt een evenwichtstoestand bereikt waarbij de watervoerende laag onder de duinen volledig gevuld is met zoet water, terwijl onder het strand het onderste gedeelte van de watervoerende laag gevuld is met zout water en het bovenste met zout water.

### EVOLUTION OF FRESH - WATER LENS DURING PUMPAGE IN DUNES

$N_{tot} = 40 \text{ m}^3/\text{d}$  ;  $k_s = 10 \text{ m/d}$  ;  $k_v/k_h = 0.1$  ;  $\alpha_1 = 15 \text{ m}$  ;  $\alpha_2/\alpha_1 = 3$  ;  $\epsilon = 3$       o pumped cell

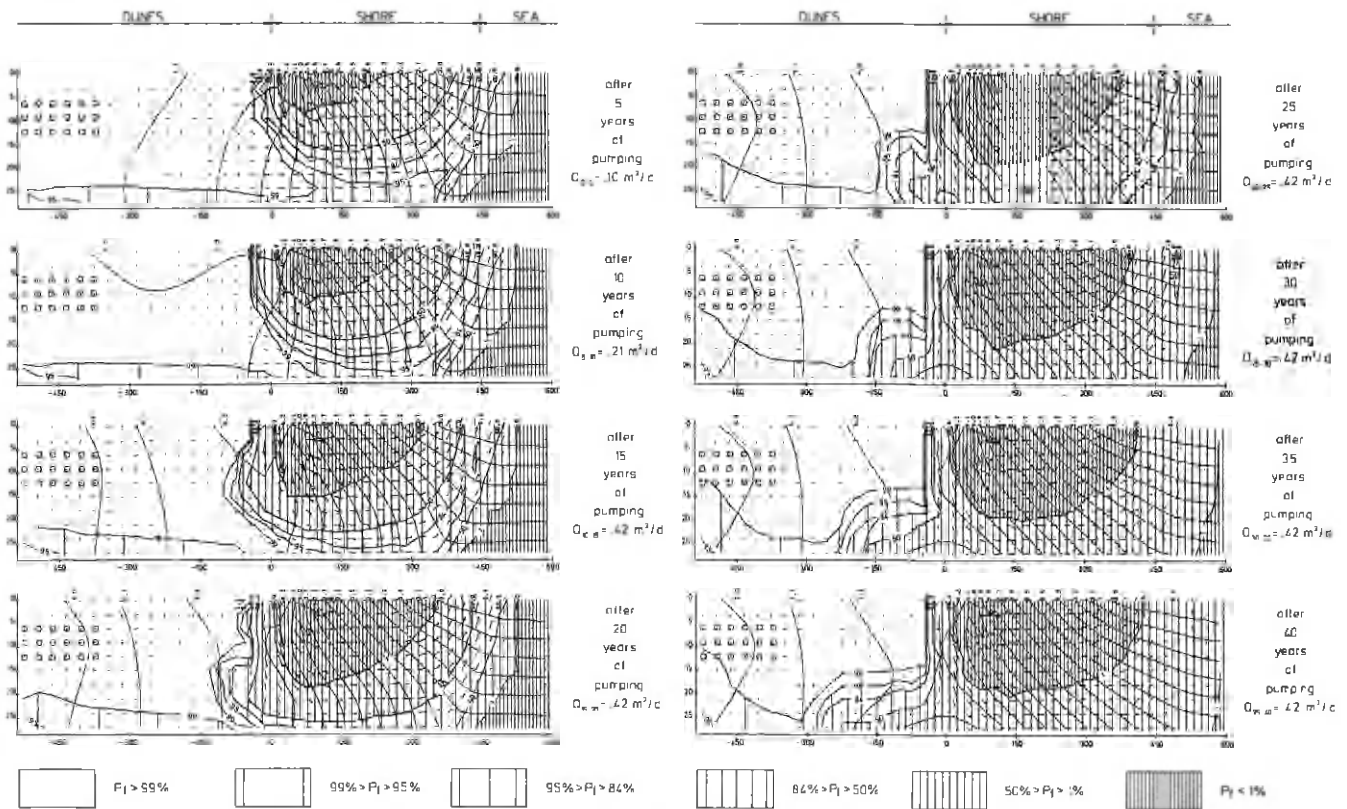


Fig. 15 – Evolutie van de grondwaterstroming, de zoetwaterstijghoekconfiguratie en de kwaliteitsverspreiding onder de duinen, het strand en de zee vanaf de start van de pumping in het duingebied. Na het tiende jaar van pumping is het opgepompte debiet groter dan het totale infiltratiedebiet van zoet water onder de duinen.



De evolutie van de stroming en van de waterkwaliteit in de watervoerende laag onder de zee is eveneens opmerkelijk. In de eerste jaren gebeurt de zoutwaterstroming er hoofdzakelijk horizontaal en zeewaarts. Naarmate de tijd vordert, vermindert geleidelijk het zoutgehalte en de zeewaartse stroming. In het onderste gedeelte van de watervoerende laag verandert de stroming van richting en het zoutgehalte van het water wordt weer groter. In het bovenste gedeelte van de watervoerende laag handhaaft zich de zeewaartse stroming. Een zeer trage zoutwaterstroming van het onderste naar het bovenste gedeelte van de watervoerende laag ontwikkelt zich zoals reeds beschreven door COOPER et al. (1964).

Na vijfhonderd jaar van simulatie verandert de zoetwaterstijghoogte en de verspreiding van de grondwaterkwaliteit onder de duinen, het strand en de zee niet meer betekenisvol. Deze zoetwaterstijghoogte en de kwaliteitsverspreiding worden nu als initiële waarde gebruikt om de evolutie van de grondwaterkwaliteit tijdens het pompen in de duinen te simuleren. Na tien jaar van pompen wordt het totale pompdebiet op 105% van de totale infiltratie van zoet water,  $N_{\text{tot}}^{\text{fresh}}$  gehouden. Tijdens de eerste vijf jaar was het pompdebiet één vierde en tijdens de tweede vijf jaar was het de helft van dat na het tiende jaar. Deze simulatie wordt uitgevoerd om het gevolg van te sterke pumping in de duinen te bestuderen. De resultaten worden voorgesteld in fig. 15.

Vanaf het moment dat de pumping start, begint zich de zoutwaterlens in het bovenste gedeelte van de watervoerende laag onder het strand, en vooral het droge strand, uit te breiden. De zoet-brakwatertong onder het strand wordt dunner en rijker aan zouten. Wanneer de overpumping begint, hebben twee belangrijke ontwikkelingen in de verspreiding van de grondwaterkwaliteit plaats: de eerste onder de grens van de duinen en het strand, de tweede onder de grens van het natte strand en de zee.

