rijksinstituut voor drinkwatervoorziening

Velwig

Hy Th_ Olsthoorn 83

REGENWATERINFILTRATIE VOOR DE GLASTUINBOUW IN HET WESTLAND EN DE DRIEHOEK BLEISWIJK BERKEL BERGSCHENHOEK

Rapport in opdracht van de Directie Drink- en Industriewatervoorziening van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer

Ir. T.N. Olsthoorn
Ir. G. van Ee
Rijksinstituut voor
Drinkwatervoorziening
Leidschendam,
September 1983

rijksinstituut voor drinkwatervoorziening

Hy Th_ Olsthoorn83

REGENWATERINFILTRATIE VOOR DE GLASTUINBOUW IN HET WESTLAND EN DE DRIEHOEK BLEISWIJK BERKEL BERGSCHENHOEK

Rapport in opdracht van de Directie Drink- en Industriewatervoorziening van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.

Ir. T.N. Olsthoorn
Ir. G. van Ee
Rijksinstituut voor
Drinkwatervoorziening
Leidschendam,
September 1983

I N H O U D

VERANTWOORDING

0 SAMENVATTING, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN
0.1 Samenvatting en conclusies
0.2 Aanbevelingen

1 INLEIDING

1.1 Opdracht
1.2 Probleemstelling
1.2.1 gezichtshoek glastuinbouw
1.2.2 - ,, - waterleidingbedrijf
1.2.3 - ,, - overheid
1.3 Aanpak van het project

2 REGENWATERINFILTRATIETECHNIEK

3 KARAKTERISERING VAN HET GEBIED
3.1 Geohydrologisch
3.1.1 inleiding
3.1.2 geologische opbouw
3.1.3 geohydrologie en waterkwaliteit
3.1.4 geohydrologische schematisering
3.2 Meteorologisch
3.2.1 gebruikte gegevens
3.2.2 neerslag versus behoefte aan gietwater
3.2.3 beschikbaarheid aan hemelwater in de winter voor het opbouwen van een beginvoorraad

4 GEOFACTOREN BIJ REGENWATERINFILTRATIE
4.1 Zout en dichtheidsstroming
4.2 Dispersie, diffusie, ondergrondse menging
4.3 Doorlatendheid en anisotropie
4.4 Tevoren aanwezige ("natuurlijke") stroming
4.5 Volkomen en onvolkomen putten
4.6 Pakketkeuze
4.7 Schaal
4.8 Strategie

5 BEREKENINGEN MET METEOROLOGISCHE GEGEVENS

6 SCHATTING VAN HET POTENTIEEL

7 LITERATUUR

APPENDICES

A1 VERDISCONTERING VAN DE DICHTHEIDSSTROMING

A2 ANISOTROPIE VAN DE DOORLAATFAKTOR

A3 VERWERKING VAN ONVOLKOMEN PUTTEN

VERANTWOORDING

De auteurs zijn bijzonder erkentelijk voor de medewerking van Dr. Ph.Hamaker van het ICW, de Klimatologische Dienst van het KNMI, het Tuinbouwproefstation te Naaldwijk, de Rijks Geologische Dienst (RGD) alsmede de heren R.Lieste en drs. A. van Wijhe van het RID, die alle(n) hebben bijgedragen tot de totstandkoming van dit rapport.

T.N. Olsthoorn
G. van Ee
Augustus, 1983

0. SAMENVATTING, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

0.1 Samenvatting en conclusies

Door toenemende omvang van de substraatteelt in de tuinbouw neemt de behoefte aan waterbronnen met een extreem laag zoutgehalte sterk toe. Aan de gestelde norm van minder dan 50mg chloride per liter voldoet veelal slechts het regenwater. Waar mogelijk wordt derhalve regenwater van de kasdaken opgevangen en voor later gebruik in tanks of bekkens bewaard. Op veel plaatsen ontbreekt echter de ruimte om bekkens (bassins) aan te leggen of tanks te plaatsen. Afgezien hiervan, raken ook de grotere bassins gedurende de zomer doorgaans leeg. In zulke situaties moet dan op andere bronnen als ontziltingsinstallaties en/of drinkwater worden overgeschakeld. Bekeken vanuit het oogpunt van het drinkwaterbedrijf dat dit tekort moet leveren, leidt dit tot een ongunstige situatie in bedrijfseconomisch en bedrijfstechnisch opzicht. Immers, het water slechts gedurende een relatief korte tijd nodig, maar de dan gevraagde capaciteit is hoog ("kwaliteit" is hier identiek met een laag chloride-gehalte). De investeringen voor de realisatie van een ruimer leiningnet en de overige produktiemiddelen die hiervoor nodig zijn, leiden onvermijdelijk tot een hogere waterprijs. Hierbij komt nog, dat de kwaliteit van het geleverde drinkwater, wat zoutgehalte betreft, doorgaans ontoereikend is voor de tuinder. Hij is hierdoor in een aantal gevallen alsnog gedwongen een ontziltingsinstallaties aan te schaffen.

Ondergrondse opslag van regenwater zou het genoemde ruimteprobleem oplossen. Immers de benodigde bovengrondse ruimte is minimaal, terwijl de voor de opslag beschikbare ondergrondse ruimte zeer groot is en het regenwater uitstekend is wat betreft de kwaliteit (Chloridegehalte ca. 15mg Cl^-/l).

Aangezien de jaarlijkse waterbehoefte per kas ongeveer even groot is als de neerslag die er gemiddeld per jaar opvalt, kan opslag alleen, ten gevolge van de onvermijdelijk optredende verliezen, nimmer de waterbehoefte geheel dekken; altijd blijft toevoer van water vanuit andere bronnen (drinkwater en of ontziltingsinstallaties) in zekere mate noodzakelijk.

Wel kan door een geschikte strategie met een ondergrondse regenwateropslag de benodigde aansluitcapaciteit van deze andere bronnen flink worden beperkt en kunnen deze gelijkmatiger worden belast. Veelal kan, wanneer voortdurend voor een klein deel gebruik wordt gemaakt van de andere bronnen, worden voorkomen dat de regenwatervoorraad gedurende de zomer uitgeput raakt. Dit maakt topcapaciteiten van deze andere bronnen overbodig. De regenwatervoorraad kan onder gunstiger omstandigheden naar schatting zo'n 75% van de waterbehoefte dekken.

De werking van een regenwateropslag is erg afhankelijk van

afhankelijk van de geohydrologische faktoren en hoe daarmee tijdens het ontwerp en tijdens het bedrijf wordt omgesprongen. De belangrijkste faktoren die ondergrondse opslag van regenwater bemoeilijken zijn:

1). Het dichtheidsverschil tussen het oorspronkelijke grondwater en het geinfiltreerde hemelwater
2). De sterkte van de natuurlijke stroming.

Met name onder minder gunstige is het essentieel terdege met deze punten rekening te houden. Het aantal mogelijkheden hiertoe is legio. Men kan de schaal van het project vergroten om de invloed van genoemde faktoren relatief te verminderen (schaalvergroting betekent samenwerking tussen meer bedrijven); op een aantal plaatsen in het gebied kan men met hetzelfde oogmerk een dunner pakket kiezen (Holocene zandlagen) om het water in op te slaan; men kan het dichtheidsverschil tegemoet treden door het geperforeerde gedeelte van de onttrekkingsputten op een hoger niveau te plaatsen dan dat van de infiltratieputten; men kan de natuurlijke stroming in veel gevallen het hoofd bieden wanneer men de onttrekkingsput stroomafwaarts plaatst van de infiltratieput en eventueel is het mogelijk om de natuurlijke grondwaterstroming zelf te reguleren. Ten slotte kan veel worden bereikt met een juiste strategie betreffende de mate waarin en de tijdstippen waarop het ondergronds opgeslagen water wordt ingezet. Gezien dit scala aan vrijheidsgraden is het in de regel niet relevant te vragen *of* ondergrondse voorraadvorming in een bepaalde situatie al dan niet mogelijk is; veel meer dient te worden gevraagd naar de *wijze waarop* de ondergrondse voorraadvorming onder de gegeven omstandigheden dient plaats te vinden.

Ondanks de beperkingen waaraan deze orienterende studdie noodgedwongen onderworpen is, kan worden gesteld, dat de geohydrologische omstandigheden met name in de B-driehoek (Bleiswijk, Berkel, Bergschenhoek) gunstig zijn voor het toepassen van ondergrondse opslag van regenwater. De situatie in het Westland is een stuk minder gunstig; maar toch zijn ook daar plaatselijk interessante mogelijkheden aanwezig.

Voor de B-driehoek kan worden gezegd, dat, wanneer de nu lopende praktijkproef te Bleiswijk succes heeft en de eerste bedrijfsomstandigheden gunstig zijn, men er een snelle uitbreiding van de toepassing van deze techniek tegemoet mag zien. Een belangrijke stimulerende faktor zal de kostprijs van het op deze wijze "geproduceerde" regenwater zijn, welke gustig afsteekt ten opzichte van die van andere bronnen (zie laatste alinea van hoofdstuk 6), terwijl het zoutgehalte ervan lager is dan dat van het leverbare drinkwater. Hier overheen komt nog de kostenreduktie voor de tuinder, die samenhangt met verkleining van de aansluitcapaciteit met het openbare leidingnet. Eenzelfde redenering geldt ten aanzien van de geringere extra benodigde ontziltingscapaciteit; ook deze kan met een regenwaterinfiltratiesysteem worden terug gebracht. Op deze gronden is zeer wel denkbaar, dat de infiltratietechniek grote gevolgen kan hebben voor de

toekomstige infrastructuur van het waterleidingnet in het betreffende gebied.

Wat hierboven voor de B-driehoek is gesteld geldt in mindere mate voor het Westland. Afgezien van een aantal deelgebieden binnen het Westland, is de zoutconcentratie van het grondwater er hoger tot hoog. Bovendien is de stroomsnelheid van het grondwater in het Westland over het algemeen relatief hoog. Beide faktoren zijn minder gunstig tot ongunstig voor ondergrondse regenwateropslag. Toch zijn voor de deskundige ontwerper zoveel mogelijkheden zich aan de aangetroffen omstandigheden aan te passen, dat op dit moment zeker niet kan worden gezegd dat ondergrondse opslag van regenwater onder relatief ongunstige omstandigheden, als op sommige plaatsen in het Westland, onmogelijk zou zijn. Om dit nader uit te zoeken is een aanvullend onderzoek noodzakelijk. Dit onderzoek kan in eerste instantie theoretisch van aard zijn; uiteindelijk zal echter het succes van de methode bij de eerste bedrijfsinstallaties bepalend zijn voor de vlucht die deze techniek in de toekomst zal gaan nemen.

0.2 Aanbevelingen

Met het oog op het belang van onvolkomen onttrekingsputten bij de terugwinning van het opgeslagen water uit pakketten die van oorsprong brak of zout waren, en de onmogelijkheid dit punt tijdens deze studie in voldoende detail te onderzoeken, verdient een aparte modelstudie naar dit punt aanbeveling. Juist deze studie zal een nauwkeuriger schatting mogelijk maken van het potentieel van de ondergrondse regenwateropslag in de zilte delen van het Westland. Het verdient hierbij aanbeveling het voor deze studie ontwikkelde programma voor zulke berekeningen geschikt te maken, zodat dan een krachtig en all-round werktuig wordt verkregen voor het ontwerp van dergelijkde voorzieningen.

Gezien het belang van de resultaten van de proefnemingen te velde voor de toekomstige waterleidingtechnische infrastructuur van de beschouwde en mogelijk andere tuinbouwgebieden, zouden zulke proefnemingen moeten worden gestimuleerd en gecoordineerd. Zo mogelijk zou in samenwerking met anderen een eigen proefinstallatie moeten worden opgezet.

Het verdient aanbeveling een aparte studie te verrichten naar het vooronderzoek dat nodig is voor het ontwerpen van dergelijke installaties en naar de metingen die tijdens het onderzoek maar vooral ook tijdens de exploitatie nodig zijn voor een verantwoorde bedrijfsvoering.

1. INLEIDING

1.1 Opdracht

In het kader van het IODZH-onderzoek (Integraal Onderzoek Drinkwatervoorziening Zuid-Holland; afgerond medio 1983) is een studie gewijd aan de watervoorziening voor de glastuinbouw in Zuid Holland (Tangena en Hamaker 1982). Uit deze studie bleek, dat de behoefte aan leidingwaterwater (drinkwater) in de glastuinbouw in sterke mate afhankelijk is van de voorraadvorming bij de tuindersbedrijven zelf.

Genoemde studie was beperkt tot voorraadvorming door middel van regenwatertanks en -bassins. De mogelijkheden van ondergrondse voorraadvorming van regenwater is niet in de studie meegenomen. De belangstelling voor ondergrondse voorraadvorming neemt echter zienderogen aan toe; de afgelopen maanden is over dit onderwerp een aantal artikelen in de plaatselijke pers en de betreffende vakliteratuur verschenen (zie literatuurlijst). Deze hebben ongetwijfeld tot de toegenomen belangstelling bijgedragen. Ook zijn onlangs enkele proefnemingen op praktijkschaal gestart, waarbij toeleveringsbedrijven samenwerken met boorfirma's en individuele tuinders.

Deze ontwikkelingen hebben mogelijk gevolgen voor de investeringen en exploitatie van de drinkwaterleidingbedrijven, zeker wanneer ondergrondse voorraadvorming op grote schaal toepasbaar zou blijken. In verband hiermee droeg de Directie Drink- en Industriewatervoorziening het RID een orienterend onderzoek op waarvan de resultaten in het voorliggende rapport zijn vastgelegd. De opdracht was, de mogelijkheden en merites te onderzoeken van kunstmatige infiltratie (=grondwateraanvulling) en terugwinning van regenwater (en eventueel leidingwater) in de ondergrond van de tuinbouwgebieden in het Westland en de zgn. B-driehoek (Bleiswijk, Berkel, Bergschenhoek).

1.2 Probleemstelling

1.2.1 Gezichtshoek glastuinbouw

Teelt op volle grond verliest momenteel met toenemende snelheid terrein ten gunste van de zgn. substraatteelt. Aan substraatteelt komt geen grond meer te pas; de kasgrond wordt met wit plastic afgedekt en de planten gekweekt in pakketjes steenwol daar bovenop. De ervaringen met deze werkwijze zijn gunstig: een hogere produktie bij een betere kwaliteit gekoppeld aan een gemakkelijker zowel als hygienischer bestrijding van ziekten. Op grond van deze faktoren stappen steeds meer tuindersbedrijven over van volle grond op steenwol.

Kenmerkend voor de substraatteelt is de toediening met het gietwater van alle stoffen die de plant nodig heeft. Met dunne slangetjes wordt dit gietwater veelal direkt in de steenwol geleid. De doorspoeling van de steenwol wordt tot een minimum beperkt en blijft soms geheel achterwege. Van enige bufferwerking, een kenmerk van teelt op volle grond, is bij substraatteelt geen sprake meer. De plant is hierdoor uiterst gevoelig geworden voor wat zij krijgt toegediend.

Het bovenstaande heeft tot gevolg dat bij substraatteelt de kwaliteit van het beschikbare water een kritische factor kan worden, waar dit voorheen niet of in mindere mate het geval was. Vooral de concentratie keukenzout (chloride) dient voldoend laag te zijn; 50 Cl^-/l wordt veelal als bovengrens beschouwd voor toepassing in substraatteelt. Noch het drinkwater en zeker niet het plaatselijke oppervlaktewater voldoen aan deze eis.

Een oplossing wordt veelal gevonden in ontzouting van grond- of leidingwater met installaties voor omgekeerde osmose (ook hyperfiltratie genoemd). Hiernaast wordt een zo groot mogelijk gebruik gemaakt van het beschikbare hemelwater. In noodgevallen wordt direkt van leidingwater gebruik gemaakt of wordt bijgemengd met leidingwater.

Naast de hoge kosten voor ontzilting en de voor verkeerd gebruik zeer gevoelige hyperfiltratie-modules is het gebrek aan ruimte van groot belang. Dit beperkt de mogelijkheden voor aanleg van bekkens. Veelal is er in het geheel geen ruimte, tenzij men hiervoor kostbare meters teeltgrond opoffert.

Ondergrondse opslag van regenwater lijkt op het eerste gezicht een aantrekkelijke optie, die althans de ruimteproblematiek oplost. Toch dienen de eerste ervaringen te worden afgewacht alvorens men werkelijk zinvolle conclusies over de mogelijkheden kan trekken. Met de lopende incidentele en vooralsnog niet of nauwelijks gecoordineerde proefnemingen zijn 1 tot 2 jaren gemoeid.

1.2.2 Gezichtshoek waterleidingbedrijf

Tijdens het IODZH-onderzoek kwam naar voren dat het waterleidingbedrijf grote investeringen zou moeten plegen om de toenemende vraag van substraattelers in de toekomst het hoofd te kunnen bieden. Een groot deel van de investeringen zou nodig zijn voor aanpassing van het leidingnet. De oorzaak hiervan is dat de tuinders die geen grondwaterontzilting toepassen in de nazomer, wanneer de watebehoefte nog hoog is, allen worden geconfronteerd met lege regenwaterbekkens. De aansluitkapaciteit aan leidingwater zou derhalve maximaal moeten zijn (ca 60m^3/d/ha), terwijl deze kapaciteit slechts voor een korte periode nodig is. Een dergelijke infrastruktuur leidt onvermijdelijk tot een hoge prijs per eenheid produkt (leidingwater).

Vanuit de optiek van de drinkwaterleverancier nemen de investeringsrisico's tot nauwelijks draagbare proporties toe, wanneer onverhoeds zou blijken dat ondergrondse voorraadvorming van hemelwater voor de tuinders de mogelijkheid biedt om veel minder gebruik van leidingwater te gaan maken dan was voorzien.

