



LABORATORIUM VOOR TOEGEPASTE GEOLOGIE EN HYDROGEOLOGIE

IWVA

VOORLOPIGE TEKST

TGO

91/07



RIKSUNIVERSITEIT
GENT

GEOLOGIE

1. Inleiding

Voor de bespreking van de geologische bouw van het studiegebied beperken we ons tot die perioden die belangrijk zijn voor de studie. Algemeen kunnen we stellen dat de primaire, sekundaire en de tertiaire afzettingen homogeen zijn samengesteld, terwijl de kwartaire afzettingen erg heterogeen zijn.

2. Primair

De Paleozoïsche sokkel wordt gevormd door het Massief van Brabant. De helling van de lagen is WNW gericht en men treft de top aan van -225 mTAW onder Diksmuide tot -290 mTAW in het uiterste noordwesten van de Westhoek. In het zuidwestelijk deel van de Westhoek bestaat de top van de sokkel uit gesteenten van Siluurouderdom; in het noordoostelijk deel uit gesteenten van Cambriouderdom. Het betreft zandstenen, schiefers en kwartsieten die sterk vervormd werden tijdens de Caledonische en Hercynische orogenese. In het bovenste deel van die afzettingen kunnen die gesteenten verweerd of gespleten zijn.

3. Sekundair

Op de Paleozoïsche sokkel rusten diskordant afzettingen uit het Krijt. De algemene helling van deze lagen is NE. We treffen de top van het Krijt aan van -160 mTAW in het zuiden van het studiegebied tot ongeveer -185 mTAW in de omgeving van Nieuwpoort. De dikte neemt toe in westelijke richting en bedraagt 50 m onder Diksmuide en loopt op tot 100 m onder de Frans-Belgische grens. De afzetting bestaat uit mergels en krijt van Senoonouderdom.

4. Tertiair

De eocene afzettingen bestaan voornamelijk uit mariene sedimenten. De algemene helling is NNE.

De oudste tertiaire afzettingen bestaan uit Landeniaanafzettingen. De top varieert van -110 mTAW in de buurt van Roesbrugge tot -135 mTAW in de buurt van Nieuwpoort. De dikte schommelt tussen 30 en 60 meter, met een maximum onder het Plateau van Izenberge. De Landeniaanafzettingen bestaan uit een marien facies (L1) dat bestaat uit fijne glauconiethoudende zanden (L1d) en glauconiethoudende zandige klei met zandsteen-niveaus. Aan de basis bevindt zich een grindniveau. Het marien facies gaat geleidelijk over in een kontinentaal facies bestaan de uit zanden met kleilenzen (L2).

De top van de eocene afzettingen bestaat uit grijsblauwe klei (Yc) van Ieperiaanouderdom. De Ieperiaanklei dagzoomt op het Plateau van Izenberge, en vormt elders het substraat van kwartaire afzettingen. De dikte van de Ieperiaanklei neemt toe in noordelijke richting, maar varieert sterk tengevolge van de wisselende insnijding gedurende het Kwartair.

Op deze Ieperiaanklei komt op enkele plaatsen van het Plateau van Izenberge een groen glauconiethoudend fijn zand tot kleihoudend zand voor, namelijk het Ieperiaanzand (Yd).

5. Kwartair

De afzettingen van het Kwartair zijn bepalend voor de bouw van de huidige bodem en het huidige relief. Het Kwartair wordt gekenmerkt door belangrijke klimaatsveranderingen.

Het Pleistoceen was een koude periode waarin vier belangrijke ijstijden voorkwamen, ieder gescheiden door warmere interglaciale fasen. Vanaf het einde van de Saale-ijstijd vormde zich een erosie-oppervlak en werden diepe en brede dalen, o.a. door de IJzer en enkele zijbeken, uitgeschuurd in het tertiair substraat dat hier bestaat uit de Ieperiaanklei. Tijdens de daaropvolgende Eemiaantransgressie werden de diepste delen van het erosielandschap opgevuld met grove mariene sedimenten. Deze afzettingen vormen de Assise van Oostende. Tijdens het eropvolgende Weichseliaan-glaciaal werd zand en leem afgezet van niveo-eolische en niveo-fluviatiele oorsprong. Ze vormen een dek van gemiddeld 5 meter dikte op de Eemiaanafzettingen of op de Ieperiaanklei. Deze afzettingen sluiten lateraal aan bij de Weichseliaanafzettingen van Binnen Vlaanderen.

Het Holoceen vangt aan met een postglaciaal (Preboreaal en Boreaal) gekenmerkt door een lage zeespiegelstand, een algemene verwarming, en tijdens dewelke vooral erosie plaatsgrijpt. De waterlopen (ontstaan door ontdooiing van de ondergrond) schuurde zich opnieuw een bedding uit in het niveo-eolisch dek, en vaak er doorheen tot in de Ieperiaanklei.

Tijdens het Atlanticum rees de zeespiegel aanzienlijk tengevolge van de verdere afsmelting van de ijskappen. Tijdens de overstroming van het gebied (Flandriaanse transgressie) werd de Assise van Kales afgezet. In deze assise worden twee facies onderscheiden : een marien facies dat onderaan zandig en bovenaan kleiig is en een fluviatiel facies (veel terrigeen en venig materiaal) dat beperkt blijft tot de boreale valleien. Op het einde van het Atlanticum heeft zich een duinengordel gevormd, waarvan de duinengordel Adinkerke-Ghyvelde een overblijfsel is. Deze duinengordel sloot het achterliggende waddenlandschap af van de zee.

Door de opbouw van de duinengordel nam de invloed van de zee op het achterliggende gebied af. Tijdens het Subboreaal ontwikkelde zich een veenlandschap in de afgesloten lagunes. Dit veen bedekt de gehele Assise van Kales en varieert in dikte van enkele decimeter tot enkele meter. In deze veenafzetting onderscheidt men drie soorten veen : onderaan treft men rietveen aan (ontstaan in brakwatermilieu), daarop kwam bosveen tot ontwikkeling en op sommige plaatsen daarboven nog mosveen. De ontwikkeling van het veen bereikte op sommige plaatsen zulkdanige hoogten dat het door de latere Duinkerken-transgressies niet meer werd overstroomd, zoals in het gebied van "De Moeren".

Het Subatlanticum wordt gekenmerkt door de verschillende fasen van de Duinkerken-transgressie.

Tijdens de Duikerken-I-transgressie werd de oude duinengordel doorbroken ten westen van Wulpen. De sedimenten van deze transgressie zijn gekenmerkt door typische microgelaagdheid veroorzaakt door een afwisseling van zandige en kleiige laagjes

van één tot enkele millimeter dikte. Plaatselijk komt aan de top een vegetatieniveua voor. De sedimenten komen nergens aan het oppervlak voor want ze worden steeds bedekt door Duinkerken-II-sedimenten.

De Duinkerken-II-transgressie werd gekenmerkt door twee subfasen. Tijdens de eerste subfase greep hoofdzakelijk erosie plaats. De oude duinengordel werd op talrijke plaatsen doorbroken en verbrokkeld, en diepe geulen werden uitgeschuurd. In deze doorbraakgebieden werd het veen nagenoeg volledig weggeslagen. Het vroegere veenlandschap werd tweemaal per dag overstroomd, behalve enkele eilanden gevormd door de Oude duinen van Adinkerke-Ghyvelde, een aantal pleistocene hoogten of "donken" en het gebied van "De Moeren" waar het veen hoog was opgegroeid.

Tijdens de tweede subfase greep vooral sedimentatie plaats. In de kreken werd wegens de grote snelheid van het water hoofdzakelijk zand afgezet. Op het hoger gelegen veenoppervlak sedimenteerde vooral klei. Op het einde van de sedimentatiefase werd bij de verlanding van de kreken ook klei afgezet op de zandige sedimenten. Door latere ontwatering klonken de klei-opveengronden in terwijl de zandige sedimenten weinig of niet van hoogte veranderden. Tengevolge van deze reliefsinversie ontstonden aldus hoge zandige kreekruggen en laaggelegen poelgronden. Op het einde van de Duinkerken-II-transgressie (8ste eeuw) bleven er nog enkele kreken in werking in het inbraakgebied tussen Oostduinkerke en Koksijde. Daar werden vooral zandige sedimenten afgezet.

Langzamerhand vormde zich naar het einde van de Duinkerken-II-transgressie een strandvlakte aan de zeezijde. Daarop vormde zich tijdens de Karolingische regressie een nieuwe duinengordel (Jonge Duinen) die de strandvlakte bijna volledig afgesloten en die nu nog steeds bestaat.

Het materiaal van het jonge duinlandschap bestaat hoofdzakelijk uit zand van nogal wisselende samenstelling. De korrelgrootte ervan kan variëren door de selecterende windwerking tijdens en na de afzetting. Bij sterke wind wordt er nl grover materiaal afgezet dan bij kalme wind. Bovendien kunnen op plaatsen die aan de wind zijn blootgesteld, de fijne delen uitwaaien zodat grover zand achterblijft. Zodoende is het zand aan de lijzijde van de duinen iets groter dan dat aan de luwzijde. Hierdoor is ook onregelmatig gelaagde opbouw (kriskrasgelaagdheid) van sommige duinen te verklaren. Het kalkgehalte van duinzand varieert doch is meestal hoog.

Tijdens de Duinkerken-III-transgressie (11de eeuw) werden opnieuw bressen geslagen in de jonge duinen, namelijk het IJzerestuarium ter hoogte van Nieuwpoort. Er werd hier opnieuw een diep krekensysteem ontwikkeld. De kreken werden diep ingesneden. De afzettingen in dit gebied bestaan vooral uit klei, soms uit lichte klei, slechts in de kreken kwam zandig materiaal tot bezinking.

Door menselijk ingrijpen ontstonden na de 11de eeuw nog enkele overstromingen, doch deze hadden geen belangrijk aandeel in de landschapsvorming. Ook werden sommige delen van de polders ontveend (brandstof en zoutwinning). Deze uitgeveende gebieden kwamen zo nog eens lager te liggen.

2. Geomorfologie

In de Westhoek kunnen we drie grote eenheden onderscheiden, namelijk de Duinen, de Polders en de Zandleemstreek.

2.1. De Duinen

In de Duinen kunnen we onderscheid maken tussen de Jonge Duinen en de Oude Duinen van Adinkerke-Ghyvelde (Binnenduinen).

2.1.1. De Jonge Duinen

Deze duinengordel strekt zich hier uit van de Frans-Belgische grens tot aan het IJzerestuarium. Het is een relatief brede zone die is ontstaan door opwaaiing en fixatie van zeezand op de strandvlakte. Doordat de kustlijn heeft gestreefd naar een rechte lijn hebben de duinen zich langzaam landinwaarts verplaatst. Zo komt het dat aan de zeezijde de duinen die bestaan uit grofkorrelig, kalkrijk zand rusten op oude duinafzettingen en naar de polders toe de duinen rusten op oude polderafzettingen. De duinstreek bezit een sterk golvend (tussen Frans-Belgische grens en Oostduinkerke) tot licht golvend (Oostduinkerke tot IJzermonding) relief. Het peil van de duinen varieert van +5 m TAW in de duinpannen tot +29 m TAW.

Volgens de biologische waarderingskaart van België (kaartblad 12, 1988) betreft het hier een biologisch zeer waardevol gebied, gekenmerkt door een grote variatie aan milieutypes tengevolge van de verschillende geomorfologische types.

2.1.2. De Binnenduinen van Adinkerke-Ghyvelde

Deze strook duinen (8 km lang en 750 m breed) ligt parallel aan de huidige kustlijn en vormt een restant van een oude duinengordel. De maximale hoogte bedraagt + 7 m TAW.

Deze duinen bestaan tot op grote diepte uit volledig ontkalkte zanden met een iets fijnere textuur van de zanden van de Jonge Duinen.

2.2. De Polders

Algemeen onderscheiden de kustpolders zich van het omgevende landschap door hun vlak en laag relief (+3 tot +5 m TAW), vaak met een typisch mikrorelief, door het open karakter van het landschap en de aanwezigheid van dijken, door de aanwezigheid van poldersedimenten zoals klei en de kunstmatig beheerste grondwaterstand.

In de Polders kunnen we ook verscheidene landschapstypes onderscheiden : het Oudland van Veurne Ambacht, het gebied van De Moeren, het Middelland en het Nieuwland met het IJzerestuarium.

2.2.1. Het Oudland van Veurne Ambacht

Dit zijn de gebieden die na de Duinkerken-II-transgressie niet meer werden overstroomd en waar deze Duinkerken-II-sedimenten nu dagzomen. Het wordt verder opgedeeld in drie landschapstypes op basis van geomorfologische kenmerken (MOORMANN, F., 1951) : het

Inversielandschap, het Overdekte Waddenlandschap en het Overdekt Pleistoceen landschap.

2.2.1.1. Het Inversielandschap

Dit is het belangrijkste landschapstype van het Oudland. Het wordt gekenmerkt door kreekruigen en depressies. Het wordt verder ingedeeld in het inbraakgebied, het versneden gebied en de boreale valleien.

Het inbraakgebied is één grote kreekrug (peil +4 tot +4,5 mTAW) bestaande uit jong zeezand en bedekt met klei. Het centraal gedeelte van het Inversielandschap vormt het versneden gebied. Nabij het inbraakgebied zijn de kreekruigen zeer groot en de depressies klein. Naar het zuiden toe verkleinen de kreekruigen en vergroten de depressies, zodat daar een vertakt stelsel voorkomt van kleine kreekruigen (+5 mTAW) en grote depressies (+3 mTAW). De ondergrond bestaat grotendeels uit veen, dat in grote kreekruigen geheel of gedeeltelijk is weggeslagen. De bodem bestaat voornamelijk uit klei, enkel de bovenloop van de grote kreekruigen heeft een zandige bodem.

De boreale valleien in het zuiden vormen de uitlopers van het Inversielandschap. Ze komen voor als smalle stroken in het Overdekt Pleistoceen landschap tot zelfs in de niet bedekte Pleistocene gebieden.

2.2.1.2. Het Overdekt Waddenlandschap

Dit landschapstype bestaat uit Atlantische wadsedimenten die bedekt zijn door een dunne laag Duinkerken-II-sedimenten en komt voor ten oosten van Wulpen en tussen de Jonge Duinen en de Binnenduinen. In dit laatste gebied liggen enkele duineilandjes die behoren tot de Oude Duinen. Ten westen en ten noorden van Adinkerke heeft dit gebied een zwak inversierelief met een dunne laag veen in de ondergrond en kleine kreekruigen. Het gaat geleidelijk over in het versneden gebied van het inversielandschap.

2.2.1.3. Het Overdekt Pleistoceen landschap

Dit is het landschap dat in het zuiden van de Polders voorkomt en de overgang vormt tussen het Oudland en de dagzomende Pleistocene of tertiaire afzettingen van de zandleemstreek. Hier worden deze Pleistocene of tertiaire afzettingen op geringe diepte aangetroffen. Het microrelief van de Pleistocene ondergrond bepaalt het zwak golvend relief (+3,5 tot +5 mTAW).

2.2.2. De Moeren

Dit gebied heeft een afwijkende kwartair geologische opbouw ten opzichte van de rest van de Polders. Doordat de invloed van de zee (tengevolge van de Oude Duinen) sterk was verzwakt verminderde de aanvoer van sedimenten. Het bleef een laagliggend gebied (+0,5 tot +1 mTAW) zonder afwateringsmogelijkheden zodat het een waterplas vormde.

Het ontstaan van De Moeren werd op verschillende manieren verklaard. Enerzijds zijn er auteurs die beweren dat De Moeren steeds een meer is geweest en dat nooit veenvorming plaatsgreep; anderen denken dat er veen werd gevormd dat werd afgegraven door de mens. Een overzicht van de verschillende verklaringen wordt

gegeven door BOLLE (1983).

Er worden hier voornamelijk zandige afzettingen aangetroffen. De bodem bestaat uit klei.

2.2.3. Het Middelland

De gemiddelde hoogte varieert hier van +3 tot +4 mTAW. Het inversierelief is hier slechts matig uitgesproken. De oppervlakkige sedimenten bestaan uit afzettingen van de Duinkerken-III-transgressie. Ook hier onderscheiden we verschillende landschapstypes. In de overdekte kreekruiggronden gaat de bovenste zware kleilaag meestal op minder dan 1 m over in lichter materiaal. De dekkleigronden hebben meer dan 1 m zware klei. De overdekte poelgronden bestaan uit zware klei op zware poelgrond, waaronder op minder dan 1 m veen kan voorkomen. In de geulgronden tenslotte kan de dikte van de zware klei er meer dan 1 m bedragen, waaronder dan lichter materiaal voorkomt.

2.2.4. Het Nieuwland

Dit gebied met een zeer vlak relief (+4 mTAW) bestaat bovenaan uit Duinkerken-III-afzettingen. We onderscheiden er de strandruggronden die bestaan uit zand of slibhoudend zand tot meer dan 1 m diepte die soms overgaan in klei. De schorgronden bestaan uit klei die op minder dan 60 cm diepte overgaat in lichter materiaal.

3. Biologisch waardevolle gebieden

De duinen uit het studiegied worden algemeen beschouwd als biologisch zeer waardevol, door de grote variatie aan milieutypes met typische plantengroei en dierengemeenschappen. In onderstaande tabel wordt van alle duinen uit het studiegebied het statuut aangegeven.

Grote delen van de polders uit het studiegebied hebben een internationale betekenis als broed-, pleister- en overwinteringsplaats voor een aantal waardevolle vogels en zijn aldus beschermd door de konventie van Ramsar (o.a. de IJzerbroeken) en een richtlijn van de Europese Gemeenschap (bijna alle duinen en 5700 ha IJzervallei).

HYDROGEOLOGIE

1. Inleiding

Het gebruik van grondwater heeft vele voordelen :

- het grondwater heeft een constante temperatuur die schommelt rond de + 11°C;
- de chemische kwaliteit is op vele plaatsen zeer goed;
- de zuivering van grondwater is veel goedkoper dan de zuivering van oppervlaktewater;
- door de lange verblijftijd in de bodem is het grondwater vrij van ziekteverwekkende kiemen; het aantal bacterien neemt af met de diepte.

Meer en meer echter wordt de kwaliteit van het grondwater bedreigd door :

- overmatig pompen waardoor de waterstand sterk verlaagt (met optreden van oxydatie en verminderen van de winnings-debietten) en verontreinigd of zout water gemakkelijker de watervoerende laag binnendringt;
- overbemesting;
- ongecontroleerd storten;
- lekkende tanks;
- infiltratie van vervuild of zuur regenwater.

Het gevolg is een verminderde grondwaterkwaliteit : nitraten en ammonium, fosfaten, chloriden, zware metalen, koolwaterstoffen, bestrijdingsmiddelen, ... komen in toenemende concentratie in het grondwater terecht. Deze verontreiniging van het grondwater heeft grote gevolgen want dit grondwater blijft lange tijd aanwezig in de watervoerende laag. Wel kan de verontreiniging verdund of geabsorbeerd worden.

De overheid legt dan ook strenge normen op voor de uitbating en de bescherming van waterwinningsgebieden. Bovendien wordt meer en meer rekening gehouden worden met ecologische aspecten. In de jaren 70 en 80 is het milieubesef sterk toegenomen, en is het niet meer mogelijk zomaar grondwater te winnen zonder zich te bekommeren om de gevolgen voor de omgeving.

In hoofdstuk gaan we dan ook na welke mogelijkheden er bestaan om grondwater te winnen in het studiegebied. In hoofdstuk zullen we onderzoeken of het toepassen van infiltratietechnieken in de reeds aanwezige grondwaterwinningen, de mogelijkheden kan bieden grotere debieten op te pompen. Tenslotte zullen we nagaan of we met behulp van ontziltingstechnieken mogelijk brakke waters kunnen aanpompen voor de drinkwaterproductie.

2. Watervoerende lagen

In het studiegebied komen 3 watervoerende lagen voor, namelijk:

- de zandige kwartaire afzettingen (freatisch reservoir)
- de zandige landeniaanafzettingen (artesisch reservoir)
- de gespleten primaire afzettingen (artesisch reservoir).

We gaan in wat volgt de mogelijkheden voor drinkwater onderzoeken per watervoerende laag.

3. Overzicht hydrogeologische studies in de Westhoek

H. THIELE (1943) heeft met behulp van elektrische sonderingen de zoet-/zoutwatergrens bepaald in de polders van de Westhoek. W. DE BREUCK et al. (1974) hebben een kaart opgesteld met de diepte van de zoet-/zoutwatergrens van de freatische laag van de ganse Belgische kustvlakte.

In het duinengebied van De Panne (1974-1978) werd een hydrogeologisch onderzoek uitgevoerd, waarin naast de lithostratigrafie ook de resistiviteit van de formaties en het grondwater werd bepaald, de grondwaterstroming werd onderzocht en waarbij tot slot een drie-dimensionaal model voor een niet-stabiele stroming werd gekalibreerd (L. LEBBE, 1984).

Aansluitend op deze studie werd in een volgend onderzoek de stroming van zoet en zout water (1978-1981) onder het strand van De Panne onderzocht. Er werd een twee-dimensionaal model opgesteld dat de steady-state stroming van zoet en zout water onder het strand behandelt (L. LEBBE, 1981). Aansluitend werd het twee-dimensionaal kwaliteitsmodel van KONIKOW en BREDEHOEFT (1978) toegepast om de evolutie van de zoet-/zoutwaterverdeling te bestuderen (L. LEBBE).

Als vervolg op de 2 vorige studies werd de hydrogeologie bestudeerd van de gebieden gelegen achter het strand en de duinen van De Panne (1981-1986). Het betreft de polders, de oude duinen en De Moere (I. BOLLE, 1983, E. VAN HOUTTE, 1984, M. DE VOS, 1985 en L. VAN DE WALLE, 1986). De grondwaterstroming werd onderzocht, evenals de zoet-/zoutwaterverdeling. Tenslotte werd een model gekalibreerd dat de evolutie van de freatische watervoerende laag simuleert (L. LEBBE en K. PEDE, 1986).

Verder werd een studie uitgevoerd in het domein Hannecart te Oostduinkerke-Koksijde (1980-1982) om de gevolgen na te gaan van een waterwinning in dit duinengebied op de watervoerende laag en de flora en fauna van de onmiddellijke omgeving (M. MAHAUDEN en L. LEBBE, 1982).

Er werd tenslotte nog een hydrogeologische studie uitgevoerd in de IJzervallei (1984-1988). Het omvatte naast lithostratigrafisch onderzoek, ook onderzoek naar de zoet-/zoutwaterverdeling en de relatie tussen de resistiviteit van de formatie en van het grondwater (L. ZEUVTS, 1991).

Naast deze relatief omvangrijke hydrogeologische studies werden nog enkele kleinere studies uitgevoerd met diverse doeleinden en dit te Oostduinkerke (L. LEBBE, 1973) en te Nieuwpoort (I. BOLLE et al., 1990).

Al deze studies betroffen hier de freatische watervoerende laag. Daarnaast werd een inventarisatie gemaakt van alle winningsputten in de diepere lagen, namelijk de zandige Landeniaanafzettingen en de Krijt- en Sokkelafzettingen (GOM, 1987).

4. De freatisch watervoerende laag.

4.1. Inleiding

De samenstelling en verdeling (zoet/zout) van het grondwater in de kustvlakte vertoont een grillig patroon dat een gevolg is van de geologische evolutie van het kustgebied : afwisseling van mariene en continentale omstandigheden.

Na de definitieve terugtrekking van de zee waren de kwartaire sedimenten verzadigd met zout water, gelijk aan de samenstelling

van zeewater (dominante ionen Cl, Na, Mg en SO₄). Als gevolg van de infiltratie van neerslagwater werd, vooral in de hoger gelegen kreekgebieden, het zout water geleidelijk aan verdreven. Het infiltrerende zoete water (rijk aan CaHCO₃) zorgde voor de verdringing van de opgeloste mariene ionen; ook werden aan klei geadsorbeerde ionen uitgewisseld tegen Ca uit het water. Naarmate meer zoet water binnendrong werd het zoute water steeds verder teruggedrongen naar de diepere delen van het kwartaire grondwaterreservoir.

4.2. De duinen

Onder de Jonge Duinen bevindt zich een zoetwaterlens die is ontstaan door infiltratie van het neerslagoverschot in de duinen. Dit neerslagwater heeft het oorspronkelijk zout water verdrongen. Door de hogere grondwaterstand in de duinen is er een natuurlijke grondwaterstroming in de richting van de zee - die de indringing van zeewater verhindert - en in de richting van de Polders. Ook onder de Oude Duinen van Adinkerke-Ghyvelde bevindt zich een zoetwaterzak. Hier is de grondwaterstroming in de richting van de noordelijk gelegen Polders en "De Moeren" (zuiden) toe. Het zoet en zout water bevindt zich in een evenwichtstoestand. In de onmiddellijke omgeving van de grens zoet/zout treedt er diffusie op, zodat er een smalle tussenzone van brak water ontstaat.

Het zoetwater is van het CaCO₃-type.

In de duinen worden 3 grondwaterwinningen uitgebaat, 2 in de Jonge Duinen en één in de Oude Duinen.

Kaartbl	Gemeente	Debiet 1990 (m ³)	Waterlaag
11/7	De Panne	1.916.243	25
11/8	Koksijde/Oostduink.	1.729.478	25
19/3	Adinkerke	219.736	25

Door de heterogene samenstelling van de afzettingen, is er een grote variatie van de hydraulische eigenschappen van de verschillende litologische eenheden van de freatische laag. De resultaten van een onderzoek in "Ter Yde" (MAHAUDEN et al., 1982), waar drie meer doorlatende eenheden (A, B en C) werden gescheiden door twee minder doorlatende eenheden (B' en C'), zijn aangegeven in onderstaande tabel.

Tabel Hydraulische doorlatendheden per eenheid (m/dag)

Eenheid	Bepaald uit korrelverdeling		pompproef
	HAZEN	ERNST	
A	13,3	19,8	
B	7,26	9,67	3,3
C	17,36	20,99	75
A'	1,73	1,22	
B'	1,47	1,08	

Een analoog resultaat werd bekomen bij een pompproef in de Oude Duinen (VAN HOUTTE, 1984), waar twee doorlatende zandformaties

werden gescheiden door een slecht doorlatende leemlaag. De hydraulische doorlatendheid van de bovenste zandlaag was 9 m/dag, van de onderste 125 m/dag, terwijl de leemlaag een hydraulische doorlatendheid had van 0,2 m/dag.

Uit beide voorbeelden blijkt duidelijk dat wanneer een gebied eventueel in aanmerking komt voor grondwaterwinning een bijkomend hydrogeologisch onderzoek noodzakelijk zal zijn.

4.3. De Polders

In de Polders bepaalt het kreekruigenpatroon de verdeling van zoet en zout water. Over het algemeen komt onder de poelgronden brak of zout water voor op zeer geringe diepte terwijl onder de kreekruigen een zoetwaterzak gevormd wordt.