Onder de grens van de duinen en het strand begint zout water landwaarts te stromen. Er ontstaat een verticale overgangzone. Als de overpumping doorgaat, dringt er zout water door in het boven- tot middengedeelte van de watervoerende laag. Naarmate de tijd vordert, zakt deze zoutwaterindringing tot in het onderste gedeelte van de watervoerende laag waar ze tenslotte landwaarts voortschrijdt. Het zoet water nabij het ondoorlatende substraat onder de duinen met een iets groter zoutgehalte, stroomt opwaarts naar de waterwinning toe.

Onder het natte strand en de zee wordt het zoutgehalte in de zoet-brakwatertong groter. De zoutwaterlens daalt vooral onder het natte strand zodat een lens van brak water afgeknepen wordt van de zoet-brakwatertong. Als de tijd vordert, wordt het zoutgehalte in deze brakke lens groter en ze verplaatst zich opwaarts en in de richting van de zee. De aanwezigheid van de brakke lens onder het laagste gedeelte van het natte strand vóór de bebouwde kom van De Panne kan op een dergelijke wijze verklaard worden.

## 5. NUMERISCHE SIMULATIE ALS HULP BIJ EEN HYDROGEOLOGISCHE STUDIE

Door het gebruik van het numerische model verkrijgen we een inzicht in de wijze waarop bepaalde parameters moeten geschat en ingevoerd worden. Het belang van de te bepalen parameters kan afgewogen worden tegenover de energie die ze van de hydrogeologische studie vergen. Het is duidelijk verkeerd veel energie te spenderen aan het nauwkeurig opmeten van bepaalde parameters als blijkt dat het te bestuderen proces weinig gevoelig is voor de grootte van deze parameters. Is het proces daarentegen zeer gevoelig voor een of andere parameter dan zijn de grotere inspanningen voor het bepalen ervan gerechtvaardigd. Voor de studie van de evolutie van grondwaterkwaliteiten in een grondwaterreservoir zijn de waterdoorlatende eigenschappen (doorlatendheid, anisotropie, waterdoorlatende porositeit) van de lagen, de zoetwaterstijghoogteconfiguratie en de spreiding van de grondwaterkwaliteit onmisbaar.

Meestal is het voldoende de horizontale doorlatendheid van de doorlatende en de verticale doorlatendheid van de halfdoorlatende lagen nauwkeurig te kennen. Indien de dichtheidsverschillen tussen de verschillende grondwaterkwaliteiten zo groot worden dat deze de grondwaterstromingen beïnvloeden, dan is een nauwkeurige kennis van de verticale doorlatendheid van zowel de halfdoorlatende als de doorlatende lagen vereist. Nauwkeurige gegevens over de verticale doorlatendheid kunnen we verkrijgen bij pompproeven waarbij de stijghoogteverlagingen gemeten worden op verschillende diepten en op een relatief korte afstand van een pompput die het grondwaterreservoir slechts over een beperkt diepte-interval aansnijdt (E.P. WEEKS, 1969; S.P. NEUMAN & P.A. WITHERSPOON, 1972; L. LEBBE, 1983). Alhoewel deze pompproeven reeds een relatief groot volume van het grondwaterreservoir beïnvloeden, moeten we toch rekening houden met de schaal van de pompproeven en de schaal waarop men de grondwaterstromingen wil volgen. De kennis van de heterogeniteit van het grondwaterreservoir kunnen we bekomen uit een litostratigrafische studie en uit de analyse van de stijghoogteconfiguratie en -schommeling in het grondwaterreservoir.

De waterdoorlatende porositeit bepaalt de gemiddelde snelheid van de grondwaterdeeltjes. De longitudinale en transversale dispersiviteit bepalen de menging van waters met verschillende kwaliteit die optreedt tijdens de stroming door de poreuse media. Deze laatste parameters zijn dus van grote betekenis voor de verspreiding van de waterkwaliteit. Tracerproeven zijn aangewezen om ze te bepalen. Weer moeten we rekening houden met de beperkte schaal van deze proeven. De grondwatersnelheden en de afstand waarover de concentraties gevolgd worden tijdens de tracerproef zouden van dezelfde grootteorde

moeten zijn als die van het te bestuderen proces. Het verband tussen de hydrodynamische dispersie, de grondwatersnelheid en de afstand waarover men de stroming beschouwt, is niet steeds duidelijk (F.W. SCHWARTZ, 1977; L. SMITH & F.W. SCHWARTZ, 1980, 1981a, 1981b). Daarom zijn momentopnamen van de spreiding van de waterkwaliteiten in een grondwaterreservoir waardevol indien men tot doel heeft de evolutie van de spreiding van de waterkwaliteiten in het grondwaterreservoir te bestuderen.

Uit de studie van de stijghoogteconfiguratie en -schommelingen bekomen we gegevens waaruit niet alleen doorlatendheden kunnen afgeleid worden maar waarmee eveneens de randvoorwaarden kunnen opgesteld worden. De spreiding van de grondwaterkwaliteit met haar specifieke eigenschappen zoals de relatieve ionensamenstelling, de concentratie van radioactieve isotopen  $^3\text{H}$  en  $^{14}\text{C}$  en de stabiele isotopen  $^{18}\text{O}$  en  $^{13}\text{C}$ , verruimen ons inzicht in de oorsprong en in de evolutie van de verschillende waters (J. DEVOS, 1984). Deze gegevens kunnen een grote hulp zijn bij het opstellen van de aanvangs- en de randvoorwaarden.

Het numerische model zal aanvankelijk gebruikt worden om de gemiddelde stijghoogteconfiguratie na te bootsen. De waargenomen en de berekende stijghoogte zullen vergeleken worden. Vooral door aanpassing van de verticale en van de horizontale doorlatendheden zullen de verschillen weggewerkt worden. Indien na een aantal terugkoppelingen een goede overeenstemming bekomen wordt tussen de waargenomen en de berekende waarden, kennen we de grondwatersnelheden op de verschillende plaatsen in het grondwaterreservoir. Vanaf dit moment kan men overgaan tot het toetsen van de waargenomen en van de berekende verspreiding van de kwaliteiten. Dit zal gebeuren door verdere aanpassing van de verticale doorlatendheid, indien de dichtheidsverschillen tussen de verschillende grondwaterkwaliteiten groot is, en door aanpassing van de waterdoorlatende porositeit en van de longitudinale en verticale dispersiviteit. Door vergelijking van de waargenomen en berekende stijghoogten en van de kwaliteitsverspreiding krijgen we een inzicht in de haalbare nauwkeurigheid en in de eventuele tekorten van het model.