Een ander facet zijn de perspectieven die worden geboden wanneer de ontwikkelingen wel op tijd worden onderkend. In dat geval zullen de uitgetrokken investeringsgelden voldoende zijn om de voorziening van een beduidend groter gebied op het gewenste peil te brengen. Want hoe het ook zij, de regenwateropslag zal nimmer de totale behoefte aan gietwater kunnen dekken bij de momenteel toegepaste teeltmethoden en vruchtsoorten.

1.2.3 Gezichtshoek overheid

De investeringen die het waterleidingbedrijf moet doen en de risico's die daarmee zijn gemoeid zijn ook een zaak voor de overheid, evenals de integrale watervoorziening in het gebied. De overheid dient hierbij de optimale situatie na te streven.

Een van de factoren die hierbij niet onopgemerkt mag blijven is het feit dat de benutting van hemelwater automatisch verzilting van het plaatselijke oppervlaktewater in de hand werkt (er komt immers steeds minder zoet water in het oppervlaktewater terecht). Deze situatie kan er op zichzelf toe leiden dat andere bedrijven die op zich nog van het oppervlaktewater gebruik zouden kunnen maken door deze verzilting gedwongen worden zelf regenwater te gaan opvangen (en drinkwater te gaan benutten) met versterking van de diverse verschijnselen als gevolg.

1.3 Aanpak van het project

De doelstelling van de opdracht vergt 3 zaken:

1) Kennis van de geohydrologie van het gebied;
2) kennis van de beschikbaarheid van het hemelwater en de waterbehoefte van de kassen;
3) berekeningstechnieken waarmee de voorraadvorming adequaat kan worden gesimuleerd.

De kennis van de geohydrologie is verwerkt in het betreffende hoofdstuk. Hierin is tevens aandacht besteed aan het zoutgehalte van het grondwater. Dit vormt, te zamen met de natuurlijke stroming, een hoofdfactor bij de mogeljkheden tot voorraadvorming in de ondergrond. Met het oog op de kleine schaal van de voorraad bij individuele toepassing zijn dunne zandpakketten aantrekkelijk, zoals die op een aantal plaatsen in het zogenaamde Holoceen (zie de geologische studie) voorkomen. Aan het voorkomen van zulke lagen is extra aandacht besteed. De verliezen ten gevolge van dichtheidsverschillen tussen infiltratie- en oorspronkelijk grondwater en door afstroming ten gevolge van natuurlijke grondwaterstroming zijn dan naar verhouding geringer.

De kennis van de beschikbaarheid van hemelwater alsmede die van de behoefte aan water is volledig betrokken van Dr.Ph.Hamaker van het Inst. voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding te Wageningen (ICW). De meteorologische gegevens zijn dezelfde als die welke door Tangena en Hamaker (1982) zijn gebruikt. Alleen de formule waarmee de extra verdamping is berekend die optreedt door het verwarmen van de kassen, is een door Hamaker verschafte modernere versie. (De verschillen die hierdoor optreden zijn gering).

Evenals dat door Tangena en Hamaker (1982) is gedaan is in dit rapport met twee verschillende teelten rekening gehouden, t.w. een teelt met een relatief lage waterbehoefte en een teelt met een relatief grote vraag naar water. De gewasfactoren voor beide teelten (de factoren waarmee de verdamping moet worden vermenigvuldigd om de waterbehoefte te verkrijgen) zijn op decadebasis verkregen van dr. Hamaker (zie Tangena en Hamaker, 1982).

Ter berekening van het ondergrondse gedrag van het geinfiltreerde water kon uit financiele redenen slechts terzijde gebruik worden gemaakt van geavanceerde computermodellen, als het model SWIP-2 dat op het RID aanwezig is. Dit model is nu uitsluitend gebruikt om de toegepaste analytische benadering te controleren, van de beweging van het grensvlak tussen het zoete en het zoute water. Afgezien van de financiele reden werd het gebruik van het betreffende geavanceerde model als te omslachtig ervaren voor het uitvoeren van de grote reeks berekeningen die nodig waren om het gewenste inzicht te verkrijgen.

De beschikbare RID-programma's van de "FLOP-familie" (FLOP

staat voor "Flow Pattern") leek in eerste instantie een geschikt uitgangspunt, daar met deze programma's zowel stroomlijnen als fronten kunnen worden berekend. De noodzakelijke aanpassingen die voor de onderhavige problematiek in de programma's moesten worden aangepast waren echter van dien aard dat is besloten een nieuw programma te maken, dat op dezelfde leest is geschoeid als het genoemde FLOP-programma. Dit nieuwe programma is verder in dit rapport gebruikt. Het houdt behalve met stroomlijnen en fronten rekening met de beweging van het grensvlak tussen zoet en zout water, met anisotropie (verschillende doorlatendheden in verticale en horizontale zin en met varierende onttrekkings- en infiltratiestromen alsmede met onvolkomenheid van de putten. Tevens kunnen de meteorologische gegevens direkt als invoer worden gebruikt. (De werking vanhet programma wordt in de appendix gegeven.)

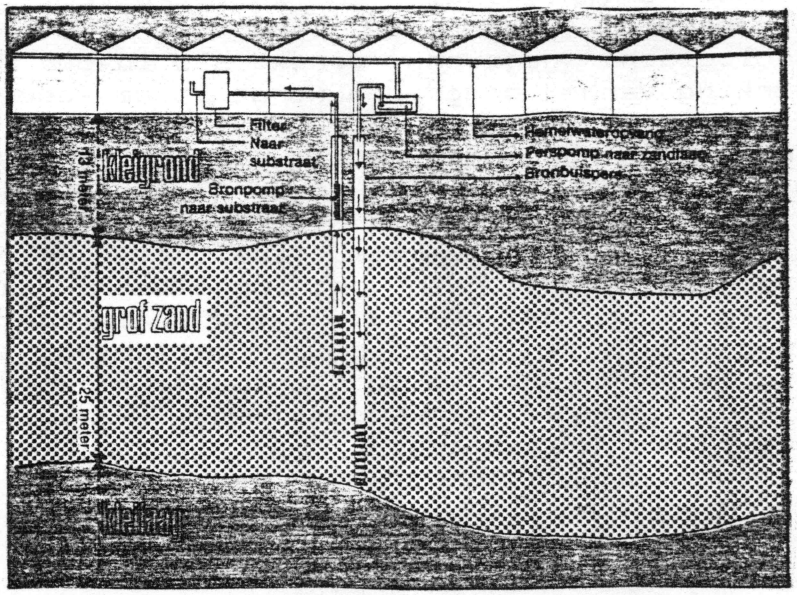
Op grond van de geo(hydro)logische studie was het mogelijk om een drietal voor de regio kenmerkende situaties te selecteren. Aan de hand van deze 3 situaties is met gestileerde invoergegevens inzicht verkregen in het ondergrondse gedrag van het opgeslagen water en kon een strategie voor de voorraadvorming worden gekozen. Tenslotte kon met behulp van de werkelijke meteorologische gegevens de werking van dergelijke opslagsystemen worden gesimuleerd voor een langere, aaneengesloten periode. Hiervoor is de periode 1971-1980 gekozen.

2 REGENWATERINFILTRATIETECHNIEK

Regenwaterinfiltratie is in dit rapport een afkorting voor "ondegrondse opslag van hemelwater" dat door middel van een of meer putten in de grond is gebracht en daar weer aan kan worden onttrokken. Figuur 2.1, die is ontleend aan het tijdschrift "Groente en Fruit", geeft een beeld van een dergelijke installatie.

2 REGENWATERINFILTRATIETECHNIEK

Regenwaterinfiltratie is in dit rapport een afkorting voor "ondegrondse opslag van hemelwater" dat door middel van een of meer putten in de grond is gebracht en daar weer aan kan worden onttrokken. Figuur 2.1, die is ontleend aan het tijdschrift "Groente en Fruit", geeft een beeld van een dergelijke installatie.



Figuur 2.1: Schets van een regenwaterinfiltratiesysteem (ontnomen aan "Groente en Fruit", 22 april 1983)

Hierbij moet worden aangetekend, dat de plaatsing van de infiltratie- en onttrekkingsput(ten) in de praktijk in aanzienlijke mate kan afwijken van het in figuur 2.1 geschetste beeld. De kenmerkende faktoren zijn echter in het plaatje aanwezig:

Via het glasdak opgevangen hemelwater wordt naar een buffervat geleid, dat een grootte heeft van enkele honderden m^3 per ha glas. Vanuit het (hier niet getekende) buffervat wordt het water door een zandfilter naar de infiltratieput gevoerd. Deze leidt het vervolgens in een ondergrondse zandlaag. Het water blijft in deze zandlaag in afwachting van later gebruik in de kas als gietwater. Wanneer water nodig is, wordt het via de infiltratieput of (meestal) een speciaal voor dit doel gemaakte onttrekkingsput weer omhoog gepompt.

In hoeverre er al dan niet een aparte winput nodig is en hoe deze winput geplaatst dient te worden ten opzichte van de infiltratieput is een kwestie van het ontwerp en is bepalend voor het resultaat dat met de installatie kan worden bereikt. Hetzelfde geldt voor de lengte van de geperforeerde gedeelten van de putten (de putfilters) en hun positie ten opzichte van de boven- en de onderzijde van de zandlaag. De diverse keuzen hangen af van de situatie zoals deze in een concreet geval wordt aangetroffen.

Deze faktoren zijn:

- *De dikte van de zandlaag, zijn opbouw, gelaagdheid en doorlatendheid in verschillende richtingen;*
- *de van nature of door andere oorzaken reeds aanwezige grondwaterstroming in de zandlaag;*
- *het zoutgehalte van het grondwater in de zandlaag;*
- *andere chemische eigenschappen van het grondwater.*

De meeste van de genoemde faktoren spreken voor zichzelf. Het zoutgehalte is van belang omdat water met een hoger zoutgehalte een grotere dichtheid heeft (zwaarder is) dan zoeter water. Het blijkt dat zelfs brak water, zoals dat in het westen van ons land veelal in de grond wordt aangetroffen, een sterke neiging heeft het geinfiltreerde regenwater in de zandlaag naar boven te verdringen. Om deze reden is het veelal aan te bevelen het filter van de terugwinput boven in de zandlaag te plaatsen. Dit is in de figuur 2.1 enigzins weergegeven.

Het punt "andere chemische eigenschappen" is hier te berde gebracht om te wijzen op de vrees die bij velen bestaat ten aanzien van infiltratie van zuurstofhoudend (regen)water in een laag met zuurstofloos maar soms sterk ijzerhoudend grondwater. Vermenging van beide watersoorten zou ongetwijfeld en nagenoeg ogenblikkelijk een bruine ijzerbrij veroorzaken ten gevolge van de reactie tussen de zuurstof uit het regenwater en het opgeloste (tweewaardige) ijzer uit het grondwater. Een dergelijke brij zou vervelende gevolgen hebben voor de doorlatendheid van de grond, de capaciteit van de putten en die van de gietwatervoorziening.
Gelukkig treedt er in de grond nauwelijks vermenging op; het infiltratiewater verdringt het grondwater. Bovendien wordt het ijzerhoudende grondwater door de infiltratie steeds verder van de put geduwd, waar het minder kwaad kan. Daarbij komt nog dat het kontaktvlak tussen beide watersoorten, de plek waar de reactie plaatsvindt, juist door de opgetreden reactie uitgereageerd raakt en in feite als een bufferzone dienst gaat doen. Deze factoren tezamen verklaren dat de beschreven vrees zich nog nergens in de praktijk heeft bewaarheid, ondanks de jarenlange ervaring die intussen op veel plaatsen in de wreld met infiltratieputten is opgedaan en waar de situatie vergelijkbaar is (Olsthoorn 1982a,b).

Een andere zaak is de vermenging tussen genoemde watersoorten in een onttrekkingsput. Wanneer teveel water wordt onttrokken ontstaat er op een gegeven moment een situatie waarbij van de ene zijde het geinfiltreerde water de put instroomt, maar tegelijk van de andere zijde het oorspronkelijke grondwater. Het spreekt vanzelf dat er dan vermenging tussen beide watersoorten optreedt, niet in de grond maar juist in de onttrekkingsput en de aangesloten installatie. De ijzerbrij die daarbij optreedt kan fataal zijn voor de installaties. Dit verschijnsel is vaak bij infiltratiesystemen aangetroffen. In het geval van regenwateropslag voor glastuinbouw hoeft deze situatie zich niet voor te doen, wanneer men er alert op is. Indien het oorspronkelijke grondwater brak of zout is, is de kans klein, omdat het toenemende zoutgehalte de tuinder ervan zal weerhouden om oorspronkelijk grondwater mee op te pompen. Bovendien is een kontrole van de waterkwaliteit op basis van zoutconcentratie of geleidingsvermogen gemakkelijk realiseerbaar. Anders wordt het wanneer het oorspronkelijke grondwater een laag zoutgehalte heeft. In dat geval is kontrole op meepompen van oorspronkelijk en mogelijk sterk ijzerhoudend grondwater niet eenvoudig en kan een verstopping als boven aangeduid hiervan het gevolg zijn. Aanwezigheid van brak grondwater kan uit dit oogpunt, tegen de verwachting in, een voordeel betekenen.

De chemische aspecten zullen in de rest van dit rapport buiten beschouwing worden gelaten.

In dit rapport staat het denkbeeldige bedrijf ter grootte van 1 ha centraal. De berekeningsvoorbeelden hebben betrekking op een bedrijf van deze grootte. Het bedrijf van 1 ha is een redelijk gemiddelde voor de bedrijfsgrootte in de regio en de resultaten laten zich aan de hand van dit bedrijf eenvoudig interpreteren en om te rekenen naar bedrijvan van een andere grootte.

De schaal van de voorraadvorming is een belangrijke faktor. Schaal moet hierbij worden gezien als de verhouding tussen de hoeveelheid infiltratiewater enerzijds en de afmetingen van de ondergrondse zandlaag anderzijds. Een maat voor deze schaal is de verhouding tussen de straal van een als cilinder gedachte bel infiltratiewater ter dikte van het zandpakket en de dikte van dit zandpakket. Is deze verhouding beduidend kleiner dan 1, dan moet worden verwacht dat de voorraad relatief gevoelig is voor allerlei minder goed voorspelbare factoren (bijv. gelaagdheid van de ondergrond, mengverschijnselen e.d.). Een verhouding die beduidend groter is dan 1 moet als gunstig worden beschouwd. In de praktijk zal deze verhouding echter vaak klein (zeg kleiner dan 1) blijken te zijn. Immers een voorraad water die in grootte overeen komt met de hoeveelheid hemelwater die in een winter beschikbaar is, bedraagt in de orde van

3600m³/ha. Dit levert bij een veel voorkomende zandlaagdikte van 25m met een porienvolume van 35% een cilinder op met een straal van 11,4m. De verhouding tussen deze straal en de pakketdikte is dan dus minder dan 0,5 en derhalve bepaald ongunstig te noemen. Op grond van deze eenvoudige berekening kan nu reeds worden gesteld, dat samenwerking tussen meerdere tuindersbedrijven, ter vergroting van de schaal, een belangrijke, zo niet essentiele zaak zal blijken te zijn.

Dit schaalprobleem kan onder gunstige geologische omstandigheden worden opgelost, door voor de opslag dunnere pakketten (bijv. 5-10m) te benutten. Deze zijn op een aantal plaatsen in het Westland voorhanden (zie hoofdstuk 3). In andere gevallen zal schaalvergroting moeten worden nagestreefd om ongunstige geo-hydrologische omstandigheden het hoofd te te kunnen bieden. In de praktijk betekent schaalvergroting samenwerking van meerdere tuindersbedrijven.

Een technisch punt is de capaciteit van het infiltratie/terugwinsysteem. Dit punt zal in de volgende hoofdstukken niet meer ter sprake komen. Daar de infiltratiekapaciteit toch een relevante faktor betekent, zal het hier kort worden aangestipt.

Nimmer zal een infiltratieput de neerslag van een sterke regenbui ogenblikkelijk weg kunnen werken. Zo'n bui kan in een uur tijd gemakkelijk 100m³/ha leveren, terwijl de capaciteit van een infiltratieput veelal in de orde van 10 a 20m³/h zal bedragen. Een buffervat zal derhalve noodzakelijk zijn om de neerslag tijdelijk te bergen en zodoende verspilling te voorkomen.

De grootte van zo'n vat kan beperkt blijven tot enkele honderden kubieke meters en hangt, behalve van de infiltratiecapaciteit, af van het aantal keren dat men statistisch aanvaardt dat het vat overstroomt. Het blijkt nu (zie figuur 2.2), dat bij 10m³/h infiltratiecapaciteit een vat van 160m³/ha gemiddeld een keer per jaar zal overlopen. Bij een vat van 240m³ zal dit nog slechts gemiddeld eenmaal per 5 jaar het geval zijn. Buffervaten voor ondergrondse hemelwateropslag zullen derhalve in het algemeen een omvang van enkele honderden m³ moeten hebben. (In tegenstelling tot een voorraadbekken dient een buffervat steeds zoveel mogelijk leeg te zijn, dat wil zeggen klaar om een bui op te vangen).

Tenslotte iets over de voorzuivering. Het water dat van het glasdak komt bevat ongetwijfeld stof en organisch materiaal. Dit betekent dat het niet direkt kan worden geinfiltreerd; een voorbehandeling is noodzakelijk om verstopping van de infiltratieput te voorkomen. Langzame zandfiltratie lijkt hiertoe de aangewezen methode. (Snelfiltratie zal

ontoereikend zijn om verstopping ten gevolge van bacteriegroei te voorkomen. Ook is het de vraag of een snelfilter deeltjes in voldoende mate uit het water kan verwijderen; het zand in de grond is in de regel beduidend fijner dan zand dat in snelfilters wordt toegepast.)