De kreekgebieden, met een hoge topografische ligging en een hoofdzakelijk zandige samenstelling, zijn een geschikt milieu voor infiltratie van neerslagwater. Dit infiltratiewater verdrijft het zoute water naar de diepere delen van de watervoerende laag, tot een evenwicht is bereikt waarbij het infiltrerend neerslagoverschot dat de grondwatertafel bereikt ondergronds wegstroomt.

In poelgebieden daarentegen wordt de infiltratie van neerslagwater belemmerd door de lage ligging, de intensieve ontwatering en de geringe doorlatendheid van de sedimenten. Het aanwezige zoete water is dan ook afkomstig van ondergrondse afstroming uit kreekgebieden en beperkte infiltratie van neerslagwater nabij de watertafel.

Zowel in kreekgebieden als in poelgebieden is de grens tussen zoet en zout water nooit scherp. Er komt een overgangszone voor van brak water waarbij de concentratie aan opgeloste stoffen stijgt van het zoet water naar het zout water.

W. DE BREUCK et al. (1974) hebben het grensvlak zoet-/zoutwater in kaart gebracht. De gebieden waar het zout water zich op grote diepte bevindt zijn :

- ten zuiden van de duinen ter hoogte van Oostduinkerke-Bad
- de omgeving van Sint-Joris
- de omgeving van het militaire vliegveld te Koksijde (kreekrug)
- ten westen van Nieuwpoort tussen 2 uitlopers van de duinengordel
- de omgeving van Avekapelle (Avekapellkreek)
- de omgeving van Nieuwkapelle (IJzerkreek).

In het kader van deze studie worden de eerste 3 gebieden nader onderzocht voor wat betreft mogelijke grondwaterwinningen.

Algemeen kan worden gesteld dat het noordelijk deel van de Polders uit grovere afzettingen bestaat dan het zuidelijk deel.

4.3. De Moeren

In "De Moeren" komt geen zoet water voor. Enkel ter hoogte van het Bewesterpoorteiland is er water van betere kwaliteit aanwezig ten gevolge van de grotere infiltratie van zoet water. In het noorden van "De Moeren" bevindt zich een zoute kwel.

4.4. Het Plateau van Izenberge

Op het Plateau van Izenberge komt het tertiair substraat ondiep voor en komt zelfs sporadisch aan de oppervlakte. Het wordt bedekt door zandlemig materiaal. In dit zandlemig materiaal komt

wel grondwater voor doch het is zeker niet bruikbaar voor eventuele grondwaterwinning.

5. De artesisch watervoerende lagen

5.1. Inleiding

De zandige landeniaanafzettingen vormen de bovenste artesisch watervoerende laag; in de barsten en spleten van de vaste gesteenten (Krijt en sokkel) bevindt zich ook grondwater en dit reservoir vormt de onderste artesisch watervoerende laag. Het grondwater uit beide watervoerende lagen wordt aangevuld uit hogergelegen gebieden en uit bovenliggende formaties (fig).

In natuurlijke omstandigheden zou de stijghoogte op vele plaatsen ver boven de top van de laag en boven het maaiveld uitsteken. Deze natuurlijke toestand werd voor het Landeniaan en de Sokkel berekend (Lebbe et al, 1988). Daaruit blijkt dat :

- in de sokkel de grondwaterstroming gericht is vanuit het zuidoosten in westelijke en noordelijke richting (fig); nabij de kust zou de berekende natuurlijke stijghoogte iets minder dan +15 mTAW bedragen wat wordt bevestigd door oude waarnemingen;
- in het Landeniaan is het stromingspatroon ongeveer hetzelfde (fig);
- voor het studiegebied was er een opwaartse stroming vanuit het Landeniaan naar het oppervlak (<2 m³/ha).

Wanneer men de huidige toestand in het studiegebied vergelijkt met de natuurlijke toestand dan constateert men dat :

- er een stijghoogteverlaging wordt bereikt van ongeveer 40 m en dit zowel voor de sokkel als voor het Landeniaan (fig);
- de grondwaterstroming in de sokkel gericht is vanuit het studiegebied in zuidwestelijke richting naar de streek van Roeselare (fig);
- het verschil tussen de stijghoogte in de sokkel en de top van de sokkel groter is dan 200 m;
- de grondwaterstroming in het Landeniaan vanuit de randen van het studiegebied gericht is naar Veurne (fig).

De huidige samenstelling van het grondwater in het Landeniaan, het Krijt en de sokkel is het resultaat van een evolutie die aan het eind van het Tertiair is begonnen. Toen trok de zee zich definitief terug en waren de watervoerende lagen in evenwicht met het marien milieu, wat tot uiting kwam door de aanwezigheid van zout water in de poriën en spleten van de sedimenten.

Wanneer de zee was teruggetrokken begon zoet water te infiltreren in de hogergelegen gebieden en stelde het natuurlijk grondwaterstromingspatroon zich in. De mariene invloed werd geleidelijk verdrongen vanaf de voedingsgebieden in de richting van de grondwaterstroming. Deze "verzoeting" treedt minder snel op in de diepere lagen. De huidige verdeling van de grondwaterkwaliteit vertoont de opeenvolgende fazen in dit terugdringen van zout door zoet water.

5.2. Grondwaterkwaliteit

5.2.1. Watertypes in het Landeniaan

In de watervoerende laag van het Landeniaan treft men, in het studiegebied, 3 verschillende watertypes (WALRAEVENS et al., 1989 klassifikatie volgens Stuyfzand, 1986) aan (fig) :

- ten westen van Veurne het F_b^* - NaHCO_3^+ type;
- tussen Diksmuide en Veurne het B^* - NaHCO_3^+ type;
- in het noordoosten van het studiegebied het B^* - NaMix^+ type.

De concentratie van de belangrijkste parameters is als volgt :

- het chloridegehalte stijgt in oostelijke richting van 200 mg/l tot 500 mg/l;
- het natriumgehalte stijgt in oostelijke richting van 400 mg/l tot 700 mg/l;
- het kaliumgehalte is begrepen tussen 10 en 20 mg/l;
- het magnesiumgehalte is begrepen tussen 1 en 5 mg/l;
- het calciumgehalte is lager dan 10 mg/l;
- het water is zeer zacht, kleiner dan 5 °F;
- het bicarbonaatgehalte stijgt in oostelijke richting van 600 mg/l tot 850 mg/l;
- het sulfaatgehalte is begrepen tussen 150 en 300 mg/l;
- de geleidbaarheid stijgt in oostelijke richting van 1500 S/cm tot 3000 S/cm;
- het gehalte aan stikstofverbindingen is laag.

De kationenuitwisselingsparameter ($\text{Na}+\text{K}+\text{Mg}$) verbeterd stijgt in de stromingsrichting, wat erop wijst dat de kationenuitwisseling in de bedekkende klei nu minder intens is dan vroeger.

5.2.2. Watertypes in het Krijt

In het Krijt treft men 3 verschillende watertypes (WALRAEVENS et al., 1989) aan (fig) :

- ten noordoosten van Veurne het B^* - NaMix^+ type;
- tussen zuidwesten van Veurne het F_b^* - NaMix^+ type.

De concentratie van de belangrijkste parameters is als volgt :

- het chloridegehalte stijgt in oostelijke richting van 200 mg/l tot 550 mg/l;
- het natriumgehalte stijgt in oostelijke richting van 450 mg/l tot 750 mg/l;
- het kalium-, magnesium-, en calciumgehalte is zoals in het Landeniaan;
- het water is zeer zacht, kleiner dan 5 °F;
- het bicarbonaatgehalte stijgt in oostelijke richting van 600 mg/l tot meer dan 900 mg/l;
- het sulfaatgehalte is begrepen tussen 150 en 250 mg/l.

5.2.3. Watertypes in de sokkel

In het studiegebied waren geen gegevens voorhanden om de watertypes te bepalen. Wel wordt ten oosten van ons studiegebied water aangetroffen van het B^* - NaMix^+ type (WALRAEVENS et al., 1989).

De concentratie van de belangrijkste parameters is als volgt :

- het chloridegehalte stijgt in oostelijke richting van 200 mg/l tot 700 mg/l;
- het natriumgehalte stijgt in oostelijke richting van 450 mg/l tot 800 mg/l;

- het kalium-, magnesium-, en calciumgehalte is zoals in het Landeniaan;
- het water is zeer zacht, kleiner dan 5 °F;
- het bicarbonaatgehalte stijgt in oostelijke richting van 500 mg/l tot meer dan 700 mg/l.

5.3. Grondwaterkwantiteit

5.3.1. Landeniaan

In tabel hebben we gegevens verzameld voor winningsputten in de watervoerende laag van het Landeniaan. Daaruit blijkt dat de meest voorkomende debieten schommelen tussen 2 en 3 m³/h. De specifieke capaciteit van de winningsputten bedraagt 1 à 3 m³/h/m.

Bij een pompproef uitgevoerd te Langemark (DE CEUKELAIRE et al., 1991) bekwam men een hydraulische doorlatendheid van het Landeniaanzand 0,122 m/d.

METEOROLOGIE

1. Waterbalans van de polders en de duinen

Over de periode 1960-1990 was de gemiddelde luchttemperatuur 9,6 °C, met als koudste maand januari (3,2 °C) en als warmste augustus (16,4 °C). De gemiddelde neerslag over de periode 1957-1987 bedroeg 698 mm, waarvan 469 mm terugkeert naar de atmosfeer als gevolg van de evapotranspiratie. De voedingscoëfficiënt van het grondwater bedraagt aldus 0,33, d.w.z. 33% van de gevallen neerslag (228 mm) bereikt de grondwatertafel. De droogste maand is februari (40,5 mm) en de natste november (79,4 mm).

Op grond van de gemiddelde neerslag- en evapotranspiratiegegevens (resp. periode 1957-1987 en 1957-1976) van het weerstation te Koksijde werd een gemiddelde waterbalans (tabel) opgesteld voor de IJzervlakte (ZEUWTS, 1991). Er werd aangenomen dat het vochtophoudend vermogen van de bodem (overwegend kleiig) 300 mm was. Er kan gesteld worden dat deze waterbalans geldt voor het ganse poldergebied van de Westhoek.

Het volledige wateroverschot wordt geleverd tijdens de winterperiode (november-maart). De bodem bevat in deze periode een vochtgehalte dat hoger is dan de veldcapaciteit. Het neerslagoverschot komt volledig ten goede van het grondwaterreservoir, wat zich uit in een toename van de stijghoogte.

Tijdens de periode april-augustus wordt de evapotranspiratie de dominerende faktor en overtreft de neerslaghoeveelheid waardoor water uit de berging wordt verbruikt. Het grondwaterreservoir wordt niet langer gevoed met neerslagwater, doch de afvloeï van water gaat door wat leidt tot daling van de stijghoogten.

In de maanden september en oktober wordt het neerslagoverschot gebruikt om de berging van de bodem terug op peil te brengen. Slechts daarna treedt opnieuw doorstroming naar de watertafel plaats.

Deze berekende waterbalans geeft een gemiddelde situatie weer. Er kunnen echter van jaar tot jaar verschillen optreden, afhankelijk van de neerslaghoeveelheid en zijn verdeling over het jaar.

Op basis van dezelfde gegevens en naar analogie met MAHAUDEN et al. (1982), werd een gemiddelde waterbalans (tabel) opgesteld voor de onverzadigde zone in de duinen. Daarbij werd aangenomen dat het vochtophoudend vermogen van de duinbodems 100 mm bedraagt. Uit deze waterbalans blijkt dat het neerslagoverschot van september volstaat om de berging van de bodem terug op peil te brengen zodat het neerslagoverschot reeds een maand vroeger ten opzichte van de polders de watertafel ten goede komt.

2. Waterbalans in Binnen-Vlaanderen

Bij een studie uitgevoerd in opdracht van AROL (1990) werd een waterbalansmodel (periode 1901-1986) met een maandelijkse tijdsbasis toegepast op vier hydrografische bekkens in het IJzerbekken. Het betreft de Poperingevaart, de Kemmelbeek, de Ieperlee en de Sint-Jansbeek die het deel van Binnen-Vlaanderen ten zuiden van de IJzer afwateren. Deze bekkens zijn

OPPERVLAKTWATER

1. Inleiding

Vooraleer over te gaan tot de bespreking van de waterkwaliteit van de IJzer is het nuttig te vermelden dat zoet oppervlaktewater bestemd voor de produktie van drinkwater gebonden is aan kwaliteitsobjectieven. Bij Koninklijk besluit (25 september 1984) werden 3 categorieën ingesteld (A1, A2 en A3), waarbij telkens verschillende behandelingen van het oppervlaktewater worden voorgeschreven. Met water van categorie A1 kan door een eenvoudige fysische behandeling (bv snelle filtratie) en desinfectie drinkwater worden geproduceerd. Water van categorie A2 vereist een normale fysische en chemische behandeling (bv coagulatie en uitvloeking) en desinfectie. Water van categorie A3 vereist een grondige chemische en fysische behandeling, raffinage en desinfectie. De verschillende normen staan aangegeven in bijlage . Voorts heeft de overheid zichzelf normen opgelegd (MINA-plan) voor de kwaliteit van het oppervlaktewater. Deze normen moeten tegen 1995 worden bereikt (bijlage).

2. IJzer

2.1. Inleiding

De IJzer heeft zich ingesneden in de Polders. Het bekken van de IJzer draineert 1112 km², waarvan 378 km² in Frankrijk. Het hydrografisch bekken van de IJzer draineert in West-Vlaanderen het gebied dat zich uitstrekt van Westouter over Zonnebeke, Koolskamp en Torhout, naar Diksmuide en Beveren-IJzer.

2.2. De waterkwaliteit in Frankrijk

2.2.1. Onderzoek uit de periode 1975 - 1988

De fysisch-chemische kwaliteit van het oppervlaktewater werd regelmatig gevolgd stroomafwaarts de monding van de Heidebeek ter hoogte van de brug te Roesbrugge. De gemiddelde resultaten tussen 1985 en 1988 zijn opgenomen in onderstaande tabel.

85-88	O ₂	BOD5	COD	PO ₄	NO ₃	NO ₂	NH ₄	TKN	NH ₃
gemiddelde (mg/l)	7,47	6,08	39,71	3,71	27,47	1,04	2,79	4,67	0,0160

In 1987 werd door het SRAE (Service Régional d'Aménagement des Eaux) een kwalitatieve studie uitgevoerd van de IJzer en zijn zijbeken. Daaruit bleek het volgende :

- de pH varieert gemiddeld tussen 7,9 en 8,1. Het water is dus licht alkalisch;
- de alkaliniteit van de IJzer is groot en neemt stroomafwaarts af tengevolge van de lage tot gemiddelde alkaliniteit van zijn zijbeken;
- het water bevat veel calcium;
- de geleidbaarheid van het water is hoger dan 800 µS. De

- geleidbaarheid van de zijbeken is iets minder groot dan van de IJzer;
- de hoeveelheid opgeloste zuurstof ligt tussen 5 en 7 mg O₂/l voor de IJzer en 4,7 en 6,5 voor de zijbeken. De resultaten zijn echter sterk afhankelijk van klimatologische en hydrologische omstandigheden. Bij lage debieten is het zuurstofgehalte lager dan bij hoge debieten;
 - de BOD5 en COD waarden zijn vooral hoog stroomafwaarts de monding van de Wylder en de Heidebeek, wat duidelijk wijst op een belangrijke vervuiling op deze punten. Van de zijbeken hebben de Peenebeek en vooral de Heidebeek (14,8 mg/l) hoge waarden voor de BOD5;
 - het nitraatgehalte in de IJzer is belangrijk, stijgt stroomafwaarts, verhoogt sterk vanaf de monding van de Esquelbeek doch overschrijdt nergens 44 mg NO₃/l. De zijbeken bevatten hogere concentraties, vooral de beek van Herzeele en de Heidebeek;
 - het ammoniumgehalte is merkkelijk hoger dan 1 mg NH₄/l, zowel in de IJzer als in zijn zijbeken. Enkel tussen Bambecque en de monding van de Heidebeek is de ammoniumconcentratie laag;
 - het chloorgehalte van de IJzer en de zijbeken varieert tussen 69 en 94 mg Cl/l.
 - het sulfaatgehalte bedroeg 107 tot 149 mg SO₄/l en stijgt stroomafwaarts;
 - het fosfaatgehalte overschrijdt ook sterk de verontreinigingsdrempel van 0,5 mg PO₄/l.

Uit de resultaten bleek het IJzerbekken (zowel de IJzer als zijn zijbeken) organisch sterk verontreinigd en geëutrofeerd, doch er was een lichte verbetering te merken vergeleken met de periode 1975-77 (fig.). De belangrijkste verontreiniging was afkomstig van de zone Zeggars-Cappel /Bollezele (conservefabriek en huishoudelijk afvalwater), de Peenebeek en de Heidebeek. Bovendien waren de chloor-, stikstof- en fosfaatconcentraties zeer hoog.

De biologische kwaliteit van de IJzer was matig tot goed (BI tussen 5 en 7), enkel de punten Bollezele en Wylder zijn twijfelachtig. De biologische kwaliteit van de Peenebeek (BI = 4) en de Heidebeek (BI = 3) was slecht. De toestand in 1987 was echter, op de Peenebeek en Heidebeek na, beter dan in 1977.

De kwaliteit van het oppervlaktewater bleek ook sterk gebonden aan het debiet van de rivier. Bij laag water was er een concentratie van pollutanten in de rivier.

Als algemeen besluit van het onderzoek werd gesteld dat de kwaliteit van de IJzer in de periode 1975-1987 lichtjes verbeterd was en dat de kwaliteit van de Peenebeek (landbouw) en de Heidebeek (agro-industrie en huishoudelijk) slecht bleef gedurende deze periode.

2.2.2. Gegevens van de periode 1989-1991

Onderzoek uit 1989 wees uit dat de IJzer te Bambecque (bijlage) een goede en stabiele waterkwaliteit bezit, met een rijke visstand waaronder enkele zeldzame soorten zoals de kleine modderkruiper. Van 1989 tot mei 1991 werden hoge concentraties aan Kjeldahl stikstof en ammonium en hoge COD waarden waargenomen

vooral in de zomermaanden. Tijdens de wintermaanden werden vooral hoge nitraatconcentraties gemeten. Over het ganse jaar komt veel fosfaat voor in het water. Op botanisch vlak treffen we er als gevolg van de tamelijk voedselrijke omstandigheden veel macrofyten aan. De IJzer behaalt er een BI = 7 (1989).

De Heidebeek, die uitmondt ter hoogte van de Frans-Belgische grens, bleek in 1989 nog altijd zwaar verontreinigd, maar zijn invloed op de waterkwaliteit van de IJzer is in normale omstandigheden gering. In combinatie met atmosferische omstandigheden treedt soms plaatselijk zuurstoftekort op met vissterfte als mogelijk gevolg.

De beschikbare analyses van Bambecque en Roesbrugge (bijlagen en) van 1989 tot mei 1991 bevestigen dat de kwaliteit van de IJzer slechts weinig slechter is te Roesbrugge. Toch merken we steeds iets meer verontreiniging op te Roesbrugge.

Volgens het MINA-plan is de vuilvracht uit Frankrijk met een biochemische zuurstofbehoefte in de periode 1985-1989 met 45 %, tot 880 ton, gedaald en de hoeveelheid vuilvracht met een chemische zuurstofbehoefte met 38 %, zijnde 13.907 ton. De nitraatvracht uit Frankrijk bleef ongewijzigd over deze periode, namelijk 1828 ton stikstof. De sulfaatvracht bedroeg in 1989 34.627 ton en de vracht aan orthofosfaat bedroeg 386 ton fosfor (zie tabel).

2.3. De waterkwaliteit in West-Vlaanderen

2.3.1. Biologische kwaliteit in 1986

De biologische kwaliteit (fig) van de IJzer in 1986 was, ondanks het samenvloeiën aan de grens met de zwaar verontreinigde Heidebeek, goed van de Franse grens tot aan de samenloop met de Haringbeek. Na samenloop met de zwaar verontreinigde Haringbeek was het water van de IJzer van slechte kwaliteit.

Verdere gegevens over de kwaliteit van de IJzer in 1986 zijn niet voorhanden. Men beschikt wel over gegevens van enkele bijrivieren van de IJzer : de Poperingevaart, Kemmelbeek, Ieperlee, Martjesvaart en Handzamevaart waren zwaar verontreinigd, de Pesersbeek en Boezingegracht hadden een goede kwaliteit.

2.3.2. Kwaliteit op basis van gegevens 1989-1991

De biologische kwaliteit van de IJzer en enkele bijrivieren in augustus 1989 wordt getoond in figuur .

De kwaliteit te Roesbrugge (BI = 7, 1989) is slechts weinig slechter na de monding van de Heidebeek. Hoge waarden voor Kjeldahl stikstof, ammonium, fosfaat en COD komen vooral voor tijdens de zomermaanden terwijl tijdens de wintermaanden vooral hoge nitraatconcentraties voorkomen. Ook hier bevat het water het ganse jaar door veel fosfaat. De geleidbaarheid is lichtjes hoger dan te Bambecque.

Stroomafwaarts Roesbrugge ontvangt de IJzer de sterk verontreinigde Haringbeek (bijlage). Het water van de Haringbeek heeft een hoge geleidbaarheid, bevat weinig zuurstof, heeft hoge BOD5 en COD waarden en bevat zeer hoge concentraties aan fosfaat, chloride en stikstof (Kjeldahl, NO3 en NH4). Verder worden spora-

disch cyanide, fluoride, fenolen en één enkele keer zink in hoge concentraties in het water aangetroffen. De kwaliteitsdaling van de IJzer is eerder gering. We noteren een BI = 6 (1989) na de monding van de Haringebeek (Stavele).

De analyseresultaten van Stavele (bijlage) bevestigen de geringe kwaliteitsdaling.

In de omgeving van Elzendamme ontvangt de IJzer de Poperingevaart (bijlage). Die is stroomafwaarts Poperinge zwaar verontreinigd door de afvalwaters van deze stad en verspreide lozingen van agrarische oorsprong. Verontreiniging met silosap zorgt in het najaar steeds voor zware milieuhinder. De BOD5 en COD waarden zijn hoog, evenals de concentraties aan fosfaat en stikstof. Sporadisch worden hoge concentraties aan cyanide, fluoride, fenolen en koper aangetroffen en bevat het water weinig zuurstof. De Poperingevaart zorgt voor een zware belasting van de waterkwaliteit van de IJzer; de BI daalt er scherp van 6 naar 3 (Elzendamme, 1989).

De analyseresultaten te Elzendammebrug (bijlage) bevestigen de kwaliteitsdaling: hogere COD en BOD waarden, hogere geleidbaarheid, minder zuurstof, meer fosfaat en meer chloride in het water.

Te Fintele noteren we terug een BI = 5 (1989).

De kwaliteit van het water te Reningebrug (bijlage) is gelijkwaardig aan de kwaliteit te Elzendamme.

De Boezingegracht bezit een goede waterkwaliteit (beste zijwaterloop van de IJzer). De Kimmelbeek daarentegen is over praktisch de gehele lengte zwaar tot zeer zwaar verontreinigd. Enkel in de bovenlopen rond Kimmel en Westouter kunnen we nog zuivere beken aantreffen. De verontreinigingsbronnen van de Kimmelbeek zijn van diverse aard (huishoudelijk en agrarisch). Iets voorbij Reningebrug vloeit ze samen met de IJzer. De BI daalt er van 5 naar 4 (1989).

Ter hoogte van Knokkebrug vloeit de IJzer samen met het zwaar verontreinigde oppervlaktewater van het Kanaal van Ieper. Dit kanaal ontvangt nabij de monding de zeer zwaar bezoedelde Ieperlee en Martjesvaart (Sint-Jansbeek).

Zowel de Ieperlee als het Kanaal van Ieper (bijlage) hebben een hoge resistiviteit, hoge BOD5 en COD waarden, hoge concentraties aan fosfaat, chloride en stikstof en sporadisch hoge concentraties aan fenolen en fluoride. Er worden zelfs af en toe zware metalen in hoge concentraties aangetroffen, zoals chroom, koper en kwik.

Dit betekent dat het oppervlaktewater van de IJzer ter hoogte van Knokkebrug (Reninge) zwaar verontreinigd is. De analyseresultaten van 1989 tot en met mei 1991 (bijlage) geven hoge concentraties voor fosfaat, nitraat, de geleidbaarheid, COD, BOD en chloride. Opmerkelijk is ook dat de concentraties aan ammonium en Kjeldahl stikstof die tot hiertoe in dezelfde grootte-orde lagen, sterk toenemen vanaf Knokkebrug.

Tussen Knokkebrug en het Waterproductiecentrum ontvangt de IJzer geen verontreiniging meer waardoor daar iets beter is (BI = 5, 1989).

Na het Waterproductiecentrum vloeit de Houten- en Stenensluisvaart in de IJzer. De kwaliteit van deze beken is goed doordat ze water ontvangen van de Blankaartvijver, dat als natuurlijk zuiveringsstation dient voor het aangevoerd verontreinigd water van de Rone- en de Velkelokerbeek.

De kwaliteit te Diksmuide (bijlage) is iets beter is dan te Reninge. De BI bedraagt 5 (1989).

Na Diksmuide wordt de IJzer nog een laatste keer aangetast door de zwaar verontreinigde Handzamevaart. De BI daalt er van 5 naar 3 (Dodengang, 1989). De analyseresultaten van Stuivekenskerke (bijlage) vertonen hoge concentraties aan ammonium, nitraat en fosfaat, naast hoge COD waarden. Vooral de geleidbaarheid en het chloridegehalte van het oppervlaktewater nemen sterk toe.

Te Pervijze registreren we een BI = 4, en te Nieuwpoort (Uniebrug) bedraagt de BI = 6. In Nieuwpoort (bijlage) worden geregeld hoge geleidbaarheden en chloridegehalten gemeten. De concentraties aan ammonium, nitraat, fosfaat en de COD waarden zijn iets lager dan te Suivekenskerke.

De concentraties aan pesticiden en aromatische polycyclische koolwaterstoffen blijft onder de norm.

Volgens het MINA-plan zou de uit Vlaanderen in de IJzer gebrachte vracht met biochemische zuurstofbehoefte met 41 % verminderd zijn, tot 1454 ton, over de periode 1985-1989 en de vracht met chemische zuurstofbehoefte met 52 %, tot 32.677 ton. De nitraatvracht was met 31 % gestegen in deze periode tot 2.423 ton stikstof. In 1989 bedroeg de stikstofvracht 7.067 ton, de sulfaatvracht 69.441 ton, de orthofosfaatvracht 1.260 ton fosfor. De chloridevracht was in die periode met 91% afgenomen tot 62.252 ton.

Vergelijking met de gegevens van een "vuilvracht"-model in opdracht van AROL (1991) leert ons dat de Poperingevaart, de Kemmelbeek, de Sint-Jansbeek en de Ieperlee in 1985 voor 40 % van de nitraatvracht instonden (tabel).