Het getoetste model kan als een syntese van de huidige stand van onze kennis van het te onderzoeken probleem beschouwd worden. Het laat ons toe te evalueren of er voldoende veldwaarnemingen zijn om het gestelde doel te bereiken, en welke veldwaarnemingen er nog dienen aangevuld te worden. Het geeft ons een inzicht in de basiswetten, in hun accuraatheid waarmee ze de processen omschrijven, in hun onderling belang in het bestudeerde systeem en in het opeenvolgende belang van de verschillende parameters. Uiteindelijk laat het ons toe de evolutie van de grond-

waterkwaliteit te berekenen en deze resultaten te evalueren door de ervaringen opgedaan tijdens de toetsing.

Tenslotte kan een aan de terreinomstandigheden getoetst model aangewend worden om tot een optimaal beheer van de grondwatervoorraden in het kustgebied te komen.

## 6. OPTIMAAL BEHEER VAN GRONDWATERVOORRADEN IN EEN KUSTVLAKTE MET BEHULP VAN HET NUMERISCHE MODEL

### 6.1. Geschetste probleem

Het geschetste probleem is sterk vereenvoudigd. Het behandelt een kustvlakte die bestaat uit een strand, een smalle duingordel en een laag moerassig gebied. Dit laatste grenst aan een hoger gelegen gebied waar op geringe diepte een dikke ondoorlatende klei voorkomt (fig. 16). De grenzen tussen de gebieden verlopen evenwijdig. Het grondwaterreservoir onder de kustvlakte bestaat uit drie vrij homogene, continue lagen met horizontale gelaagdheid en begrenzing. De onderste doorlatende laag ligt op een ondoorlatend substraat en bestaat uit grove tot middelmatige zanden. Daarop ligt een halfdoorlatende laag bestaande uit klei- en leemhoudende fijne zanden. De bovenste doorlatende laag bestaat uit middelmatige tot fijne zanden. Landwaarts is het grondwaterreservoir begrensd door een verticale ondoorlatende kleiwand.

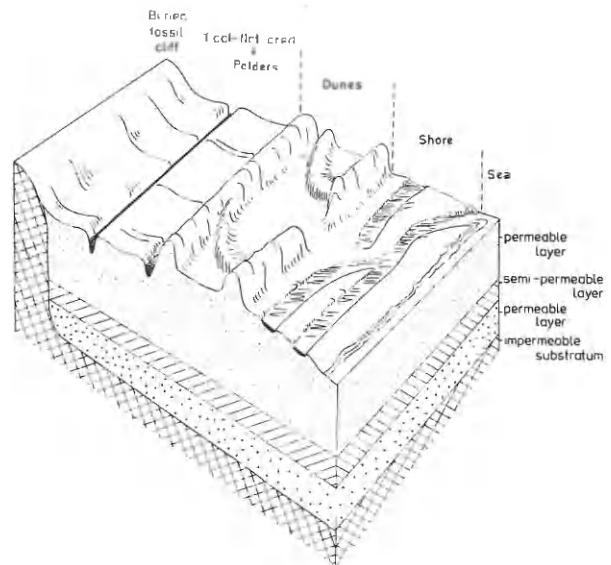


Fig. 16 – Schematische voorstelling van een kustvlakte.

Aanvankelijk was gans de kustvlakte door de zee overspoeld en waren de doorlatende en halfdoorlatende lagen volledig gevuld met zout water. We ne-

men aan dat de duingordel in een vrij korte periode ontstaan is. Achter de duingordel ligt een moerassig, vlak gebied, met getijdegeulen (krekken), afgeboord door oeverwallen. Deze getijdegeulen staan in vrije verbinding met de zee en zorgen voor de afwatering van het hogere achterland. Het gemiddelde waterpeil in deze getijdegeulen ligt slechts iets hoger dan de gemiddelde zeespiegel. Als de zee hoger staat en meer zoet water vanuit het achterland afvloeit, kan het water doorheen de oeverwallen breken en het grootste gedeelte van het vlakke gebied onder water zetten. Daar het grootste gedeelte van het overstromingswater door de aanwezigheid van drempels niet oppervlakkig kan terugvloeien naar de getijdegeulen vormen zich grote plassen van brak water in de laagste delen waarin sedimentatie van fijn materiaal plaatsvindt. Het grootste gedeelte van het brakke water vloeit slechts traag door ondiepe grondwaterstroming terug naar de getijdegeulen. Op de smalle duingordel infiltreert uitsluitend zoet water, nl. een gedeelte van de neerslag. Vóór de duingordel ligt het strand dat breed is door de zwakke helling en de grote getijdefluctuatie.

Eerst wordt de evolutie van de spreiding van de grondwaterkwaliteit berekend vanaf het ontstaan van de smalle duingordel. Vervolgens veronderstellen we dat men het moerassig gebied een bepaalde tijd na het ontstaan van de duingordel wil inpolderen. De evolutie van de spreiding van de grondwaterkwaliteit wordt berekend voor twee verschillende wijzen van inpoldering. De eerste is de traditionele methode waarbij sluizen op de monding van de getijdegeulen gebouwd worden om de instroming van zeewater te beletten. Door de aanleg van talrijke brede en rechte drainagekanalen en door de plaatsing van pompgemalen wordt het water zo vlug mogelijk uit het vlakke moerassige gebied verwijderd. Daardoor verzoet het water in de drainagekanalen sterk en daalt het waterpeil sterk in de kanalen en in het ganse ingepolderde gebied. Bij de tweede wijze van inpoldering wordt ervoor gezorgd dat de gemiddelde waterstand in de drainagekanalen (gemiddelde over een jaar genomen) minder verlaagd wordt. In het duingebied wordt de zoetgrondwatervoorraad aangepompt terwijl kunstmatige infiltratie door grintlichamen onder hogere duingebieden dicht tegen het strand gebeurt. Om opwaartse stroming van zout water onder de waterwinning en onder de polders te beletten, wordt zout water weggepompt uit de onderste grove laag.

## 6.2. Ingebrachte gegevens

Het hoger geschetste probleem wordt in een tweedimensionaal model behandeld. Het grondwaterreservoir wordt beschouwd in een vertikaal vlak loodrecht op de as van de duingordel. Het reservoir is er onderverdeeld in tien lagen van gelijke dikte (drie meter) en in achtendertig kolommen van gelijke

breedte (zestig meter). De onderste drie lagen bestaan uit grove tot middelmatige zanden. Deze worden een horizontale doorlatendheid van 30 m/d en een verticale van 0,6 m/d toegekend. De daaropvolgende twee lagen zijn de klei- en leemhoudende fijne zanden met een horizontale doorlatendheid van 1 m/d en een verticale van 0,02 m/d. De bovenste vijf lagen zijn de middelmatige tot fijne zanden met een horizontale doorlatendheid van 10 m/d en een verticale van 0,2 m/d. Zestien kolommen zijn gelegen onder het laag moerassig gebied, tien onder de smalle duingordel, negen onder het strand en drie onder de zee.