Een langzaam zandfilter kan op relatief eenvoudige wijze in een tank worden gerealiseerd. Kenmerken van een dergelijk filter zijn een lage filtatiesnelheid (enkele dm/h) en een niet te grof zand (bijv. matig grof Maaszand). Een langzaam zandfilter wordt normaliter niet automatisch teruggespoeld. Daarvoor in de plaats wordt het van tijd tot tijd schoongeschraapt (Huisman 1973) door verwijdering van een dun bovenlaagje (vervuild) zand ter dikte van enkele cm. De frequentie van een dergelijke reiniging dient voldoende laag te zijn, bij voorkeur niet meer dan een keer per jaar. De ervaring zal moeten uitwijzen of deze frequentie met regenwater van kassen zonder meer bereikbaar is. Zo niet, dan zijn er verschillende eenvoudige mogelijkheden om dit alsnog te bereiken.

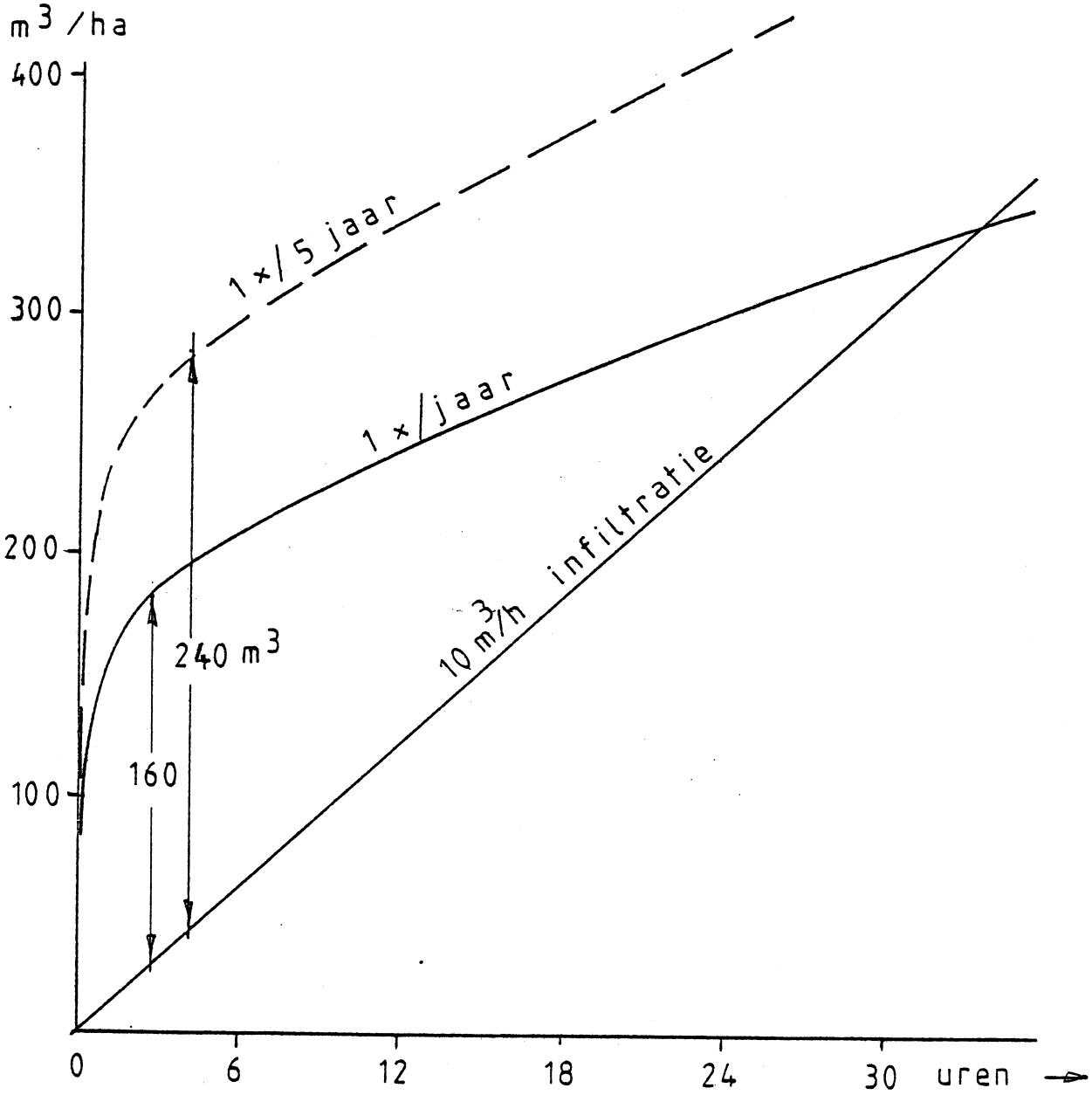


Fig. 2.2: Neerslagsom voor De Bilt als funktie van de neerslagduur.
(Gegevens ontleend aan:
A.G. van den Herik en M.T. Kooistra;
"5-minuten-regens, regenintensiteiten en overstromingen bij rioleringen"
Grontmij, ca. 1970.

3 KARAKTERISERING VAN HET GEBIED

3.1 Geohydrologisch

3.1.1 Inleiding

Uit technisch en ekonomisch oogpunt komen vooral de direkt onder het maaiveld gelegen zandige watervoerende pakketten voor opslag van regenwater in aanmerking. Faktoren die de mogelijkheid tot tijdelijke opslag in een watervoerend pakket bepalen zijn:

- de doorlatendheid van het pakket;
- het chloridegehalte in het pakket;
- de snelheid van de natuurlijke grondwaterstroming.

De doorlatendheid van het pakket bepaalt de snelheid van infiltratie en terugwinning van het regenwater. Om technische redenen komen daarom alleen zandige pakketten voor opslag in aanmerking. De vorm en de lokatie van de zoetwaterbel, in plaats en tijd, wordt bepaald door het chloridegehalte in het watervoerende pakket en de snelheid van de natuurlijke grondwaterstroming. Hierbij spelen fysische processen zoals diffusie, dispersie en dichtheidsstromingen een belangrijke rol. Naarmate het chloridegehalte in het watervoerende pakket lager is en de snelheid van de natuurlijke grondwaterstroming geringer, zal het eenvoudiger zijn om uit de, in tijden van neerslagoverschot gevormde, zoetwaterbel water met een acceptabel chloridegehalte terug te winnen.

De in het Westland en in de B-driehoek voor regenwateropslag in aanmerking komende watervoerende pakketten zijn van Pleistocene en Holocene ouderdom. Vanaf het begin van het Pleistoceen, zo'n twee miljoen jaar geleden, maakt West-Nederland deel uit van een dalend Noordzee-bekken. Hierdoor konden aanzienlijke sedimentpakketten ontstaan. Aanvankelijk in een marien milieu. Maar door het kouder worden van het klimaat, met als gevolg zeespiegeldaling, vonden vervolgens rivierafzettingen van Rijn en Maas plaats.
De laatste tienduizend jaar worden aangeduid als het Holoceen. In deze periode, waarin een duidelijke klimaatsverbetering optrad, vond een zeespiegelrijzing plaats, waardoor West-Nederland herhaaldelijk te maken heeft gehad met transgressies (overstroming vanuit zee). Tijdens het Holoceen is een twintig meter dik pakket ontstaan bestaande uit zand-, klei- en veenlagen.

Gezien de korte beschikbare tijd voor dit onderzoek is voor het verkrijgen van inzicht in de geologische en geohydrologische eigenschappen hoofdzakelijk uitgegaan van de in bestaande rapporten vastgelegde informatie. Van eventueel eigen aanvullend onderzoek is in deze fase dan ook afgezien.
Met name is gebruik gemaakt van:

- Geologische kaart van Nederland, blad 37W,RGD;
- Hydrologie en waterkwaliteit van Midden-West Nederland,ICW;
- Geohydrologisch onderzoek duingebied van Zuid-Holland,DGV-TNO.

Voor het Westland is uit deze bronnen een goed beeld van de opbouw van de ondergrond te krijgen. Voor de B-driehoek geven deze rapporten veel minder inzicht. Van dit gebied is dan ook aan de hand van de in

het archief van het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening opgeslagen boringen een overzichtskaart gemaakt.

3.1.2 Geologische opbouw

Pleistoceen
Voor de opslag van regenwater komen in eerste instantie de relatef dicht onder het maaiveld gelegen zandige pakketten in aanmerking. Deze komen in het gebied voor tot zo'n 40 m beneden NAP. Beneden dit niveau bevinden zich ook nog wel zandige pakketten maar deze blijven buiten beschouwing omdat opslag in deze diepere lagen, om ekonomische redenen, niet in aanmerking komen.

Als basis voor het hydrologische systeem wordt hier de Formatie van Kedichem en de Formatie van Tegelen aangehouden. Omdat deze twee formaties op lithostratigrafische (qua gesteente opbouw) gronden moeilijk van elkaar zijn te scheiden worden zij als een eenheid aangemerkt. Het zijn vroeg-pleistocene fluviatiele afzettingen van Rijn en Maas bestaande uit fijne slibhoudende zanden afgewisseld met kleilagen. De bovenkant reikt tot zo'n 40 m -NAP.

Hierboven ligt de Formatie van Kreftenheye welke tot zo'n 20 m -NAP reikt. Het is een boven-pleistocene fluviatiele afzetting van Rijn en Maas en bestaat uit grove tot zeer grove bonte zanden met lokaal veel grind. Aan de bovenkant van de Formatie van Kreftenheye komt een grijze leemlaag voor met een dikte van een tot enkele meters. De bovenkant van deze leemlaag vormt de overgang van Pleistoceen naar Holoceen.

Holoceen
De afzettingen die de laatste 10.000 jaar hebben plaatsgevonden worden tot het Holoceen gerekend. Het zijn litorale (aan de kust gevormde), mariene (in zee gevormde) , estuariene (in riviermondingen gevormde), lagunaire (in strandmeren gevormde) en perimariene (op de overgang land en zee gevormde) afzettingen en behoren tot de Westland Formatie. Op grond van de afzettingsomstandigheden en de ouderdom heeft een opdeling in laagpakketten plaatsgevonden. Zo worden binnen de Westland Formatie onderscheiden:

- Oude Duin- en Strandafzettingen en Jonge Duin- en Strandafzettingen, gevormd in een litoraal milieu;
- Afzettingen van Calais en Afzettingen van Duinkerke, voornamelijk gesedimenteerd achter de strandwallen;
- Veen dat wanneer het onder de Afzettingen van Duinkerke ligt Basisveen wordt genoemd en wanneer dit niet het geval is als Hollandveen wordt aangeduid. Deze venen zijn over het algemeen zeer slecht doorlatend.

Het Hollandveen komt in verschillende dunne laagjes over grotere gebieden voor, zodat het mogelijk is om binnen de Afzettingen van Calais en binnen de Afzettingen van Duinkerke enige transgressiefasen te onderscheiden.
Zo worden onderscheiden:

Duinkerke	III	na 800	n.Chr.
Duinkerke	II	250- 600	n.Chr.
Duinkerke	I	500- 200	v.Chr.
Duinkerke	0	1500- 800	v.Chr.
Calais	IV	2700-1800	v.Chr.
Calais	III	3300-2700	v.Chr.
Calais	II	4300-3300	v.Chr.

Calais I 6000-4300 v.Chr.

De Calais-afzettingen komen over het algemeen in het hele gebied voor. De Duinkerke-sedimentaties worden daarentegen gekenmerkt door zandige geulsedimenten welke ingesneden zijn in het Hollandveen en vanuit dit geulsysteem afgezette kleiige afzettingen op het Hollandveen. De dikste laag Hollandveen wordt aangetroffen tussen de Afzettingen van Calais en de Afzettingen van Duinkerke.
Figuur 3.1 geeft een overzicht van het Holoceen in West-Nederland waarbij de relatie tussen transgressiefasen enerzijds en diepte en tijd anderzijds wordt gegeven.

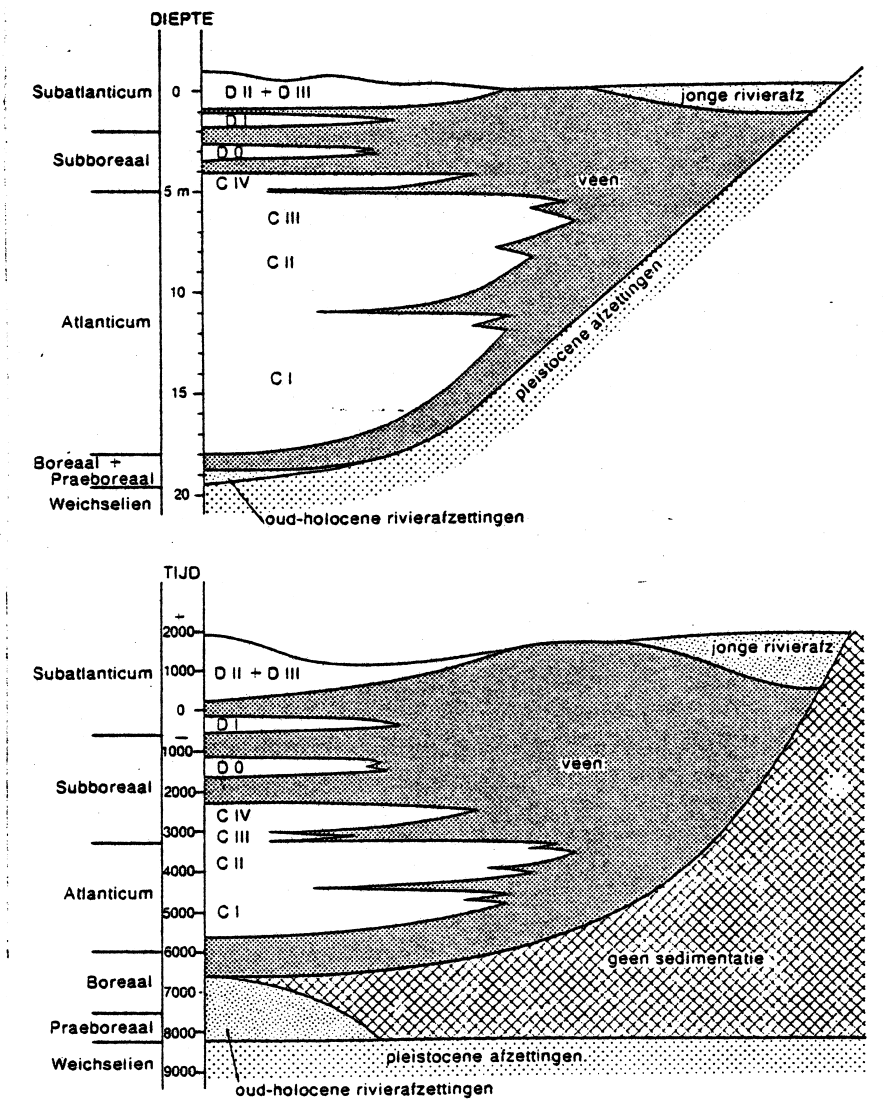


Fig. 3.1 Relatie tussen transgressiefasen enerzijds en diepte en tijd anderzijds (naar Pons et al., 1963).

In het kort zal nu worden ingegaan op de eigenschappen van de verschillende lagen die voor de geohydrologie van belang zijn, waarbij met name aandacht zal worden geschonken aan de lithologie, de stratigrafie en de ligging van de lagen.

Basisveen
Het Basisveen wordt op zo'n 15-20 m -NAP aangetroffen en vormt de overgang tussen het Pleistoceen en Holoceen. Het is meestal donkerbruin tot zwart, zeer compact en schilferig. Uit de

samenstelling van het veen valt te konkluderen, dat het onder zeer vochtige en voedselrijke omstandigheden is ontstaan, waarbij de voorkomende plantensoorten wijzen op zoetwaterplassen, die tijdens de veenvorming in diepte toenamen.
De veenlaag wordt in grote delen van het gebied niet aangetroffen. Komt hij wel voor, dan ligt hij boven de leemlaag van de Formatie van Kreftenheye. De afwezigheid van het Basisveen kan inhouden dat het veen nooit is gevormd, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van open rivierlopen, ofwel dat het is geerodeerd. Door compactie bedraagt de dikte van de laag doorgaans niet meer dan 25 cm.

Afzettingen van Calais I
De afzettingen van Calais I bestaan voornamelijk uit zware humeuze kleien, gyttja's en kleigyttja's (gytja is de modder op de bodem van een meertje en is rijk aan organisch materiaal). Aan de basis van de afzetting was het afzettingsmilieu bijna zoet terwijl daarna brakke en mariene invloeden de overhand kregen. Dit ging tevens gepaard met het zandiger worden van de afzettingen.
In de driehoek Naaldwijk-Maassluis-Wateringen zijn Afzettingen van Calais I aangetroffen terwijl in de rest van het gebied deze afzettingen zijn geerodeerd. De basis van het laagpakket ligt op zo'n 17 m -NAP terwijl de bovenkant in ligging varieert van 9-14 m -NAP.

Afzettingen van Calais II
De Afzettingen van Calais II bestaan voornamelijk uit matig grove tot matig fijne zanden met hier en daar grindinschakelingen. Rond het dorp De Lier bestaan de afzettingen uit kleiig zand met daartussen enkele kleibandjes. Van onder naar boven is een afname in korrelgrootte merkbaar; de bovenzijde bestaat meestal uit zware rietklei. De Afzettingen van Calais II worden in het hele gebied aangetroffen. De bovenkant ligt op zo'n 10 m -NAP.

Afzettingen van Calais III
De Afzettingen van Calais III bestaan veelal uit zand met aan de bovenkant een afdekkende rietklei. In het Westland is een geulopvulling uit de Calais III-fase bewaard gebleven. Op deze plaats komt aan de bovenkant van de afzettingen lokaal een gerijpte klei voor. In het noordwestelijk gedeelte van het Westland ligt de bovenkant van Calais III op ongeveer 5 m -NAP en wigt uit tegen de Oude Duin- en Strandzanden.