De VMW is sedert het voorjaar 1991 begonnen met het capteren van water uit de IJzer iets voorbij Fintele, waar dit vroeger gebeurde ter hoogte van het Waterproductiecentrum tussen Knokkebrug en Diksmuide. Het water wordt via de Grote Beverdijkvaart afgeleid naar een zandwinningsput in Nieuwkapelle, vanwaar het in het spaarbekken "De Blankaart" wordt gepompt. Deze omschakeling werd genoodzaakt door de slechte kwaliteit van het water van de IJzer ter hoogte van het Waterproductiecentrum.

Als besluit kunnen we stellen dat de kwaliteit van de IJzer over de periode 1987-1991 niet verbeterd. De hydrobiologische kwaliteit van de IJzer is in de periode 1986-1989 lichtjes verbeterd voor de strook tussen de samenvloeiing van de Haringebeek en de samenvloeiing van de Poperingevaart.

2.4. De bronnen van verontreinigingen

De bronnen van verontreiniging zijn de landbouw, de huishoudelijke afvalwaters en de industrie. Volgens een Franse studie zouden ze in 1982 respektievelijk verantwoordelijk geweest zijn

voor 65%, 30% en 5% van de verontreiniging in het Franse deel van het IJzerbekken. Momenteel zou de landbouw nog voor 50 % en de industrie voor 20% bijdragen tot de verontreiniging. We kunnen een gelijkaardige verhouding veronderstellen in het Vlaamse deel van het IJzerbekken.

De verontreiniging door huishoudelijk- en industrieel afvalwater is gemakkelijk controleerbaar en kan ook gemakkelijker aangepakt worden omdat we de plaats en aard van de vervuiling kennen. Het aandeel van de landbouw is echter moeilijker te beheersen.

2.4.1. Huishoudelijke afvalwaters

Zowel in Frankrijk als in Vlaanderen doet men inspanningen om alle woningen zo snel mogelijk aan te sluiten op het openbaar rioleringsnet.

In Frankrijk zijn momenteel 7 zuiveringsstations operationeel (zie onderstaande tabel), die 1/3 (10000 I.E./dag) van het huishoudelijk afvalwater uit het IJzerbekken behandelen.

Tabel Zuiveringsstations in Frans deel IJzerbekken

Station	Aangesloten gemeenten	Jaar	Capaciteit I.E./uur	Ontvanger
CROCHTE		1984	1000	watergang
HONDSCHOOTE	Rexpoëde Killem	1976	6480	watergang
OXELAERE	Cassel Bavinchove	1979	4440	Peenebeek
STEENWOORDE		1974	30000	Heidebeek
WORMHOUT	Esquelbecq	1976	3890	Peenebeek
ARNEKE		1991	1300	Peenebeek
HERZEELE	Bambecque	1991	1200	Beek van Herzeele

Het zuiveringsstation "STEENWOORDE" (afvalwater van huishoudens en voedings- en farmaceutische industrie) kan niet alle aangevoerde water behandelen, zodat een deel van het water onbehandeld in de Heidebeek terechtkomt. Ook het zuiveringsstation "WORMHOUT" ontvangt meer vuil dan het aankan.

Op Belgisch grondgebied zijn 2 zuiveringsstations operationeel, namelijk Woumen en Wulpen.

2.4.2. Industriële afvalwaters

Er wordt ongeveer 40000 I.E./dag geproduceerd door de diverse bedrijven in Frankrijk, waarvan de meest vervuilende rond Steenvoorde gelegen zijn. Door de ondercapaciteit van het station te Steenvoorde komt een groot deel van het afvalwater ongezuiverd in de Heidebeek terecht. Er bestaan plannen om dit station aan te passen en om alle vervuilende bedrijven op een zuiveringsstation aan te sluiten of hun afvalwater te laten behandelen.

Bij een nieuwe industriezone in de buurt van Wormhout is een

zuiveringsinstallatie in gebruik die het afvalwater zuivert.

2.4.3. Landbouw

Het IJzerbekken is een uitgesproken agrarisch gebied waar veel aan veeteelt (mestvarkens en -koeien, melkkoeien) en akkerbouw wordt gedaan.

Een recente studie in de omgeving van de Peenebeek (dat als representatief kan beschouwd worden voor het ganse Franse deel van het IJzerbekken) konstateerde een slecht gebruik van organische en minerale meststoffen (overbemesting) en een ondercapaciteit voor de opslag van drijfmest. Hetzelfde geldt uiteraard voor het Vlaamse gedeelte van het IJzerbekken.

Van september tot april, wanneer de grondwaterstand stijgt, de akkerlanden braak liggen of de grond bevroren is, zou geen drijfmest meer mogen worden uitgevoerd omdat de mineralen dan niet kunnen worden opgenomen door de planten. Daardoor ook komen de hoogste pieken van de nitraatconcentraties in het oppervlaktewater in de winter voor (zie fig).

2.5. Toekomst

In Frankrijk bestaat voor de IJzervallei een "Contrat de Rivière", dit is een samenwerkingsakkoord (landschapszorg, waterkwaliteit, toerisme, recreatie, ...) tussen alle instanties die in de streek verantwoordelijkheid dragen. Als deze partners samen een meerjarenkontraat ondertekenen, kunnen ze voor de uitvoering op ruime middelen rekenen van de centrale overheid. In dit verband worden door het CARFO (Comité d'Aménagement Rural de la Flandre Occidentale) grote inspanningen geleverd en zo ook kwam men tot een akkoord met het Provinciebestuur van West-Vlaanderen, het Fonds Leefmilieu van de Koning Boudewijnstichting en het Regionaal Instituut voor de Samenlevingsopbouw om te komen tot een gelijkaardig Vlaams IJzerprojekt. Hierbij speelde Samenlevingsopbouw Westhoek een grote rol.

De bedoeling van de initiatiefnemers is te komen tot een samenhangend beheersplan voor de toekomst van de IJzervallei : waterkwaliteit, waterpeilen, oeverversterking en -beheer, natuurbehoud, overstroombare weiden, landbouw, rivierlandschap, ruimtelijke ordening en recreatie.

Op 5 juni 1991 werd het Bekkenkomitee voor de IJzer geïnstalleerd, dat is samengesteld uit alle belanghebbende partners (landbouw, landinrichting, recreatie, polderbesturen, waterwinningsbedrijven ...) en afgevaardigden van de gemeenten en het onderwijs. Het is de algemene vergadering voor dit IJzerprojekt.

Hoewel dit projekt ontegensprekelijk streeft naar een goede kwaliteit van het oppervlaktewater, kan men zich wel de vraag stellen of dit projekt gediend is met een nog grotere afname van water uit de IJzer, vooral omdat de natuurgroepen streven naar hogere waterpeilen.

2.6. Besluit

Het oppervlaktewater van de IJzer bevat een matige tot goede kwaliteit in Frankrijk en tot aan de samenloop met de Kommelbeek. De zijbeken die tot hiertoe in de IJzer vloeiden (Peenebeek, Heidebeek, Haringebeek en Poperingevaart) hadden slechts een

geringe kwaliteitsverandering tot gevolg. Na de samenloop met de Kommelbeek en iets verder met het Kanaal van Ieper treedt er een gevoelige kwaliteitsverslechtering op. Te Diksmuide wordt de kwaliteit nog eens sterk aangetast door de Handzamevaart.

We stellen ook seizoensgebonden kwaliteitsveranderingen vast:

- hoge nitraatconcentraties in de winter;
- hoge Kjeldahlstikstof-, ammonium-, sulfaat- en fosfaatconcentraties in de zomer;
- hogere COD en BOD waarden in de zomer;
- lagere zuurstofconcentraties in de zomer;
- hogere geleidbaarheden van juli tot november.

Algemeen kunnen we stellen dat hoe dichterbij de Franse grens, hoe beter de kwaliteit voor inname. Doch ook hier wordt nog regelmatig enkele A3-normen voor inname van oppervlaktewater overschreden: nitraat, ammonium, Kjeldahl stikstof, COD en BOD, fosfaat en chloride.

Vanaf de samenloop van de Kommelbeek is het IJzerwater niet meer geschikt voor inname.

In Frankrijk voert men al geruime tijd een actief beleid voor de sanering van de IJzervallei. Daar is men nu ook in België aan begonnen: MINA-plan en IJzerprojekt. Er moet afgewacht worden wat de resultaten daarvan zullen zijn.

3. Het debiet van de IJzer

3.1. Inleiding

Er zijn geen debietmetingen beschikbaar van de IJzer. Wel is het MOW een systeem aan het uitwerken zodanig dat het debiet van de IJzer zal kunnen geregistreerd worden (mondelijke mededeling ir. Coen, Hoofdingenieur-Direkteur Bruggen en Wegen). Toch heeft het MOW de debieten van de IJzer berekend op basis van gegevens afkomstig van 3 meetstations op zijbeken van de IJzer (J. HEYLEN, 1979 en 1984). In dit onderzoek hebben we ook getracht een schatting te maken van het debiet van de IJzer. Beide resultaten worden in wat volgt besproken.

Voorts heeft AROL (1990) een studie laten uitvoeren over de waterbalans van het IJzerbekken, waarbij door middel van een mathematisch model de afvoer van de IJzer werd berekend.

3.2. Berekening debiet van de IJzer door het MOW

Gedurende de periode 1974 - 1981 werd door het MOW het gemiddeld maandelijks debiet van de IJzer te Diksmuide (oppervlakte van het hydrografisch bekken 1112 km²) bepaald, op basis van de beschikbare debieten van drie limnigrafische stations (J. HEYLEN, 1979 en 1984). Deze limnigrafen waren opgesteld op de Sint-Jansbeek te Merkem (bekken te Merkem 75 km²), de Poperingevaart te Oostvleteren (bekken te Oostvleteren 84 km²) en de Grote Kommelbeek te Vlamertinge (bekken te Vlamertinge 36,5 km²).

Door nu de debieten van deze 3 zijbeken (195,5 km²) te extrapoleren naar de oppervlakte van het hydrografisch bekken van de IJzer, kon het gemiddelde maandelijks debiet van de IJzer berekend worden. Daarvoor diende men de gemeten debieten te vermenigvuldigen met een faktor 1112 / 195,5 of 5,69. De aldus bekomen

debeten werden dan nog eens met 15 % verminderd, om enerzijds geen overschatting te maken en anderzijds een correctie door te voeren voor de invloed van de waterstand van de IJzer op de waterstand in de zijbeken (daar 2e stations dicht bij de monding gelegen zijn).

De berekende debieten van 1974 tot 1981 worden in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel Berekende gemiddelde maandelijkse debieten voor de IJzer te Diksmuide (1112 km²) in m³/s

Jaar Maand	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Jan	6,24	14,17	6,86	12,98	11,31	11,99	9,48	16,3
Feb	8,13	8,32	7,44	14,83	9,62	12,85	13,54	4,93
Maa	7,26	13,69	2,72	8,27	5,23	17,55	12,87	13,11
Apr	1,11	11,13	1,22	5,3	2,47	5,47	7,06	3,43
Mei	0,72	1,4	0,68	2,97	9,44	4,3	1,94	3,2
Jun	0,58	0,54	0,49	1,6	0,82	2,71	1,01	7,69
Jul	2,23	1,06	0,2	0,63	0,77	1,11	14,37	3,43
Aug	0,97	1,21	0,24	0,58	0,43	1,5	0,97	0,97
Sep	6,2	1,45	1,85	0,49	0,39	0,58	0,68	1,01
Okt		1,31	1,95	0,68	0,48	1,4	1,98	12,28
Nov		12,24	2,97	7,2	0,68	6,96	4,26	8,13
Dec		7,79	7,59	7,93	5,9	22,73	16,4	16,63

Wat duidelijk opvalt zijn de grote debieten gedurende de wintermaanden en de lage debieten in de zomermaanden. Er werd een correlatie vastgesteld tussen de gemiddelde debieten van de IJzer te Diksmuide over de periode januari tot en met april, en de totale neerslag van het IJzerbekken over dezelfde periode : een grote neerslag in deze periode betekent ook een hoger debiet van de IJzer (fig.).

3.3. Berekening debiet van de IJzer door LTGH

Van de periode juni 1986 - december 1990 beschikt men over gegevens van 3 meetstations op zijbeken van de IJzer (Laboratorium voor Hydraulica, RUG) :

- Poperingevaart te Oostvleteren, met een bekken van 83 km²
- Kemmelbeek te Boezinge, met een bekken van 68 km²
- Ieperlee te Zuidschote, met een bekken van 67 km².

Analoog aan de werkwijze in vorig punt besproken, werd het gemiddeld maandelijks debiet berekend voor de IJzer aan de Franse grens (hydrografisch bekken 378 km²) en te Diksmuide. Daarvoor diende men de gemeten debieten te vermenigvuldigen met een faktor respectievelijk gelijk aan 378 / 218 of 1,73 en 1112 / 218 of 5,10. Daarna werd met 15 % verminderd, om analoge redenen als hiervoor.

De berekende debieten worden in onderstaande tabel weergegeven.

Tabel Berekende gemiddelde maandelijkse debieten voor de IJzer aan de Franse grens en te Diksmuide in m³/s

Jaar Maand	Franse grens of Diksmuide	1986	1987	1988	1989	1990
Jan	F		3,191	9,661	1,926	3,147
	D		9,407	28,481	4,679	9,277
Feb	F		2,890	8,808	1,900	4,492
	D		8,518	25,967	5,601	13,243
Maa	F		5,372	6,450	3,275	1,298
	D		15,836	19,013	9,654	3,828
Apr	F		2,128	1,816	4,113	0,897
	D		6,273	5,354	12,125	2,644
Mei	F		1,141	1,056	0,794	0,598
	D		3,364	3,113	2,341	1,764
Jun	F	0,513	2,528	0,85	0,51	0,493
	D	1,513	7,452	2,506	1,504	1,452
Jul	F	0,384	2,479	0,807	0,438	0,356
	D	1,131	7,309	2,38	1,292	1,049
Aug	F	0,522	2,74	0,584	0,379	0,368
	D	1,539	8,076	1,721	1,118	1,084
Sep	F	0,648	1,872	1,126	0,444	0,482
	D	1,912	5,518	3,321	1,309	1,422
Okt	F	1,390	6,426	1,387	0,554	0,915
	D	4,097	18,944	4,088	1,634	2,696
Nov	F	2,05	6,485	0,935	0,415	2,213
	D	6,043	19,117	2,757	1,222	6,524
Dec	F	5,22	2,809	3,3	2,24	3,273
	D	15,389	8,28	9,728	6,602	9,65

3.4. Studie van AROL

3.4.1. Inleiding

Voor de periode 1901-1986 werd de maandelijkse waterbalans gesimuleerd voor de bekkens van de Poperingevaart, de Ieperlee, de Sint-Jansbeek en de Grote Kemmelbeek. Daaruit blijkt dat, behalve voor de Ieperlee, de berekende werkelijke evapotranspiratie vrij hoog is en de snelle afvoer de belangrijkste afvoercomponent is (figuren tem). Dit wordt verklaard door de kleiige ondergrond en de ondiepe grondwaterstand in de stroombekkens. Voor de Ieperlee kan de afwijking verklaard worden door onnauwkeurige debietgegevens of door een foute oppervlakte van het stroombekken.

3.4.2. IJzer

Op basis van de gegevens van deze stroombekkens, debietmetingen van de IJzer in de buurt van Bambecque (Engelshof), hydrometeorologische gegevens (neerslag, temperatuur,

zonnestralen), gegevens ivm de bodem (o.a. albedo, korrelgrootte) en gegevens over vegetatie werd de waterbalans van het IJzerbekken gesimuleerd.

De resultaten voor deze berekeningen te Bambecque en Diksmuide staan in de tabellen tem en in figuren tem .
 Uit deze resultaten kan de afvoercoëfficiënt berekend worden, namelijk

$$d = 100 \cdot (Q_t / P_t).$$

In onderstaande tabel staat de afvoercoëfficiënt per maand aangegeven voor Bambecque en Diksmuide.

Tabel . Afvoercoëfficiënt voor de IJzer.

Maand	Bambecque (Engelshof)	Diksmuide
Januari	61,30	62,19
Februari	70,57	76,30
Maart	23,24	24,43
April	24,68	24,62
Mei	10,21	12,68
Juni	13,52	13,60
Juli	20,15	19,18
Augustus	5,96	8,50
September	3,37	7,62
Oktober	16,11	21,79
November	27,88	31,62
December	57,83	62,47

Uit een vergelijking van deze resultaten met de debietberekeningen uitgevoerd door het MOW (figuur) kan men besluiten dat deze laatste berekeningen een goede benadering zijn van de afvoer van de IJzer.

3.5. Analyse van de debieten

3.5.1. Inleiding

Zoals reeds hierboven besproken bestaat er een korrelatie tussen de gemiddelde debieten van de IJzer over de periode januari tot en met april, en de totale neerslag van het IJzerbekken over dezelfde periode : een grote neerslag in deze periode betekent ook een hoger debiet van de IJzer. In het bestek van deze studie hebben we getracht een beter inzicht te krijgen in de verdeling van het debiet van de IJzer.

3.5.2. Verband tussen debiet en totale neerslag

Wanneer de totale maandelijkse neerslag wordt uitgezet tegenover het gemiddelde maandelijkse debiet (fig en) konstateert men een korrelatie tussen de totale maandelijkse neerslag en het debiet :

- van december tot april neemt het debiet sterk toe met de hoeveelheid neerslag volgens een lineair verband;
- in oktober en november neemt het debiet toe met de hoeveelheid neerslag volgens een logaritmisch verband;

- gedurende de zomermaanden kunnen we niet spreken van een logische relatie tussen debiet en hoeveelheid neerslag.

3.5.3. Verband tussen debiet en surplus

Wanneer het totale maandelijkse neerslagoverschot, dit is het deel van de neerslag dat niet verdampt is en niet werd opgenomen ter aanvulling van de bodemberging, wordt uitgezet tegenover het gemiddelde maandelijkse debiet (fig) konstateert men ook hier een korrelatie tussen beide. De korrelatie is gelijkaardig aan de korrelatie tussen totale neerslag en debiet.

4. De waterkwaliteit van het Lo kanaal

De biologische kwaliteit (1990) van het Lo kanaal was slecht te De Fintele (BI = 3) tot matig te Veurne (BI = 6).

Het oppervlaktewater is gekenmerkt door een grote geleidbaarheid, een grote concentratie aan Kjeldahl stikstof, ammonium en fosfaat in de zomer, nitraat in de winter. Het chloridegehalte is hoog, evenals de COD en BOD waarde. In de zomer is er weinig zuurstof aanwezig in het water.

Dit water is ongeschikt voor inname.

5. De waterkwaliteit van het kanaal Duinkerke-Nieuwpoort

De biologische kwaliteit (1990) is over de ganse lengte slecht (BI = 4).

Het oppervlaktewater is gekenmerkt door een hoge geleidbaarheid, een hoog chloridegehalte- en fosfaatgehalte, hoge COD en BOD waarden. De waarden zijn het hoogst rond Nieuwpoort en nemen af in de richting van Adinkerke. De concentraties aan Kjeldahl stikstof, ammonium en nitraat zijn relatief laag tussen Veurne en Adinkerke. Naar Nieuwpoort toe zijn de concentraties hoog. Er komt veel fluoride voor in het water en één enkele keer werd de A3 norm voor kwik en boor overschreden.

Dit water is ongeschikt voor inname.

6. De waterkwaliteit van de Bergenvaart

De biologische kwaliteit van de Bergenvaart is slecht in de buurt van Bulskamp (BI = 4) tot matig in de buurt van Veurne en de Franse grens (BI = 6).

Het oppervlaktewater is gekenmerkt door een hoge geleidbaarheid en een hoog chloridegehalte. De ammoniumconcentratie is laag. Wel komt er veel Kjeldahl stikstof, nitraat en fosfaat voor in het water.

De geleidbaarheid, chloride- en fosfaatgehalte zijn groter in de buurt van de grens.

Dit water is ongeschikt voor inname.

7. De waterkwaliteit van het Langeleed-Parlementsgracht

De biologische kwaliteit is goed te Nieuwpoort (BI = 7), en wordt dan matig tot aan het Militaire vliegveld te Koksijde (BI = 6).

In de Parlementsgracht (rondom vliegveld Koksijde) en het eerste deel van de Langeleed richting Adinkerke is de biologische kwaliteit slecht (BI = 4). Te Adinkerke bezit het Langeleed terug een matige kwaliteit (BI = 6).

Te Nieuwpoort is er een geringe belasting aan stikstofverbindingen; te Koksijde en Adinkerke is die terug hoog. De geleidbaarheden zijn hoog en dit vooral te Nieuwpoort. Het chloride- en fosfaatgehalte is eveneens hoog, doch iets minder te Nieuwpoort. Dit geldt ook voor de COD waarde. Dit water is ongeschikt voor inname.

8. De waterkwaliteit van de Grote Beverdijkvaart

De biologische kwaliteit is goed (BI = 7). Er komen veel stikstofverbindingen voor in het water. De COD waarden zijn hoog. Ook de geleidbaarheid en het chloridegehalte van het water is hoog, vooral te Nieuwpoort. Ook het fosfaatgehalte is hoog. Dit water is ongeschikt voor inname.

9. De waterkwaliteit van de Sint-Machtuitsbeek

De biologische kwaliteit is matig stroomopwaarts het Lokanaal (BI = 6) en zeer slecht stroomafwaarts het Lokanaal (BI = 2). Er is een zware belasting aan stikstof- en fosforverbindingen in het water. De geleidbaarheid was gedurende 1991 hoog in september en oktober, net als het chloridegehalte: gedurende de rest van het jaar is de geleidbaarheid en het chloridegehalte normaal te noemen. Ook de COD waarde is hoog. Dit water kan gebruikt worden voor inname.

10. De waterkwaliteit van de Proostdijkvaart

De biologische kwaliteit is zeer slecht in de buurt van Veurne (BI = 0) en evolueert stroomafwaarts naar een matige kwaliteit (BI = 5/6). Het water heeft een zeer hoge geleidbaarheid en een hoog chloridegehalte. De fosfaatbelasting en de COD waarde is hoog, maar de hoeveelheid stikstofverbindingen in het water is normaal. Dit water is niet geschikt voor inname.

11. De waterkwaliteit van de Kromme Gracht

Van de Kromme Gracht zijn geen analyses beschikbaar. De biologische kwaliteit is matig tot goed (BI = 5 tot 7).

12. De waterkwaliteit van de Ringsloot

Ook van de Ringsloot zijn geen analyses beschikbaar. De biologische kwaliteit is goed in het zuiden (BI = 7) tot matig in het noorden (BI = 5). De mindere kwaliteit in het noorden wordt waarschijnlijk veroorzaakt door lozing van afvalwater van een deel van Adinkerke.

INFILTRATIE EN INJEKTIE

1. Inleiding

Wanneer de vraag naar water groter wordt dan de jaarlijkse natuurlijke infiltratie in een waterwinningsgebied, kan de productie deze vraag niet bijhouden zonder schade toe te brengen aan de omgeving van dit waterwinningsgebied, omdat dan immers een gevoelige verlaging van de grondwaterstand zal optreden.

Door aanvoer van water (bv. oppervlaktewater) naar ondiepe kanalen of depressies (infiltratie) of naar injectieputten (injectie) in het waterwinningsgebied, kan de productie verhoogd worden, immers na infiltratie kan het water terug opgevangen worden in lager gelegen kanalen of drains (infiltratie), ofwel terug opgepompt worden (infiltratie en injectie). Er moet echter steeds voor gezorgd worden dat het water een zekere periode in de watervoerende laag aanwezig is.

Naast het opvoeren van de productie kan infiltratie en/of injectie ook gebruikt worden om de oorspronkelijke hydrogeologische toestand te herstellen en om verontreinigd water terug te dringen.

Niet alle gebieden zijn echter geschikt voor infiltratie en/of injectie. Infiltratie en/of injectie zijn gebonden aan enkele hydrogeologische factoren :

- er moet een doorlatende watervoerende laag aanwezig zijn;
- ingeval van infiltratie mag deze doorlatende laag niet bedekt worden door een slecht doorlatende laag van enkele meters dik;
- ingeval van injectie dient boven het watervoerende pakket waarin injectie plaatsvindt bij voorkeur een goed afsluitende laag aanwezig te zijn, waardoor de hydrogeologische effecten op de ondiepe grondwaterstand beperkt blijven; een afsluitende laag onder dit watervoerend pakket biedt een goede bescherming aan de ondergrondse watervoorraad;
- de kwaliteit van het grondwater in het watervoerende pakket waarin infiltratie en/of injectie plaatsvindt dient goed te zijn; ingeval van injectie moet de ligging van het grensvlak tussen brak en zout water diep liggen en mag in de watervoerende laag waarin zal worden geïnjecteerd geen brak of zout water aanwezig zijn.

Het gebruik van infiltratie en/of injectie heeft volgende voordelen :

- er wordt een ondergrondse voorraad aangelegd;
- infiltratiekanalen en injectieputten kunnen gemakkelijk worden geïntegreerd in het landschap;
- de schommeling in kwaliteit van het geïnfiltrated water wordt afgevlakt;
- er treedt een verbetering op van kwaliteit door menging met het natuurlijk aanwezige water, door fysische en biologische processen die optreden in de watervoerende laag, en door afsterven van virussen en bacteriën;
- een korstondige infiltratie van gepollueerd water wordt geneutraliseerd door menging met het aanwezige water;
- het opgeslagen water is beter beschermd tegen rechtstreekse verontreiniging en algengroei;
- er treedt een verhoging op van de waterstand in de omgeving;
- de zoutwaterstroming vanuit de zee en de polders wordt

omgekeerd.

Naast voordelen, heeft infiltratie en/of injectie echter ook nadelen, namelijk :

- bij infiltratie wordt water in de watervoerende laag gebracht dat meer nutriënten bevat dan het natuurlijke aanwezige water waardoor een andere plantengroei ontstaat;
- bij infiltratie kan het water in de kanalen gekontamineerd worden door contact met de atmosfeer en kan het water herbesmet worden door bacteriën;
- bij infiltratie moet het terrein veelal ingrijpend gewijzigd worden door graven van kanalen en/of bekkens;
- er treden snel verstoppingsverschijnselen op waardoor (vooral bij injectie) het infiltratiewater moet worden voorbehandeld.

In wat volgt zal eerst dieper worden ingegaan op infiltratie (2) en injectie (3) en de chemische processen die zich daarbij in de bodem afspelen (4), de voorbehandeling van infiltratiewater (5) en enkele voorbeelden (6).

2. Infiltratie

2.1. Inleiding

Onder infiltratie verstaan we het toevoegen van water aan een freatische doorlatende laag, en dit door middel van kanalen, bekkens of grintlichamen. Dit infiltratiewater wordt dan op een zekere afstand teruggewonnen via winningsputten, drains of lager gelegen winningskanalen (fig).

De hydrogeologische factoren, de voor- en nadelen van infiltratie werden in de inleiding behandeld. De processen die zich afspelen in de bodem bij de passage van het infiltratiewater worden in een aparte paragraaf behandeld.