## 6.3. Evolutie van de waterkwaliteit na het ontstaan van de smalle duingordel

In het moerassig gebied veronderstellen we twee getijdegeulen ter hoogte van de zesde en van de zestienste kolom. In de bovenste laag nemen we een vaste stijghoogtegrens aan. De stijghoogte wordt er 0,3 m hoger dan de gemiddelde zeestand gehouden en het zoetwaterpercentage is gelijk aan vijfennegentig. We veronderstellen dat in de andere cellen van de bovenste laag dubbel zoveel water als in het duingebied infiltreert en dat daarvan de helft zeewater is en de helft zoet water. Het infiltrerende water heeft dus een zoetwaterpercentage gelijk aan vijftig. In het duingebied infiltreert minder water, met een snelheid van  $7 \cdot 10^{-4}$  m/d, maar met een zoetwaterpercentage gelijk aan honderd. Op het strand en onder de zee wordt een vaste stijghoogtegrens aangenomen. De waarden van deze vaste stijghoogtegrens worden afgeleid uit de continue stijghoogte waarnemingen op het strand ter hoogte van de Frans-Belgische grens (fig. 3). Indien water infiltreert op het strand dan is het zoetwaterpercentage gelijk aan nul. De verticale grens onder de zee is een vaste stijghoogtegrens. Het reservoir is onderaan begrensd door een ondoorlatende laag terwijl op de grens van de polders en het achterliggende hogere gebied een verticale ondoorlatende wand verondersteld wordt.

Bij de toepassing van de methode van de karakteristieken worden negen te volgen deeltjes per cel genomen. De maximale celafstand per beweging wordt gekozen op 0,95. De longitudinale dispersiviteit van het poreuze midden  $\alpha_L$  is 0,15m. De verhouding transversale tot longitudinale dispersiviteit evenals de waterdoorlatende porositeit bedragen 0,3.

Juist voor de vorming van de smalle duingordel waren de doorlatende en de halfdoorlatende lagen volledig gevuld met zout water. Het initiële zoetwaterpercentage van alle deeltjes was dus nul. Na iedere tijdsperiode van vijf jaar wordt tussen iedere cel de drijfvermogenfaktor herafgeleid uit het berekende zoetwaterpercentage. Op deze wijze wordt de evolutie van de waterkwaliteit over een periode van tachtig jaar berekend.

In fig. 17 worden de resultaten van deze berekeningen voorgesteld. We zien opnieuw het ontstaan van de zoetwaterlens onder het smalle duingebied en van een tong met een geringer zoutgehalte onder het strand. In het moerassige vlakke gebied gebeurt de grondwaterstroming hoofdzakelijk in het bovenste

gedeelte van de watervoerende laag. Het grootste gedeelte van het oorspronkelijke zout water vertoont er een daling van het zoutgehalte. Enkel in het onderste gedeelte van de watervoerende laag komen onder de getijdegeulen nog zoutwaterlensen voor waarvan het zoutgehalte weinig afwijkt van het oorspronkelijke.

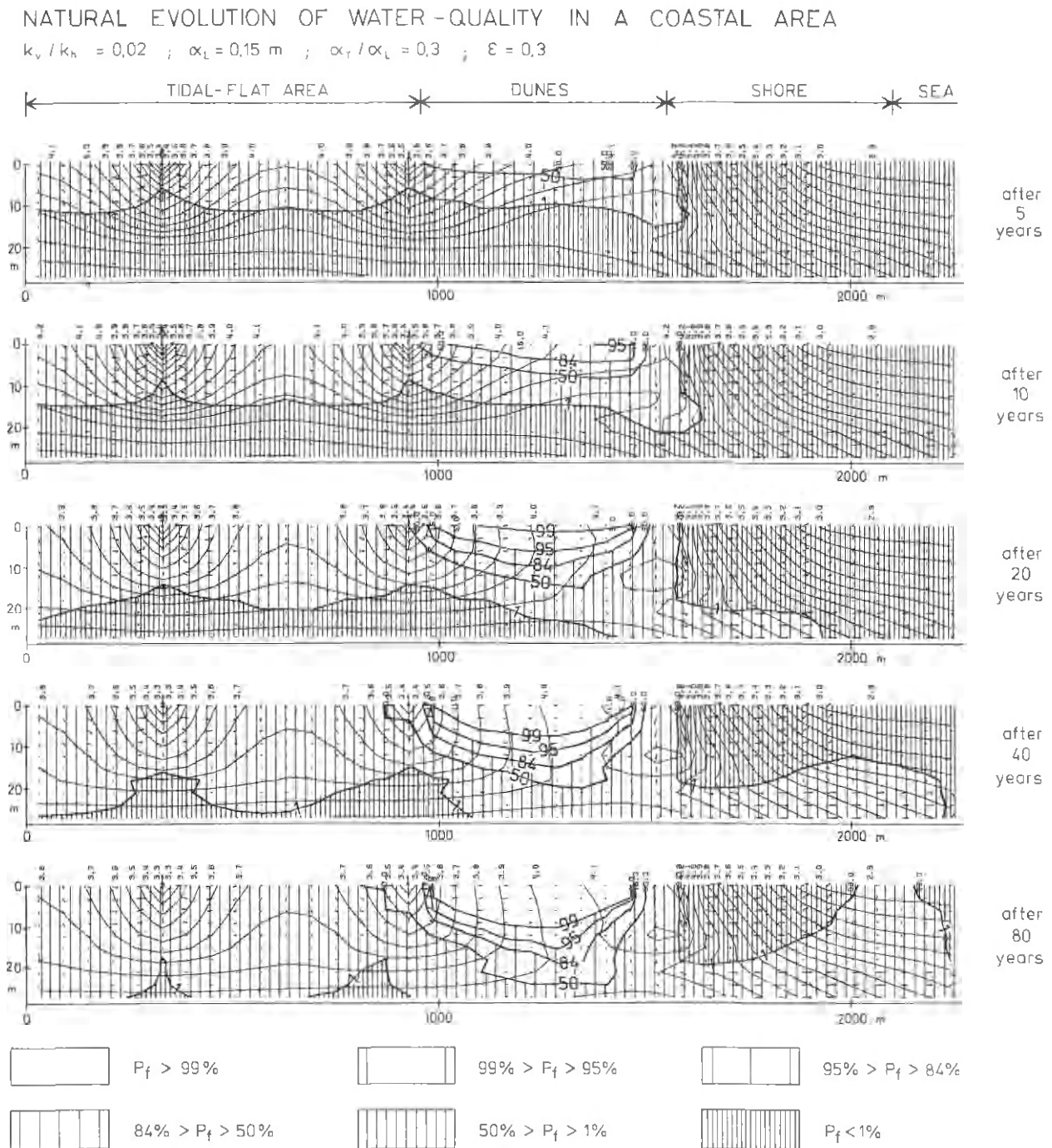


Fig. 17 – Natuurlijke evolutie van de grondwaterstroming, de zoetwaterstijghoogteconfiguratie en de kwaliteitsverspreiding onder de kustvlakte na het ontstaan van de smalle duingordel. Berekend met de numerische methode (tweedimensionaal, in vertikaal vlak).