Afzettingen van Calais IV
Binnen de Afzettingen van Calais IV worden geulsedimenten, kwelderafzettingen en afzettingen in strandsvlakten onderscheiden.
Het geulsediment bestaat uit zand, waarvan de korrelgrootte van onder naar boven in korrelgrootte afneemt; tevens neemt de afwisseling met dunne kleilaagjes toe. De bovenkant bestaat veelal uit een kleilaag.
De kwelderafzettingen bestaan aan de basis uit lichte klei en aan de bovenkant uit zware klei. De Afzettingen van Calais IV in de strandvlakte bestaan meestal uit zware klei. De bovenkant van de Afzettingen van Calais IV reiken tot zo'n 3 m -NAP.

Hollandveen
Het veen, dat voorkomt samen met de Afzettingen van Calais en Duinkerke, wordt, met uitzondering van het Basisveen, tot het Hollandveen gerekend. Ten noorden van de Maasmond bestaat het uitsluitend uit rietveen, wat aangeeft dat dit veen in een eutroof (voedselrijk) milieu gevormd is. Het veen dat werd gevormd op de strandvlakten tussen de strandwallen bestaat aan de basis uit rietveen, waarboven mesotroof (matig voedselrijk) zeggeveen met

RID

houtresten aanwezig is. De dikte van het Hollandveen is variabel en bedraagt enkele decimeters tot enkele meters.

Afzettingen van Duinkerke 0
De Geulafzettingen uit de Duinkerke 0-fase bestaan doorgaans uit een pakket fijn gelaagd zand en zavel. De afzettingen langs de geulen bestaan veelal uit lichte klei, terwijl de dekafzettingen uit humeuze rietklei bestaan welke zowel lateraal als verticaal overgaan in venige rietklei en vervolgens in veen.

Afzettingen van Duinkerke I
Deze afzettingen bestaan uit geul- en dekafzettingen waarbij de geulafzettingen grotendeels uit klei afgewisseld met zandlaagjes bestaan en de dekafzettingen opgebouwd zijn uit zware kleien.

Afzettingen van Duinkerke II
De Afzettingen van Duinkerke II komen voor in de Gantelmonding (de Gantel is een oude stroomgeul ten zuidoosten van 's-Gravenzande) bij Naaldwijk en bestaan voornamelijk uit klei met veel rietresten.

Afzettingen van Duinkerke III
De Afzetttingen van Duinkerke III zijn op lithostratigrafische gronden onderverdeeld in twee soorten dekafzettingen; de Afzettingen van Duinkerke IIIa, hoofdzakelijk in de tweede helft van de 12e eeuw afgezet en de Afzettingen van Duinkerke IIIb die na 1200 zijn gesedimenteerd.
De Duinkerke IIIa geul- en plaatafzettingen bestaan doorgaans uit matig fijn zand. De dikte bedraagt over het algemeen niet meer dan een meter en reiken in een groot deel van het gebied tot aan het maaiveld. Bij 's-Gravenzande heeft zich een zandbank ontwikkeld met een dikte van een 15 meter.
De Afzettingen van Duinkerke IIIb zijn geulsedimenten en bestaan in het algemeen uit grove zanden die naar boven toe fijner worden. In het Westland zijn twee geulen uit deze fase bekend; een geul die van Maasdijk via 's-Gravenzande ten zuiden van Monster in zee uitmondde en een geul die ten zuiden van de Staelduinen loopt en ten noorden van Hoek van Holland een uitweg naar zee zocht.

Oude en Jonge Duin- en Strandafzettingen
Duinzanden bestaan doorgaans uit humusarme, matig fijne zanden, terwijl bij de strandzanden door het voorkomen van lutum (deeltjes kleiner dan .002 mm) sprake kan zijn van matig tot sterk kleiig zand. De overgang is vrijwel nooit aantoonbaar.
Oude Duin- en Strandafzettingen komen ook voor binnen de driehoek Naaldwijk-Wateringen-Monster. De basis ligt op een diepte van 10 - 12 m -NAP en de bovenkant reikt tot gemiddeld 2 - 3 m -NAP, terwijl een aantal duinkopjes tot aan het maaiveld reiken.
Jonge Duin- en Strandafzettingen zijn langs de kust gelegen.

Bijlage 1 geeft een overzicht van de verschillende pakketten volgens een viertal raaien. Deze bijlage is integraal overgenomen van de "Toelichting bij de geologische kaart 1:50.000, blad 37W" van de RGD en geeft een goed inzicht in de opbouw van de ondergrond in het Westland. (Voor verdere toelichting zij naar dit RGD-werk verwezen)
Voor de B-driehoek is de geologische kaart nog niet gereed. Voor dit gebied is aan de hand van boorbeschrijvingen een kaart gemaakt (bijlage 2). Deze kaart geeft een beeld van het voorkomen van zand, klei en veen.

3.1.3 Geohydrologie en waterkwaliteit

Algemeen
Bij opslag van regenwater in de ondergrond en het terugwinnen van dit water uit de ondergrond zijn een drietal technische aspecten van belang, te weten:

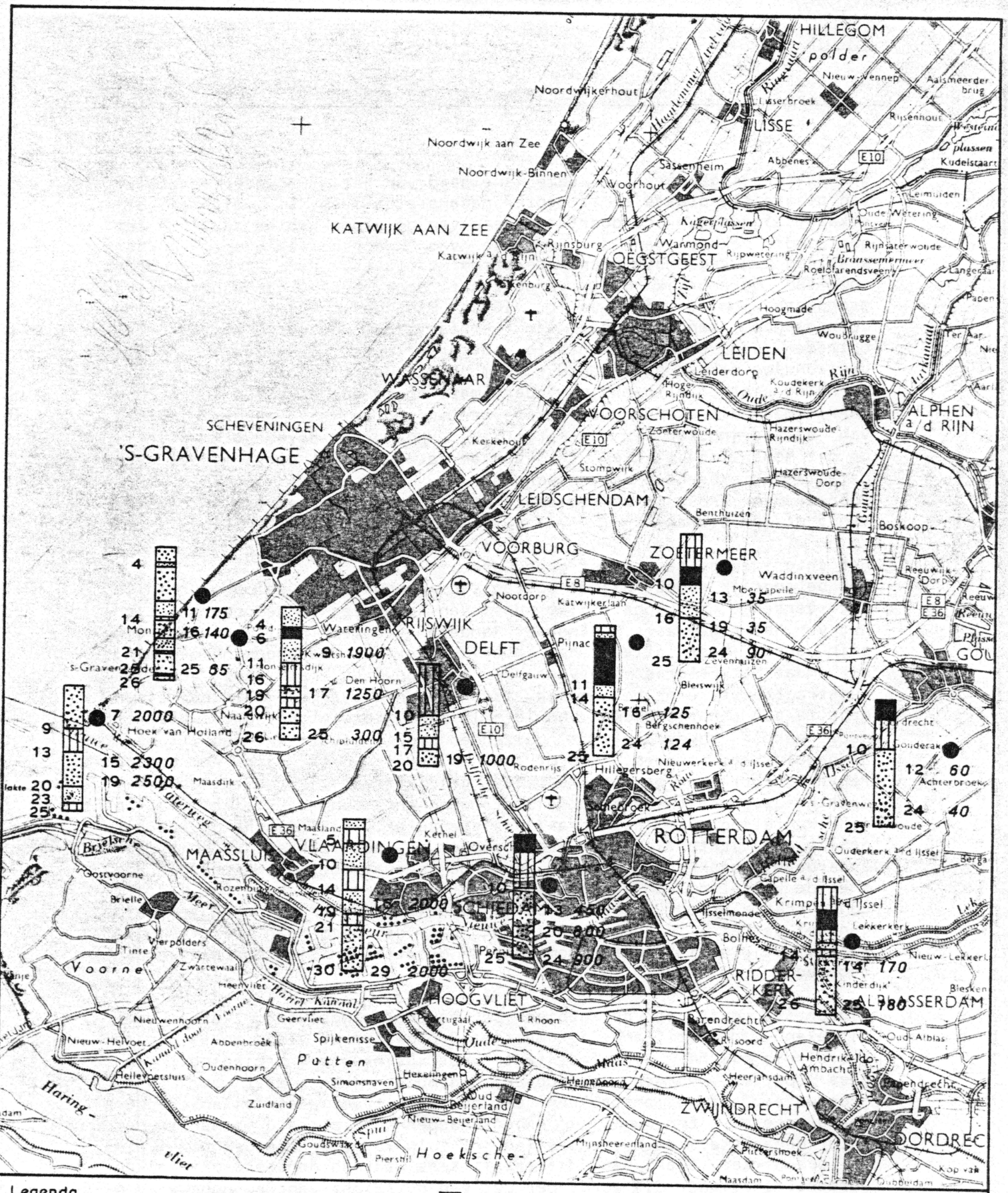
- de doorlatendheid van het pakket;
- de natuurlijke grondwaterstroming;
- het chloridegehalte van het grondwater.

Daarnaast zijn ekonomische faktoren van belang bij de plaatsbepaling van de ondergrondse opslag van regenwater. Zo zullen de kosten verbonden aan het inzamelen, transport, opslag en levering van het regenwater lager moeten zijn dan de kostprijs van het op een andere wijze te verkrijgen water. Dit brengt met zich mee dat de opslag zo dicht mogelijk bij de kas moet plaats vinden.

De doorlatendheid van het watervoerende pakket
Om water in voldoend grote hoeveelheden en binnen een redelijke tijd uit de grond te kunnen oppompen dient een pompput gemaakt te worden. Het water dat de put instroomt wordt door middel van een pomp omhooggehaald en gedistribueerd. De mate van toestroming in de ondergrond naar de pompput wordt in sterke mate bepaald door de doorlatendheid van het pakket waaruit grondwater gewonnen wordt. Zo is de doorlatendheid van klei- en veenlagen te gering om er water aan te kunnen onttrekken. Voor opslag komen slechts zandige pakketten in aanmerking. Verontreinigingen van zandpakketten door klei- en veendeeltjes hebben in dit verband ook een negatieve invloed op de doorlatendheid.
Uit oogpunt van doorlatendheid komen in principe de volgende zandige afzettingen voor opslag van regenwater in aanmerking: de Fromatie van Kreftenheye, de Afzettingen van Calais II, Duinkerke IIIa, de Duin- en Strandafzettingen alsmede de geulsedimenten van Duinkerke IIIb. De Formatie van Kreftenheye komt waarschijnlijk in het hele Westland en de B-driehoek voor en bestaat uit grofzandige afzettingen welke op zo'n 20 - 40 m -NAP voorkomen. De andere afzettingen bestaan over het algemeen uit fijn tot matig-fijn zand en komen niet continue in het hele gebied voor. Zo komen de Afzettingen van Duinkerke IIIa en de Duin- en Strandafzettingen hoofdzakelijk in het westelijke deel van het Westland voor, terwijl de geulafzettingen van Duinkerke IIIb hoofdzakelijk in de oude stroomgeulen wordt aangetroffen. Ook de dikte van deze lagen is sterk wisselend, zo komen lagen van 2 m maar ook lagen tot 10 en meer m voor.
Hoewel uit bijlage 1 een redelijk beeld van de geologische opbouw van het Westland verkregen kan worden, laat de schaal geen conclusies toe over details. Detail onderzoek is gewenst; het is in elk geval noodzakelijk ter voorbereiding van concrete projecten.
Voor de B-driehoek geeft bijlage 2 een overzicht van het voorkomen van zandige pakketten. Deze kaart is vervaardigd aan de hand van de boorgegevens uit het archief van het Rijksinstiuut voor Drinkwatervoorziening. Er is geen uitsplitsing gemaakt naar formaties en afzettingen zoals is gebeurd voor het Westland. Op bijlage 2 worden alleen zand (fijn en matig-grof tot grof), klei en veen onderscheiden. Ook voor de B-driehoek is nadere detaillering van de verspreiding en de dikte van de zandige lagen gewenst.

Natuurlijke stroming
Het geinfiltreerde regenwater zal ondergronds worden meegevoerd door de natuurlijke grondwaterstroming. Hoe snel het water wordt meegevoerd hangt af van de snelheid van de natuurlijke grondwaterstroming. De richting van de grondwaterstroming is loodrecht op de grondwaterisohypsen (lijnen van gelijke

RID



RIJKSINSTITUUT VOOR DRINKWATERVOORZIENING *HYDROLOGISCHE HOOFDAFDELING* 1983		Titel: CHLORIDEGEHALTEN VOLGENS MEETNET "GRONDWATERKWALITEIT"			
Get. JD	Schaal: 1:250.000	Project:	Bijlage Fig. 3.2	Form. A4	Tek. nr.
Gez.					

grondwaterstijghoogten). Deze snelheid van het grondwater verschilt van plaats tot plaats en is groter naarmate de isohypsen dichter bij elkaar liggen en de doorlatendheid van de grond groter is.. In het grofzandig pakket van de Formatie van Kreftenheye vindt in het Westland een regionale grondwaterstroming plaats. Deze stroming wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door een vrij aanzienlijke grondwaterwinning in Delft (Gist Brocades). Met name in de zomermaanden kan hierdoor een verplaatsing van de zoetwaterbel optreden van enkele tientallen meters (orde 20 m/jaar) in het grofzandige pakket op zo'n 20 - 40 m -NAP. Waarschijnlijk treedt deze stroming niet of althans in mindere mate op in de pakketten boven 20 m -NAP; maar hier kunnen wel lokale stromingen optreden onder invloed van afwateringskanalen en dergelijke. Hoe groot deze zullen zijn is op dit moment moeilijk aan te geven en zal eventueel door middel van detail-studie bekeken moeten worden.
Voor de B-driehoek is de regionale stroming geringer en zal in de orde van 5 m/jaar bedragen.

Het chloridegehalte van het grondwater.
Een belangrijk aspect bij de opslag van regenwater in de ondergrond is het verschil in soortelijke massa van het water in de ondergrond en dat van het regenwater. Alhoewel andere stoffen niet onbelangrijk zijn wordt hier alleen het chloridegehalte in beschouwing genomen; dit omdat het chloride-ion voor de tuinbouw en met name voor de substraatteelt erg belangrijk is. De neerslag die valt heeft een gehalte aan chloride-ionen van 10 - 15 mg/l, terwijl het grondwater al gauw enkele honderden tot duizenden mg/l bevat en dus als brak aangeduid kan worden. Wordt nu in vrij korte tijd een zoete regenwaterbel in de brakke laag geinfiltreerd, dan zal door het dichtheidsverschil een dichtheidsstroming ontstaan, die zich uit in een kanteling van het brak/zoet grensvlak. Het dichtheidsverschil drijft het lichtere, zoete water omhoog in het pakket waarbij het zwaardere, brakke water zich onder de zoetwaterbel zal dringen. Hoe snel de kanteling van het grensvlak zal plaats vinden hangt af van het concentratieverschil tussen beide vloeistoffen en de doorlatendheid van het pakket. In appendix I zal aan de hand van berekeningen kwantitaitieve informatie omtrent de grootte van dit fenomeen worden gegeven.

Figuur 3.1 geeft voor het gebied de bemonsteringsputten welke deel uitmaken van het landelijk meetnet Grondwaterkwaliteit zoals dit in gebruik is bij het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening. Aan deze putten worden periodiek, globaal een maal per jaar, grondwatermonsters onttrokken en op een twintigtal eigenschappen geanalyseerd. Een van de eigenschappen die bepaald worden is het chloridegehalte. De putten reiken tot zo'n 25 meter beneden maaiveld en beschikken over een drietal filters waaraan monsters onttrokken worden. In figuur 3.1 wordt per put een overzicht van de opbouw van de ondergrond gegeven waarbij een onderscheid in klei-, veen- en zandlagen is gemaakt. Deze onderverdeling is gelijk aan die op bijlage 2: links van de boorstaat is de diepteligging in meters beneden maaiveld aangegeven van de overgang van de lagen terwijl rechts van de boorstaat de diepteligging van de filters in meters beneden maaiveld zijn aangegeven, alsmede de gemiddelde waarde van het chloridegehalte vanaf het begin van de waarnemingen (vanaf 1979).
In bijlage 2 is voor de omgeving van de B-driehoek eveneens een overzicht van het chloridegehalte gegeven voor de boringen waar grondwateranalyses zijn uitgevoerd.
Uit figuur 3.1 en bijlage 2 kan geconcludeerd worden dat het chloridegehalte in het Westland, met uitzondering van de duinen enkele

RID

duizenden milligrammen per liter bedraagt. Voor de B-driehoek en de duinen bedraagt het chloridegehalte slechts enkele honderden tot duizend milligrammen per liter. Met name in het noordelijke deel komen lage concentraties voor hetgeen uitermate gunstig is voor de opslag van regenwater. Uit de boring bij Naaldwijk, figuur 3.1, wordt op een diepte van 25 meter eveneens een laag chloridegehalte aangetroffen (300 mg/l), hier is echter sprake van een grote natuurlijke grondwaterstroming vanuit de duinen.

Doorlatendheid van het watervoerende pakket
De doorlatendheid van het watervoerende pakket voor grondwaterstroming wordt onder andere bepaald door de struktuur van het korrelskelet, de gradering van de korrels en het slibgehalte. Over het algemeen geldt: Hoe grover en hoe minder slibdeeltjes in het pakket des te groter de doorlatendheid. Hoewel in het verleden overal ter wereld verschillende pogingen zijn ondernomen om de doorlatendheid te bepalen aan de hand van de korrelgradering en het slibgehalte, zijn de waarden op deze manier verkregen toch op zijn minst dubieus. De beste resultaten worden verkregen door het uitvoeren van een pompproef. Binnen het gebied zijn echter maar twee pompproeven uitgevoerd en wel een bij de De Lier in 1954 en een bij Schipluiden in 1968. Bij beide werd voor het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket een waarde van 1000 m2/dag gevonden. Bij een dikte van het pakket van 18 meter wordt voor de doorlatendheid van de Pleistocene zandafzettingen een waarde van 55 m/dag gevonden. De TNO-kaarten geven een regionaal beeld van de kD. Hieruit volgt een kD in de orde van 1000 m2/d bij een pakketdikte van rond 25 m. De hieruit resulterende doorlatendheid van 35 m/d is in de rest van dit rapport voor de Pleistocene afzettingen aangehouden.
De afzettingen in het Holoceen zijn fijner, hier is als waarde voor de doorlatendheid van 10 m/dag aangehouden.