2.2. Voordelen ten opzichte van injectie

Bij infiltratie komt bij uitval van de wateraanvoer een aanzienlijke berging vrij door het dalen van het waterpeil in de infiltratieplassen en van de freatische grondwaterstanden. Deze daling van de grondwaterstand is echter ecologisch ongunstig.

Met een behoorlijke kwaliteit voorgezuiverd rivierwater en de juiste infiltratiesnelheid speelt verstopping bij oppervlakteinfiltratie geen dominante rol.

2.3. Infiltratiewater bij infiltratie en verstopping

2.3.1. Infiltratiewater

Coagulatie, snelfiltratie en chloring kan volstaan als behandeling van infiltratiewater. In de kanalen of vijvers wordt dan wel een laag slib afgezet, die eventueel tot verstopping kan leiden. In de kanalen of vijvers is er een gunstige verlaging van vluchtige en aan actieve kool adsorbeerbare organohalogenen.

2.4. Verstopping van de bekkenbodem

Het verstopping van de bekkenbodem doet de infiltratiesnelheid afnemen. Het verstoppingsverschijnsel houdt vooral verband met

de fysische, chemische en biologische eigenschappen van het infiltratiewater.

De zwevende deeltjes aanwezig in het infiltratiewater zijn het voornaamste agens voor de verstopping van infiltratiebekkens. Ijzer (Fe 2+) wordt geoxideerd en bezinkt als ijzerhydroxide op de bekkenbodem. Verder kan ijzerhydroxide zich nog afzetten op de zandkorrels zelf en zo de beschikbare ruimte voor watertransport nog verminderen. Het hydroxide gaat ook organisch materiaal adsorberen. Naast ijzer kunnen echter nog andere elementen geoxideerd worden en neerslaan. In onderstaande tabel wordt het gehalte aan deeltjes fijner dan 50 μm en het ijzergehalte weergegeven op enkele diepten onder het infiltratiebekken (DEVOS, J., 1984).

Tabel . - Gehalte aan fijne deeltjes en ijzer in grondstalen (uit bodem van infiltratiebekken) genomen na infiltratieproef

diepte (cm)	% deeltjes < 50 μm	vrij ijzer als % Fe ₂ O ₃	totaal ijzer als % Fe ₂ O ₃
0 - 3	4,07	1,39	1,52
3 - 6	0,38	0,23	0,44
6 - 9	0,09	0,15	0,37
9 - 12	0,22	0,13	0,31

Een slijpplaatje genomen van de bovenste 3 centimeter van het bekken bevestigt het vorige. Bovenaan is er een nieuwgevormd laagje van enkele millimeter dikte dat nagenoeg volledig uit amorf ijzerhydroxide bestaat, met wat fijnverdeeld kwarts, CaCO₃ en enkele kleideeltjes. Onder dit ijzerhydroxidelaagje worden nog "vlokken" van dit bestanddeel tussen de zandkorrels waargenomen (DEVOS, J. 1984).

De ontwikkeling van wieren - afhankelijk van de temperatuur, de lichtintensiteit en minerale voedingsstoffen - draagt ertoe bij dat de bodem snel verstopt, omdat deze wieren chemische bestanddelen produceren en na het afsterven bezinken.

In de bodem gaan zich ook bacterien ontwikkelen, o.a. ijzer- en sulfaatreducerende bacterien, die stoffen afzetten op en tussen de zandkorrels. Daarom is de keuze van de hoogte van de waterstand in het infiltratiemidden ook van belang.

Verder kan verstopping ook veroorzaakt worden door het zwellen van kleimineralen (ten gevolge van ionenuitwisseling) en de aanwezigheid lucht- en gasbellen die de doorsijpeling van water verhinderen.

Deze sliblaag kan echter gemakkelijk verwijderd worden door wegschrapen van de sliblaag of door droogzetten van de kanalen. Droogzetten leidt echter tot ecologisch ongewenste grondwaterfluctuaties.

2.5. Infiltratiesnelheid

De infiltratiesnelheid staat in rechtstreeks verband met de permeabiliteit van de formatie. BIZE et al. (1972) hebben dit proefondervindelijk vastgesteld (fig).

3. Injektie

3.1. Inleiding

Bij injectie wordt vergaand voorgezuiverd water (meestal oppervlaktewater) door middel van persputten diep in de ondergrond gebracht. Rondom de injectieputten gegroepede winningsputten onttrekken het geïnfiltreerde water weer aan het watervoerende pakket (SPREY et al., 1990). Het principe wordt voorgesteld op fig

3.2. Voordelen ten opzichte van infiltratie

Er is vrijwel geen invloed op de freatische grondwaterstanden, terwijl ook geen eutrofiëring van de bovengrond optreedt. Bovendien is voor injectie slechts in beperkte mate vergraving van het terrein nodig (SPREY et al., 1990). Als injectie bovendien onder een slecht doorlatende kleilaag plaatsvindt, zal de grondwaterstand nauwelijks beïnvloed worden (VAN DER EEM, 1990), ook niet wanneer plots zou gestopt worden met de injectie.

3.3. Infiltratiewater bij injectie en verstopping

3.3.1. Verstopping

3.3.1.1. Inleiding

Injektieputten kunnen verstoppen door :

- a. zwevende deeltjes in het water
- b. bellen in het water
- c. bacteriegroei in de put
- d. chemische neerslagvorming
- e. dispersie en zwelling van kleideeltjes in de bodem
- f. zetting van de bodem rondom de put.

3.3.1.2. Zwevende deeltjes

Zwevende stof veroorzaakt in het algemeen een verstopping die lineair toeneemt met de in totaal geïnfiltreerde zwevende stof. Bij constante concentratie is zodoende ook het verband met het totaal geïnfiltreerde volume water lineair.

3.3.1.3. Bellen

Overal waar overdrukken in het leidingstelsel ontstaan, het water vrij valt of oververzadiging aan bepaalde gassen optreedt, ontstaan bellen, die met het infiltratiewater mee de put worden ingesleurd en dan de bodemporiën blokkeren.

3.3.1.4. Bacteriegroei

Pas wanneer de bacteriën zich in de put nestelen en zich daar door voortdurende voedselaanvoer (assimileerbare organische stoffen in het infiltratiewater) op grote schaal gaan vermenigvuldigen kunnen zij een hinderlijke verstopping veroorzaken.

Vermijden is mogelijk door een continue of periodieke chlooring

van het infiltratiewater, danwel het wegzuiveren van de assimileerbare organische stoffen.

3.3.1.5. Neerslagvorming

Naast de gebruikelijke vermindering van oververzadiging aan kalk, is sterke waakzaamheid geboden bij doseringen of het samenvoegen van watersoorten tussen de laatste infiltratiestap en de persputten.

Vermenging van het infiltratiewater met het oorspronkelijke grondwater leidt vaak tot neerslagvormende reacties. Toch is verstopping door deze oorzaak in Nederland nog niet voorgekomen (OLSTHOORN, 1982).

3.3.1.6. Kleideeltjes

Gevaarlijker is de verstopping door zwellen en vooral door dispersie van kleideeltjes (montmorilloniet) die rond de bodemkorrels aanwezig kunnen zijn.

3.3.1.7. Regenereren van verstopte putten

Voor de hand liggende mechanische regeneratiewijzen zijn :

- a schoonpompen (met zuigpomp of onderwaterpomp)
- b jutteren (met perslucht)
- c schoonspuiten (met hoge-drukpomp)
- d andere

Door middel van schoonpompen wordt gemiddeld binnen enkele minuten 80% van de opgetreden verstoppingsweerstand verwijderd. Jutten met perslucht veroorzaakt een voortdurende stromingsomkering en is daarom een zeer geschikte regeneratiemethode. Bij het schoonspuiten wordt de kracht van de horizontale straal van een in filter van een persput neergelaten hogedrukspuit vernietigd door de omstorting.

3.3.2. Kwaliteit van het infiltratiewater

Het infiltratiewater gebruikt bij injectie moet aan strengere eisen voldoen dan bij infiltratie. Ter preventie van verstopping dient verder voorgezuiverd te worden om zwevende deeltjes te elimineren. Een extra chloreming kan verstopping door bacteriegroei voorkomen, maar levert echter wel ongewenste nevenproducten zoals gechlloreerde koolwaterstoffen.

Door de grotere stroomsnelheid en de kleinere dimensie van de nog resterende zwevende deeltjes kunnen die verder penetreren in het watervoerende pakket.

Er kunnen ook problemen optreden door menging van verschillende watersoorten bij injectie, door gasbellen en door verstopping van poriën tengevolge van zwellen van kleideeltjes zoals montmorilloniet (PETERS, 1984).

3.4. Injectie en het zoet-/zoutwatergrensvlak

Bij onderzoek in het waterwingebied van de EWR bleek dat infiltratieputten in een centrale puttenrij en omgeven door winputten de beste garantie bieden tegen verbrakking. Daarnaast moet met het oog op verbrakking de stijghoogte in alle winputten evenals

in alle infiltratieputten ongeveer gelijk moeten zijn. Er werden 3 scenario's gemodelleerd. Een eerste met 25% overinfiltratie had voor gevolg dat brak en zout water onder in het watervoerende pakket door de infiltratie voor een deel horizontaal wordt verdreven en voornamelijk buiten de grenzen van het systeem door de winputten wordt aangetrokken. Aan de buitenzijde van het systeem vormt zich een brakwateringring zodat stopzetten van infiltratie een snelle verzilting voor gevolg zal hebben (fig). In een tweede model wordt 115% water geïnfiltréerd van de beoogde winning, en wordt gedurende de eerste 2 jaar slechts 50% gewonnen waarna 100% wordt gewonnen. Ook hier is een brakwateringring duidelijk aanwezig, wat op termijn tot problemen kan leiden. Bovendien zullen grote schommelingen optreden in de grondwaterstand. Ook kan het verdrijven van de zoute kwel op deze plaats leiden tot een verhoogde zoute kwel op enige afstand van het systeem (fig). In een derde model wordt brak en zout water onttrokken recht onder de zoete winning. De onttrekking van zout water moet 40% bedragen van het zoet water (fig). Op deze lokatie werd afgezien van injectie (VAN DER EEM, 1990). Hiermee is duidelijk aangetoond dat vooraleer over te gaan tot injectie, vooral in gebieden waar zoet en zout water aanwezig is, eerst moet worden overgegaan tot grondig onderzoek.

3.5. Opbouw injectieputten

We zullen hier niet in detail de opbouw van de injectieputten bespreken, omdat dit in paragraaf 6 voor een aantal proefgevallen wordt besproken. We vermelden wel dat het belangrijk is tijdens de aanleg van de infiltratieput het circulerende water zo schoon mogelijk te houden. Sterke verontreiniging hiervan met klei- en slibdeeltjes, kan de poriën van de formatie blijvend verstopen en de levensduur van de put aanzienlijk bekorten (DE JONGE, 1990).

4. Chemische processen in de bodem bij passage infiltratiewater

4.1. Inleiding

De kwaliteitsverandering van oppervlaktewater na infiltratie wijkt af van die na injectie. Essentieel daarbij is het verschil in : aërobiegraad (het redox-niveau), kationenuitwisselingscapaciteit (CEC), samenstelling van het adsorptiecomplex (vooral K, Mg en NH_4), ijzersulfiden, organisch stofgehalte en oxydeerbaarheid daarvan, fijne deeltjes (slib- en kleifraction), en hydraulische karakteristieken als doorlatendheid en porositeit.

In tabel zijn de belangrijkste verschillen in processen van kwaliteitsverandering bijeengezet. Bij injectie treden als afwijking ten opzichte van de ondiepe passage vooral een minder effectieve filtratie, de oxydatie van pyriet, de netto desorptie van typisch anoxische en in het verleden uit zeewater geadsorbeerde elementen en netto adsorptie van Ca (STUYFZAND, 1989).

4.2. Enkele bodemprocessen in detail

4.2.1. Filtratie

Stoffen die aan zwevende stoffen gebonden zijn zullen in eerste instantie vooral door filtratie uit het infiltratiewater worden verwijderd. De slibminnende (sterk lutofiele) sporenelementen

(Hg, Cr, Pb, Be en Fe) worden in ruime mate weggevangen door filtratie terwijl de zwak lutofiele elementen (fig) aan deze immobilisatie ontsnappen. De aanvankelijk gefiltreerde elementen kunnen echter in tweede instantie terug gemobiliseerd worden door reductie (As, Fe en Mn) of complexvorming met in slib vrijkomende humus- en fulvinezuren (STUYFZAND,1989).

Bij infiltratie in Nederland (infiltratie met Rijnwater) is het bodemslib uit de vijvers sterk verrijkt aan Cd, Hg en Zn en PAK's, terwijl hexachloorbenzeen en lindaan in hoge concentraties voorkomen. De concentratieniveaus van duinzand op 1 m diepte zijn laag, doch verhoogd in ten opzichte van de oorspronkelijke toestand (STUYFZAND,1989).

Bij injectie migreren de zwevende deeltjes dieper in de water-voerende laag (verdere voorzuivering), wat waarschijnlijk tot een minder uitgesproken accumulatie zal leiden (STUYFZAND,1989).

4.2.2. Bacteriën en virussen

Filtratie is het belangrijkste verwijderingsmechanisme. Daarna worden ze geëlimineerd door biologische, chemische en fysische processen. Uit onderzoek blijkt dat bacteriën en virussen minder snel worden verwijderd uit het infiltratiewater wanneer : een sliblaag als eerste barriere ontbreekt, de stroomsnelheden hoog en variabel zijn, de temperatuur laag is, het gehalte aan humus- en fulvinezuren hoog is en een onverzadigde zone ontbreekt. De minimaal ondergronds af te leggen afstand van het water ligt bij voorkeur tussen 50 en 100 m (STUYFZAND,1989).

4.2.3. Redox-reacties en redox-milieus

De belangrijkste redox-reacties bij bodempassage zijn :

- de nitrificatie van aangevoerd ammonium;
- de oxydatie van organische stof die voorkomt in het infiltratiewater, als primair aanwezige vaste fase en als geaccumuleerde vaste fase;
- de oxydatie van ijzersulfiden.

Voortgaande bodempassage in een milieu steeds rijker aan oxydeerbare organische stof leidt tot consumptie van steeds zwakkere oxydatoren (respektievelijk O_2 , NO_3 en SO_4) en tot de produktie van o.a. Fe, Mn, NH_4 en eventueel CH_4 in anoxisch milieu (fig). STUYFZAND (1989) heeft een indeling van de redox-milieus van de ondergrond van duinen gemaakt na 15 jaar infiltreren, en dit voor respektievelijk infiltratie (fig) en injectie (fig). De grote diversiteit aan redox-milieus en de menging van water hieruit bij terugwinning kan leiden tot verstopping van winningsputten.

4.3. Waterkwaliteitsverandering bij infiltratie

4.3.1. Inleiding

Duininfiltratie verandert de natuurlijke toestand drastisch. Het in de duinen geïnfiltreerde rivierwater bevat namelijk aanzienlijke hoeveelheden voedingsstoffen die in de oorspronkelijke situatie beperkend waren voor de plantengroei. Als gevolg hiervan blijken in infiltratiegebieden nog slechts nutriëntenminnende plantesoorten voor te komen die een authentieke - min of meer

nutriëntenmijdende - vegetatie uitsluiten.

4.3.2. Aanvoer en belasting van nutriënten

Onderzoek in Nederland (VAN DIJK en BAKKER, 1984) wees uit dat voor de belangrijkste groeibeperkende nutriënten (orthofosfaat, ammonium, nitraat en kalium), de totale aanvoer in geïnfilterde duinen vele malen die van niet-geïnfilterde duingebieden overtrof.

In 3 gebieden werden analyses uitgevoerd van merkstofconcentraties. De gepresenteerde analyses betreffen fluoride, chloride en kalium (merkstoffen) en de macronutriënten orthofosfaat en nitraat.

Van de 3 geselecteerde merkstoffen is de concentratie in het infiltratiewater veel hoger dan in het neerslagwater. Slechts in 2 van de 18 onderzochte punten bleek sprake te zijn van een zwakke ontwikkeling van een regenwaterlens, waarbij de concentraties in het grondwater binnen 2 meter onder de grondwaterspiegel met de diepte toenamen van het niveau van neerslaggrondwater tot dat van infiltratiewater. In de andere putten blijkt sterke menging van de bovenste grondwaterlagen op te treden, veel sterker dan op grond van de dispersiecoëfficiënt van zuiver duinzand verwacht zou mogen worden.

Bij de macronutriënten zijn voorts fysisch-chemische mechanismen, als precipitatie, adsorptie aan bodemdeeltjes en biologische activiteit als absorptie door de vegetatie, denitrificatie, mineralisatie van belang. De verwachting is dat fosfaat in het grondwater vooral de eerste en stikstof vooral door de tweede set factoren wordt beïnvloed.

In de bovenste 2,5 meter van het grondwater bleek steeds dat meer dan 95% van de totale minerale stikstof uit nitraat bestaat. Heel lage waarden werden vooral stroomafwaarts van kwelplassen aangetroffen. Elders werden heel hoge waarden gevonden, veel hoger dan op grond van input-concentraties en verdunning verwacht mag worden. Het lijkt erop dat het met het infiltratiewater aangevoerde nitraat binnen 100 m van de infiltratieplas grotendeels verdwenen is. Te denken valt daarbij aan denitrificatie onder invloed van makkelijk oxydeerbaar organisch materiaal zoals aanwezig in het infiltratiewater zelf en in de veenbanken in de te doorstromen bodem.

De spreiding in de fosfaatgehalten blijkt zo groot dat geen significante afwijkingen van de verwachting op grond van alleen verdunning met neerslagwater kan worden aangetoond. Deze spreiding wordt vooral veroorzaakt door hoge piekwaarden in voorjaar en zomer.

Het grondwater in de meetraaien vertoonde plaatselijk hogere jaargemiddelde concentraties dan het infiltratiewater. Dit verschijnsel wordt geweten aan mobilisatie van fosfaationen vanuit de bodem naar het in de jaren 1977 en 1978 door verbeterde voorzuivering veel fosfaatarmere infiltratiewater.

4.3.3. Waterkwaliteit van kwelplassen

Op 2 van de 3 plaatsen bleken de kwelplassen tot 300 m van de infiltratieplassen meer kalium te bevatten dan op grond van aanvoer uit de atmosfeer mocht worden aangenomen. Per gebied was de overschrijding van de natuurlijke waarden minder naarmate het grondwater langzamer afstroomde en naarmate de afstand tot de voedende infiltratieplas groter was. Dit bevestigt het feit dat naarmate de afstromingsnelheid lager is en/of de afstand groter het aandeel neerslagwater in de bovenste meters grondwater groter is.

Voor nitraat kon op één plaats een gradiënt van afnemende concentratie bij toenemende afstand tot de infiltratieplassen worden aangetoond. Op de andere plaatsen kwam deze gradiënt niet voor, vermoedelijk omdat andere fysisch-chemische of biologische processen het verdunningsproces overheersen. Dit neemt echter niet weg dat de oorspronkelijke concentratie sterk wordt overschreden.

Op grond van de met de afstand tot de infiltratieplassen te verwachten toenemende verdunning met neerslagwater van het bovenste grondwater kon worden verwacht dat de kwelplassen die het dichtst bij de infiltratieplassen liggen, de hoogste fosfaatconcentraties vertonen. Op één plaats was dit niet zo. In beide andere gebieden is echter wel volgens verwachtingen een significante negatieve correlatie tussen afstand en concentratie gevonden.

Op één plaats was de afname van de concentratie met de afstand sterker dan verwacht op grond van alleen verdunning. Adsorptie aan de bodem en in mindere mate opname door de vegetatie kunnen hier een verklaring bieden voor de extra afname tijdens de afstroming. Op dezelfde plaats werd gedurende 2 jaar (76-78) een sterke toename van de orthofosfaatconcentraties gemeten tussen 100 en 300 m afstand, terwijl dichtbij een constant hoge concentratie werd waargenomen. Een en ander is een aanwijzing voor een zich in de bodem voortbewegend adsorptiefront dat geleidelijk steeds verder vanaf de infiltratieplassen voortschrijdt.

4.4.4. Conclusies

Uit onderzoek (VAN DIJK en BAKKER, 1984) blijkt dat infiltratie van oppervlaktewater ten behoeve van waterwinning van zeer grote invloed is op de voedingsstoffenhuishouding van de duinen.

- a. Bij infiltratie is de aanvoer van voedingsstoffen groter, tot tientallen maal zo groot, dan in een situatie zonder infiltratie.
- b. Ook bij vergaande voorzuivering van het infiltratiewater zal het voedingsstoffenaanbod veel hoger blijven dan onder natuurlijke omstandigheden.
- c. Het is duidelijk dat het optreden van regenwaterlenzen, drijvend op het infiltratiewater, een verschijnsel is dat nauwelijks optreedt. In het freatische grondwater vindt sterke menging van infiltratie- met neerslagwater plaats.
- d. Samenhangend met constatering c bestaat er een gradiënt van een met de afstand tot infiltratieplassen afnemende kaliumconcentratie in freatisch grondwater en kwelplaswater.
- e. In de infiltratiegebieden zijn de nitraatgehalten in zowel grond- als kwelplaswater in het algemeen aanzienlijk hoger dan in niet-geïnfiltreerde duingebieden. Bovendien is in de afge-

lopen jaren een sterke stijging van deze nitraatgehalten geconstateerd.

- f. In één van de drie bestudeerde gebieden is het orthofosfaatgehalte van het kwelplaswater zeer hoog en neemt recent nog sterk toe.

4.4.5. Bijkomend onderzoek

Een andere studie (VAN PUFFELEN, 1985) konstateerde volgende verschijnselen :

- reductie van sulfaat tijdens het zomer-halfjaar leidend tot de vorming van een ijzersulfide en oplossing van kalk en de oxydatie van ijzersulfide tijdens het winter-halfjaar tot sulfaat;
- een ad- en desorptie in slibarme zones van opgelost kiezelzuur, kalium, orthofosfaat en fluoride hetgeen leidt tot sterk vertraagde doorslag in vergelijking met die van chloride; hierdoor worden fluctuaties in gehalten van deze stoffen extra gedempt;
- het droogzetten van een infiltratiemiddel leidt tot een sterke orthofosfaat- en sulfaatmobilisatie als gevolg van de oxydatie van organisch materiaal en ijzersulfide;
- het wel of niet verwijderen van de bodemsliblaag heeft grote consequenties voor de kwaliteitsveranderingen.

Het in het water aanwezige zuurstof wordt behalve voor ammonium niet zozeer gebruikt voor de oxydatie van organische stoffen in water, maar voor reducerende stoffen in het te infiltreren pakket.

Er is een trendmatige verandering in de loop van de jaren te constateren voor sommige parameters, die veranderen onder invloed van de bodemsamenstelling met name nitraat. De nitraatreductie neemt langzaam af door uitputting van de reducerende stoffen in het zandpakket. Vermindering van de graad van anaërobie leidt tot een verminderde ijzeropname.

Zwevende stoffen, ijzer- en mangaanverbindingen worden in eerste instantie volledig verwijderd door filtratieprocessen, ammonium wordt omgezet in nitraat en orthofosfaat wordt geadsorbeerd.

Organische stoffen gemeten als TOC, kleur, KMnO_4 -verbruik en UV-extinctie worden voor enkele tientallen procenten in gehalten verlaagd door adsorptie en afbraak.

Typend voor het duingebied is een verhoging van het waterstof-karbonaat- en calciumgehalte als gevolg van een oplosreactie van schelpresten, die gecorreleerd kan worden aan een zuurproductie bij oxydatiereacties. Optredende anaërobie gaat gepaard met meer ijzer, mangaan en ammonium in water, terwijl lange reistijden vooral tot uiting komen in een verhoogd silicaatgehalte.

Bij duinpassage worden alle bacterie- en virussoorten en ook sporen met factoren in aantal verlaagd.

De verwijdering van zware metalen of sporenelementen is in het algemeen goed tot zeer goed te noemen afhankelijk van de stof en de concentratie waarin deze voorkomt.

De ophoping van deze elementen is alleen in slib en algen in de infiltratiemiddelen en in de eerste decimeters duinzand aantoonbaar. Doorslag of mobilisatie is voor geen enkel element geconstateerd met uitzondering van arseen.

Wat betreft organische microverontreinigingen zijn er geen algemeen geldende conclusies te trekken aangaande de verwijdering bij duinfiltratie (VAN PUFFELEN, 1985).

Onderzoek aan onze universiteit (DEVOS, 1984) bevestigt veel van

voorgaande waarnemingen. Het zuurstofgehalte in het water neemt snel toe, o.a. door de beluchting en de beweging door de onverzadigde zone. Gehalten aan fosfaat en organisch materiaal en de zuurgraad variëren weinig tijdens het proces. De stikstofverbindingen worden sterk verdund, het ijzer wordt nagenoeg volledig verwijderd uit het water. Ook het gehalte aan colibacillen neemt sterk af.

Tabel . - Evolutie van enkele kwaliteitsparameters gedurende het kunstmatig infiltratieproces

	ruwwater	bekken- water	herwonnen water (13,5 m)
geleidbaarheid ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	695	680	681
pH	7,2	7,3	7,3
org. stof koud (mg/l O_2)	0	0,02	0,08
org. stof warm (mg/l O_2)	1,94	1,94	1,76
O_2 (mg/l)	1,19	2-5	9,2
zwevende stof 105 °C (mg/l)	12,4	8,1	2,5
zwevende stof 600 °C (mg/l)	6,6	2,8	0,1
kleur zwevende stof	roodbruin	oranjebruin	geeloranje
% calcinatieverlies			
zwevende stoffen	47	65	96
$\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$	3,45	1,71	0,30
NH_4^+	3,23	3,02	1,24
Cl^-	95,72	96,30	97,30
NO_3^-	3,01	2,04	1,02
NO_2^-	sporen	0,01	0,01
PO_4^{3-}	0,73	0,73	0,73

De nitraatreduktie is grotendeels toe te schrijven aan reacties met zwavelverbindingen zoals pyriet waardoor het sulfaatgehalte toeneemt, ijzerhydroxide neerslaat en het grondwater verzuurt. Ook het ijzergehalte in het grondwater neemt toe. Denitrificatie kan echter ook plaatsvinden met organisch materiaal en dan treedt geen verzuring op van het water.

Door verzuring zal kationuitwisseling plaatsvinden tot verzadiging optreedt waarna kalk zal worden opgelost. Door neutralisatie van zuur met CaCO_3 zal de hardheid toenemen. Wanneer geen kalk aanwezig is wordt waterstofcarbonaat aangesproken. Wanneer geen kalk wordt aangevoerd zal de pH zover dalen dat zware metalen als Ni en Al in oplossing gaan. Dit Al kan oorzaak zijn van verstopping van winningsputten door reactie met water met een hogere pH.

(VAN BENNEKOM, 1991).