#### 6.4. Evolutie van de waterkwaliteit na de inpoldering op traditionele wijze

Bij deze wijze van inpoldering worden sluizen gebouwd op de uitmonding van de getijdegeulen om de instroming van zout water tijdens hoge zeespiegelstand te verhinderen. De getijdegeulen worden omgevormd tot drainagekanalen. Door de rechttrekking en de aanleg van pompgemalen wordt het zoet water zo vlug mogelijk uit het poldergebied naar de zee gevoerd. De overstromingen in het poldergebied nemen sterk af en als ze nog voorkomen, is het overstromend water zoet. Men kan dus besluiten dat de gemiddelde waterstand in de drainagekanalen verlaagd wordt en dat minder water infiltreert in het poldergebied. Het infiltrerend water is nu echter zoet.

Deze veronderstellingen worden in het model in rekening gebracht door de verandering van de vaste stijghoogtegrens in de zesde en in de zestiende kolom. De stijghoogte wordt er 1,2 m verlaagd zodat deze nu 0,9 m onder het gemiddeld zeepeil komt te liggen. In de andere cellen van de bovenste laag in het moerassig gebied veronderstellen we nu dat evenveel water als in het duingebied infiltreert en dat het zoetwaterpercentage van het infiltrerend water gelijk is aan honderd. De andere randvoorwaarden evenals de doorlatendheden van het grondwaterreservoir zijn dezelfde als in deel 6.3.

Het aantal te volgen deeltjes per cel, de maximale celafstand, de longitudinale en de transversale dispersiviteit en de waterdoorlatende porositeit worden ongewijzigd gelaten. De initiële zoetwaterpercentages van de deeltjes zijn gelijk aan deze berekend voor een periode van tachtig jaar na het ontstaan van de smalle duingordel zoals behandeld in deel 6.3. De evolutie van de waterkwaliteit wordt nu berekend voor een periode van twintig jaar na de inpoldering. Hierbij wordt na iedere tijdsspanne van 1,25 jaar het drijfvermogen herafgeleid uit de berekende zoetwaterpercentages waarna een nieuwe stijghoogte- en stroomsnelheidsconfiguratie berekend wordt.

In fig. 18 worden de resultaten van deze berekeningen op dezelfde wijze voorgesteld als in deel 6.3. Hieruit leiden we af dat de zoetwaterzak onder de smalle duingordel na een vrij korte periode verdwijnt. Onder het ingepolderde gebied vermindert het zoutgehalte zeer traag in een dunne, ondiepe band. Onder de drainagekanalen ontstaat een opwaartse stroming van zout water.

#### 6.5. Evolutie van de waterkwaliteit na de inpoldering op alternatieve wijze

Bij deze inpoldering worden eveneens sluizen gebouwd die verhinderen dat zout water nog verder het

land indringt. Het zoete neerslagwater dat binnen het gebied valt en datgene dat vanuit het hogerliggende achterland afstroomt, wordt zoveel mogelijk in het gebied gehouden. Dit gebeurt door alleen de overtollige hoeveelheden uit de drainagekanalen te verwijderen. Een gedeelte van dit water wordt kunstmatig in het reservoir onder het duingebied gebracht. Dit gebeurt het best in het bovenste gedeelte van het reservoir zo dicht mogelijk tegen de zee, om het verziltingsgevaar, tengevolge van de hoge waterstanden op het strand, te keren. Een gedeelte van het zoet water wordt in het duingebied opgepompt en komt vrij voor gebruik. Om te verhinderen dat opwaartse stromingen van zout water ontstaan onder de waterwinning in het duingebied en onder de drainagekanalen in de polders, wordt in het onderste gedeelte van het reservoir zout water verwijderd door bemaling met een aantal pompputten. Het opgepompte zoute water dient in de zee geloosd te worden.

Al deze veronderstellingen worden op de volgende wijze in het model in rekening gebracht. De stijghoogte in de zesde en de zestiende kolom wordt slechts 0,75 m verlaagd zodat ze slechts 0,45 m onder het gemiddelde zeepeil komt te liggen. In de andere cellen van de bovenste laag in het moerassig gebied veronderstellen we dat infiltratie van zoet water plaatsvindt met dezelfde snelheid als in het duingebied. Ter hoogte van de vierentwintigste en de zeventwintigste kolom wordt kunstmatig zoet water in het reservoir gebracht. Dit gebeurt door een vaste stijghoogte in de bovenste cellen aan te nemen. De stijghoogte is er respectievelijk 0,09 en 0,15 m hoger dan de stijghoogte in de achtentwintigste kolom, dit is de vaste stijghoogte onder het hoogste gedeelte van het strand. In de tweeëntwintigste kolom wordt zoet water onttrokken aan het bovenste, fijnere gedeelte van het grondwaterreservoir (totaal debiet 31 m<sup>3</sup>/d per meter watervoerende laag). In het onderste, grovere gedeelte van het reservoir wordt in dezelfde kolom zout water onttrokken (totaal debiet 47 m<sup>3</sup>/d per meter watervoerende laag). Onder het poldergebied wordt in de vierde, de negende en de zeventiende kolom zout water onttrokken aan het onderste gedeelte van het grondwaterreservoir (totaal debiet per kolom 16 m<sup>3</sup>/d per meter watervoerende laag). Alle parameters worden gelijk gehouden zoals in deel 6.3, namelijk de vaste stijghoogtegrenzen onder strand en zee, de ondoorlatende grenzen, de verticale en de horizontale doorlatendheden, het aantal te volgen deeltjes per cel, de maximale celafstand per beweging, de longitudinale en de transversale dispersiviteit en de waterdoorlatende porositeit. De initiële zoetwaterpercentages van de deeltjes zijn dezelfde als in deel 6.4. De evolutie van de waterkwaliteit wordt weer berekend voor een periode van twintig jaar. Hierbij wordt na iedere tijdsspanne van 1,25 jaar het drijfvermogen herafgeleid uit de berekende zoetwaterpercentages waarna een nieuwe stijghoogte- en stroomsnelheidsconfiguratie herrekend wordt.