3.1.4 Geohydrologische schematisering

Op grond van de geohydrologische gegevens wordt een drietal situaties onderscheiden die als kenmerkend voor het gebied mogen worden aangemerkt. Voor de verdere berekeningen in dit rapport is van deze karakteriseringen uitgegaan.
Situatie 1 heeft betrekking op het zandige pakket van Pleistocene herkomst dat zich globaal op zo'n 20 meter beneden maaiveld bevindt en een 20 meter dik is.
Situatie 2 heeft eveneens betrekking op het zandige pakket van Pleistocene herkomst maar nu in de omgeving van Bleiswijk.
Situatie 3 heeft betrekking op de Holocene zandlagen zoals die in het gebied voorkomen.
Voor deze situaties zijn de volgende eigenschappen aangehouden:

1) Situatie Westland

pakketdikte	:	25 m
porositeit	:	35 %
doorlatendheid	:	35 m/d
natuurlijke grondwaterstroming	:	0,05 m/d
chloride concentratie	:	2000 mg/l

2) Situatie Bleiswijk

pakketdikte	:	25 m
porositeit	:	35 %

doorlatendheid	:	35 m/d
natuurlijke grondwaterstroming	:	0,01 m/d
chloride concentratie	:	400 mg/l

3) Situatie Holoceen

pakketdikte	:	7 m
porositeit	:	35 %
doorlatendheid	:	10 m/d
natuurlijke grondwaterstroming	:	0,01 m/d
chloride concentratie	:	1000 mg/l

3.2 Meteorologisch

3.2.1 Gebuikte gegevens

Hoewel, dankzij de medewerking van het ICW en het KNMI meteorologische gegevens op dagbasis en op decadebasis ter beschikking stonden over de periode 1951-1980, is, omwille van de beschikbare tijd, voor dit project, slechts gebruik gemaakt van de gegevens over de periode 1971-1980. Gezien de hiervoor reeds beschreven noodzaak om bij regenwaterinfiltratie over een voldoend groot buffervat te beschikken, komt waterverlies door overstorten van dit vat zelden voor. Dit betekent dat het niet nodig is met de meteorologische gegevens op dagbasis te werken en dat met de decadegegevens kan worden volstaan. Dit is in dit rapport gedaan. (Aan het einde van dit hoofdstuk zijn grafieken gegeven waarin neerslag, waterbehoefte en het verschil per decade zijn opgenomen, over de periode 1971-1980).

De behoefte aan water is berekend uit de neerslag, temperatuur en de globale straling, met formules verkregen van Dr. Hamaker van het ICW. Dezelfde werkwijze is toegepast door Tangena en Hamaker (1982). Ook zijn dezelfde gewasfactoren geruikt. Afwijkend de hoeveelheid water voor worteldoorspoeling, waarvoor hier, zonder de nuances van Tangena en Hamaker, 15% is aangehouden. Tenslotte wijkt de formule voor de berekening van de extra verdamping ten gevolge van het stoken van de kassen iets af. Hij luidt nu:

$E_{STOOK}=(1-TEMP_{buiten}/TEMP_{kas}) \quad * \quad 10^{-3}$
[m/d]

Waarbij de kastemperatuur $TEMP_{kas}$ op 18° is gesteld.

De bovenstaande en hier gebruikte formule is een door Hamaker aangepaste versie van de formule in Tangena en Hamaker (1982). De verschillen zijn echter gering.

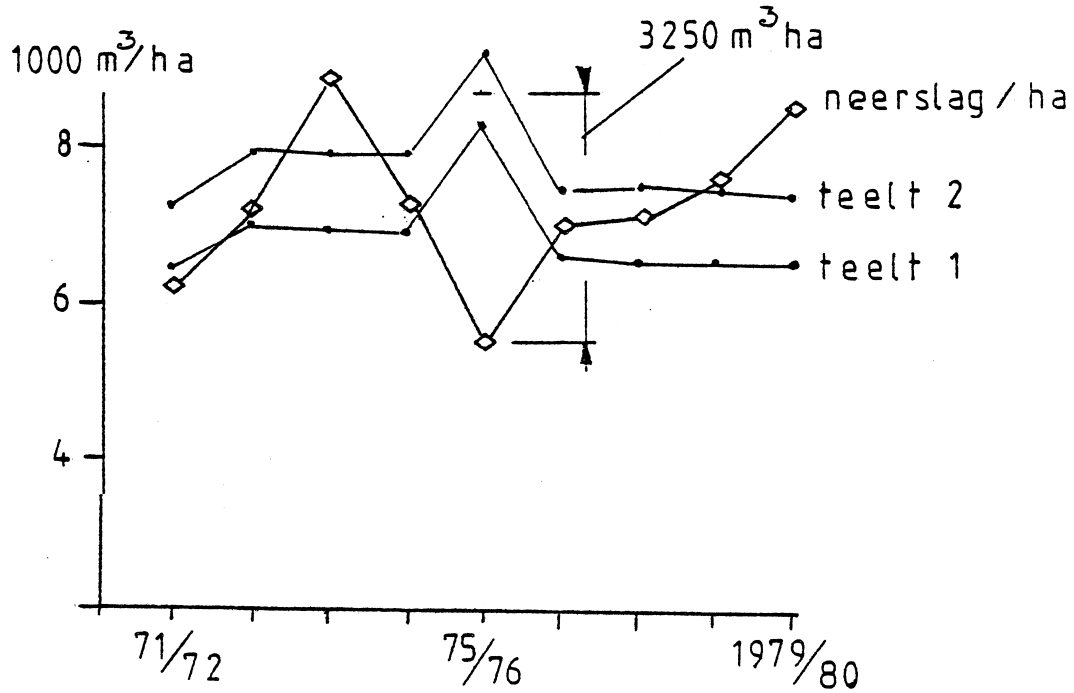
3.2.2 Neerslag versus behoefte aan gietwater

De balans tussen de behoefte aan gietwater en de beschikbaarheid aan hemelwater kan worden geillustreerd door sommatie van vraag en aanbod over de gehele periode 1971-1980. Bij deze sommatie zijn twee teelten onderscheiden, t.w. een met een relatief grote waterbehoefte (tomaten, komkommers) en een met een relatief kleinere waterbehoefte (bijv. papikra's, aubergines). Dit onderscheid is ook door Tangena en Hamaker (1982) gemaakt. Genoemde sommatie levert het volgende resultaat:

Neerslag	*Teelt*	*Teelt2*
65400(m3/ha)	*61000(m3/ha)*	*69000(m3/ha)*
100%	*96%*	*106%*

Uit deze cijfers blijkt dat de waterbehoefte praktisch even groot is als de neerslag die over een langere periode op hetzelfde oppervlak valt (zie ook de grafieken aan het einde van dit hoofdstuk). Houdt men rekening met de onvermijdelijk optredende verliezen door overstorten van bassins, verdamping vanuit bassins en het glasoppervlak zelf, door ondergrondse afstroming en vermenging met zout grondwater etc. dan is er gemiddeld een duidelijk tekort aan neerslagwater. In dit tekort zal op andere wijze moeten worden voorzien, bijvoorbeeld door middel van ontziltingsinstallaties of vanuit het openbare leidingwaternet.

Een belangrijk facet zijn de verschillen die tussen opeenvolgende jaren kunnen optreden in de beschikbaarheid van neerslagwater. Figuur 3.5 is een overzicht voor de periode 1971-1980. Uitgezet zijn de neerslag en de waterbehoefte van beide teelten als totaal per ha per jaar. Als het jaar is hierbij een aanengesloten teeltseizoen genomen, lopend van en met decade 31 (eerste week van november) tot en met decade 30 (laatste week van oktober) van het volgende jaar.



Figuur 3.5: Jaartotalen van de neerslag en de waterbehoefte van beide teelten, berekend v/m decade 31 t/m decade 30.

De grafiek geeft direkt een indruk van de verschillen die van jaar tot jaar optreden. Zo is er in 1973/74 en in 1979/80 een overschot aan regenwater ten opzichte van de

gemiddelde van de behoefte van beide teelten, terwijl in de andere jaren er een tekort aan water is. In het seizoen 1975/76 (d.w.z. de extreem droge en warme zomer van 1976) was het tekort zelfs meer dan 3000m3/ha.

Had men gedurende een jaar alleen de beschikking over regenwater en een voorraad, dan had zou men een voorraad nodig hebben die veelal beduidend groter is dan het aangegeven tekort over 1976. Dit komt omdat het meeste water dat in een winter over is en kan worden opgeslagen, in de zomer over het algemeen in zijn geheel weer nodig is. De variatie binnen een jaar is derhalve veelal groter dan de variatie tussen jaren. Dit betekent dat zeer grote bekkens nodig zouden zijn om winteroverschotten volledig te benutten.

Het bovenstaande wordt geillustreerd in de tabel 3.1. Deze tabel is samengesteld door vanaf decade 30 neerslag minus behoefte cumulatief te berekenen tot aan dezelfde decade in het volgende jaar. De zo verkregen getallen weerspiegelen het verloop van het volume in een denkbeeldig bekken dat bij aanvang (decade 31) leeg is.

Uit tabel 3.1 blijkt dat het maximum volume in dit bekken omstreeks eind februari/begin maart wordt bereikt en een omvang heeft van 1500 tot ruim 3000m3/ha. Ook blijkt dat het minimum volume (bereikt zo rond oktober) vaak sterk negatief is. Dit laatste betekent dat de negatieve waarde feitelijk aan het begin van de rekenperiode reeds in het bekken aanwezig zou moeten zijn om het gehele seizoen door te komen, zonder water van elders te moeten betrekken. Het totale bekkenvolume dat hiertoe in staat zou zijn bedraagt rond 5000 tot 6000m3/ha. Het is duidelijk dat bassins met een dergelijke omvang in lang niet alle tuinderijen realiseerbaar zijn, afgezien noch van de financiele offers die dergelijke bekkens vergen.

Voor teelt 1 (relatief geringe waterbehoefte)

JR/JR	DEC	m3/ha	DEC	m3/ha	m3/ha na jr
71/72	5	1420	29	-585	-320
72/73	5	1719	26	-1080	+285
73/74	8	2056	21	-540	+1890
74/75	5	3180	25	+90	+310
75/76	3	2210	24	-2425	-1910
76/77	6	2470	20	-70	+430
77/78	9	2890	26	+50	+560
78/79	9	2280	28	+625	+1060
79/80	4	2931	17	+900	+2100

Voor teelt 2: (relatief grote waterbehoefte)

JR/JR	DEC	m3/ha	DEC	m3/ha	m3/ha na jr
71/72	5	1325	28	-1560	-1200
72/73	5	1630	26	-2130	-690
73/74	8	1980	21	-1125	+960
74/75	8	3090	25	-930	-685
75/76	3	2154	24	-3390	-2910
76/77	6	2380	27	-945	-460
77/78	9	2790	26	-935	-345
78/79	9	2150	28	-413	+90
79/80	4	2844	27	+420	+1210

Tabel 3.1: Maximum en minimum volume bij cumulatieve berekening van neerslag minus waterbehoefte per ha, steeds vanaf decade 31. De rechterkolom geeft het overschot (+) of het tekort (-) over een heel jaar.

3.2.3 Beschikbaarheid aan hemelwater in de winter voor het opbouwen van een beginvoorraad

Alvorens een voorraadsysteem te kunnen gebruiken dient het te worden gevuld. Men zou ook van opladen kunnen spreken. Bij regenwaterinfiltratiesystemen lijkt de meest geschikte "oplaadstrategie" die waarbij gedurende de winter voorafgaand aan de in gebruikname van het regenwater-infiltratiesysteem alle beschikbare hemelwater wordt geinfiltreerd en geen water wordt onttrokken. De periode tussen september en februari lijkt hiervoor het meest4 geschikt. In deze periode is de behoefte aan water gering en de neerslag, met name in de herfst, het grootst.

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de gemiddelde neerslag in

m3/ha/d gedurende de periode van en met september (decade 25) tot en met februari (decade 6) in de jaren 1971-1980.

Periode	*m^3/ha/d*
71/72	*12,9*
72/73	*16,6*
73/74	*22,8*
74/75	*36,7*
75/76	*19,4*
76/77	*23,4*
77/78	*22,1*
78/79	*19,5*
79/80	*22,4*

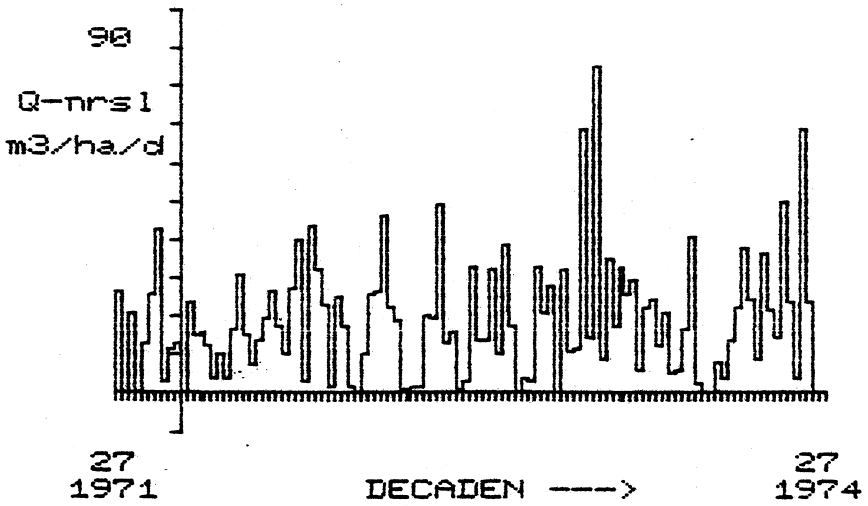
Tabel 3.2: Gemiddelde neerslag in m3/ha/d voor Naaldwijk tussen v/m decade 25 t/m decade 6 in de periode 1971-1980.

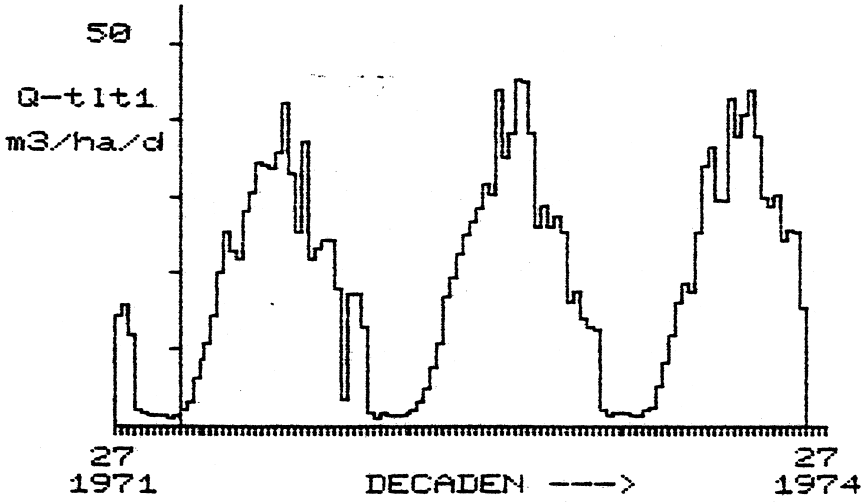
Uit deze tabel blijkt dat er van jaar tot jaar aanzienlijke verschillen te verwachten zijn in de neerslag. Dit betekent, dat tuindersbedrijf ronduit pech kan hebben, wanneer men een droge winter treft. Het geovolg zal dan zijn, dat het regenwater-infiltratiesysteem maar voor een beperkt deel van zijn maximale capaciteit zal kunnen functioneren. Afgezien van de verschillen die per jaar optreden, blijkt dat 20m3/dag (vergelijk de in hoofdstuk 2 besproken opnamecapaciteit van de put, die in de orde was van 20m3/uur) gedurende een winterperiode als uitgangspunt voor ontwerpberekeningen dienst kan doen. Dit is in dit rapport verder gedaan.

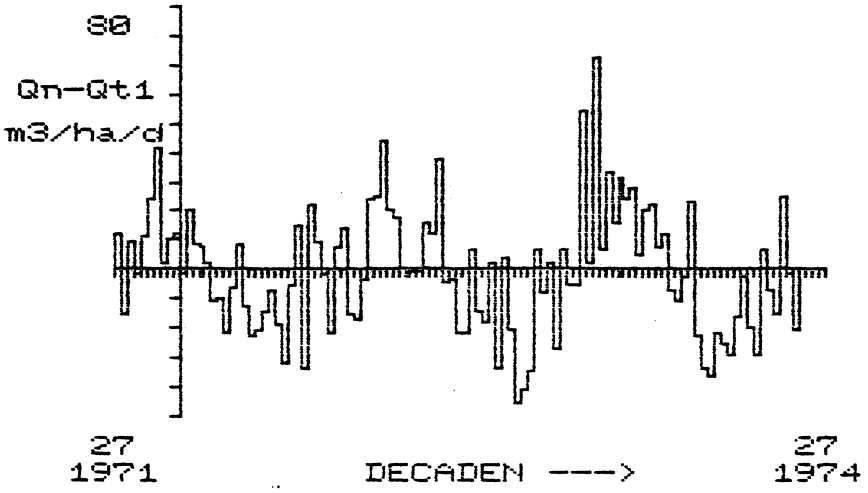
Om een geheel decennium door te rekenen is een start in maart 1971 in feite een ongelukkige, aangezien de jaren 1971 en 1972 relatief droge jaren waren. Toch is een dergelijke situatie reeel. In de praktijk kan het in zo'n geval betekenen dat het opladen in een winter onvoldoende is voor optimaal gebruik in de periode daarna. Deze situatie zal dan kunnen worden bijgestuurd door het beroep dat men op de voorraad doet in de eerste periode van gebruik te beperken. Hiertoe moet de inzet van andere bronnen als, ontzilting en of leidingwater, aanvankelijk iets hoger zijn, dan volgens de planning de bedoeling was. De hiervoor benodigde capaciteitsruimte dient in het ontwerp opgenomen te zijn als veiligheid. In latere jaren kan de voorraad dan op zijn ontwerpwaarde worden aangesproken.