4.4. Waterkwaliteitsverandering bij injectie

VAN PUFFELEN (1985) konstateerde dat wat betreft de macroparameters bij injectie zuurstof en nitraat volledig wordt verwijderd en het sulfaatgehalte toeneemt. Dit laatste is in kwantitatieve zin verklaard door een aflopende oxydatie van de in het diepe zandpakket voorkomende ijzersulfiden.

De reaktieve, oorspronkelijke bestanddelen van het poreuze medium zullen tijdens kunstmatige aanvulling geleidelijk en soms ten dele worden uitgeloozd. Bij injectie gaat het vooral om uitloging van ijzersulfiden, de oxydatie van niet-gestabiliseerde organische stof, de oplossing van kalk, kationuitwisseling leidend tot desorptie van vooral Mg, NH₄, K, Fe en Mn, en desorptie van SiO₂ en PO₄ (STUYFZAND, 1989).

Uit proeven blijkt dat bij injectie vrijwel alle zuurstof in het infiltratiewater in eerste instantie verbruikt wordt voor oxydatie van pyriet (FeS₂).

Vanaf de start tot aan het stoppen van injectie kunnen bij waarnemingsputten fases worden onderscheiden met verschillend redox-niveau (STUYFZAND, 1989 en RUTTE, 1990) :

- Fase 1 : - er treedt kationuitwisseling op (zichtbaar als verhogingen van Mg, K en NH₄);
- desorptie van SiO₂ en PO₄;
- zuurstofniveau daalt tot minder dan 0,5 mg/l.
- Fase 2 : - totaal verbruik van O₂ en NO₃ als gevolg van oxydatie van pyriet en organische stof;
- samen met het oplossen van de kalk in de bodem leidt dit tot verhogingen in het water van met name de gehalten aan Ca, Fe, HCO₃, Mn en SO₄.
- Fase 3 : - doorbraak van NO₃ als gevolg van aflopende redox;
- reacties, vooral door uitputting van reactieve organische stof;
- tegelijkertijd daalt het gehalte in water van Fe en Mn.
- Fase 4 : - doorbraak van O₂ als gevolg van de uitloging van pyriet;
- dientengevolge daalt ook het gehalte aan SO₄ sterk;
- nitraat neemt vrijwel niet meer af in de bodem;
- het ijzergehalte neemt niet meer toe;
- het oplossen van kalk vindt alleen nog plaats als gevolg van de kalkagressiviteit van het geïnfiltreerde water.

Er werd waargenomen dat met toenemende verwijdering van infiltratieput, een bepaalde fase later aanvangt (RUTTE, 1990).

Waarnemingen in Nederland bij onderzoek naar injectie gaven volgende resultaten (waarnemingsput in fase 2) :

- Zn wordt vrijwel volledig uit het infiltratiewater verwijderd;
- Al, B, Ba, Be en Ni gedeeltelijk;
- Br en Se worden niet verwijderd;
- Va wordt meestal volledig verwijderd;
- As geeft een verhoogd gehalte waarschijnlijk als gevolg van oxydatie van pyriet waarin As als sporenelement voorkomt of de desorptie van bodemmateriaal;
- de trihalomethanen worden in fase 1 en 2 niet volledig verwijderd; in fase 4 wel;
- de aan actieve kool adsorbeerbare niet-vluchtige gehalogeneerde koolwaterstoffen (AOX) vertonen een gelijkaardig patroon;
- atrazine en simazine worden vrijwel niet verwijderd;
- de concentratie van fluorantheen (PAK) verandert weinig.

Algemeen kan verwacht worden dat bij injectie de eerste tientallen jaren zullen gekenmerkt zijn door anaërobe processen in de bodem (fase 1 en 2) en dat dientengevolge het onttrokken water anaëroob zal zijn, en verhoogde gehalten zal kennen aan Ca, Fe, HCO₃, Mn en SO₄. Organische verontreinigingen die in anaëroob

milieu worden afgebroken (trihalomethanen) zullen vrijwel volledig zijn verwijderd (RUTTE, 1990).

4.5. Regenwaterlens op geïnfiltreerd oppervlaktewater

Het voorkomen van een regenwaterlens in en naast gebieden met infiltratie is van belang voor de bewaking van en herstelmaatregelen leidend tot het natuurbehoud in deze gebieden. Een achteruitgang (bijvoorbeeld verzuivering) hoeft dan niet samen te gaan met hoge fosfaatconcentraties in het geïnfiltreerde oppervlaktewater. Andere oorzaken als grondwaterstandbeheersing, guanotrofieëring, luchtverontreiniging, betreding e.d. verdienen in dat geval grondige navorsing.

In hun onderzoek onderscheiden de auteurs 4 grondwatersoorten :

- neerslagwater met maximaal 10% Rijnwater bijgemengd (P);
- neerslagwater met 10-50% Rijnwater bijgemengd (PR);
- Rijnwater met 10-50% neerslagwater bijgemengd (RP);
- Rijnwater met maximaal 10% neerslagwater bijgemengd (R).

De auteurs konden op overtuigende wijze het voorkomen van een regenwaterlens (eigenlijk duinwaterlens) op geïnfiltreerd Rijnwater aantonen (fig). De grootte van de lens neemt toe naarmate men zich van de infiltratieplas verwijderd (STUYFZAND en STUURMAN, 1985).

5. Voorbehandeling infiltratiewater

5.1. Inleiding

Zowel grond- als oppervlaktewater bevat verontreinigingen. Deze verontreinigingen kunnen worden verdeeld in volgende zeven groepen (VAN SOEST en GRAVELAND, 1991) :

1. zwevende stoffen;
2. anorganische kationen;
3. anorganische anionen;
4. zware metalen;
5. organische stoffen:
 - reuk-, kleur- en smaakstoffen,
 - nutriënten (DOC/AOC),
 - toxische stoffen:
 - gehalogeneerde koolwaterstoffen,
 - pesticiden,
 - oplosmiddelen, enz
 - inhibitoren tegen corrosie en/of scaling
6. (micro)biologische organismen:
 - algen
 - hogere organismen
 - bacteriën
 - virussen
 - cysten
7. radio-actieve isotopen.

Hierna zullen we de verschillende groepen afzonderlijk bespreken en de wijze waarop deze stoffen kunnen worden verwijderd.

5.2. Verontreinigingen in grond- en oppervlaktewater

5.2.1. Zwevende stoffen

Zwevende stoffen zijn de belangrijkste oorzaak van verstopping

bij infiltratie en vooral bij injectie. De zwevende stof veroorzaakt in het algemeen een verstopping die lineair toeneemt met de in totaal geïnfiltreerde zwevende stof (OLSTHOORN, 1982). De hoeveelheid in het water aanwezige colloïden en zwevende stoffen wordt uitgedrukt in MFI (Membraan Filtratie Index).

De membraanfilterindex (MFI) wordt bepaald aan de hand van het verloop van de volumestroom in een test waarbij het te onderzoeken water onder 200 kPa (2 bar) overdruk over een millipore membraanfilter met poriën van 0,45 µm wordt geperst. De MFI is te beschouwen als maat voor de verstoppende eigenschappen van het water en maakt vergelijking van watersoorten alsmede zuiverings- en kwaliteitscontrole mogelijk.

Over het algemeen kunnen zwevende stoffen gemakkelijk verwijderd worden met :

- microzeven;
- coagulatie;
- snelfiltratie;
- ultrafiltratie;
- microfiltratie;
- langzame zandfiltratie.

5.2.2. Anorganische kat- en anionen en zware metalen

Ook deze stoffen vormen tegenwoordig geen probleem meer en kunnen verwijderd worden met :

- coagulatie;
- snelfiltratie, mechanisch en biologisch;
- ontharding;
- ontzouting met behulp van nanofiltratie en hyperfiltratie;
- (bipolaire) elektro-dialyse;
- multiflash verdamping.

5.2.3. Organische stoffen

Organische stoffen kunnen onder een grote verscheidenheid in het water voorkomen. De assimileerbare organische stoffen dienen zoveel mogelijk uit het infiltratiewater verwijderd te worden omdat ze biologische groei veroorzaken. Deze groep wordt bestreden met desinfectiemiddelen zoals chlooring. Andere organische stoffen zijn ongewenst omwille van reuk, smaak en kleur, terwijl andere toxisch, mutageen, carcinogeen of teratogeen zijn (gehalogeneerde koolwaterstoffen, pesticiden en oplosmiddelen). Ook deze stoffen worden beter eerst verwijderd uit het infiltratiewater en dit kan met behulp van oxydatie, adsorptie, biodegradatie, nanofiltratie en hyperfiltratie.

5.2.4. Microbiologische organismen

Vooral de ontwikkeling van algen vormt een probleem bij filtratie en/of injectie. Er zijn echter processen beschikbaar voor de verwijdering van deze organismen :

- coagulatie;
- snelfiltratie;
- langzame zandfiltratie;
- ultrafiltratie;
- microfiltratie;
- nanofiltratie;
- hyperfiltratie;

- desinfectie.

5.3. Verwijderingswijze

5.3.1. Inleiding

Zoals uit het vorige blijkt zijn vele methoden beschikbaar voor de verwijdering van ongewenste stoffen in het infiltratiewater. Een deel van de methoden is geschikt om verschillende groepen stoffen te verwijderen. We zullen ons in de beschrijving hierna dan ook beperken tot de belangrijkste verwijderingswijzen.

5.3.2. Coagulatie en flotatie

5.3.2.1. Inleiding

Flotatie is de techniek om vlokjes door aanhechting van fijne luchtbelletjes te laten opdrijven in water. De drijfslag kan gemakkelijk van het water worden gescheiden en apart als slib worden afgevoerd. De vlokjes worden van tevoren gevormd door dosering aan het te behandelen oppervlaktewater van een vlok-middel en door een aparte vlokvormingsstap (VAN PUFFELEN, 1990).

5.3.2.2. Vlokvorming

Meestal wordt gebruik gemaakt van een watervalmenging (bespaart chemicaliën) voor het vlokmiddel. Dit vlokmiddel is een ijzer- of aluminiumzout. In de vlokvormingsruimte waar ze 20 à 30 minuten verblijven, wordt het water konstant geroerd waardoor vlokken ontstaan die de verontreinigingen uit het water insluiten en die stevig genoeg zijn om door flotatie te worden verwijderd. De vlokvormingsenergie en de dimensies van de vlokvormingsruimten zijn essentiële ontwerpcriteria.

5.3.2.3. Flotatie

De essentie van de flotatie is de generatie van zeer kleine luchtbelletjes en de hechting ervan aan de te verwijderen vlokken.

In de flotatieruimten wordt het water in contact gebracht met saturatiewater, dit is water (meestal snelfiltraat) dat onder druk (4 à 8 bar) verzadigd wordt met lucht. Hierbij ontstaan kleine luchtbelletjes die zich aan de coagulatievlokjes gaan hechten. Gedurende een verblijftijd van 10 à 15 minuten zullen de verontreinigingen opdrijven en via een sliboverschot afgevoerd naar de slibontwatering. Er moet worden gekozen tussen dikkere drijfslagen met ingedikt en deels ontlucht slib, en dunne drijfslagen die met veel water worden afgevoerd maar die een betere kwaliteit van het flotaat garanderen.

5.3.2.4. Indikking

Het afgevoerde slib kan nu worden ingedikt waarbij het teruggewonnen water opnieuw in het proces wordt opgenomen.

5.3.2.5. Besluit

De kwaliteit van de flotatie wordt beoordeeld door het ijzer- en

aluminiumgehalte van het flotaat.

In Engeland werd op 5 lokaties flotatie vergeleken met bezinkingsinstallaties (per lokatie hetzelfde oppervlaktewater), en daaruit bleek dat flotatie op 4 van 5 plaatsen betere resultaten leverde (VAN PUFFELEN, 1990).

Bezinking geeft vaak problemen bij lage temperaturen en bij oppervlaktewater met lage zwevende-stofgehalten, veel algen en organische stoffen. Flotatie is onder die omstandigheden qua proces in het voordeel en heeft de voorkeur. Andere voordelen van flotatie zijn een geringer ruimtebeslag en een installatie die beter schoon te houden is. Een nadeel is de hoge energiekost, het chemicaliënverbruik en het restant ingedikt slib dat veelal zwaar verontreinigd is. Bovendien gaan hoge gehalten aan organische stoffen gepaard met schuimvorming bij dosering van het vlokmiddel.

5.3.3. Bezinkingsbekken

Water wordt in een bekken gebracht, waarbij eventueel een stof kan toegevoegd worden (bv FeSO_4 voor het terugdringen van het fosfaatgehalte). Door het water een tijd in dit bekken te laten verblijven zal een groot deel van de aanwezige verontreinigingen bezinken.

5.3.4. Snelfiltratie

Dit is de meest verspreide methode voor de voorbehandeling van infiltratiewater.

Water wordt in een bekken gebracht waarin een zandfilter werd aangebracht. Deze zandfilter kan op verschillende manieren worden opgebouwd maar bevat meestal fijn zand met een korrelgrootte die schommelt rond 1 mm, en ze is meestal ongeveer 1,2 m dik. Soms wordt deze zandlaag gecombineerd met een antracietlaag of een puimsteenlaag.

De infiltratiesnelheid bedraagt 1 tot 5 m/uur.

Periodiek moeten de snelfilters gereinigd worden door eerst met lucht en daarna met schoon water de afgevangen verontreinigingen uit te spoelen.

5.3.5. Beluchting

Het water kan over een cascade gebracht worden, waardoor het belucht wordt. Dit proces wordt meestal gecombineerd met een andere voorbehandeling. Door beluchting wordt ongeveer de helft van de koolstofdioxide uit het water verwijderd, en wordt Fe en Mn geoxydeerd.

6. Enkele voorbeelden van infiltratie en/of injectie

6.1. De duinwaterleiding van 's Gravenhage (DZH)

6.1.1. Infiltratie

In dit bedrijf wordt sedert 1955 oppervlaktewater geïnfiltreerd. Dit was nodig omdat de produktie de jaarlijkse natuurlijke infiltratie (5 miljoen m^3) overschreed.

Het infiltratiewater is afkomstig van een afgesloten arm van de

Maas. In deze arm wordt FeSO_4 toegevoegd waardoor het grootste deel van de fosfaten zijn verwijderd. Ook is reeds veel zwevende stof bezonken en wordt tot slot het water nog over een snelle zandfilter gebracht.

Het Maaswater wordt rechtstreeks naar de infiltratiebekkens geleid. Er zijn twee soorten bekkens (totaal 1 miljoen m^2) namelijk lage bekkens, 5 m boven zeeniveau en 1 tot 2 m diep, met een infiltratiesnelheid van 1 cm/uur en hoge bekkens, 10 m boven zeeniveau en 4 tot 5 m diep, met een infiltratiesnelheid tot 5 cm/uur.

Het dichtslibben van de bekkens is hier praktisch onbestaande. De grootste infiltratie gebeurt langs de bekkenranden en daar is de turbulentie (wind) zo groot dat het meeste slib naar benden valt. Ook komen deze randen soms droog en wordt het slib dan weggewaaid. De grootste hoeveelheid slib wordt dan ook afgezet naar het midden van de bekkens toe. Gedurende de 35 jaar dat hier infiltratie wordt toegepast heeft men slechts in enkele bekkens alle slib verwijderd, maar dat gaf geen zichtbare verhoging van de infiltratiesnelheid (mondelijke mededeling).

Op 60 tot 100 m van de bekkens zijn de pompputten aangelegd zodat het water ongeveer 60 dagen nodig heeft om de pompput te bereiken.

6.1.2. Injektie

Begin 1990 is gestart met injectie (lokatie Waalsdorp-Laag). De capaciteit bedraagt 4 miljoen m^3 per jaar. De hydrogeologie van het gebied is weergegeven in fig . Er is gekozen voor een lijnsysteem met 24 infiltratieputten en twee rijen met in totaal 22 onttrekkingsputten.

De infiltratieputten zijn geboord met een diameter van 1 m. Er werd gebruik gemaakt van drinkwater, waarbij de zwevende bestanddelen uit de boorspoeling zijn verwijderd. De filterlengte bedraagt circa 35 m (fig). De infiltratiesnelheid op de boorgatwand bedraagt 0,2-0,3 m/uur.

De onttrekkingsputten zijn geboord met een diameter van 0,6 m en hebben een kort filterlengte (15 m) om de risico's van brakwater-upconing te minimaliseren. De grondwaterstromingspatroon staat aangegeven in fig (DE JONGE, 1990).

Als infiltratiewater wordt gebruik gemaakt van hetzelfde Maaswater als bij infiltratie, maar dit water heeft nog volgende processen ondergaan : - flotatie (vlokmiddel AlSO_4)
- snelfiltratie (fig).

Er is dus gekozen voor een verregaande voorzuivering ($\text{MFI} < 3 \text{ s/l}^2$) om een minimale regeneratie van de infiltratieputten te bekomen. Tot zover verloopt alles naar wens.

De totale investeringskosten bedragen circa 3 gulden per m^3 jaar-capaciteit. De investerings- en exploitatiekosten voor oppervlakteinfiltratieprojecten liggen veel lager (HUIJBOOM, 1990).

6.2. EWR (Katwijk aan Zee)

6.2.1. Infiltratie

In de duinen waar water wordt gewonnen bedraagt de jaarlijkse natuurlijke infiltratie 3 miljoen m^3 /jaar. De drinkwaterproduktie bedraagt echter ongeveer 25 miljoen m^3 /jaar. Reeds vanaf 1940 werd gestart met infiltratie van water uit polderkanalen in

natuurlijke depressies in de duinen. Nu zijn er 52 zulke bekkens met een totale oppervlakte van 60 ha.

Veel van het geïnfilterde water loopt af naar een gegraven depressie waaruit het water rechtstreeks kan gepompt worden. De infiltratiesnelheid bedraagt 40 cm/dag. Dit kanaal dat op peil 0 NAP ligt, terwijl de infiltratiebekkens op peil 9 à 10 NAP liggen, is echter niet ideaal omdat het een open kanaal is en er terug verontreiniging (o.a. door de vogelpopulatie) kan optreden van het zuiver water. Een deel van het geïnfilterd water vult de zoetwaterlens aan. Dit water wordt teruggepompt bij zeer grote vraag of problemen met de infiltratie.

6.2.2. Injektie

Eind 1991 of begin 1992 zal hier worden gestart met injectie. Er werd gekozen voor injectie omwille van de extra zuivering die plaatsgrijpt in het duinzand en de vernietiging van alle bacteriën en virussen. Ook hier werd gekozen voor een doorgedreven zuiveringsproces van het infiltratiewater, om verstopping van de infiltratieputten tegen te gaan. Het schema van het zuiveringsproces staat in fig . De kostprijs voor de bouw van dit zuiveringsstation Lindenbergh, met een capaciteit van 2650 m³/h, bedroeg 24 miljoen gulden (bouwjaar 1988). Er wordt een lage MFI-waarde (3-5 s/l²) voor het infiltratiewater nagestreefd (DE MOEL et al., 1990). Wel zal het water in de infiltratieputten iedere dag gedurende 50 minuten terug opgepompt worden.

Er zijn 44 injectieputten voorzien, waarvan de konstruktie weergegeven wordt in fig . De infiltratiesnelheid zal 0,5 m/uur bedragen. Met 23 bestaande putten en 4 radiocollectorputten, dit zijn horizontale geboorde putten, zal het water teruggewonnen worden. De capaciteit van staat aangegeven in onderstaande tabel.

Tabel . Capaciteit van de injectiewinning EWR

INFILTRATIE	WINNING
4.700.000 m ³ per jaar	4.300.000 m ³ per jaar
600.000 m ³ per maand	750.000 m ³ per maand
20.000 m ³ per dag	32.000 m ³ per dag

De keuze van radiocollectorputten werd gemaakt omdat die aanpompen over een grote lengte en zo minder de zoet-/zoutwatergrens in een punt naar boven zuigen.

6.3. Gemeentewaterleidingen Amsterdam

6.3.1. Infiltratie

Deze winplaats beschikt over 40 infiltratiegeulen met een totale oppervlakte van 86 hectare. De ontwerpcapaciteit is 233.000 m³/d, wat circa 20% hoger is dan het gemiddelde van 192.000 m³/d, nodig om de gewenste jaarcapaciteit van 70 miljoen kubieke meter te halen. Deze overcapaciteit is in de zomermaanden van belang en maakt ook het snel aanvullen van de voorraden na calamiteiten mogelijk.

Het geïnfilterde rivierwater wordt voor circa 40% onttrokken door twaalf drainstelsels met een totale lengte van 9 kilometer.

Het overige infiltratiewater wordt samen met natuurlijk duinwater gewonnen door een stelsel van 17 kanalen ter lengte van 37,5 kilometer. Daarnaast bevinden zich in het diepe watervoerende pakket, veilig onder een goede kleilaag, 254 winputten. De onderwaterpompen kunnen samen 4.000 m³/h toevoegen aan de kanalen in het bovenduin.

De winplaats is uitgelegd op 83 miljoen m³/a, waarbij in een gemiddeld hydrometeorologisch jaar circa 3 miljoen kubieke meter diepwater, 10 miljoen kubieke meter bovenduinwater en 70 miljoen kubieke meter infiltratiewater nodig is. Dan treedt een spaar-effekt van ruim 2 miljoen kubieke meter in het diepe duin op, waardoor de vóór de kunstmatige infiltratie opgetreden verzilting langzaam wordt teruggedrongen.

Het schema van het bereidingsproces zoals het nu in ontwikkeling is bestaat uit 7 trappen (fig). De ozonisatie en filtratie door middel van actieve kool is nog niet aanwezig; wel wordt momenteel actieve poederkool gedoseerd voorafgaande aan de snelfiltratie (SCHUURMANS, 1991).

6.4. PWN te Castricum

6.4.1. Infiltratie

Sedert 1956 wordt voorgezuiverd water geïnfiltreerd in de duin-gebieden te Castricum en dit met behulp van kanalen. Het water wordt terug opgepompt met winningsputten.

6.4.2. Injectie

Vanaf eind 1989 werd gestart met injectie (lokatie Watervlak). Via 20 injectieputten wordt voorgezuiverd water (MFI < 10 s/l²) in een diepere watervoerende laag gebracht, en dat water wordt dan terug opgepompt via 12 winningsputten (fig). De injectieputten (boordiameter 1 m) hebben een lange filter (25 m), terwijl de winningsputten voorzien zijn van kortere filters om te voorkomen dat brak water wordt aangepompt. In tegenstelling tot Den Haag en Katwijk wordt dus minder gekozen voor verregaande voorzuivering, maar worden alle injectieputten regelmatig terug-gespoeld. De capaciteit van deze winning bedraagt 5 miljoen m³ per jaar; het gehele proces wordt automatisch bestuurd. De kostprijs van het geheel bedroeg 12 miljoen gulden.

7. Besluit

Infiltratie en injectie maakt gebruik van de bodem als :

- voorraadvat
- mengreservoir
- reusachtig natuurlijk filter.

Met behulp van infiltratie wordt water in de bovenste watervoerende laag gebracht, met behulp van injectie kan het water direkt op de gewenste diepte worden geïnfiltreerd, dwars door allerlei slecht doorlatende lagen heen. Het ingelaten water kan op een zekere afstand teruggewonen worden. Beide vormen zijn aan welbepaalde hydrogeologische factoren onderhevig.

Nader onderzoek van de geochemie is noodzakelijk vanwege de grote

voorspellingskracht voor kwaliteitsveranderingen bij bodem-
passage.

Ten opzichte van injectie is infiltratie : goedkoper, het water dient niet zo ver vorgezuiverd omdat verstoppingsverschijnselen niet zo snel optreden (voordelen) doch is meer onderhevig aan hervervuiling van het water en is ekologisch erg betwist (nadelen).

DE OUDE DUINEN EN DE MOEREN

1. Onderzoek van de grondwatervoorraden met behulp van een matematicus model

1.1. Inleiding

De Oude Duinen (Cabour) zijn een smalle strook duinafzettingen, waarin zich een zoetwaterzak bevindt. Onder deze zoetwaterzak komt nog brak en zout water voor. Ten zuiden van deze duinen bevinden zich De Moeren. In dit laag poldergebied komt het zout water op geringe diepte en op sommige plaatsen ("zoute kwel") zelfs aan de oppervlakte voor. Met behulp van boorgatmetingen werd een resistiviteitsprofiel opgesteld dat loopt het Overdekt Waddenlandschap ten noorden van de Oude Duinen tot het zuiden van De Moeren (fig).

Met behulp van een matematicus model werd onderzocht of men door een alternatieve manier van draineren de zoute kwel kan elimineren en de zoetwaterwinning vergroten, terwijl de winning van zoet water wordt opgedreven (VANDEWALLE, 1986).

1.2. Litologie

De doorsnede is noord-zuid gericht, loodrecht op de strekking van de duinen. Het model loopt vanaf het Overdekt Waddenlandschap, over de Oude Duinen en tot en met het noordelijk deel van De Moeren.

Het ondoorlatend substraat wordt gevormd door de Ieperiaanklei en bevindt zich op -30 m TAW in het Overdekte Waddenlandschap en de Oude Duinen (BOLLE, 1983). Aan de zuidrand stijgt deze echter snel tot -20 m TAW in De Moeren. Ze stijgt verder tot -5 m TAW in het zuiden van De Moeren (VAN HOUTTE, 1984). Op de Ieperiaanklei ligt een kwartaair middelmatig zand met grof schelpgruis, die vooral onder de Oude Duinen dik (15 m) en grof is en naar De Moeren toe dunner en fijner wordt. Deze afzetting wordt bedekt door middelmatige en fijne zanden die onderaan lemig zijn. Bovenaan komen klei- en leemlenzen voor onder het Overdekt Waddenlandschap en Moeren en veenlenzen onder het zuidelijk gedeelte van de Oude Duinen. De bovenste afzetting in het Overdekt Waddenlandschap en De Moeren bestaat uit 1 tot 2 m dikke lemige klei.

1.3. Verdeling van zoet en zout water

In de inleiding vermeldden we reeds het bestaan van een resistiviteitsprofiel. Uit dit profiel kan de verdeling van zoet en zout water in de verschillende afzettingen worden afgeleid. Onder de Oude Duinen bevindt zich een zoetwaterzak op een dunne laag zout water. Deze zak heeft een asymmetrische vorm wegens de lagere ligging van De Moeren ten opzichte van het Overdekte Waddenlandschap, waardoor een sterkere gradiënt naar De Moeren toe is. Deze heeft een opwaartse stroming van zout water tot gevolg, hetgeen aanleiding heeft tot een zoute kwel.

De afzettingen in De Moeren zijn grotendeels gevuld met zout water. In de lemige afzettingen komt er een brakwatertong voor. Bovenaan is er een dunne laag zoet water.

De afzettingen van het Overdekt Waddenlandschap bevatten onderaan zout water. Naar boven toe wordt het water geleidelijk zoeter,

zodat een groot deel van de afzettingen gevuld is met brak water. Op de plaats waar men zoet water pompt in de Oude Duinen is er een lichte stijging van zout en brak water.

1.4. Hydraulische eigenschappen

In het gebied werden 2 pompproeven uitgevoerd : één aan de zuidrand van de Oude Duinen (VAN HOUTTE, 1984) en één in het noordelijk deel van De Moeren (VANDEWALLE, 1986).