In fig. 19 worden de resultaten van de berekening op dezelfde wijze als in deel 6.3. voorgesteld. Daaruit leiden we af dat de zoetwaterlens onder de duingordel bewaard blijft niettegenstaande een gedeelte ervan opgepompt wordt voor gebruik. Onder het poldergebied ontstaat een zoetwaterreservoir. Na een bepaalde tijd, bijvoorbeeld twintig jaar, kan het pompen in het onderste gedeelte van het reservoir stopgezet worden en vervangen worden door een pomp van

zoet water in het bovenste gedeelte. Onder de waterwinning van de duinen moet men blijven pompen om een nieuwe zoutwaterindringing in het poldergebied te voorkomen.

### 6.6. Besluit

Uit het hoger geschetste probleem blijkt duidelijk dat men bij de traditionele wijze van inpoldering enkel

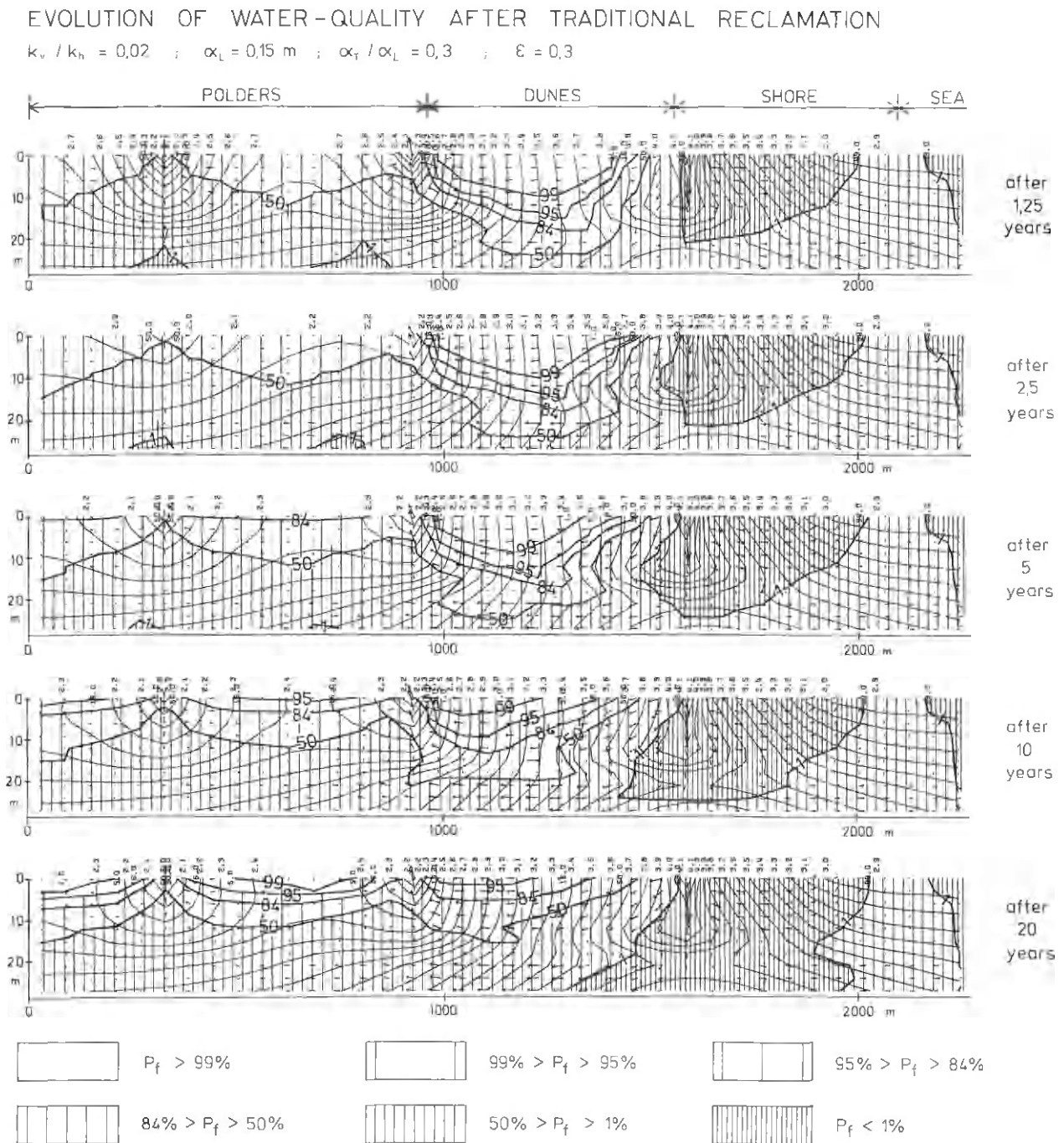


Fig. 18 – Evolutie van de grondwaterstroming, de zoetwaterstijghoogteconfiguratie en de kwaliteitsverspreiding onder de kustvlakte na inpoldering op traditionele wijze. Berekend met de numerische methode (twee-dimensionaal, in verticaal vlak).

streeft naar een verlaging van de watertafel. Daarbij wordt het infiltrerende zoet water onmiddellijk weggedraineerd. Het stroomt enkel in het bovenste gedeelte van het freatisch reservoir waardoor een ondiepe lens met een geringer zoutgehalte ontstaat. In de omgeving van de drainagesloten is er een opwaartse stroming waardoor er zout water juist onder de wa-

tertafel voorkomt. Het zoute water kan tijdens droge perioden opstijgen en zoutshade aan de landbouwgewassen veroorzaken. Momenteel bestaan er plannen om de afwatering van de polders verder te zetten op traditionele wijze maar met moderne, krachtiger middelen (M. VOET, 1983). Dit zou gebeuren door de rechttekening en de verbreding van de hoofdkana-

EVOLUTION OF WATER - QUALITY AFTER ALTERNATIVE RECLAMATION

$k_v / k_h = 0,02$  ;  $\alpha_L = 15 \text{ m}$  ;  $\alpha_T / \alpha_L = 0,3$  ;  $\epsilon = 0,3$