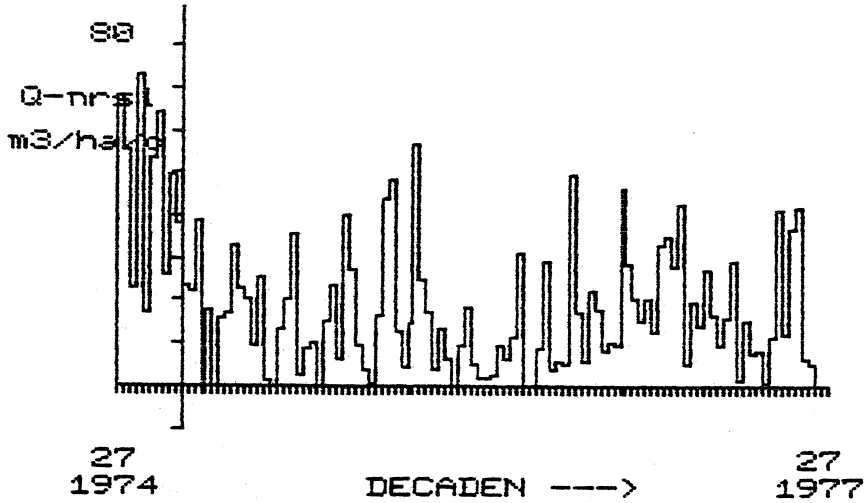
Figuren 3.6: Verdeling van de neerslag en waterbehoefte per decade over de periode 1971-1980, voor een teelt met een relatief hoge waterbehoefte (komkommers, tomaten) en voor een teelt met een relatief geringe waterbehoefte (paprika's, aubergines), op basis van meteorologische gegevens berekend volgens Hamaker (Tangena en Hamaker, 1982; Hamaker, persoonlijk overleg, 1983)

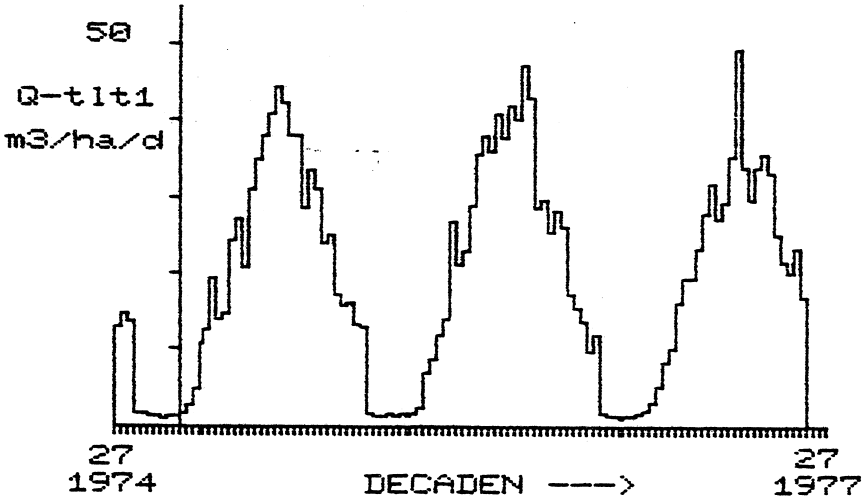
De figuren 3.6 zijn op de volgende pagina's geplaatst.