Voor de pompproef in de Oude Duinen werd voor de onderste kwartaire zandlaag een hoge hydraulische doorlatendheid van 125 m/d en een specifieke elastische berging van $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ berekend. De erboven liggende halfdoorlatende leemlaag had een verticale doorlatendheid van 0,0002 m/d.

Voor de pompproef in De Moeren werd voor de onderste kwartaire zandlaag een hydraulische doorlatendheid van 5,5 m/d en een specifieke elastische berging van $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ afgeleid. Voor de erboven liggende halfdoorlatende zandige leemlaag werd een verticale doorlatendheid van 0,0013 m/dag berekend.

1.5. Zoetwaterstijghoogten

Er werd een gemiddelde zoetwaterstijghoogte berekend voor alle beschikbare peilbuizen in het gebied (gedurende drie jaar werden maandelijks de stijghoogten opgemeten). Op basis van deze gegevens werd een kaart van gelijke stijghoogten (fig.) opgemaakt.

Aan de zuidrand van de Oude Duinen heerst een sterke gradiënt. Dit is een gevolg van het hoger peil van de watertafel in de Oude Duinen tegenover De Moeren.

Aan de Franse grens in de Oude Duinen en in het noordelijk deel van De Moeren blijkt er een sterke opwaartse stroming te bestaan.

1.6. Mathematisch model

1.6.1. Invloed van de waterwinning

In een eerste simulatie werd getracht de historische evolutie van de watervoerende laag te achterhalen, en dit vanaf de vorming van de Oude duinen tot en met de drooglegging van De Moeren. Vanuit deze situatie werd dan de invloed van de waterwinning in Cabour gesimuleerd, waarbij $100 \text{ m}^3/\text{jaar}$ per meter breedte van de doorsnede werd opgepompt gedurende 70 jaar. Men bekomt dan de huidige situatie. Figuur toont de resultaten van deze simulatie. Uit deze laatste simulatie blijkt dat de overgangszone tussen zoet- en zout water stijgt in de richting van de plaats van de pumping. De stroming naar De Moeren van het zout water onder de zoetwaterzak neemt toe. Het zoutgehalte in de opwaartse stroming onder het noordelijk deel van De Moeren verhoogt.

1.6.2. Alternatieve wijze voor draineren van het Overdekte Waddenlandschap, de Oude Duinen en De Moeren

BOLLE (1983) en VAN HOUTTE (1984) toonden aan dat door diepe artesische putten of het wegpompen van zout water uit de onderste zandlaag meer zout kon worden afgevoerd uit het gebied, dan met de klassieke drainagemethoden, waarmee voornamelijk het zoete neerslagwater wordt afgevoerd.

In deze simulatie wordt een batterij geplaatst over de ganse lengte van de doorlatende laag die zout water oppompt met een

totaal debiet van 450 m³/jaar per meter breedte van de doorsnede. Voor de winning van zoet water wordt onder de Oude Duinen 200 m³/jaar per meter doorsnede weggepompt.

In het gebied bedraagt de infiltratie jaarlijks 280 mm per jaar. Figuur toont de resultaten van deze alternatieve manier van draineren. Na een paar jaar treedt reeds een effectieve daling op van de overgangszone tussen zoet en zout water op. Deze daling is het zwakst ter hoogte van de zoetwaterwinning onder het noordelijk deel van de Oude Duinen en ter hoogte van de opwaartse stroming onder het noordelijk deel van De Moeren.

Een batterij sterke pompen onder de zuidelijke rand van de Oude Duinen zal de zoute kwel na ongeveer 10 jaar wegwerken.

Aan de zuidrand van de Oude Duinen bestaat er een sterke stroming van de Ringsloot naar de Konterdijk toe.

2. Invloed van kunstmatige infiltratie op de waterwinning

2.1. Inleiding

In vorig punt zagen we reeds dat wegpompen van zout water de kwaliteit van het grondwater in het watervoerend pakket zal doen verbeteren. Het weggepompte water zal steeds minder zout worden, zodat het op een bepaald ogenblik mogelijks geschikt zal zijn voor ontzilting door omgekeerde osmose.

Anderzijds zal door wegpompen van het zoute grondwater een deel van het reservoir vrijkomen. Dit vrije deel kan aangevuld worden door kunstmatige infiltratie. Deze kunstmatige infiltratie kan gerealiseerd worden door aanleggen van langwerpige kanalen. Dit geïnfiltrateerde water is dan terug beschikbaar voor grondwaterwinning.

2.2. Infiltratie

2.2.1. Omvang van de kanalen

De omvang van de infiltratie is afhankelijk van de grootte van het waterwingebied. Daar het hier gaat om een relatief klein gebied, lijken 2 kanalen van 500 m lengte en 12 m breedte een goede optie. Deze kanalen zouden zich dan respectievelijk in het noordelijk en het zuidelijk deel van het waterwingebied situeren. De totale infiltratie-oppervlakte bedraagt dan 12000 m².

2.2.2. Infiltratiesnelheid

Om verstoppingsverschijnselen te voorkomen moet de infiltratiesnelheid zo klein mogelijk gehouden worden. Dit betekent concreet een infiltratiesnelheid van 0,1 tot 0,2 m/dag.

2.2.3. Infiltratiecapaciteit

De infiltratiecapaciteit is gelijk aan de infiltratie-oppervlakte maal de infiltratiesnelheid. Deze bedraagt dus 1200 tot 2400 m³ per dag. Indien men enkel gedurende de winter infiltreert (zie punt 3) betekent dit dat 144.000 tot 288.000 m³ water kan geïnfiltrateerd worden. Voor iedere bijkomende maand die kan geïnfiltrateerd worden betekent dit een bijkomende infiltratie van 36000 tot 72000 m³ per maand.

Verbreiding van de kanalen zal de infiltratiecapaciteit weinig

beïnvloeden omdat de infiltratie zich voornamelijk afspeelt aan de randen van de kanalen.

De infiltratiecapaciteit kan wel met een derde verhoogd worden door het aanleggen van een bijkomend kanaal.

3. Beschikbaar water in De Moeren

3.1. Inleiding

In De Moeren zijn momenteel 4 pompstations operationeel :

- Elektriek-Zuid met een capaciteit van 60 m³/min;
- De Seine met een capaciteit van 70 m³/min en voorzien van 2 vijzels;
- Baudouin met een capaciteit van 35 m³/min;
- St-Karelsmolen met een capaciteit van 30 m³/min.

Men beschikt over betrouwbare gegevens van de pompuren voor de periode 1975 tot 1991. Door verwerking van deze gegevens werd getracht een schatting te maken van de hoeveelheid water die men in een gemiddeld jaar ter beschikking heeft.

3.2. Maandelijks afvoer

Voor de periode 1975-1990 werd voor de maanden oktober tot en met april, de hoeveelheid afgevoerd water (Q_t) voor die maand (x-as) uitgezet tegenover de neerslag (P_t) in die maand (y-as). De grafieken zijn voorgesteld in de figuren t.e.m. . Per maand werd dan de richtingscoëfficiënt berekend, namelijk

$$P_t = a Q_t \quad (1)$$

waarbij P_t : neerslag (L/T);
 a : richtingscoëfficiënt (L⁻²);
 Q_t : afvoer (L³/T).

De totale oppervlakte die gedurende die periode werd gedraineerd is dan gelijk aan

$$O = 1 / a \quad (2)$$

waarbij O : totaal gedraineerde oppervlakte (L²).

De totale te draineren oppervlakte van het gebied bedraagt 2000 ha, en bestaat uit de Belgische Moeren en een deel van de Buitenmoeren. De afvoercoëfficiënt van het gebied wordt uitgedrukt door

$$d = 100 \cdot (O / O_t) \quad (3)$$

waarbij d : afvoercoëfficiënt;
 O_t : de totale te draineren oppervlakte (L²).

In onderstaande tabel werd de afvoercoëfficiënt voor elke maand uitgezet voor de periode 1975-1990, en ook voor de perioden 1975-1980, 1981-1985 en 1986-1990. Op deze manier bekomen we een beeld van de variatie van deze coëfficiënt met de tijd.

Tabel . Afvoercoëfficiënt per maand voor De Moeren.

Maand	1975-1990		1975-1980	1980-1985	1986-1990
	O (km ²)	d (%)	d (%)	d (%)	d (%)
Januari	12,05	60,24	63,93	62,26	54,76
Februari	13,72	68,58	93,80	69,34	48,78
Maart	7,59	37,96	38,63	38,58	36,68
April	6,46	32,27	33,80	33,89	29,83
Oktober	2,84	14,20	7,65	24,24	7,2
November	4,67	23,36	21,09	31,92	19,89
December	9,42	47,08	52,91	51,65	35,71

Analoog werd voor de periode december 1975 tot maart 1990 de afvoercoëfficiënt berekend voor de ganse winter (december tem maart) gedurende elk jaar. Men bekomt als resultaat :

$$O = 10,21 \text{ km}^2$$

$$d = 51,05 \%$$

wat betekent dat gedurende de winter gemiddeld de helft van de neerslag wordt weggepompt.

Uit de vergelijkingen (1) en (2) volgt dat

$$Q_t = O P_t \quad (4)$$

zodat we voor elke maand en voor de ganse winter de afvoer kunnen berekenen aan de hand van de hoeveelheid neerslag die gedurende deze maand is gevallen.

Tot besluit van deze uiteenzetting kan men stellen dat :

- de grootste afvoer gebeurt gedurende de maanden januari en februari; deze afvoer is vrij regelmatig in januari terwijl ze gedurende februari eerder onregelmatig is;
- in de maanden december, maart en april vertoont de afvoer een regelmaat;
- de afvoer van de maanden oktober en november is klein.

3.2. Neerslag en opgepompte debieten

Voor de maanden december tot en met maart werd voor een periode van 31 jaar (1960-1990) de probabiliteitsverdeling van de neerslag voor elke maand en voor de gezamenlijke wintermaanden berekend (figuren tem). Uit deze informatie en in combinatie met de berekende drainagecoëfficiënten kan men de kans berekenen die er bestaat om gedurende een welbepaalde maand een minimumdebiet te bereiken. In onderstaande tabel worden deze berekeningen weergegeven voor 5%, 10%, 20%, 50%, 80%, 90% en 95%.

Tabel . Minimumdebiet (10⁶ m³) per maand.

Maand	95%	80%	50%	20%	5%
Jan	0,06	0,36	0,66	0,98	1,29
Feb	0,00	0,25	0,55	0,85	1,13
Mar	0,04	0,22	0,39	0,55	0,72
Dec	0,08	0,32	0,58	0,84	1,07
Winter	1,02	1,55	2,14	2,66	3,27

Uit deze berekening kan men besluiten dat minimum iedere winter

1 miljoen m³ uit De Moeren beschikbaar is, en dat gedurende de helft van de winters de hoeveelheid beschikbaar water uit De Moeren de 2 miljoen m³ overschijdt.

Voor de periode 1981-1990 werden de dagelijkse gegevens van alle pompstations verwerkt. Daaruit blijkt dat afwijkingen op de afvoercoëfficiënt veroorzaakt worden door :

- periode van konstante regenval (oktober 1981) waardoor gedurende een lange periode een grote hoeveelheid water wordt weggepompt en waarbij de minste regenval na zo'n periode (december 1981) het wegpompen van water vereist;
- na een periode van sneeuwval (begin januari 1985) in combinatie met vorst, waardoor die sneeuw een periode bleef liggen, moet na de dooi gedurende een zekere periode zeer veel water worden weggepompt (eind januari - begin februari 1985); gedurende de vorstperiodes zelf wordt slechts weinig water afgevoerd;
- in september (1984) kan een extreem hoge neerslag (160 l/m²) het wegpompen van water noodzaken;
- bij hevige regenbuien in mei en juni (1981) kan het soms nodig zijn water weg te pompen, vooral als de voorbije winter nat was.

4. Kwaliteit en voorzuivering van water uit de Ringsloot

4.1. Kwaliteit

Volgens de recentste gegevens van de Vlaamse Milieu Maatschappij bedraagt de Biotische Index van de Ringsloot in 1990, 7 (goed) in het zuiden van De Moeren tot 5 (matig) in het noorden van De Moeren. Het water zal echter moeten worden behandeld vooraleer het kan worden geïnfiltreerd.

In 1982 gebeurden continue metingen van de temperatuur en de geleidbaarheid op de Molenvaart nabij de Sint-Karelsmolen. Op figuur zijn deze metingen uitgezet. Er dient opgemerkt dat de gemeten geleidbaarheid G werd omgezet naar de geleidbaarheid G_R bij de temperatuur van het grondwater (20°). Uit deze figuur blijkt de lagere geleidbaarheid en dus lager zoutgehalte in de winter. Dit wordt verklaard door het feit dat in de winter meer water infiltreert (lage evapotranspiratie) en via de draineringsbuizen dus enkel zoet water wordt afgevoerd, terwijl in de zomer geen water infiltreert en dus meer zout water wordt afgevoerd. Het totale zoutgehalte TDS van het water gedurende maart schommelt rond 4000 mg/l.

4.2. Voorzuivering dmv een bezinkingsbekken

Wanneer in de omgeving een zandwinningsput zou komen, kan het water uit de Ringsloot in deze put worden overgepompt. Door rond deze put pompputten te steken kan op een eenvoudige manier voorgezuiverd water worden verkregen. Dit opgepompt water moet echter wel een beluchting en snelfiltratie ondergaan voor het kan worden geïnfiltreerd.

Er kunnen echter wel problemen optreden wanneer in de omgeving van deze put zout water in de ondergrond zou voorkomen. Dan zou ook eerst dit zoute water dienen weggepompt te worden.

4.3. Voorzuivering dmv andere methoden

Zonder bezinkingsbekken dient overgegaan te worden tot een andere voorzuivering van het infiltratiewater. Deze zal bestaan uit flotatie en snelfiltratie.

5. Begroting van de omvang van het bezinkingsbekken

Men gaat ervan uit dat 1 miljoen m³ water wordt afgevoerd gedurende de winter (95% kans). Daarvan wordt 300.000 m³ gedurende de winter zelf geïnfiltreerd in Cabour. Er rest dus nog 700.000 m³ water die moeten gestockeerd worden.

Ofwel gaat men een bekken bouwen dat onderaan en aan de wanden wordt versterkt (eventueel ondoorlatend) en waaruit men rechtstreeks het te infiltreren water zal pompen. Uit dit bekken zal een hoeveelheid water verdampen gelijk aan de totale oppervlakte (in m²) vermenigvuldigd met een halve meter. Indien men dus gedurende het ganse jaar wil infiltreren mag de totale oppervlakte van het bekken niet groter zijn dan 200.000 m² om minimum 600.000 m³ infiltratiewater te behouden. De wanden van dit bekken dienen versterkt te worden omdat door rechtstreeks pompen van water uit het bekken de wanden worden verzwakt en geleidelijk zullen afkalven.

Een andere optie bestaat erin om op een afstand van de omtrek van het bekken batterijen aan te leggen, via dewelke men dan het gestockeerde water uit het bekken pompt. Het voordeel hiervan is dat de wanden van het bekken niet hoeven versterkt te worden, en dat de bodem in de omgeving van het bekken een bijkomende stockage biedt. Een nadeel is dat het waterpeil in het bekken slechts enkele meters kan worden gevarieerd. Voor een bekken in De Moeren bedraagt de variatie van dit waterpeil 2 m, waarvan 0,5 m verdampt. De berging van water in de omgeving is moeilijk te berekenen maar zal klein zijn. Bijgevolg zal de oppervlakte van het bekken gelijk moeten zijn aan 600.000 m³ (totaal volume te stockeren water) gedeeld door 1,5 m (waterdikte die kan terugwonnen worden) dus 400.000 m³.

6. Besluit

In Cabour kan 144.000 tot 288.000 m³ zoet water worden geïnfiltreerd gedurende de winter, indien het zout water uit het onderste gedeelte van de watervoerende laag wordt weggepompt (ca 400.000 m³/jaar). Op die manier zou na een tiental jaar de ganse watervoerende laag met zoet water zijn gevuld.

Het infiltratiewater kan in de winter worden gehaald uit de Ringsloot (De Moeren). Wanneer een bezinkingsbekken in de onmiddellijke omgeving zou beschikbaar zijn, kan de infiltratie verhoogd worden met 36.000 tot 72.000 m³ per maand door stockage van water gedurende de winter in dit bekken.

Wanneer water via batterijen langs een bekken wordt opgepompt is een beluchting en snelfiltratie voldoende als voorzuivering. In het andere geval dient overgegaan tot flotatie en snelfiltratie vooraleer te infiltreren.

De kwaliteit van het water uit de Ringsloot is matig. Het totale zoutgehalte (4000 mg/l) is aan de hoge kant.

AVEKAPELLEKREEK

1. Inleiding

De Avekapellekreek is een zandige kreekrug ter hoogte van Avekapelle die zich uitstrekt in oostelijke (Rousdamme) en zuidelijke (Eggewaartskapelle) richting (fig). De geologie en de hydrogeologie werden uitvoerig bestudeerd door L. ZEuwTS (1991).

2. Geologie van de Avekapellekreek

2.1. Inleiding

Aan de hand van boringen en geofysische boorgatmetingen (fig) werd de litologie van het gebied bestudeerd. De litologische structuur wordt aangegeven op drie doorsneden : een lengtedoorsnede doorheen het oostelijk deel van de kreek, tussen Avekapelle en Pervijze (fig), een dwarsdoorsnede doorheen dit deel van de kreek te Avekapelle (fig) en een lengtedoorsnede doorheen het zuidelijk deel van de kreek, tussen Avekapelle en Zoetenaai (fig).

2.2. Tertiair

De top van het tertiair substraat, bestaat uit stijve grijsblauwe Ieperiaanklei en vertoont een sterk golvend patroon.

In het noordelijk en centrale deel van de kreek varieert de top tussen -10 en -17 m TAW met smalle en diepe insnijdingen tot -27. In het zuidelijk deel komt de top voor tussen -5 en -10 met diepe insnijdingen tot -14.

2.3. Kwartair

De dikte van de kwartaire afzettingen bedraagt 12 tot 30 m; in het noordelijk deel zijn de kwartaire afzettingen het dikst.

In de kwartaire afzettingen worden van boven naar onder volgende litologische eenheden onderscheiden (ZEuwTS, 1991) :

- K10 vaste weinig zandhoudende klei, meestal een weinig veenhoudend (Subatlanticum)
- K9 zandhoudende klei tot klei, meestal veenhoudend en soms schelphoudend (Subatlanticum)
- K8 schelphoudend fijn tot middelmatig zand dat soms een weinig klei- en veenhoudend kan zijn (Atlanticum tot Subatlanticum)
- K3 plastische klei, sporadisch dunne leemlensjes en veenhoudend (ouderdom niet gekend)
- K2 plaatselijke klei, weinig veen en schelpgruis (Holstein)
- K1 grinthoudend zand tot grint (ouderdom niet gekend).

In de Avekapellekreek wordt de laag K10, die over het algemeen 1 m dik is, overal aangeboord. Aan de randen van de kreek rust ze meestal op de laag K9 die tot 3 m dik kan worden.

Het grootste deel van de Avekapellekreek wordt opgevuld met de zandige afzettingen van de laag K8. De dikte bedraagt in het algemeen 15 m, maar plaatselijk zelfs meer dan 25 m. In de laag K8 onderscheiden we van boven naar onder :

- K8,4 fijn zand met schelpfragmenten
- K8,3 middelmatig zand met veel schelpfragmenten

K8,2 fijn zand met schelpfragmenten (K8,2,1) tot kleihoudend
fijn zand (K8,2,2)

K8,1 fijn zand met veel schelpfragmenten.

Aan de randen van de kreek kan plaatselijk de laag K3 voorkomen.
De lagen K2 en K1 worden slechts zeer sporadisch aangetroffen.

3. Hydrogeologie

3.1. Inleiding

De Ieperiaanklei vormt, al of niet samen met de lagen K2 en K3, het zeer slecht doorlatend substraat. Daarboven rust de doorlatende laag K8, waarin een slecht doorlatende laag kan voorkomen. De watervoerende laag wordt afgesloten door de slecht doorlatende lagen K9 en K10.

3.2. Pompproef

3.2.1. Inleiding

De geologische gesteldheid op de plaats van de pompproef wordt weergegeven in figuur . Het ondoorlatend substraat wordt gevormd door de laag K3 die rust op het tertiair substraat. Hierop rusten twee doorlatende en twee slecht doorlatende lagen; de eerste drie behoren tot de litologische eenheid K8, de bovenste slecht doorlatende laag tot de eenheid K10.

Er werd een dubbele pompproef uitgevoerd waarbij respectievelijk werd gepompt over de ganse dikte van de onderste doorlatende laag (PP1) en over de grofste afzetting van de bovenste doorlatende laag (PP2). Er bevonden zich peilbuizen in de aangepompte lagen en juist onder de watertafel. De interpretatie gebeurde met een numeriek model.

3.2.2. Resultaten van de pompproef

De horizontale doorlatendheden van de aangepompte lagen k_{h1} en k_{h2} bedraagt respectievelijk 11,4 en 19,9 m/d; de specifieke elastische berging van deze lagen S'_{A1} en S'_{A2} , respectievelijk $5,6 \cdot 10^{-5}$ en $1,6 \cdot 10^{-4}$. De hydraulische weerstand tussen de onderste doorlatende laag en de slecht doorlatende laag bedraagt 26 dagen; deze van de onderste zone van de bovenste doorlatende laag bedraagt 5,5 dagen. Deze parameters werden het nauwkeurigst bepaald.

De overige parameters werden minder nauwkeurig afgeleid. Het zijn de horizontale doorlatendheden van de niet aangepompte lagen, respectievelijk 2,4 m/d (L2) en 4,7 m/d (L3, L5 en L6), en de specifieke elastische berging van deze lagen, respectievelijk $1,7 \cdot 10^{-4}$ (L2), $5 \cdot 10^{-5}$ (L3) en $1 \cdot 10^{-4}$ (L5 en L6). De hydraulische weerstand tussen de bovenste doorlatende laag en de watertafel ligt in de orde van 100 dagen; de bergingscoëfficiënt nabij de watertafel is zeer gering.

In tabel worden deze gegevens vertaald naar de reële bouw van het hydrografisch reservoir. Hieruit blijkt het grover faciës van K8,3 ten opzichte van K8,4 en in mindere mate K8,2.

3.3. Stijghoogtewaarnemingen

ZEUWTS (1991) heeft het algemeen stromingspatroon (figuur)

afgeleid uit de kaart die de gemiddelde zoetwaterstijghoogte voorstelt. Hij onderscheidde in de Avekapellekreek 4 afzonderlijke gebieden die hydrogeologisch van elkaar gescheiden zijn door afwateringskanalen :

- een westelijk gebied, tussen Proostdijkvaart en de Kromme gracht;
- een centraal gebied, tussen de Kromme gracht en de Oude Aa-Vaart;
- een oostelijk gebied ten oosten van de Oude Aa-Vaart;
- een zuidelijk gebied, ten zuiden van de Kromme gracht, in het zuiden begrensd door de Leerzevaart.

Deze gebieden, behalve dit ten oosten van de Oude Aa-Vaart vertonen eenzelfde grondwaterstromingspatroon gekenmerkt door een afvloeï naar de omringende poelgebieden met laag grondwaterpeil enerzijds en afwatering naar de kanalen anderzijds. Het verschil tussen de stijghoogten in de Avekapellekreek en deze in de poelgebieden en de afwateringskanalen is vrij gering, respektievelijk 0,5 en 0,9 m. De stijghoogteverschillen zijn het grootst in het zuidelijk gedeelte. De grondwatersnelheid kan geraamd worden (gemiddelde doorlatendheid van de kreeksedimenten 8 m/d en porositeit 0,4) op ca. 15 m/jaar.

In het gebied ten oosten van de Oude Aa-Vaart is er vermoedelijk een grondwaterstroming van de poelgronden naar dit gebied toe en zo naar de Aa-Vaart.

Uit de waarnemingen bleek ook dat in perioden met hoge stijghoogten de grondwatersnelheid steeg tot ca. 40 m/jaar en in perioden met lage stijghoogten daalde tot ca. 2 m/jaar.

Gedurende droge zomers wordt het normale grondwaterstromingspatroon grondig verstoord :

- grondwaterstroming van de poelgronden naar de Avekapellekreek door de betere afwatering (hogere doorlatendheid), de grotere aanwezigheid van drainagebuizen en de hogere evapotranspiratie (suikerbiet, maïs en tarwe) van de kreek ten opzichte van de poelgronden (weilanden);
- infiltratie vanuit de kanalen naar het kreekgebied.

4. Grondwaterkwaliteit in de Avekapellekreek

4.1. Inleiding

Met behulp van de gemiddelde formatiefactor (4,17) afgeleid uit de zandige kreeksedimenten, werden de formatieresistiviteiten bepaald waarmee de verschillende zoetwaterpercentages overeenstemmen (ZEUWTS, 1991). In onderstaande tabel worden deze waarden weergegeven.

Zoetwaterpercentage	TDS (mg/l)	w (11°C) (m)	t (m)
100	375	26,67	112,00
99	658	15,20	63,85
95	1.791	5,58	23,45
84	4.907	2,04	8,56
50	14.538	0,69	2,89
1	28.417	0,35	1,48
0	28.700	0,35	1,46

Steunend op de klassificatie van DE MOOR en DE BREUCK (1969) werd een benaming voor de verschillende grondwaterklassen ingevoerd:

- zoetwaterpercentage groter dan 95 % : zoet water;
- zoetwaterpercentage tussen 95 en 84 % : matig brak water;
- zoetwaterpercentage tussen 84 en 50 % : brak tot zeer brak water;
- zoetwaterpercentage kleiner dan 50 % : zout water.

Aan de hand van de uitgevoerde boorgatmetingen werden drie doorsneden opgesteld doorheen de Avekapellekreek (figuren t.e.m.). Ter verduidelijking werden enkele gegevens bekomen uit de analyse van grondwaterstalen (relatieve ionenverdeling, absolute concentraties van de voornaamste ionen en totaal zoutgehalte TDS) op de doorsneden voorgesteld.

4.2. Verdeling zoet-zout water

De Avekapellekreek is gekenmerkt door de aanwezigheid van grondwater met een uiteenlopend zoutgehalte.

De invloed van de infiltratie van neerslagwater blijkt duidelijk. Er heeft zich een zoetwaterlens gevormd met een gemiddelde dikte van 12 m. Onder het zoet water komt een overgangszone brak water voor. De diepte waarop dit brakke water voorkomt is net als de dikte ervan sterk wisselend. Het brakke water kan tot op het tertiair substraat reiken of kan overgaan in zout water.

De omliggende lager gelegen poelgronden zijn gekenmerkt door het voorkomen van brak of zout grondwater nabij de watertafel. Er heeft slechts beperkte infiltratie van zoet water plaatsgehad.