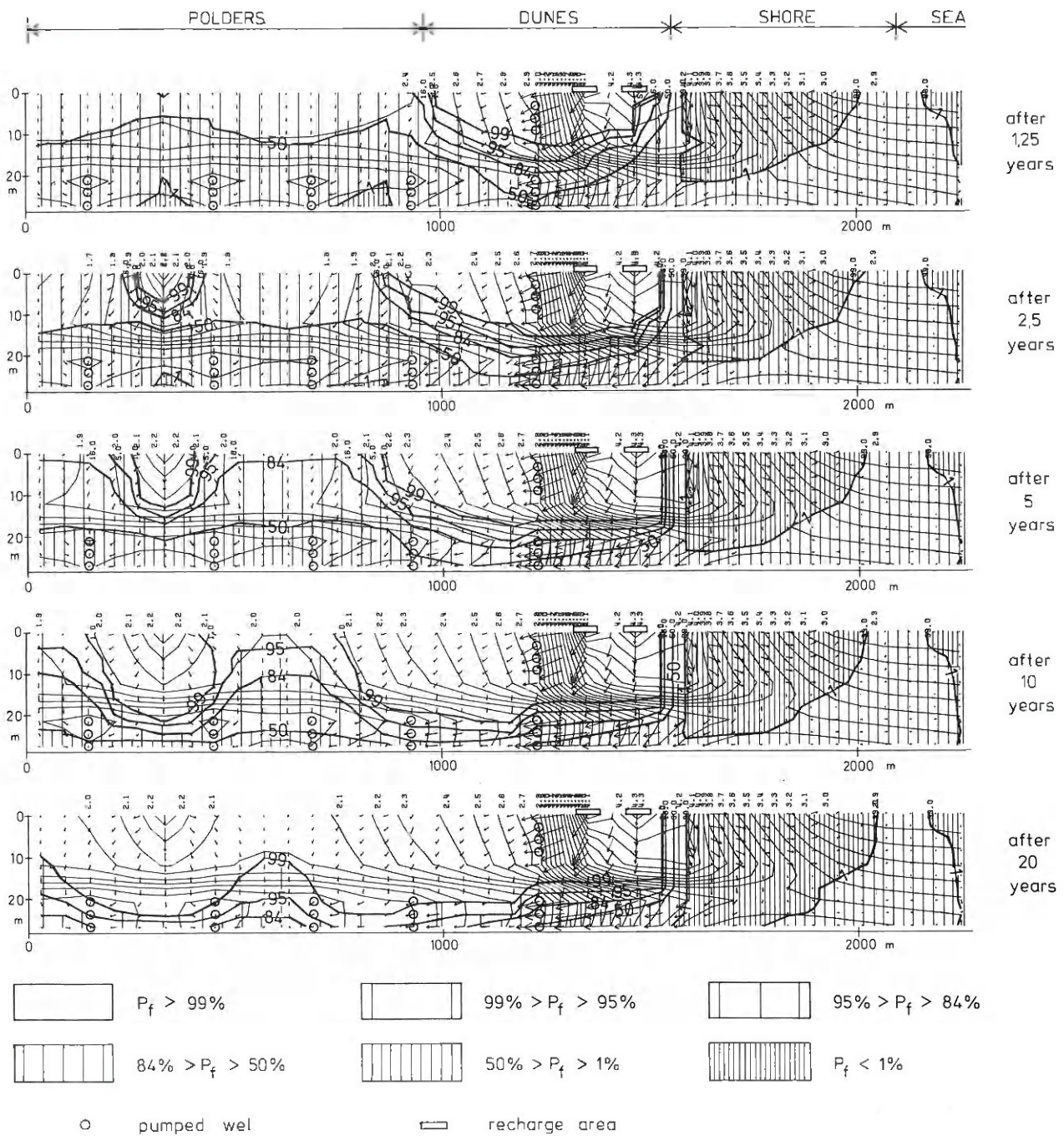


Fig. 19 – Evolutie van de grondwaterstroming, de zoetwaterstijghoogteconfiguratie en de kwaliteitsverspreiding onder de kustvlakte na inpoldering op alternatieve wijze. Berekend met de numerische methode (twee-dimensionaal, in vertikaal vlak).

len en door installatie van pompgemalen voor een verdere daling van de waterstand in de drainagekanalen. Dit laatste zal de opwaartse beweging van het zoute grondwater over grotere oppervlakten teweegbrengen. Deze oppervlakten worden dan ook bedreigd door zoutschade.

In tegenstelling met deze gemoderniseerde traditionele wijze van inpoldering moet men er naar streven om de waterstand in de drainagekanalen zo hoog mogelijk te houden. Dit kan door in de winter de waterstand minder drastisch te verlagen en door in de zomer deze kanalen te vullen met water dat afvloeit uit het hogerliggende gebied. Het overtollige water moet zo veel mogelijk uit het poldergebied verwijderd worden door bemaling in het onderste deel van het grondwaterreservoir. Door de infiltratie van het regenwater en de irrigerende werking van de kanalen zal een zoete grondwatervoorraad onder het poldergebied gecreëerd worden. Na verloop van tijd kan deze zelfs aangewend worden als bron van zoet water. Om het instromen van zout water vanuit het hoog strand te verhinderen, kan kunstmatig zoet water ingebracht worden in het bovenste gedeelte van de watervoerende laag onder de duinen tegen het strand aan.

## 7. ALGEMEEN BESLUIT

Het numerische model van L.F. KONIKOW & J.D. BREDEHOEFT (1978) werd aangepast zodat dichtheidsverschillen in rekening kunnen gebracht worden. Het werd getoetst op enkele zoet-zoutwaterproblemen die eveneens door de methode van de vortexbeleggingen opgelost werden (J. PETERS, 1983a, 1983b). Er wordt een relatief goede overeenkomst tussen de verschillende resultaten gevonden. Enkele afwijkingen zijn inherent aan de bepaald-verschilbenadering. De grondwatersnelheden in de omgeving van een cel met onttrekking vormen bij het numerisch model een probleem voor zeer goede benadering. Er treden dan ook afwijkingen op ten opzichte van de analytisch berekende resultaten. Bij het numerische model zal de supplementaire stroming die een grensvlak naar de horizontale terugdraait, het resultaat zijn van de verschillen in de gemiddelde drijfvermogens tussen een groep van cellen. Het numerische model is dus eerder geschikt voor de simulatie van een probleem waarbij geleidelijk overgangen in dichtheden optreden dan voor de simulatie van een scherp grensvlak tussen twee vloeistoffen met verschillende dichtheid.

Het aangepaste model werd aangewend voor de simulatie van de natuurlijke evolutie van de zoetwaterlens onder de duinen, het strand en de zee gedurende een periode van vijfhonderd jaar na de vorming van de duinen. De zoetwaterstijghoogte en de waterkwaliteitsverspreiding die bekomen werden na simulatie

van vijfhonderd jaar, werden aangewend als initiële waarden bij de simulatie van de evolutie van een zoetwaterlens gedurende een overbemaling in het duingebied. Hieruit blijkt dat er ter hoogte van de Franse grens en het natuurreservaat nog een zeewaartse stroming van zoet water bestaat. De brakwaterlens onder de laagwaterlijn vóór de behouwe kom van De Panne kan verklaard worden als een overgangsvorm die optreedt bij sterke pumping in het duingebied, waardoor de zeewaartse stroming van zoet water wegvalt.