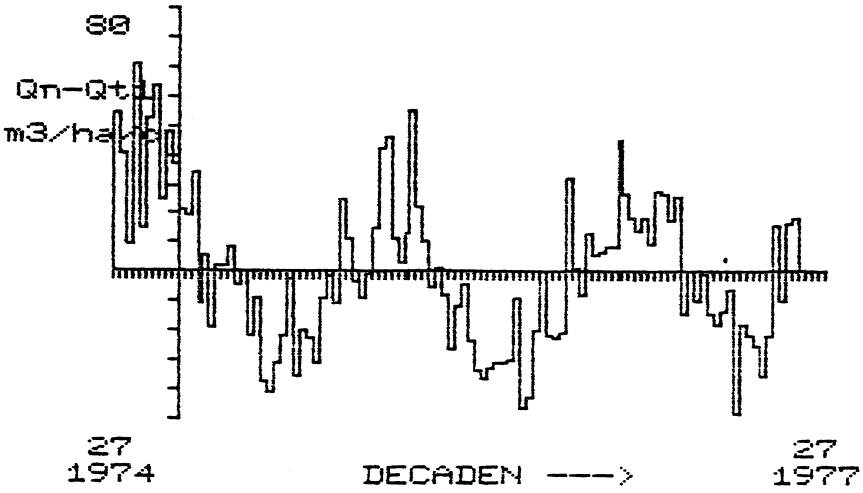

90
Q-nrs1
m3/ha/d
27
1971
DECADEN --->
27
1974

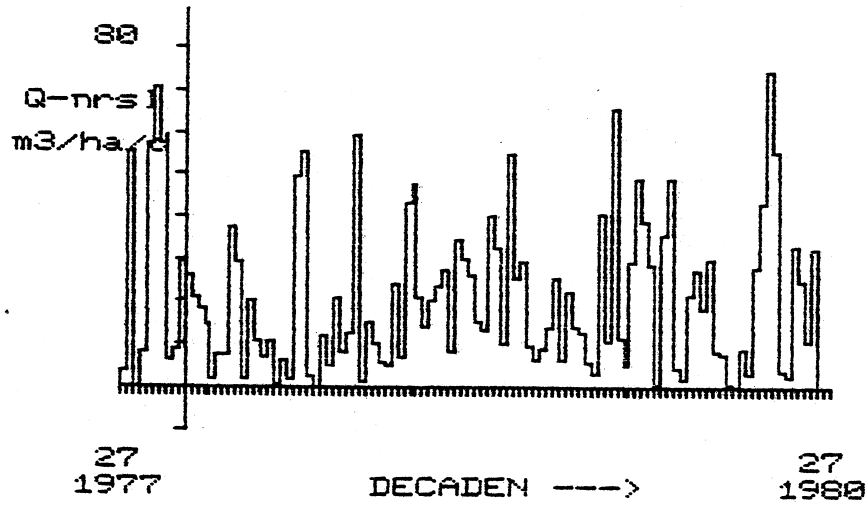

50
Q-tlt1
m3/ha/d
27
1971
DECADEN --->
27
1974

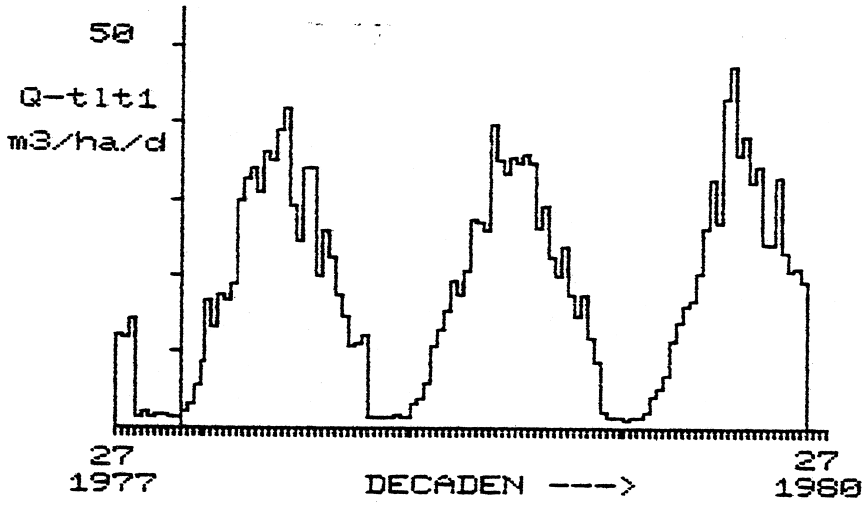

80
Qn-Qt1
m3/ha/d
27
1971
DECADEN --->
27
1974

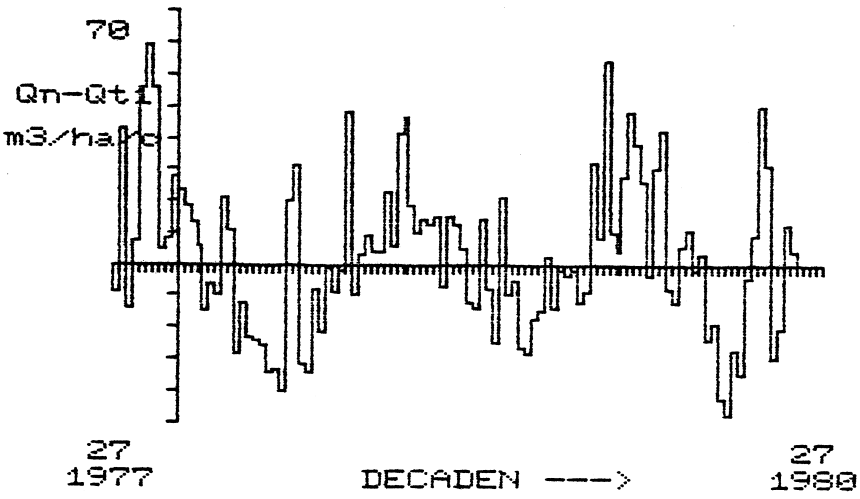

80
Q-nrsl
m3/ha/d
27
1974
DECADEN --->
27
1977

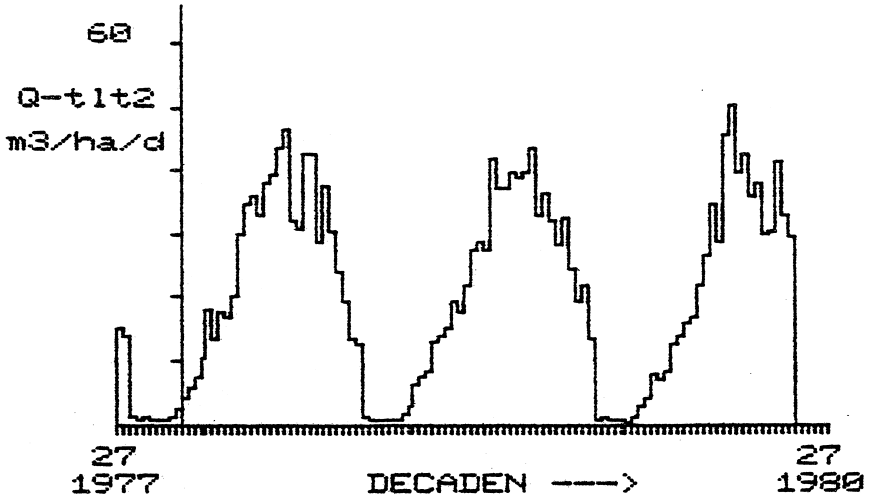

50
Q-tlt1
m3/ha/d
27
1974
DECADEN --->
27
1977

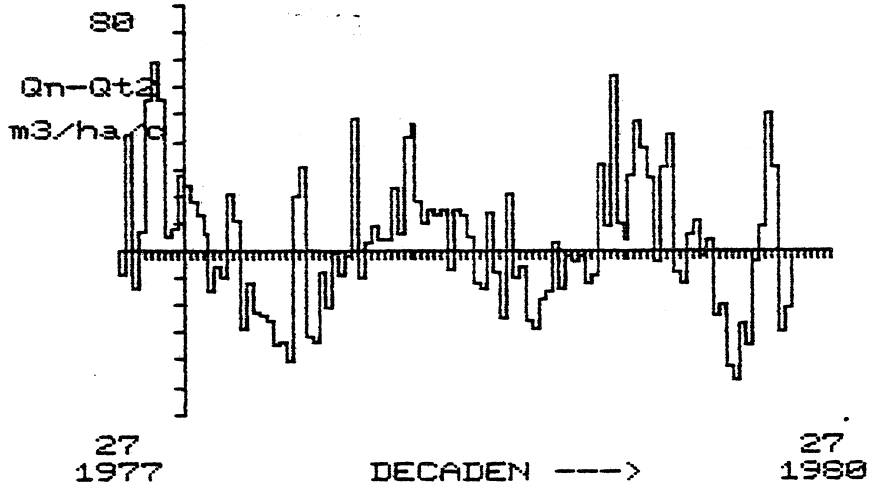

80
Qn-Qt
m3/ha/d
27
1974
DECADEN --->
27
1977

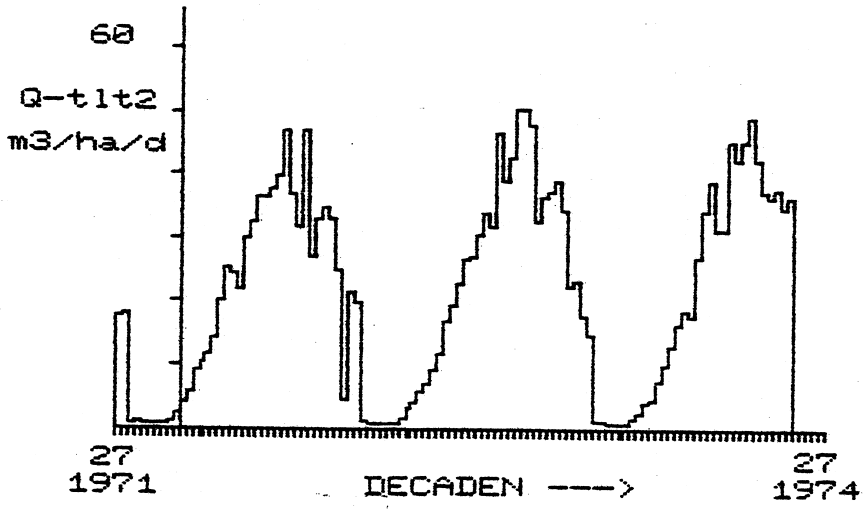

80
Q-nrs1
m3/ha/d
27
1977
DECADEN --->
27
1980

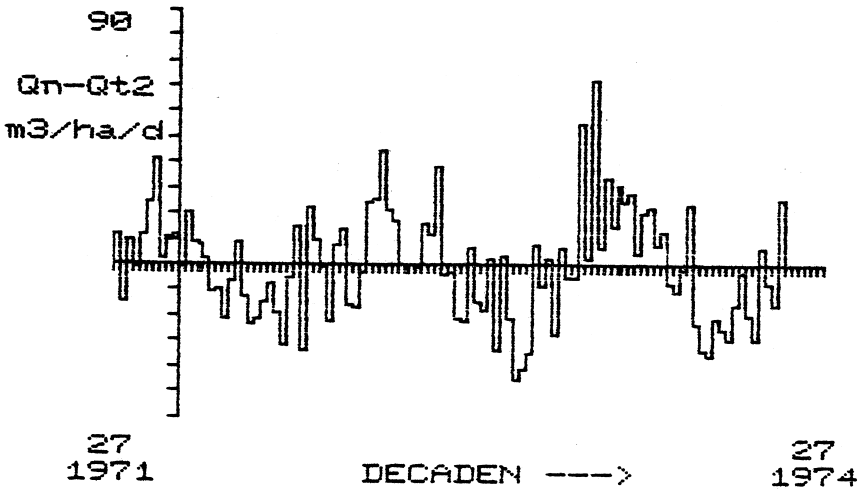

50
Q-tlt1
m3/ha/d
27
1977
DECADEN --->
27
1980

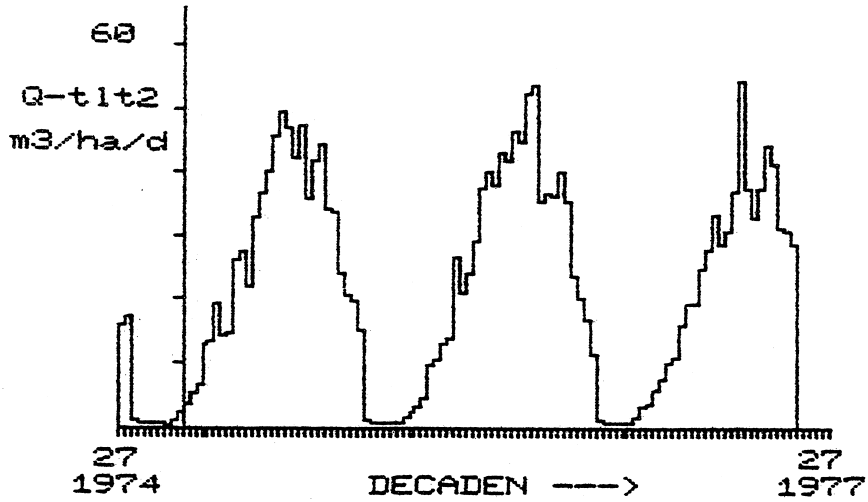

70
Qn-Qt1
m3/ha/d
27
1977
DECADEN --->
27
1980

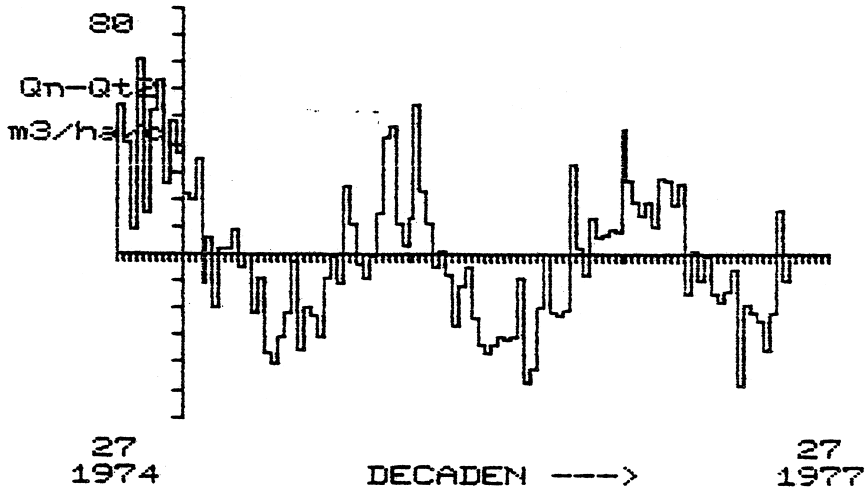

60
Q-t1t2
m3/ha/d
27
1977
DECADEN ---->
27
1980


80
Qn-Qt2
m3/ha/d
27
1977
DECADEN ---->
27
1980


60
Q-t1t2
m3/ha/d
27
1971
DECADEN --->
27
1974


90
Qn-Qt2
m3/ha/d
27
1971
DECADEN --->
27
1974

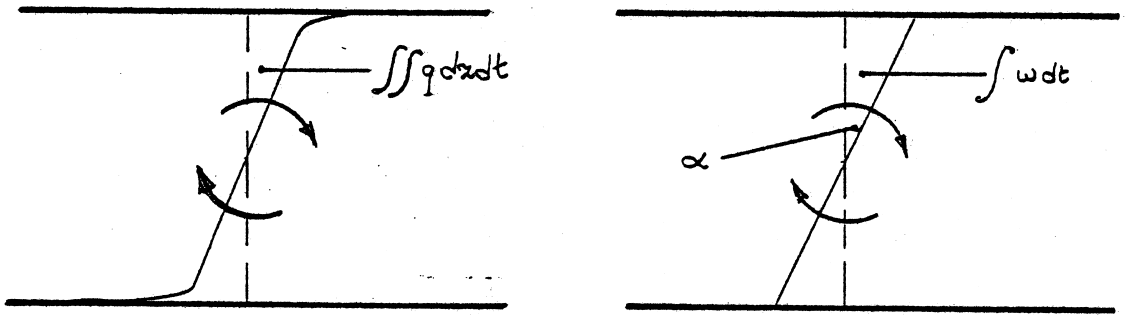

60
Q-t1t2
m3/ha/d
27
1974
DECADEN --->
27
1977


80
Qn-Qt
m3/ha/d
27
1974
DECADEN --->
27
1977

4. GEOFACTOREN BIJ REGENWATERINFILTRATIE

4.1 Zout en dichtheidsstroming

Uit appendix 1 (berekeningswijze van de dichtheidsstroming) blijkt, dat de rotatie van het front tussen zoet en zout water kan worden weergegeven door de snelheid van de snijlijn van het aangenomen vlakke grensvlak met de boven- resp. onderzijde van het watervoerend pakket (figuur 4.1).



Figuur 4.1: Schematisering van het grensvlak tussen zoet en zout/brak water (uit Hellstroem e.a. 1979).

De formule voor deze snelheid luidt:

$$v_o=(8G/pi^2)\ (delta_rho/rho)\ (k/por)\ f(tan(alfa))$$

Hierin is:

v_o =genoemde horizontale snelheid van het vlak veronderstelde grensvlak met de boven- en onderzijde van het water voerende pakket

G =Catalaanse coefficient = 9,15...

pi = 3.1415965...

^ = machtverheffing

rho =dichtheid van het zoete resp. het zoutere water [M/L³]; zonder index is rho de gemiddelde dichtheid van het zoet en het zoutere water [M/L³]

delta_rho =$rho_{zout}-rho_{zoet}$

k =doorlatendheidscoefficient [L/t]

In feite is k het gemiddelde van de verticale en de horizontale doorlatendheid, d.w.z. de

*wortel uit (k_{hor} * k_{vert})*

por =porositeit van het watervoerende pakket [dimensiloos]

alfa =de hoek van het grensvlak met de verticaal [dimensiloos; radialen]

v_o=0,742 (delta_rho/rho) (k/por) $e^{-0,3tan(alfa)}$

Is het grensvlak vertikaal, dan geldt dus

v_o=0,74 (delta_rho/rho) (k/por)

en staat het grensvlak onder een hoek van 45 graden, dan

v_o=0,55 (delta_rho/rho) (k/por)

Het verband tussen delta_rho/rho en het chloridegehalte is nagenoeg lineair. Het wordt adequaat beschreven door de volgende formule (zie Obdam, 1983 voor de oorspronkelijke cijfers):

delta_rho/rho=1,366 * 10^{-6} * Cl^-

waarin Cl^- de chlorideconcentratie in mg/l is.

Met een porositeit van 35% volgt:

als alfa=0° : v_o≅2,9 * 10^{-6} * k * Cl^-

als alfa=90°: v_o≅2,2 * 10^{-6} * k * Cl^-

Met deze betrekking is dus snel een kwantitatieve indruk te geven van de grootte van de rotatiesnelheid van het grensvlak, bijvoorbeeld uitgedrukt in v_o.

Het is opvallend, dat v_o niet afhangt van de dikte van het watervoerend pakket. Deze pakketdikte heeft indirekt wel een invloed, nl. via tangens alfa, de stand van het grensvlak. In een dun pakketje neemt alfa snel toe en daarmee de rotatiesnelheid snel af. In een dik pakket neemt alfa ondanks dezelfde v_o maar langzaam toe en gaat de rotatie van een grensvlak met nagenoeg konstante snelheid door, wellicht weken tot maanden achtereen.

Onderstaande tabel 4.1 geeft een kwantitatieve indruk van de waarde van v_o voor diverse waarden van de doorlatendheid en het chloridegehalte.
De gebruikte formule volgt direkt uit de voorgaande, waarbij nu echter een porositeit van 35% is aangehouden en de dimensies zijn ingevuld (resp. m/d voor k en mg/l voor het chloride; de snelheid, v_o, is ook in m/d uitgedrukt):

v_o≅2,5*10^{-6} * k *Cl^-

Cl- mg/l	k 35 m/d	k 10 m/d	k 2 m/d
18000	1,68	0,45	0,09
4000	0,35	0,10	0,02
2000	0,175	0,05	0,01
1000	0,088	0,025	0,005
400	0,035	0,01	0,002
100	0,009	0,0025	0,0005

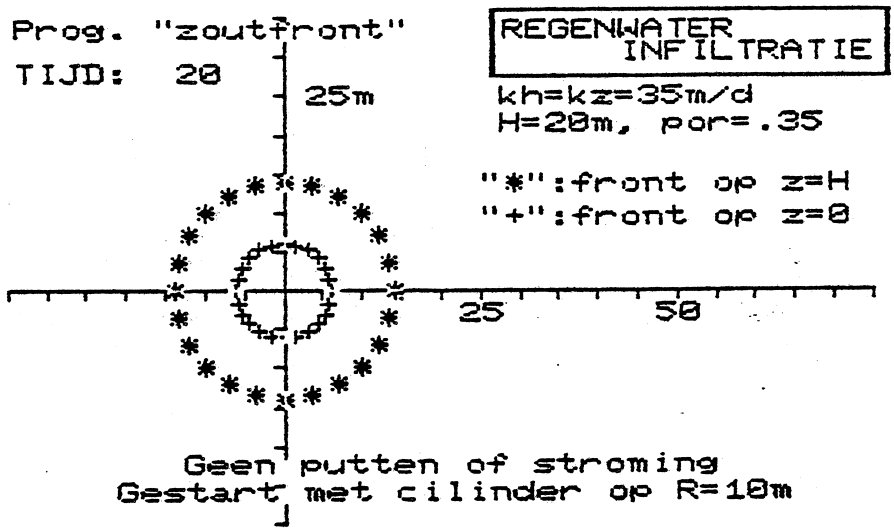
Tabel 4.1: Grensvlaksnelheid v_o als functie van het chloridegehalte (18000 is zeewater) en de doorlatendheidscoefficient.

Wanneer deze cijfers worden gezet tegenover een verblijftijd van het regenwater in de ondergrond van een ordegrootte van 200 dagen en een straal van de voorraadbel in de orde van 10m, dan blijkt bij k=35m/d een chloridegehalte van 1000mg/l reeds een grote invloed te hebben. De afstand s die de snijlijn van het grensvlak in deze tijd aflegt langs de boven- en de onderzijde van het watervoerende pakkket bedraagt dan:

$$s = 0{,}088m/d * 200d = 17{,}6m$$

Pas beneden 1000mg Cl-/l en bij doorlatendheden onder 10m/d lijkt de invloed van het zout tot hanteerbare waarden beperkt te blijven.

Hoe een cilindervormige bel zoet water er na 20 dagen uit zal zien in een omgeving met grondwater met 2000mg/l en 35m/d doorlatendheid, toont onderstaande figuur 4.2.

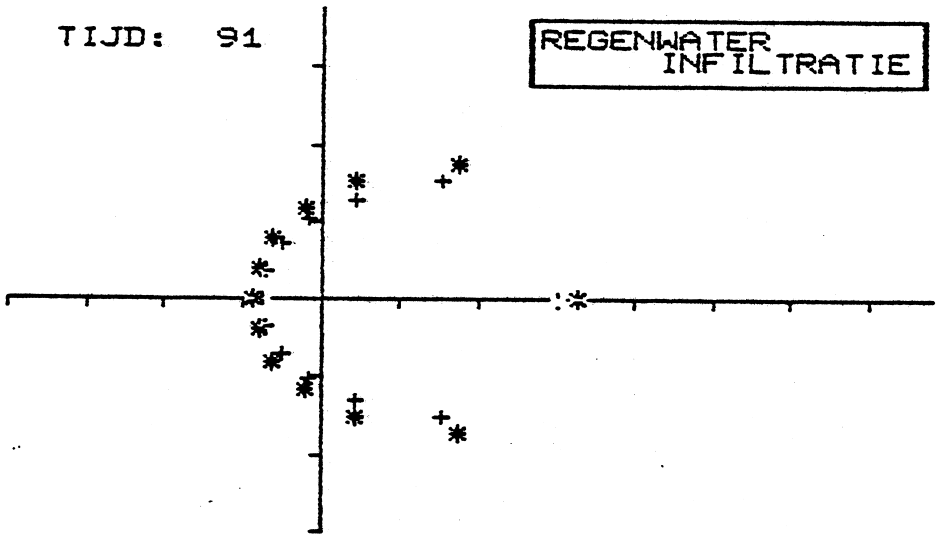


Figuur 4.2: Vervorming van een cilindrische bel zout water in een pakket als aangegeven in 20 dagen tijd.

Het effect van 2000mg/l na 20 dagen is gelijk aan het effect van slechts 200mg/l na 200d. Hierbij gaat het uiteraard steeds om het zoutgehalte verschil tussen de twee watersoorten.

De dichtheidsstroming kan derhalve een grote invloed uitoefenen op de vorm van de ondergrondse voorraad. Dit is het geval, wanneer het watervoerende pakket redelijk homogeen is en een grote dikte heeft, de doorlatendheid in de orde van 10m/d of meer en het zoutgehalte van het brakke water hoger is dan enkele honderden milligrammen per liter. Hieraan zal op veel plaatsen in het Westland worden voldaan. In deze gevallen vergt het ontwerp extra aandacht, om de terugwinning van het opgeslagen water te verzekeren.

Bij de berekeningen met een roterend grensvlak valt op dat er stroomopwaarts van de infiltratieput een stabiel en soms steil staand grensvlak ontstaat. Dit is het gevolg van evenwicht tussen de natuurlijke grondwaterstroming, de beweging van het grensvlak en de stroming ten gevolge van de infiltratie. Volgen we het front vanaf deze bovenstroomse stagnatielijn, dan wordt de helling waaronder het staat steeds vlakker. Benedenstrooms treedt geen evenwichtssituatie op (figuur 4.3).



Figuur 4.3: Bovenstrooms stationair front tussen zoet infiltratiewater en brak grondwater.

Gegevens: Onttrekking 25m³/d in (x,y)=(0,0); Natuurlijke stroming: 0,1m/d naar rechts; kx=ky=35m/d, kz=7m/d; Zoutgehalteverschil=400mg.l; de afstand tussen de tabs op de assen bedraagt 5m. Het bovenstroomse front, hier getoond na 91 dagen infiltratie verandert niet verder.

Bij een geringe natuurlijke stroming blijkt duidelijk dat het front een kegelvorm aanneemt met zijn afgeknotte top aan de onderzijde. Deze onderste grenslijn blijkt veelal in de onmiddellijke omgeving van de infiltratieput een quasi stationaire plaats in te nemen, die zich van de natuurlijke stroming weinig lijkt aan te trekken. De bovenzijde van het front luistert veel meer naar de natuurlijk stroming. Bij een dergelijke situatie kan en zal het dikwijls zo zijn, dat een eventuele volkomen winput permanent met zijn voet in het zout staat.

Ter illustratie wordt nu de quasi-evenwichtsstraal van de onderzijde van het grensvlak berekend (figuur 4.4). We stellen hiertoe de snelheid door de rotatie van het grensvlak en die door de infiltratie aan elkaar gelijk:

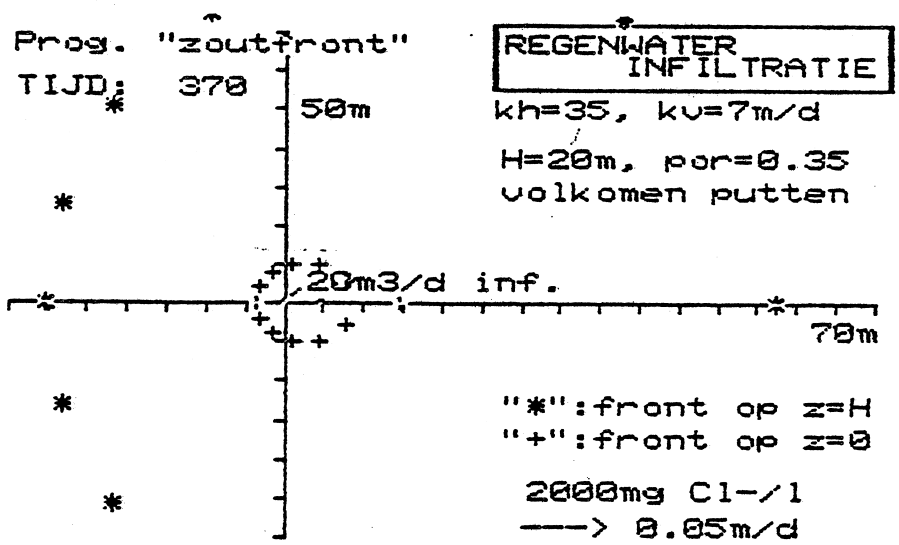
$v_{gr.vl.} = v_{infiltr.}$

$v_{gr.vl.} = v_o$ zie eerste formule van deze paragraaf

$v_{infilter}$ = Q/(2 pi kH r por)

Hierin is:
- Q=infiltratiestroom [L^3/t]
- k=horizontale doorlatendheid [L/t]
- H=dikte watervoerend pakket [L]
- r=afstand tot hart infiltratieput [L]

met enkele praktische waarden: alfa=45 graden, delta_rho/rho=0,0025 (overeen komend met 1800mg chlorideverschil per liter), k=35m/d, een porositeit van 35%, pakketdikte van 25m en een infiltratiestroom van 20m^3/d bedraagt de evenwichtsstraal slechts 3,3m.



Figuur 4.4: Geringe afstand van de voet van het zoutfront tot de infiltratieput bij hogere zoutgehalten.

In de praktijk wijkt de bodem in detail steeds af van de toegepaste schematisering. Het watervoerend pakket zal in het algemeen een min of meer gelaagd karakter hebben ten gevolge van zijn geologische ontstaanswijze. De doorlatendheid zal hierdoor varieren, en met deze doorlatendheid varieert de snelheid van het water.

Het eerste gevolg van een dergelijke gelaagdheid is het ontstaan van een gekarteld grensvlak. Tegelijkertijd neemt hierdoor de grootte van het kontaktvlak tussen beide watersoorten toe en daarmee de mate van menging. Het totaalresultaat kan een aanzienlijke vermenging en vervaging van het front zijn.

Het is vooralsnog onduidelijk, in hoeverre een dergelijke vermenging het bedrijfsresultaat benadeelt. Weliswaar neemt de dikte van het grensvlak toe, wat als een verliespost moet worden aangemerkt, maar anderzijds heeft een dikkere en dus vagere grenszone tot gevolg, dat het grensvlak (uitgedrukt als het vlak waar de concentratie het gemiddelde is van die van de twee watersoorten) minder snel roteert, een punt dat als voordeel kan worden aangemerkt. In het gebruikte computermodel is deze frontvervaging niet expliciet meegenomen. Daarvoor in de plaats is de hogere rotatiesnelheid gehanteerd behorend bij een scherp grensvlak. Deze werkwijze kompenseert voor een aanzienlijk deel het effect van de beschreven vermenging.