In het gebied tussen Avekapelle en Pervijze is aan de basis van het kwartaire grondwaterreservoir overal zout water aanwezig dat ter hoogte van afwateringskanalen (Kromme gracht) op geringere diepte kan voorkomen als gevolg van de opwaartse grondwaterstroming op deze plaatsen. In de omgeving van Avekapelle is de zoetwaterlens vrij continu (14 tot 16 m dik) maar neemt in oostelijke richting geleidelijk in dikte af om in de omgeving van de Oude Aa-Vaart nagenoeg volledig te zijn verdwenen. Daar is de infiltratie minder uitgesproken wat ook tot uiting kwam in de grondwaterstroming.

De zoetwaterlens is over de ganse breedte van de Avekapellekreek nagenoeg even sterk ontwikkeld. Enkel in noordelijke richting wordt ze minder omvangrijk.

In de poelgronden ten zuiden van de Avekapellekreek tot aan het Zoetenaiegeleed wordt geen zout water aangetroffen als gevolg van de grondwaterstroming vanuit de kreek naar het Zoetenaiegeleed.

Ten noorden van de kreek is er wel een bruuske overgang tussen zoet en zout water en dit kan worden verklaard door de Kromme gracht die het ondergronds afgevoerd zoet water onmiddellijk opvangt.

In het gebied ten zuiden van de Kromme gracht (figuur) wordt geen zout water aangetroffen.

5. Verwijdering van het zoute basiswater in de kreekgebieden

5.1. Inleiding

Bij de hiernavolgende simulaties valt de doorsnede samen met de litologische doorsnede op figuur en de kwaliteitsdoorsnede op figuur .

De totale lengte van de doorsnede bedraagt 3600 m, de breedte 60 m.

5.2. Winning zoet grondwater uit het kreekgebied

Er werd een winning van zoet grondwater gesimuleerd waarbij gedurende de eerste 10 jaar $0,17 \text{ m}^3/\text{d}$ per meter breedte van de doorsnede (95 % van de nuttige neerslaghoeveelheid) werd gewonnen, en in de daaropvolgende 40 jaar $0,2 \text{ m}^3/\text{d}$ (120 %) per meter breedte van de doorsnede werd gewonnen. De stijghoogte in de poelgebieden wordt konstant gehouden (+2,1).

Uit deze simulatie (figuur) blijkt dat wanneer het pompdebiet de nuttige neerslag niet overschrijdt, er geen invloed is op de grondwaterkwaliteitsverdeling, en dat slechts onmiddellijk onder de pompputten een kleine stijging van het grensvlak tussen zoet en zout water kan worden vastgesteld.

Na verhogen van het pompdebiet wordt de beweging van het grensvlak geaccentueerd en bereikt het zout water na 40 jaar de pompputten aan de randen van de kreek. Een pumping met een debiet groter dan de voeding staat gelijk met het verdwijnen van de zoetwatervoorraad in de krekken.

Er wordt op gewezen dat slechts met een beperkt debiet wordt gepompt, want $0,2 \text{ m}^3/\text{dag}$ per meter breedte van de doorsnede betekent (breedte van de kreek loodrecht op de doorsnede ca 3000 m) slechts $220.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$.

5.3. Winning zoet grondwater uit kreekgebied na verwijderen van het zoute water aan de basis van de kreeksedimenten

Bij deze simulatie wordt het grondwaterpeil in de poelgronden terug op +2,1 gehouden.

In de kreek wordt zoet water kunstmatig geïnfiltreerd met behulp van drie infiltratiekanalen op peil + 2,8 dwz 0,4 m hoger dan het huidig grondwaterpeil in de kreek.

Het zout basiswater wordt op 4 plaatsen (juist boven het tertiair substraat) weggepompt, waarvan 2 aan de rand van de kreek als barrière tegen zout water afkomstig uit het poelgebied. Het grootste debiet wordt gepompt uit de centraal gelegen putten. In totaal wordt $1,35 \text{ m}^3/\text{d}$ per meter breedte van de doorsnede weggepompt of $1.480.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ over de totale breedte van de Avekapellekreek.

In de topzone van de kreeksedimenten wordt zoet grondwater gewonnen (6 putten) met een totaal debiet van $0,65 \text{ m}^3/\text{d}$ per meter breedte van de doorsnede of $700.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ over de totale breedte van de Avekapellekreek. Het grondwaterpeil tussen de infiltratiekanalen wordt nooit lager dan +2,0.

Uit de resultaten van de simulatie blijkt dat reeds na 10 jaar het grootste gedeelte van het zout basiswater verdwenen is; na 20 jaar pompen is alle zout water uit de kreek verdwenen. Door de afwateringskanalen en pompputten aan de rand van de kreek wordt al het toestromend zout water uit de poelgebieden verwijderd.

Aanvankelijk is de winning van zoet grondwater beperkt tot de pompputten in de topzone van de kreeksedimenten, en dus tot een debiet van $0,65 \text{ m}^3/\text{d}$ per meter breedte van de doorsnede. Na 20 jaar dient enkel nog het debiet dat aan de randen van de kreek wordt opgepompt afgevoerd, en bestaat het overige opgepompte water volledig uit zoet grondwater. Deze bedraagt nog eens 1,7

m³/d per meter breedte van de doorsnede, wat betekent dat na 20 jaar een totaal debiet van 1.860.000 m³/jaar uit de Avekapellekreek kan gewonnen worden.

Deze waarden hebben enkel betrekking voor het deel van de Avekapellekreek tussen Avekapelle en Pervijze. Wordt ook het deel ten zuiden van Avekapelle in rekening gebracht dan kan het winningsdebiet aanzienlijk worden verhoogd.

6. Infiltratiekanaal dwars door de Avekapellekreek

Op basis van alle gegevens verzameld door ZEUWTS (1991) wordt nu voorgesteld in het centrale deel van de Avekapellekreek één lang west-oost gericht infiltratiekanaal aan te leggen die de Kromme gracht verbindt met de Oude Aa-Vaart. Langs beide zijden van dit infiltratiekanaal moet een batterij pompputten worden aangelegd die toelaten het geïnfiltreerde water terug op te pompen.

Terzelfdertijd moet het zout water uit het diepe grondwaterreservoir worden weggepompt.

De aanvoer van zoet water naar het infiltratiekanaal kan gebeuren via de Kromme gracht of via de Oude Aa-Vaart, of via een aan te leggen pijpleiding. Gedurende de wintermaanden zal geen bijkomende toevoer van zoet water noodzakelijk zijn omdat de Kromme gracht en de Oude Aa-Vaart dan voldoende water afvoeren. De meest voor de hand liggende oplossing voor de aanvoer van zoet water naar de Avekapellekreek is de IJzer. .

5. Alternatieven voor de aanvoer van water uit de IJzer

5.1. Inleiding

Voor de aanvoer van zoet water uit de IJzer naar Avekapelle kunnen de bestaande waterlopen worden gebruikt of kan een aanvoerleiding worden aangelegd van het afnamepunt op de IJzer tot aan Avekapelle. Ook wanneer men de bestaande waterlopen verkiest dient een korte aanvoerleiding aangelegd vanaf het afnamepunt op de IJzer tot aan de beek.

In wat volgt worden beide alternatieven besproken. Voor wat het gebruik van de bestaande waterlopen betreft bestaan er twee mogelijkheden :

- aanvoer van water via de Bampoelbeek, de Wijdouwbeek en de Oerense beek naar de Kromme gracht;
- aanvoer van water via de Grote Beverdijkvaart, de Zaadgracht, de Oostkerkevaart en de Aavaart.

Er zou dagelijks 12500 m³ water moeten aangevoerd worden. Er wordt gesteld dat de IJzer een debiet moet hebben van 75.000 à 100.000 m³ per dag vooraleer men tot onttrekking kan overgaan.

Deze waarden zijn wel bediscussieerbaar daar men te Nieuwpoort de IJzer op peil kan houden door minder water naar de zee af te voeren. Bovendien heeft het Ministerie van Openbare Werken plannen opgemaakt voor de verdere verbreding van de IJzer tussen Nieuwpoort en de A18, zodat het bergend vermogen van de rivier vergroot wordt. Voorts wordt gedacht aan een nieuwe stuwsluis te Nieuwpoort. Dit alles vanwege het overstromingsgevaar van de IJzer (VANHOVE et al., 1990).

5.2. Aanvoer via Bampoelbeek-Wijdouwbeek-Oerense beek-Kromme gracht

5.2.1. Inleiding

Een eerste alternatief voor de aanvoer van zoet water naar de streek van Avekapelle bestaat erin, in de buurt van Elzendamme water uit de IJzer via een persleiding over te pompen naar de Bampoelbeek. Via deze beek, de Wijdouwbeek en de Oerense beek zal het water dan op een natuurlijke manier afvloeien naar de Kromme gracht ten noorden van Oeren vanwaar het verder stroomt in de richting van Avekapelle.

Er dient hier wel opgemerkt te worden dat tussen de Oerense beek en de Kromme gracht recent een dam werd aangebracht door het Polderbestuur om zoveel mogelijk water in het gebied te houden.

5.2.2. Debiet van de IJzer te Elzendamme

In hoofdstuk werd het debiet van de IJzer te Diksmuide berekend. Op basis van deze gegevens werd de probabiliteitsverdeling van het debiet te Elzendamme (geschat hydrografisch bekken ongeveer 470 km²) berekend, waaruit werd afgeleid wat het dagelijks debiet is voor 10%, 25%, 50%, 75%, 90% en 95% van de gevallen per maand van het jaar.

Tabel . Minimumdebiet (10³ m³/dag) per maand

Maand	95%	90%	75%	50%	25%	10%
JAN	23	121	268	427	586	733
FEB	35	121	258	402	547	682
MAR	82	159	278	405	532	652
APR	-	18	103	192	282	367
MEI	-	-	48	107	166	222
JUN	-	-	21	84	146	204
JUL	-	-	4	103	203	297
AUG	-	-	6	57	178	156
SEP	-	-	25	73	121	166
OKT	-	-	14	156	298	431
NOV	-	-	106	236	367	490
DEC	68	148	274	407	541	667

Uit deze tabel blijkt dat te Elzendamme water uit de IJzer voldoende beschikbaar is gedurende :

- de wintermaanden december tot en met maart in meer dan 90% van de gevallen;
- in de maanden april en november in meer dan 75% van de gevallen;
- in de overige maanden, op uitzondering van augustus, in 50% van de gevallen.

5.2.3. Aanvoer uit het Plateau van Izenberge en de Polder

De waterlopen die hier gebruikt worden voor het transport van water van de IJzer naar Avekapelle voeren ook water uit hun bekkens af. We onderscheiden 3 hydrografische bekkens :

- de Kromme gracht tussen de Bergenvaart en de Lovaart beslaat 975 ha;
- de Kromme gracht tussen de Lovaart en de Proostdijkvaart

- beslaat 1100 ha;
- het bekken van de Bampoelbeek, Vinkembeek, Scheibeek en Wiedouwbeek beslaat 1850 ha.

Dit betekent dat naar analogie met De Moeren, elke winter (december tem maart) minimum (95% van de winters) volgende hoeveelheid water wordt afgevoerd :

- 500.000 m³ door de Kromme gracht tussen de Bergenvaart en de Lovaart;
- 500.000 m³ door de Kromme gracht tussen de Lovaart en de Proostdijkvaart;
- 1.000.000 m³ door de Bampoelbeek, Vinkembeek, Scheibeek en Wiedouwbeek.

Er moet dus gedurende de wintermaanden geen water uit de IJzer worden aangevoerd.

5.2.4. Hydrografie

De totale lengte van de Bampoelbeek, de Wijdouwbeek en de Oerense beek tot de Kromme gracht bedraagt 9 km. De oorsprong van de Bampoelbeek bevindt zich ten NW van Gijverinkhove op +14 m TAW. Waar de Bampoelbeek het Plateau van Izenberge aansnijdt is het een smalle beek met een relatief groot verval : in de eerste 850 m daalt ze 4 m, de daaropvolgende 500 m daalt ze 2 m en de volgende 3 km hebben een verval van 1 m per kilometer. De gemiddelde breedte bedraagt 1 m, de gemiddelde diepte 1 m.

Bij het aansnijden van de polders wordt de Bampoelbeek, die eerst overgaat in de Wijdouwbeek en later in de Oerense beek geleidelijk breder. De Wijdouwbeek en de Oerense beek zijn gemiddeld 2,5 m breed en 2 m diep. Het verval in de polders bedraagt ongeveer 2 m.

De lengte van de Kromme gracht vanaf zijn samenloop met de Oerense beek tot de Avekapellekreek bedraagt ca 4,5 km. De breedte bedraagt gemiddeld 3 m, en de diepte 2 tot 3 m.

De dagelijkse aanvoer van 12500 m³ water via dit tracé zou betekenen dat het peil in de beken gemiddeld 0,45 tot 0,5 m stijgt. Wegens de geringe diepte van de Bampoelbeek in het Plateau van Izenberge kan dit gedurende periodes van hevige regenval zeker een risico op overstroming meebrengen. Daarom zou in het aan te leggen systeem zeker moeten worden voorzien dat de toevoer van water uit de IJzer ten allen tijde kan worden afgebroken bij het overschrijden van een vast te leggen crisis peil.

5.3. Aanvoer via de Grote Beverdijkvaart, de Zaadgracht, de Oostkerkevaart en de Aavaart.

5.3.1. Inleiding

De Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening (VMW) onttrekt sedert 1991 water uit de IJzer tussen Fintele en Reningebrug, en transporteert dit water naar een oude zandwinningsput in Nieuwkapelle via de Grote Beverdijkvaart.

De bedoeling is nu via een overeenkomst met de VMW water uit de IJzer af te nemen op hetzelfde punt en het ook via de Grote Beverdijkvaart te vervoeren tot Nieuwkapelle. Vanaf Nieuwkapelle kan het verder via de Grote Beverdijkvaart tot Oudekapelle, dan

via de Zaadgracht tot Lampernisse, via de Oostkerkevaart richting Oostkerke en tenslotte via de Oude Aa-Vaart richting de Avekapellekreek.

5.3.2. Aanvoer van water uit de IJzer

Zoals uit vorig punt ook blijkt moet gedurende de winter geen bijkomend water worden onttrokken omdat de Grote Beverdijkvaart voldoende water afvoert uit de omliggende polders. Gedurende de andere maanden zal water uit de IJzer moeten worden onttrokken. De hoeveelheid water die kan onttrokken worden zal moeten worden overeengekomen met de VMW. Hoedanook zal dagelijks ongeveer 12.500 m³ moeten worden aangevoerd.

5.3.3. Hydrografie

De beken waarlangs het water wordt aangevoerd lopen door de polders. Er is nagenoeg geen verval. De breedte van de beken bedraagt grotendeels 4 tot 6 m en de diepte varieert van 2 tot 3 m.

De afstand van Nieuwkapelle tot de Avekapellekreek bedraagt ongeveer 11 km. Het beek in de peilen zou 0,2 tot 0,25 m stijgen.

KOKSIJDE

1. Inleiding

Volgens de verziltingskaart (W. DE BREUCK et al., 1974) bevindt het zout water zich ter hoogte van het vliegveld te Koksijde op een diepte van 20 tot 25 m.

Het vliegveld is gelegen op een kreekrug van het Oudland. De bodem bestaat uit klei die in de diepte overgaat in zand.

In het kader van deze studie werden boringen uitgevoerd langs een NW-SE profiel op het vliegveld, en langs een profiel loodrecht op dit eerste profiel.

Er werd geboord tot op de Ieperiaanklei (Yc), waarna telkens enkele boorgatmetingen werden uitgevoerd. Daarna werd een peilbuis aangebracht in de zandlaag boven de Ieperiaanklei en op 5 plaatsen werd nog een peilbuis aangebracht in de bovenste zandlaag.

2. Geologie

2.1. Inleiding

De Paleozoïsche afzettingen bevinden zich hier op -255 mTAW. De top van het Krijt is gesitueerd op een diepte van -175 mTAW. Het Landeniaan bestaat uit zand en zachte klei en is ca 55 m dik.

Het Ieperiaan bestaat hier uit stijve grijsblauwe klei en is hier gemiddeld 105 m dik. Ze helt zacht in noordoostelijke richting.

2.2. Kwartair

De dikte van de kwartaire afzettingen bedraagt 25 tot 30 m, en neemt toe in de richting van de zee. In de kwartaire afzettingen worden volgende litologische eenheden onderscheiden (MAHAUDEN et al., 1982; BOLLE et al., 1990):

B' weinig tot sterk leemhoudend fijn zand met leem- en kleilenzen; slecht gesorteerd

B fijn zand, lokaal weinig leemhoudend; middelmatig goed gesorteerd

C' weinig tot sterk leemhoudend fijn zand met slechte

sortering tot zandhoudende leem en leem
C heterogeen middelmatig zand met veel schelpen; middelmatig gesorteerd.

2.3. Lithostratigrafisch profiel

De twee lithostratigrafische profiele zijn voorgesteld in de figuren en . Van boven naar onder onderscheiden we aldus :

- de laag B'; 2 m dik in het noorden tot 4 m in het zuiden en bestaande uit polderklei, leem en/of leemhoudend zand;
- de laag B; 6,5 tot 7,5 m dik in het noorden tot 4,5 in het zuiden; naar het westen en oosten toe neemt deze laag toe in dikte tot respectievelijk 10,9 en 9,2 m; ze bestaat uit schelphoudend fijn zand, dat leemhoudend kan zijn. De basis komt voor tussen 2 en 2,5 m TAW op uitzondering en van ganse zuiden en oosten van het studiegebied waar ze op 0 m TAW voorkomt;
- de laag C'; 8 tot 10,4 m dik en bestaande uit leem, zandhoudende leem en/of leemhoudend zand; de afzetting wordt zandiger

naar het zuiden, oosten en westen; de basis komt voor van -12,6 tot -14,5 m TAW op uitzondering van SB7 waar ze op -16 voorkomt;

- de laag C; verdwijnt naar het oosten; 10,8 m dik in het noorden; wordt dunner naar het zuiden waar het minimaal 5 m dik is; ze bestaat uit middelmatig tot grof zand met veel tot zeer veel schelpfragmenten en wordt naar het zuiden toe iets minder grof;
- de laag Yc waarvan de top voorkomt tussen -24,1 m TAW in het noorden en -19,3 m TAW in het zuiden; naar het westen toe zakt deze top tot -25,1 m TAW; naar het oosten toe stijgt ze tot -17,72 m TAW.

3. Hydrogeologie

3.1. Inleiding

De Ieperiaanklei vormt het zeer slecht doorlatend substraat. Daarboven worden de goed doorlatende lagen C en B afgewisseld door de weinig doorlatende lagen C' en B'.

3.2. Stijghoogtemetingen

Op 26 september werd de stijghoogte gemeten. Deze stijghoogten werden omgerekend tot zoetwaterstijghoogten, teneinde informatie te bekomen over de grondwaterstroming.

De berekening van de zoetwaterstijghoogte gebeurde op basis van de formule (fig) :

$$h_f = (h_i - Z_k) \frac{\rho_i}{\rho_f} + Z_k$$

waarbij h_f de zoetwaterstijghoogte (m TAW)

h_i de gemeten stijghoogte (m TAW)

Z_k de plaatshoogte van de filter (m TAW)

ρ_i de dichtheid van het water in de stijgbuis (kg/m^3)

ρ_f de dichtheid van zoet water, namelijk 1000 kg/m^3 .

h_i en Z_k zijn gekend.

ρ_i wordt berekend met de formule (VAN DAM, 1977) :

$$\rho_i = 1000 + 0,8054 \cdot 10^{-3} \text{ TDS} - 0,0065(t - 4 + 0,2214 \cdot 10^{-3} \text{ TDS})^2$$

Het totale zoutgehalte TDS kan worden berekend op basis van de gemeten resistiviteit ρ_w van het water in de peilbuis (LEBBE en PEDE, 1986) :

$$\text{TDS} = 10000 / \rho_w (11^\circ\text{C})$$

In onderstaande tabel zijn alle resultaten verzameld van deze berekeningen.

Tabel . Berekening van de zoetwaterstijghoogten

Peil-	ρ_w	TDS	ρ_i	Z_k	h_i	h_f
-------	----------	-----	----------	-------	-------	-------

SB1 F1	14,51	689	1000,2	-23,074	+3,124	+3,129
SB1 F2	12,47	802	1000,3	-3,560	+3,305	+3,307
SB1 F3	4,58	2183	1001,4	-8,465	+3,337	+3,354
SB2 F1	9,15	1093	1000,5	-20,170	+3,005	+3,017
SB2 F2	9,47	1056	1000,5	-4,157	+2,681	+2,684
SB3 F1	8,29	1206	1000,6	-18,265	+2,782	+2,795
SB3 F2	11,50	870	1000,3	0,366	+2,478	+2,479
SB4 F1	13,38	747	1000,2	-17,599	+2,889	+2,893
SB4 F2	11,84	845	1000,3	-3,153	+2,582	+2,584
SB5 F1	13,99	715	1000,2	-19,900	+3,092	+3,097
SB5 F2	12,07	829	1000,3	-2,275	+3,012	+3,014
SB6 F1	1,06	9434	1007,4	-17,725	+2,555	+2,705
SB7 F1	10,64	940	1000,4	-21,603	+2,965	+2,975
SB8 F1	9,72	1029	1000,4	-15,804	+2,413	+2,422

3.3. Grondwaterstroming

Er is een duidelijke grondwaterstroming waar te nemen vanuit de duinen in de richting van de polders. Ter hoogte van SB1 infiltreert water vanuit de bovenliggende zandlaag naar de diepere zandlaag, maar verder zuidwaarts is er een opwaartse stroming vanuit de diepere zandlaag naar de bovenste zandlaag.

4. Resistiviteitsprofiel

4.1. Inleiding

Met behulp van de LN-opstelling werden 2 resistiviteitsprofielen uitgezet. Er wordt gebruik gemaakt van de LN-opstelling omdat deze het best de resistiviteit van het poriënwater weergeeft. Er worden 9 groepen grondwater onderscheiden (LEBBE et al., 1990) op basis van een gemiddelde formatiefactor van 2,7. De formatiefactor F is de verhouding van de formatieresistiviteit t tot de poriënwaterresistiviteit t_w (ARCHIE, 1942) :

$$t = F \cdot t_w$$

In onderstaande tabel worden de verschillende resistiviteitsgroepen weergegeven.

Tabel . Relatie tussen de resistiviteit van het sediment en van het poriënwater (DE MOOR en DE BREUCK, 1969 - LEBBE et al., 1990).

Resistiviteitsgroepen	Resistiviteit sediment (m)	waterkwaliteitsgroepen	Resistiviteit water (m)	TDS (mg/l)
-----------------------	------------------------------	------------------------	---------------------------	------------

G	>160	zeer zoet	>60	<200
W	160-80	zoet	60-30	200-400
V	80-40	matig zoet	30-15	400-800
F	40-20	zwak zoet	15-7,5	800-1600
A	20-10	matig brak	7,5-3,75	1600-3200
B	10-5	brak	3,75-1,88	3200-6400
C	5-2,5	zeer brak	1,88-0,94	6400-12800
S	2,5-1,25	matig zout	0,94-0,47	12800-25600
Z	<1,25	zout	<0,47	>25600

4.2. NW-SE resistiviteitsprofiel

Dit profiel start in het noorden in de overgangszone tussen de duinen en de polders en loopt in zuidelijke richting verder de polders in.

Men konstateert dat de kwaliteit van het poriënwater in de doorlatende lagen B en C in het noorden matig zoet is, met een smalle lens zwak zoet water onderaan beide zandlagen en boven de onderste zandlaag. Onderaan de onderste zandlaag komt een smalle lens matig brak water voor.

Naar het zuiden toe neemt de dikte van het matig zoete water geleidelijk af tot het volledig verdwijnt (tussen SB3 en SB6) terwijl de dikte van het zwak zoete water toeneemt.

Vanaf SB3 wordt het zoet water meer en meer verdrongen door brak water tot het volledig verwijnt. In de buurt van SB6 is de onderste doorlatende laag C volledig gevuld met brak tot zeer brak water, de bovenste doorlatende laag is gevuld met matig brak tot brak water.

De kwaliteit van het poriënwater in de slecht doorlatende laag C' is brak in het noorden en wordt matig brak tot zwak zoet naar het zuiden toe. In de buurt van SB6 is deze laag volledig gevuld met zeer brak tot zout water.

4.3. W-E resistiviteitsprofiel

Dit profiel start in het westen en loopt ongeveer parallel aan de duinen in westelijke richting.

Men konstateert dat het poriënwater in het westen in alle lagen van dezelfde kwaliteit (matig zoet) is.

Naar het oosten toe konstateert men dat de kwaliteit van het poriënwater in de doorlatende lagen B en C in het noorden matig zoet is, met een smalle lens zwak zoet water onderaan beide zandlagen en boven de onderste zandlaag. Onderaan de onderste zandlaag komt een smalle lens matig brak water voor.

In de slecht doorlatende laag C' komt matig brak tot zwak zoet water voor.

Helemaal in het oosten van dit profiel neemt de kwaliteit van het poriënwater af van boven (zoet) naar onderen toe (zwak zoet). Gans onderaan bevindt zich een smalle lens matig brak water.

5. Grondwaterkwaliteit

5.1. Inleiding

Naast de resistiviteitsmetingen van het grondwater, werden alle

peilputten nog eens bemonsterd (26 en 27 september 1991) en geanalyseerd. In onderstaande tabel staan de resultaten van deze analyses aangegeven.

Tabel . Resultaten van de grondwateranalyses.

Peil-put	pH	Geleid- baarheid $\mu\text{S/cm}$	Fe (mg/l)	temp ($^{\circ}\text{C}$)	Cl_2 (mg/l)
SB1 F1	7,2	720	1,0	13,4	113,6
SB1 F2	7,2	894	1,2	13,2	149,1
SB1 F3	7,9	>2000	0,35	13,6	639,0
SB2 F1	7,6	1015	0,6	14,1	262,7
SB2 F2	7,4	1170	1,0	14,8	142,0
SB3 F1	7,6	1327	0,35	14,7	312,4
SB3 F2	7,3	910	1,1	14,9	85,2
SB4 F1	7,4	596	0,6	15,0	113,6
SB4 F2	7,3	926	0,35	14,8	92,3
SB5 F1	7,3	768	0,8	14,6	113,6
SB5 F2	7,0	683	1,3	14,6	71,0
SB6 F1	7,2	>2000	0,7	14,7	4118,0
SB7 F1	7,2	1027	0,7	13,5	191,7
SB8 F1	7,6	1079	1,15	13,5	227,2

De analyseresultaten bevestigen de gemeten resistiviteiten van de grondwaters en bevestigen tevens het resistiviteitsprofiel, op uitzondering van het grondwater uit SB1 F3 dat zoeter is dan aangegeven op het profiel. Het betreft hier een fijnkorrelige afzetting, en in werkelijkheid is de formatiefactor kleiner dan 2,7 waardoor in het resistiviteitsprofiel een te hoog zoutgehalte wordt toegekend aan deze formatie.