De toepassing van modellen in de beginfase van het onderzoek is aan te bevelen, daar het ons toelaat het relatieve belang van de verschillende te bepalen parameters te schatten. Zo is de nauwkeurige kennis van de verticale doorlatendheid van zowel de halfdoorlatende als de doorlatende lagen vereist als we de grondwaterstromingen, waarbij de verschillende grondwaterkwaliteiten een voldoende groot dichtheidsverschil vertonen, willen bestuderen. Alleen door de verzameling van nauwkeurige veldgegevens kunnen we een model voldoende kalibreren. Door de voortdurende wisselwerking tussen de modellering en de verzameling van veldgegevens kunnen we komen tot een zinvolle omschrijving van het probleem. Het uiteindelijke resultaat kan men beschouwen als een syntese van het onderzoek. Het laat ons toe een evaluatie te maken van de stand van kennis in het te onderzoeken probleem.

Tenslotte werd het model aangewend om een optimaal beheer van de grondwatervoorraden in een kustgebied te illustreren. Hieruit bleek dat door verdere verlaging van het polderpeil de oppervlakte waar het zout water direkt onder de watertafel aanwezig is, zal toenemen. De oppervlakte met een potentieel gevaar voor zoutschade zal sterk toenemen als men door het rechtekken van drainagekanalen en door het plaatsen van pompstations het zoet water zo vlug mogelijk uit het poldergebied verwijderd. Door de drainage van de polders op een alternatieve wijze, namelijk door bemaling van het onderste gedeelte van het freatische reservoir, kan men de overgangszone van zoet en zout water verlagen. De zoutschade kan dan volledig verdrongen worden. Op de lange duur kan zelfs het freatische reservoir onder de polders aangewend worden als een zoetwaterreservoir.

## REFERENTIES

- BUI, GARELLI, U., CASULLI, V. & GREENSPAN, D. (1983). A finite difference model for the computer simulation of salt water intrusion in coastal aquifers. *Proc. 8th Salt Wat. Intrusion Meet., Bari*. Spec. issue *Geol. Appl. Idrogeol.* (in print).
- COOPER, H.H., KOHOUT, F.A., HENRY, H.R. & GLOVER, R.E. (1964). Seawater in coastal aquifers. *U.S. Geol. Surv. Wat. Sup. Pap.* 1613-C, 1-84.
- d'ANDRIMONT, R. (1902). Notes sur l'hydrologie du littoral belge. *Ann. Soc. Géol. Belg.* 29, M129-M144.

- DE BEUCK, W., DE MOOR, G., MARÉCHAT, R. & TAVERNIER, R. (1974). Diepte van het grensvlak tussen zoet en zout water in de freatische laag van het Belgische kustgebied (1963-1973). *Proc. 4th Salt Wat. Intrusion Meet.*, in bijlage, schaal 1/100.000.
- DEVOS, J. (1984). *Hydrogeologie van het duingebied ten oosten van De Haan*, 207 p. Gent: Geologisch Instituut R.U.G. (Doctoraatsverhandeling).
- HERZBERG, B. (1901). Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *Journ. Gasbeleuchtung u. verwandte Beleuchtungsarten sowie für Wasserversorgung* **44**, 815-819, 842-844.
- KONIKOW, L.F. & BREDEHOËFT, J.D. (1978). Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in groundwater. *U.S. Geol. Surv. Techn. Wat.-Resources Inv. Book 7*, Chap. C2, 90 p.
- LEBBE, L. (1978). *Hydrogeologie van het duingebied ten westen van De Panne*, 164 p. Gent: Geologisch Instituut R.U.G. (Doctoraatsverhandeling).
- LEBBE, L. (1981). The subterranean flow of fresh and salt water underneath the western Belgian beach. *7th Salt Wat. Intrusion Meet., Uppsala. Sver. Geol. Unders. Rap. Meddel* **27**, 193-219.
- LEBBE, L. (1983a). Een matematisch model van de niet-permanente grondwaterstroming naar een pompput in een veellagig grondwaterreservoir en enkele beschouwingen over de stroomtijd. *Tijdschr. Becewa* **70**, 33-48.
- LEBBE, L. (1983b). Mathematical model of the evolution of the fresh water lens under the dunes and beach with semi-diurnal tides. *Proc. 8th Salt Wat. Intrusion Meet., Bari. Spec. issue Geol. Appl. Idrogeol.* (in print).
- NEUMAN, S.P. & WITHERSPOON, P.A. (1972). Field Determination of the hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. *Wat. Resources Res.* **8**, 1284-1298.
- PETERS, J.H. (1983a). The movement of fresh water injected in salaquifers. *Proc. 8th Salt Wat. Intrusion Meet., Bari. Spec. issue Geol. Appl. Idrogeol.* (in print).
- PETERS, J.H. (1983b). De stroming van zoet en zout grondwater in een „confined aquifer” berekend met vortexbeleggingen. *Keuringsinst. Waterleidingsartikelen KIWA N.V.*, **SWE-83.002**, 1-42.
- SCHITTEKAT, J. (1972). *Etude sédimentaire et hydrogéologique à Oostduinkerke*. Liège: Université de l'Etat (Travail de Fin d'Etudes).
- SCHWARTZ, F.W. (1977). Macroscopic dispersion in porous media: the controlling factors. *Wat. Resources Res.* **13**, 743-750.
- SMITH, L. & SCHWARTZ, F.W. (1980). Mass transport. 1. A stochastic analysis of macroscopic dispersion. *Wat. Resources Res.* **16**, 303-313.
- SMITH, L. & SCHWARTZ, F.W. (1981a). Mass transport. 2. Analysis of uncertainty in prediction. *Wat. Resources Res.* **17**, 351-369.
- SMITH, L. & SCHWARTZ, F.W. (1981b). Mass transport. 3. Role of hydraulic conductivity data in prediction. *Wat. Resources Res.* **17**, 1463-1479.
- THIELE, H. (1943). *Tiefenkarte der Grenze Süßwasser/Salzwasser bezogen auf Normal Null* (französisch und belgisch Flandern) 1/25.000, 8 Blätter, Deutsche Heereskarten.
- van ERTBORN, O. (1903). La question des eaux alimentaires dans des régions dunales et poldériennes du littoral belge. *Bull. Soc. belge Géol. Paléont. Hydrol.* **18**, M297.
- VOET, M. (1983). Afwatering in de Grote Veurne-Ambacht Polder. *Water* **13**, 219-224.
- WEEKS, E.P. (1969). Determining the ratio of horizontal to vertical permeability by aquifer-test analysis. *Wat. Resources Res.* **5**, 196-214.