Het ijzergehalte van het grondwater ligt wel aan de hoge kant en overtreft overal de drinkwaternorm (0,2 mg/l Fe).

Het chloridegehalte is in het onderste deel van de doorlatende laag C aan de hoge kant en overschrijdt lichtjes de drinkwaternorm (250 mg/l Cl).

PROFIEL OOSTDUINKERKE

1. Inleiding

Volgens de verziltingskaart (W. DE BREUCK et al., 1974) bevindt het zout water zich ten zuidoosten van Oostduinkerke op een diepte van 20 tot 25 m.

Men heeft op deze plaats boringen uitgevoerd langs een NNW-SSE profiel gaande van de duinen (Monobloc) tot het kanaal Nieuwpoort-Veurne. Er werd steeds geboord tot op de Ieperiaanklei (Yc), waarbij telkens enkele boorgatmetingen werden uitgevoerd. Er werd een peilbuis aangebracht in de zandlaag juist boven de Ieperiaanklei, en een peilbuis in de bovenste zandlaag onder de oppervlakteklei.

De bodem van het noordelijk deel van dit profiel bestaat uit zand (duinen), terwijl buiten de duinen enkel kleigrond voorkomt, die dieper overgaat in lichter materiaal.

2. Geologie

KOKSIJDE

1. Inleiding

Volgens de verziltingskaart (W. DE BREUCK et al., 1974) bevindt het zout water zich ter hoogte van het vliegveld te Koksijde op een diepte van 20 tot 25 m.

Het vliegveld is gelegen op een kreekrug van het Oudland. De bodem bestaat uit klei die in de diepte overgaat in zand.

In het kader van deze studie werden boringen uitgevoerd langs een NW-SE profiel op het vliegveld, en langs een profiel loodrecht op dit eerste profiel.

Er werd geboord tot op de Ieperiaanklei (Yc), waarna telkens enkele boorgatmetingen werden uitgevoerd. Daarna werd een peilbuis aangebracht in de zandlaag boven de Ieperiaanklei en op 5 plaatsen werd nog een peilbuis aangebracht in de bovenste zandlaag.

2. Geologie

2.1. Inleiding

De Paleozoïsche afzettingen bevinden zich hier op -255 mTAW. De top van het Krijt is gesitueerd op een diepte van -175 mTAW. Het Landenian bestaat uit zand en zachte klei en is ca 55 m dik.

Het Ieperiaan bestaat hier uit stijve grijsblauwe klei en is hier gemiddeld 105 m dik. Ze helt zacht in noordoostelijke richting.

2.2. Kwartair

De dikte van de kwartaire afzettingen bedraagt 22,7 tot 27,1 m. In de kwartaire afzettingen worden volgende litologische eenheden onderscheiden (MAHAUDEN et al., 1982; BOLLE et al., 1990) :

A goed gesorteerd middelmatig zand (duinzand)

B' weinig tot sterk leemhoudend fijn zand met leem- en kleilenzen; slecht gesorteerd

B fijn zand, lokaal weinig leemhoudend; middelmatig goed

- gesorteerd
- C' weinig tot sterk leemhoudend fijn zand met slechte sortering tot zandhoudende leem en leem
 - C heterogeen middelmatig zand met veel schelpen; middelmatig gesorteerd.

2.3. Lithostratigrafisch profiel

Het lithostratigrafisch profiel is voorgesteld in figuur .
Van boven naar onder onderscheiden we aldus :

- de laag A komt enkel voor in het noordelijk deel van het profiel waar ze 6 m dik is en uitwigt naar het zuiden toe;
- de laag B'; gemiddeld 5 tot 8 m dik op uitzondering van de omgeving van SB6 en SB2 waar ze dunner is;
- de laag B komt enkel voor in het noorden en het zuiden van het profiel waar de laag maximaal respectievelijk 12 en 12,5 m dik is;
- de laag C' komt niet voor in het noordelijk deel van het profiel; de dikte neemt toe in zuidelijke richting tot maximaal 14,8; ter hoogte van SB2 is deze laag echter slechts 4 m dik;
- de laag C komt overal voor en varieert in dikte van 4 tot 7,3 m.
- de laag Yc waarvan de top voorkomt tussen -18,15 m TAW en -21,2 m TAW.

3. Hydrogeologie

3.1. Inleiding

De Ieperiaanklei vormt het ondoorlatend substraat. Daarboven bevindt zich een goed doorlatende zandlaag (C). In het noorden van het profiel komt daarop een andere doorlatende zandlaag voor (B); in het zuiden een slecht doorlatende klei-, leem- en/of veenhoudende laag (C').

Daarbovenop komt dan over het ganse profiel een slecht doorlatende klei-, leem- en/of veenhoudende laag (B') voor. Ter hoogte van SB6 en SB2 bevindt zich wel een doorlatende zandlaag (B) tussen de twee slecht doorlatende lagen (B' en C'). In het noorden komt bovenaan nog goed doorlatend zand (A) voor.

3.2. Stijghoogtemetingen en grondwaterstroming

In maart werden de stijghoogten gemeten die werden omgerekend tot zoetwaterstijghoogten.

In het studiegebied komen twee waterscheidingskammen voor : één in de duinen (Monobloc) en één ten noorden van het Langeleed parallel aan deze beek (figuur).

Het water infiltreert in de duinen en stroomt vandaar in het bovenste gedeelte van de watervoerende laag naar de polders ten noorden (Groenendijk) en ten zuiden. Ter hoogte van SB2 stroomt water naar het noorden en naar het zuiden (Langeleed).

Het onderste gedeelte van de watervoerende laag stroomt het water in zuidelijke richting.

In het centrum van het profiel (SB6, SB3 en SB1) en in de omgeving van het Langeleed (drainering) is er een opwaartse verticale grondwaterstroming. Overall elders infiltreert water vanuit het bovenste gedeelte van de watervoerende laag naar het onderste gedeelte.

4. Resistiviteitsprofiel

Met behulp van de LN-opstelling werd een resistiviteitsprofiel uitgezet.

Onder de duinen is de watervoerende laag over de volledige dikte gevuld met zoet water, met uitzondering van de onderste meter waar matig brak water voorkomt. Naar het zuiden toe komt een brak water lens voor die toeneemt in dikte en zoutgehalte in zuidelijke richting. Tussen SB3 en SB1 komt zout water voor. Onderaan de watervoerende laag is nog een klein gedeelte van de watervoerende laag met zoet water gevuld bovenop een smalle lens brak water.

Ter hoogte van SB2 (waterscheiding) komt terug zoet water voor bovenop brak water tengevolge van infiltratie van neerslagwater, maar in de buurt van de Langeleed komt enkel nog brak en zout water voor.

5. Grondwaterkwaliteit

Bij schoonpompen werden van alle peilputten de resistiviteit van het grondwater gemeten en zo het zoutgehalte van het grondwater berekend tabel).

Naast de resistiviteitsmetingen van het grondwater, werden alle peilputten nog eens bemonsterd (26 en 27 september 1991) en geanalyseerd. In onderstaande tabel staan de resultaten van deze analyses aangegeven.

De berekende zoutgehalten bevestigen de goede kwaliteit van het grondwater in het noordelijk deel van het profiel, en de betere kwaliteit van het grondwater in de buurt van SB2.

Tabel . Gemeten resistiviteit van het grondwater en berekend totaal zoutgehalte.

Peil-put	w (m)	TDS mg/l
SB1 F1	8,18	1.222
F2	0,42	23.810
SB2 F1	9,07	1.103
F2	9,12	1.096
SB3 F1	14,24	702
F2	1,11	9.009
SB4 F1	18,79	532
F2	9,15	1.093
SB5 F1	8,32	1.202
F2	28,23	354
SB6 F1	13,84	723
F2	16,99	589
SB7 F1	0,73	13.699
F2	1,32	7.575

De resultaten zijn negatief voor wat betreft waterwinning in dit gebied. De zoetwaterlens neemt snel af in dikte en bovendien is de bestaande structuur van het gebied niet verenigbaar met een waterwinning.

PROFIEL SINT-JORIS

1. Inleiding

Volgens de verziltingskaart (W. DE BREUCK et al., 1974) bevindt het zout water zich in de buurt van Sint-Joris op een diepte van 20 m.

Ten zuiden van Nieuwpoort, langs de oude spoorlijn Nieuwpoort-Diksmuide, bevindt zich een oude zandwinningsput. Die zandwinningsput kan volgens DEHAENE (1990) dienst doen als spaarbekken, want ze kapteert de Koolhofvaart die 9775 ha stroomgebied bestrijkt. Verder is het mogelijk om op een eenvoudige manier het Langeleed te kapteren of water uit de IJzer aan te voeren.

In het kader van deze studie werd op 6 plaatsen boringen uitgevoerd langs een NE-SW profiel, parallel aan de Noordzee (op 4,5 km), vanaf de Noordvaart ter hoogte van Sint-Joris naar de oude zandwinningsput. Dit profiel is gelegen in poldergebied (fig).

Er werd geboord tot op de Ieperiaanklei (Yc), waarna telkens enkele boorgatmetingen werden uitgevoerd. Daarna werd dan een peilbuis aangebracht in de zandlaag juist boven de Ieperiaanklei, en een peilbuis in de bovenste zandlaag onder het oppervlakteveen.

2. Geologie

2.1. Inleiding

De Paleozoïsche afzettingen bevinden zich hier op -250 mTAW. De top van het Krijt is gesitueerd op een diepte van -185 mTAW. Het Landeniaan bestaat uit zand en zachte klei en is ca 30 m dik. Het Ieperiaan bestaat hier uit stijve grijsblauwe klei en is hier gemiddeld 105 m dik. Ze helt zacht in noordoostelijke richting.

2.2. Kwartair

De dikte van de kwartaire afzettingen bedraagt 25 tot 30 m, en neemt toe in de richting van de zee. In de kwartaire afzettingen worden volgende litologische eenheden onderscheiden (MAHAUDEN et al., 1982; BOLLE et al., 1990; SERRA, 1991):

- B' weinig tot sterk leemhoudend fijn zand met leem- en kleilenzen; slecht gesorteerd
- B fijn zand, lokaal weinig leemhoudend; middelmatig goed gesorteerd
- C' weinig tot sterk leemhoudend fijn zand met slechte sortering
- C heterogeen middelmatig zand met veel schelpen; middelmatig gesorteerd.

2.3. Lithostratigrafisch profiel

Het lithostratigrafisch profiel is voorgesteld in figuur . Van boven naar onder onderscheiden we aldus :

- de laag B'; 2,4 tot 5,6 m dik en bestaande uit polderklei, veen en middelmatig zand;
- de laag B; 13,3 tot 18,8 m dik en bestaande uit schelphoudend fijn tot middelmatig zand, dat leemhoudend kan zijn. De top komt voor tussen 0 en 2 mTAW;

- de laag C'; 1,5 tot 2,0 m dik en bestaande uit klei dat zand- en/of leemhoudend kan zijn;
- de laag C; 1,5 tot 6,5 m dik en bestaande uit grof zand met veel schelpfragmenten en soms met silex;
- de laag Yc waarvan de top voorkomt tussen -20,3 en -26 mTAW.

3. Hydrogeologie

3.1. Inleiding

De Ieperiaanklei vormt het zeer slecht doorlatend substraat. Daarboven worden de goed doorlatende lagen C en B afgewisseld door de weinig doorlatende lagen C' en B'.

3.2. Stijghoogtemeting en grondwaterstroming

In maart 1991 werd de stijghoogte gemeten die werd omgerekend tot zoetwaterstijghoogte. Op basis van deze gegevens werd een kaart gemaakt met lijnen van gelijke stijghoogte (figuren en). Het water stroomt, zowel in het bovenste als onderste deel van de watervoerende laag in zuidwestelijke richting.

Op de 4 plaatsen in de omgeving van de Noordvaart, grijpt enkel ter hoogte van SB5 infiltratie plaats. Op de andere plaatsen is de stijghoogte in de diepere lagen hoger dan in de onderste laag, waarschijnlijk tengevolge van de drainerende werking van de Noordvaart.

Bij waarnemingen (25/4/1991) van het waterpeil in de zandwinningsput (+2,162) en in de ernaast geboorde peilbuizen (SB4 F2 +2,119 en SB4 F1 +2,082) blijkt dat in die periode water vanuit de zandwinningsput in de watervoerende laag infiltreert.

4. Resistiviteitsprofiel

Met behulp van de gemeten resistiviteiten (LN) werd een resistiviteitsprofiel opgesteld.

Het grootste deel van de watervoerende laag is gevuld met zout water. De dikte van het pakket zout water neemt geleidelijk af in oostelijke richting. In de buurt van SB6 is ze slecht 3 m dik maar neemt dan verder oostwaarts terug toe in dikte.

In het westen komt boven het zout water enkel brak water voor. Er is geen zoet water aanwezig. Oostwaarts bevat de bovenste zone van de watervoerende laag wel een dunne lens zoet water.

Algemeen kunnen we stellen dat de grondwaterkwaliteit in dit gebied slecht is.

5. Grondwaterkwaliteit

Bij het schoonpompen van alle peilbuizen werd de resistiviteit van het grondwater gemeten. Deze resistiviteit werd omgerekend naar het zoutgehalte van het grondwater (tabel). Daaruit blijkt het zeer hoge zoutgehalte van het grondwater in het onderste gedeelte van de watervoerende laag. Ook het grondwater uit het bovenste gedeelte van de watervoerende laag bevat zeer veel zout.

Vanwege de slechte kwaliteit van het grondwater kunnen we besluiten dat :

1. geen grondwater kan gewonnen worden in de buurt van Sint-Joris
2. de zandwinningsput niet kan gebruikt worden als spaarbekken

omwille van het hoge zoutgehalte van het grondwater in de omgevende watervoerende laag.

Tabel . Gemeten resistiviteit en berekend totaal zoutgehalte van het grondwater in de buurt van Sint-Joris.

Peilbuis	w (m)	TDS (mg/l)
SB1 F1	0,27	37.037
F2	7,29	1.371
SB2 F1	0,27	37.037
F2	1,00	10.000
SB3 F1	0,27	37.037
F2	0,85	11.765
SB4 F1	0,27	37.037
F2	0,90	11.111
SB5 F1	0,28	35.714
F2	4,75	2.105
SB6 F1	0,36	27.778
F2	3,12	3.205

OMGEKEERDE OSMOSE

1. Inleiding

In de kustvlakte is een groot gedeelte van de grondwaterlagen verzilt waardoor het grondwater onbruikbaar is als drinkwater. Er werden echter verschillende procédés ontwikkeld om brak of zout water te ontzilten. De eerste methoden steunden voornamelijk op het principe van de destillatie. In ons land werden 2 dergelijke installaties gebouwd (Bredene en Nieuwpoort), maar omwille van de hoge energiekost is men er van afgestapt.

Een andere methode die meer mogelijkheden biedt is omgekeerde osmose. Deze methode wordt onder andere toegepast door de staalfabrikant N.V. SIDMAR, en neemt een steeds belangrijker plaats in bij de ontzilting van water (fig.). In wat hierna volgt beperken we ons tot de bespreking van deze methode.

2. Principe

Wanneer 2 oplossingen met een verschillende concentratie door een semi-permeabel membraan worden gescheiden, en wanneer de druk op beide vloeistoffen initieel gelijk is, zal het oplosmiddel van de minst geconcentreerde oplossing doorheen het membraan naar de meest geconcentreerde oplossing diffunderen, en dit tot het verschil in concentratie verdwenen is of tot er een drukverschil is opgebouwd over het membraan die de stroming verhindert. Deze stroming wordt osmose genoemd; de druk die de stroming verhindert noemt men de osmotische druk.

Wordt nu op de meest geconcentreerde vloeistof een druk uitgeoefend groter dan de osmotische druk, dan wordt de richting van de osmotische stroming omgekeerd waardoor het oplosmiddel diffundeert van de meest geconcentreerde vloeistof naar de minst geconcentreerde. Dit is dan de omgekeerde osmose. De principes worden voorgesteld in onderstaande figuur.

Momenteel worden 2 soorten membranen gebruikt bij toepassingen van omgekeerde osmose, namelijk de celluloseacetaat- (oudste) en de composietmembranen. Goede membranen moeten aan volgende voorwaarden voldoen :

- het moet een zoutoplossing voldoende ontzilten;
- het moet bij een aangepaste druk een voldoende waterflux leveren en
- het moet zijn eigenschappen over voldoende lange tijd behouden.

3. Factoren die omgekeerde osmose beïnvloeden

3.1. Enkele vergelijkingen

De grootte van de waterflux doorheen het membraan is afhankelijk van de weerstand van dit membraan tegen zowel de water- als de zoutflux, wat wordt uitgedrukt in volgende vergelijkingen :

$$F_w = K_1 (P - \Delta) \quad (1)$$

met F_w de waterflux per oppervlakte-eenheid;
 K_1 de membraandoorlatendheid voor permeaat;
 P de druk op de zoutoplossing en
 Δ het osmotisch drukverschil over de membraan

$$F_s = K_2 (C_f - C_p) \quad (2)$$

met F_s de zoutflux per oppervlakte-eenheid ('zoutlek');
 K_2 de membraandoorlatendheid voor oplosmiddel;
 C_f de zoutoplossing concentratie en
 C_p de permeaatoplossing concentratie.

3.2. Osmotische druk

De diffusie van water doorheen het membraan wordt veroorzaakt door de toepassing van druk. Deze druk moet hoger zijn dan de osmotische druk van de behandelde oplossing. De natuurlijke osmotische druk is afhankelijk van de concentratie van het oplosmiddel. In onderstaande tabel worden enkele typische waarden gegeven.

Tabel Natuurlijke osmotische druk van waters met verschillend zoutgehalte

Type water	TDS (Total Dissolved solids) (mg/l)	Osmotische druk (bar g)
Brak water	1500	1
Brak water	5000	3
Zeer brak water	12000	7
Zoutwater (Noordzee)	35000	23
Zoutwater (Midden-Oosten)	50000	37

Gewoonlijk wordt een supplementaire druk toegepast van 25 à 40 bar g om een goede waterflux permeaat te realiseren.

Uit vergelijking (1) volgt dat men door verhogen van de druk op de zoutoplossing een grotere waterflux bekommt. Analoog vermindert de waterflux (voor eenzelfde druk) bij toename van het zoutgehalte van de oplossing toeneemt.

Uit vergelijking (2) volgt ook dat verhogen van de druk op de zoutoplossing geen effect heeft op de zoutflux doorheen het membraan.

3.3. Temperatuur

Toename van de temperatuur verhoogt zowel K_1 als K_2 , en dit in eenzelfde verhouding, zodat geen verandering in permeaatkwaliteit optreedt. Een hoge temperatuur tast de levensduur van de membranen aan.

3.4. Levensduur membranen

Membranen ondergaan met de tijd een reductie van K_1 en K_2 . Deze reductie is onder andere afhankelijk van de druk en vooral temperatuur van de oplossing.

Membranen ondergaan ook veranderingen onder invloed van de chemische eigenschappen van de oplossing. Een goede pH is belangrijk voor een lange levensduur en verder kunnen in het oplosmiddel aanwezige stoffen ook de levensduur verkorten.

Ook onder invloed van bepaalde micro-organismen kunnen sommige

membranen degraderen.

3.5. Concentratie-polarisatie

Wanneer zout door het membraan beweegt is er een opbouw aan de membraanrand, waardoor de concentratie daar hoger is dan in de oplossing. Dit heeft voor gevolg dat de zoutflux verhoogt, er treedt schaalvorming op en de membranen worden vervuild zodat de waterflux vermindert. Dit verschijnsel kan echter worden geminimaliseerd door turbulente stromingen (hoge snelheden) of door laminaire stroming in smalle kanalen.

3.6. Schaalvorming en vervuiling

De voornaamste oorzaken van schaalvorming en vervuiling zijn :

- neerslaan van calciumzouten;
- afzetting van metaaloxide (ijzer, aluminium e.a.);
- colloïden;
- bacteriën;
- neerslaan van siliciumoxiden en
- produkten van oxidatie van zwavelsulfiden.

Het gevolg is een verminderde waterflux en een verandering van de zoutflux. Daardoor is het zeer belangrijk, dat het te ontzilten water een gepaste voorbehandeling heeft ondergaan.

4. Membraansystemen

4.1. Membranen

Voor brak water worden gewoonlijk membranen gebruikt die 93% van de opgeloste stoffen uit het water verwijderen, wat betekent dat bij een toevoer van water met 3000 mg/l TDS het permeaat 210 mg/l TDS bevat. De verwijdering van de verschillende ionen hangt af van hun valentie. Divalente ionen (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) worden effectiever verwijderd dan monovalente ionen (Na^+ , Cl^-). Bovendien is de verwijdering van de verschillende ionen uit een oplossing afhankelijk van hun relatief aandeel in de oplossing. Indien het aandeel kleiner is wordt het minder effectief verwijderd. Organische moleculen met een moleculair gewicht van 300 worden totaal verwijderd, terwijl die met een moleculair gewicht van minder dan 100 bijna niet worden verwijderd.

Voor ontzilting van zeewater worden membranen gebruikt die meer dan 98 % van het NaCl verwijderen.

Het grootste probleem in verband met membranen is dat ze tegen zeer hoge drukken moeten bestand zijn. Voor de oplossing van dit probleem werden verschillende soorten membraansystemen ontworpen waarvan de platenmodule en zijn afleidingen en de holle fijne vezelmodule de belangrijkste zijn voor de ontzilting van water. We zullen ons dan ook beperken tot een korte bespreking van deze beide modules.

4.2. Platenmodule en in spiraal gewikkelde membranen

In de platenmodule liggen de membranen rug aan rug, met ertussen poreus materiaal om het permeaat af te voeren. De kanalen (om het te behandelen water aan te voeren) tussen de membraanoppervlakken zijn klein zodat in een klein volume veel membranen kunnen aangebracht worden.

Door nu deze membranen, met poreus materiaal ertussen, rond een geperforeerde buis te winden, bekomt men in spiraal gewikkelde modules, die meestal 1 m lang zijn en een diameter hebben van 20 à 30 cm. Het zoet water wordt afgevoerd langs de centrale buis. Toepassing van deze methode vereist een vergaande voorzuivering van alle gesuspendeerde en colloïdale deeltjes.

4.3. Holle fijne vezel

Membranen in de vorm van fijne holle vezels (0,015 - 0,25 mm), waarbij een dun membraan (0,1 - 1 μm) wordt aangebracht op poreus materiaal (20-30 μm), kunnen zeer hoge drukken weerstaan en vormen zeer compacte modules met een maximum aan membraanoppervlakte.

5. Voor- en nabehandeling bij toepassing van omgekeerde osmose

Een aantal factoren zijn bepalend voor het type behandeling van het water :

- het zoutgehalte of TDS;
- de tijdelijke hardheid;
- colloïdaal gesuspendeerd materiaal en kleur;
- metaalionen in oplossing;
- oxyderende agentie in oplossing;
- waterstofsulfide in oplossing;
- organisch en bacterieel materiaal in oplossing;
- temperatuur van het voedingswater;
- volume toevoer en output van de installatie.

In tabel worden de voornaamste voorbehandelingen besproken.

In het volgend punt wordt aan de hand van enkele voorbeelden deze voorbehandeling toegelicht.

6. Praktische toepassing van omgekeerde osmose

6.1. Inleiding

In ons land wordt het procédé van de omgekeerde osmose toegepast door de N.V. SIDMAR (Gent) voor de ontzilting van freatisch grondwater. In de literatuur hebben we een case-studie teruggevonden voor de ontzilting van brak water (PORTEOUS, 1983).

6.2. SIDMAR

6.2.1. Opstelling

Het schema staat aangegeven op figuur .

Er bestaan 2 grondwaterwinningen :

- een ondiepe (-15 tot -20, Kwartair) waarvan het water volgende eigenschappen heeft : 650 μScm^{-1} , 5 mg/l Fe, 10-20 ppm SiO_2 , 25-30 °F.

Het winningsdebiet bedraagt gemiddeld 160 m^3/uur .

- een diepe (-60 tot -90, Ledo-Paniseliaan) met volgende eigenschappen : 3500 μScm^{-1} , 0,15 mg/l Fe en 40-50 ppm SiO_2 .

6.2.2. Membranen

Het type filter dat gebruikt wordt is de fijne holle vezel, en

is van 2 verschillende membraan leveranciers afkomstig:

1. DOW BENELUX SALES, Prins Boudewijnlaan 41, 2520 Edegem
IO1 is van deze leverancier, de producent is FILMTEC.
2. SULZER CHEMTECH, CH - 8401 Winterthur, Zwitserland
IO2 is van deze leverancier.

Het zijn composietmembranen met volgende eigenschappen :

- pH onafhankelijk;
- geen hydrolyse;
- chemisch veel inerter;
- beter bestand tegen bacteriën;
- werkt bij lagere drukken;
- betere zoutretentie (afhankelijk van lading en afmeting ion);
- kunnen niet tegen actieve kool.

De membranen moeten regelmatig gespoeld worden :

- IO1 wordt 2 maal in de week gespoeld : eerst met dithioniet en daarna met een basische spoeling. Na spoeling stijgt het debiet (90 m³/uur) dat daarna terug geleidelijk afneemt tot 86 m³/uur.
- IO2 wordt 2 maal per jaar gespoeld gedurende 2 à 3 uur.
- IO3 is 3 jaar operationeel en werd nog niet gespoeld.

In de 10 jaar dat de N.V. SIDMAR omgekeerde osmose toepast is nog geen enkel membraan vervangen door slijtage.

6.2.3. Voorbehandeling

Volgens de gebruikers dient het toevoerwater te voldoen aan volgende eisen :

- vrij van zwevende deeltjes;
- Fe < 50 ppb;
- Mn < 50 ppb;
- Si < 150 ppm.

Om dit resultaat te bereiken worden volgende voorzuiveringen toegepast (zie schema):

- ontharding (Paniseliaanwater);
- zandfiltratie;
- ionenuitwisseling (Paniseliaanwater);
- doorgang door fijne zeven;
- toevoeging actieve kool (Paniseliaanwater).

6.2.4. Installatie- en werkingskosten

De de membranen kosten 6 à 7 miljoen BF per installatie. IO1 en IO2 heeft 30 miljoen BF gekost, IO3 7,5 miljoen BF. In deze prijs is niet begrepen de gebouwen en de infrastructuur voor winning van grondwater.

Voor 1 m³ geproduceerd water dient men 1 kWh elektriciteitsverbruik te rekenen. De totale kostprijs bedraagt 10 à 15 BF per m³ geproduceerd water.

6.2.5. Opmerking

De werking en onderhoud van het systeem vereist een grondige scheikundige kennis binnen het bedrijf.

6.3. Andere gegevens ivm kostprijs

De kostprijs (alles inbegrepen) voor het ontzilten van brak water in de Verenigde Staten bedroeg in 1985 0,44 \$ voor een installatie van 1 miljoen m³ per jaar en 0,37 \$ voor een installatie van 3 miljoen m³ per jaar.