Het berekende rotatiesnelheid van het grensvlak is gecontroleerd met het computerprogramma SWIP-2. SWIP-2 is een numeriek model dat op het RID aanwezig is een in staat grondwaterstroming te berekenen zoals deze optreedt onder invloed van dichtheidsverschillen. De rotatiesnelheid van dit model was in overeenstemming met de gebruikte formules. Een bijkomstigheid was de frontvervaging die in SWIP-2 optrad ten gevolge van "numerieke dispersie", een mengproces dat uitsluitend het gevolg is van de toegepaste schematisering (verdeling van het gebied in blokken) en het rekenproces zelve. Deze frontvervaging veroorzaakte een teruggang van de rotatiesnelheid zoals boven beschreven (Zie appendix).

Samenvattend kan worden gesteld, dat het zoutgehalte van het oorspronkelijke grondwater een belangrijke factor (zo niet de belangrijkste) factor is bij het bepalen van de haalbaarheid van de regenwateropslag in de ondergrond. Om het geinfiltreere water te kunnen terugwinnen zal de terugwinning van het water ondieper in het pakket moeten plaatsvinden dan de infiltratie. Modelberekeningen met programma's als SWIP-2 zijn noodzakelijk om een enigzins adequate voorspelling van het gedrag van de bedrijfsinstallatie te kunnen maken. Aan dergelijke berekeningen dient een gedegen kennis van de ondergrond ter plaatse ten grondslag te liggen. Voor dit laatste is in het algemeen een geo-hydrologisch veldonderzoek noodzakelijk.

4.2 Dispersie, diffusie en ondergrondse menging

Dispersie (ook hydrodynamische dispersie genoemd) maar ook moleculaire diffusie veroorzaken vermenging en daarmee vervaging van het grensvlak tussen het geinfiltreerde regenwater en het oorspronkelijke grondwater. Hierbij moet worden aangetekend dat diffusie altijd werkzaam is, terwijl dispersie alleen optreedt wanneer het water stroomt (Uffink, 1981).

De mate waarin dispersie en diffusie optreden laten zich praktisch schatten met de formule van Einstein:

$$s = \mathrm{sqrt}(\ 2\ D\ t\ )$$

Hierin is:

s =statistische spreidingslengte van de beschouwde moleculen op tijdstip t, wanneer s gelijk aan nul was op tijdstip t nul [L]

D =som van de dispersie- en de diffusiecoefficient [L^2/T].

$$D = D_{diffusie} + D_{dispersie}$$

De dispersiecoefficient is geen constante zoals de diffusiecoefficient (diff.coeff. hangt natuurlijk wel af van diverse factoren zoals het soort molecuul dat wordt beschouwd, het medium waarin het zich bevindt en de temperatuur) de dispersiecoefficient wordt veelal evenredig aangenomen met de snelheid van het water en een karakteristieke lengtemaat lambda:

$$D_{dispersie} = \mathrm{lambda} * v$$

Hierbij geldt lambda_L voor de longitudinale dispersie, dat wil zeggen in de richting waarin het water stroomt, en lambda_T voor de transversale dispersie in de richting daar loodrecht op.

Bij een konstante snelheid geldt op grond van het bovenstaande:

$$s = \mathrm{sqrt}(\ 2 * \mathrm{lambda} * L\ )$$

waarin L de in totaal afgelegde weg.

Vullen we ter illustratie een aantal redelijke waarden in (lambda_L=0,1m, lambda_T=0,01m, L=50m) dan blijkt de longitudinale spreidingslengte en daarmee de dikte van de overgangszone tussen beide watersoorten enkele meters te kunnen gaan bedragen. De transversale dispersie bereikt een spreidingslengte in de orde van ruim 1m en zal daarmee voldoende groot zijn om intensieve menging te bewerkstelligen tussen de diverse sublaagjes in een watervoerend pakket. De spreidingslengte ten gevolge van de diffusie ($D=1*10^{-9}m^2/s=1*10^{-4}m^2/d$) blijkt bij een tijdschaal van 200d nog slechts 20cm te

bedragen. De diffusie valt hiermee in het niet ten opzichte van de dispersie. Dit is meestal het geval.

Uit bovenstaande schattingen mag de conclusie worden getrokken dat, dispersie een factor is waar rekening mee moet worden gehouden. {In de uitgevoerde computerberekeningen is dit impliciet gedaan (zie eind hoofdstk 4.1)}. In de praktijk betekent dit dat een zeker waterverlies zal optreden, door menging met oorspronkelijk grondwater en er dus netto minder water kan worden onttrokken dan er werd geinfiltreerd (zie ook paragraaf Strategie, hoofdstuk 4.8).

4.3 Doorlatendheid en anisotropie

Het begrip anisotropie wordt hier beperkt tot de doorlaatfactor van het watervoerend pakket. Het pakket is anisotroop wanneer de doorlatendheidscoefficient afhankelijk is van de gekozen richting. Een nadere beschrijving wordt in appendix 2 gegeven.

Bij anisotropie wordt vooral gedacht aan een relatief kleine (meestal onbekende) doorlatendheid in vertikale zin, ten opzichte van de (doorgaans met pompproeven bepaalde) horizontale doorlatendheid. Zulke verschillen worden toegeschreven aan de geologische ontstaanswijze van de betreffende pakketten. Veelal wordt een verhouding tussen vertikale en horizontale doorlatendheid verondersteld in de orde van tien.

Met de formules uit de appendix kan worden aangegeven in welke mate anisotropie de rotatie van het zoet-zout-grensvlak beinvloedt. Deze invloed blijkt dan groot te zijn; bij de aangegeven verhouding van 1:10 verloopt de rotatie van het grensvlak ruim driemaal zo traag dan wanneer de vertikale doorlatendheid even groot zou zijn als de horizontale. Deze constatering wettigt de conclusie dat een geringe verticale doorlatendheid een voordeel is bij ondergrondse voorraadvorming. Een pakket bestaande uit dunne, horizontale en van elkaar gescheiden laagjes zou het beste zijn.

4.4 Tevoren aanwezige ("natuurlijke") stroming

Natuurlijke stroming is de grondwaterstroming die al ter plaatse aanwezig was, vordat het infiltratiesysteem werd gerealiseerd. Deze stroming kan een natuurlijke herkomst hebben of direkt, danwel indirekt door de mens worden veroorzaakt (bijvoorbeeld stroming naar kwelpolders in de B-driehoek of de stroming in het Westland door de onttrekking van de fabriek "Gist-Brocades" te Delft).

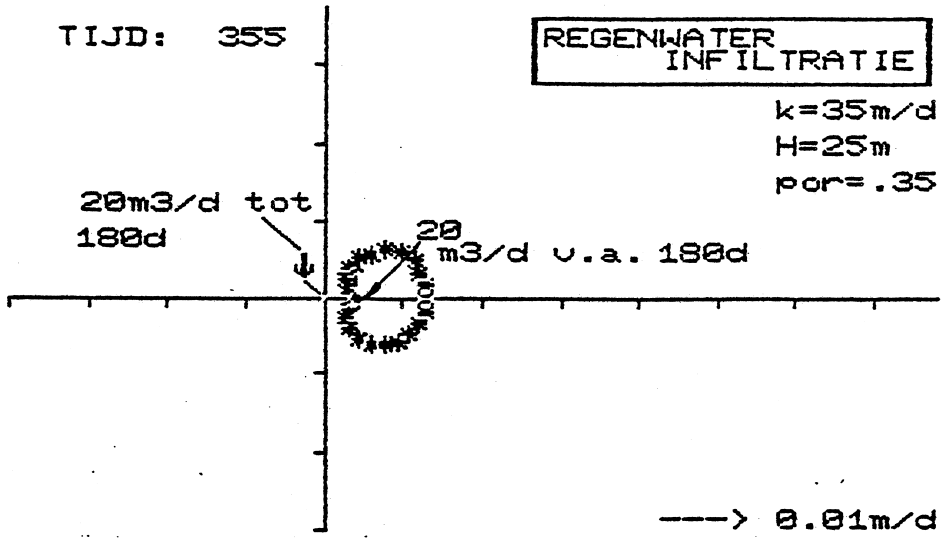
Het zal duidelijk zijn dat een dergelijke stroming die vrijwel overal in de bodem aanwezig is, het geinfiltreerde hemelwater meevoert. Figuur 4.5 toont de asymmetrie die een bel infiltratiewater door een natuurlijke stroming krijgt ten opzichte van de infiltratieput. (Deze figuur is vanwege zijn omvang aan het einde van deze paragraaf opgenomen.) Bovendien worden deeltjes op de buitenomtrek van de bel stroomafwaarts meegevoerd en concentreren zich in de buurt van het benedenstroomse stagnatiepunt.

Dit is ook het punt waar zich het brakke mengwater verzamelt! In de figuur is it te zien aan de plaats van de sterretjes, die zich ten tijde nul gelijkmatig verdeeld op een cirkel bevonden met een straal van 2m rond de infiltratieput (De afstand tussen de tabs op de assen bedraagt 5m.). In de praktijk kan men derhalve de hinder van mengwater beperken door minder water terug te winnen dan te infiltreren. Het mengwater wordt dan stroomafwaarts met de natuurlijke stroming weggevoerd.

(Uit figuur 4.5 kan tevens de belangrijke conclusie worden getrokken, dat de juiste plaats voor een waarnemingsput een plek is op geringe afstand stroomafwaarts van de onttrekkingsput.)

Infiltreren en onttrekken met een en dezelfde put is bij aanwezigheid van natuurlijke stroming (dus praktisch altijd) een nagenoeg onzinnige zaak; men trekt dan namelijk reeds kort na het staken van de infiltratie van bovenstroomse zijde oorspronkelijk oorspronkelijk grondwater aan (dus veelal zout en/of ijzerhoudend). Figuur 4.5 laat dit zien; nadat eerst gedurende 180d was geinfiltreerd met 20m3/dag om vervolgens met dezelfde capaciteit uit de infiltratieput te gaan onttrekken, wordt vanaf t=220d oorspronkelijk grondwater opgepompt. Het grootste deel van het water gaat op deze wijze met de natuurlijke stroming verloren. Ook bij minder sterke natuurlijke stromingen treden aanzienlijke verliezen door afstroming op.

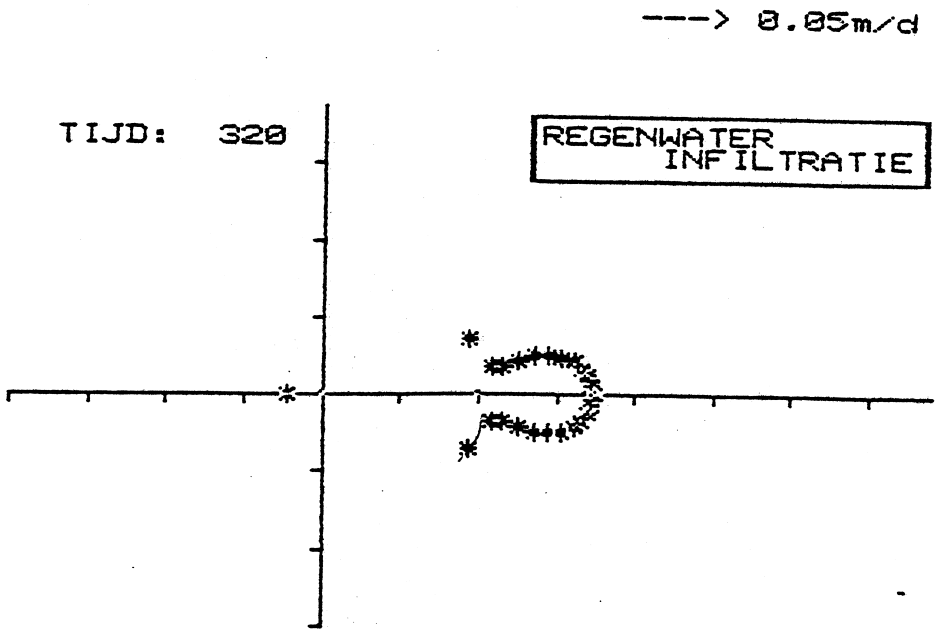
Met een aparte winput op de juiste plaats in stroomafwaartse richting kan echter veel beter resultaat worden bereikt. Figuur 4.6 laat zien dat, dat in dezelfde situatie als figuur 4.5, een aparte onttrekkingsput op 10m stroomafwaarts pas op t=330d oorspronkelijk grondwater aantrekt.



Figuur 4.6: Door stroomafwaarts te onttrekken kan meer water worden teruggewonnen.

Door deze put nog iets verder stroomafwaarts te verschuiven zou in theorie 100% van het geinfiltreerde water zijn teruggewonnen zonder bijmenging van oorspronkelijk grondwater. Het heeft echter geen zin om de berekening opnieuw te maken teneinde 100% terugwinning te bereiken; in de praktijk is een dergelik theoretisch resultaat immers van geen betekenis aangezien daar zowel de grond zelf als de infiltratie- en onttrekkingsstromen en de natuurlijke stroming van de hier aangenomen schematische waarden afwijken. 100% rendement is derhalve nooit haalbaar, een belangrijke rendementsverbetering echter wel.

Een iets ander schema van infiltreren en terugwinnen is dat waarbij blijvend een zekere hoeveelheid water wordt rondgepompt. Dit is gesimuleerd door vanaf 180 dagen de infiltratie niet geheel te staken maar terug te brengen van 20 tot 10 m^3/d en deze volumstroom in de winput te compenseren door in plaats van $20m^3/d$, $30m^3/d$ te onttrekken. Op grond van de berekeningen blijkt een dergelijk schema geen voordeel op te leveren; ongeveer op hetzelfde moment als waarop in de voorgaande situatie oorspronkelijk grondwater de winput binnenstroomt snoert nu de bel in en gebeurt hetzelfde (zie figuur 4.7).

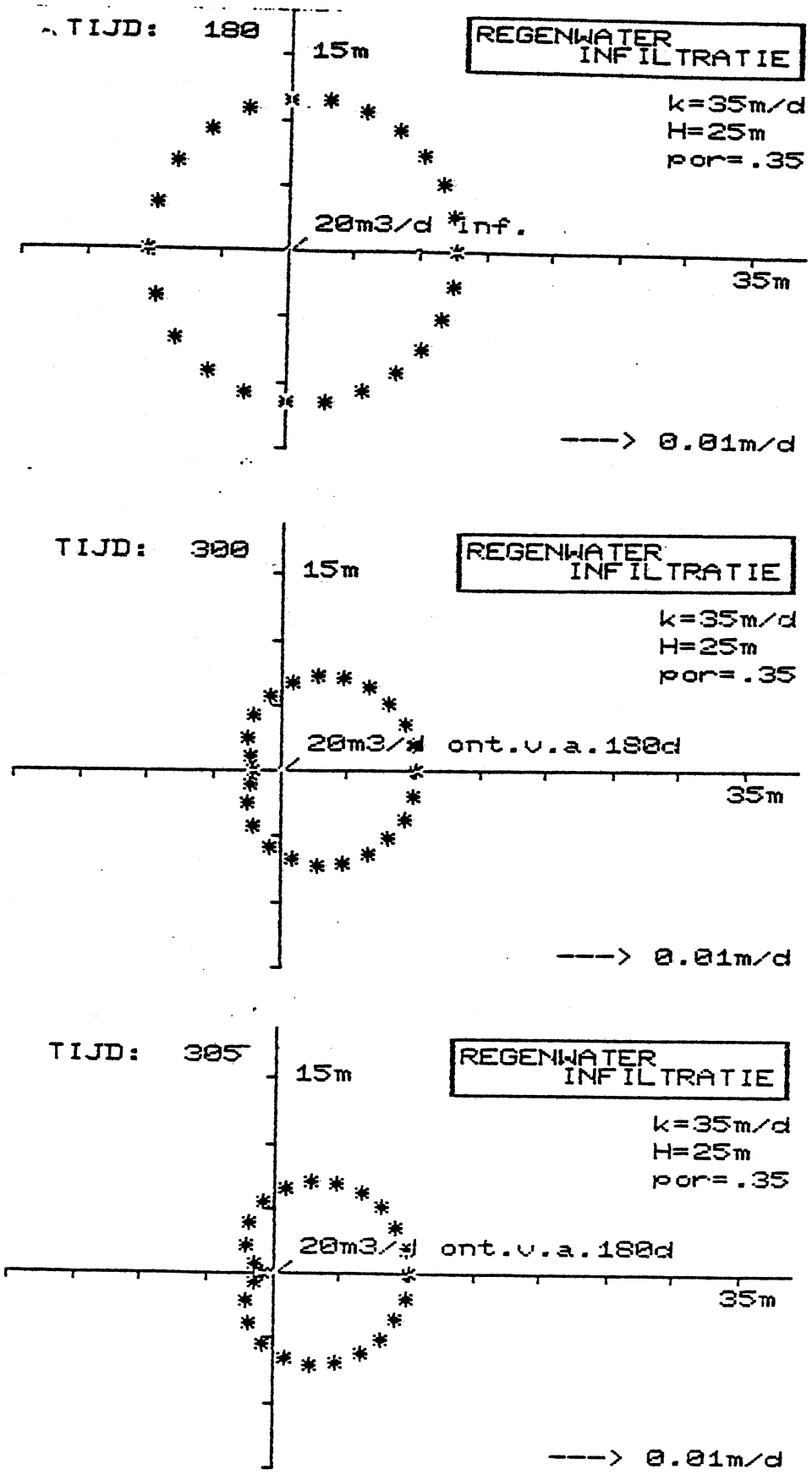


Figuur 4.7: Insnoering van de resterende bel infiltratiewater tijdens langdurige terugwinning.

Bij het experimenteren met het model is gebleken dat het uiterst moeilijk is om dergelijke insnoereffecten te vermijden, wanneer de natuurlijke stroming een aanzienlijke sterkte heeft (bijv. 0,05m/d; zie "film" hoofdstuk 5). Dit is toe te schrijven aan de geringe breedte die de bel bij sterke natuurlijke stroming krijgt en het concentratie-effect van een enkele winput. Een meer verdeelde, gelijkmatiger onttrekking stroomafwaarts van de infiltratieput (bijvoorbeeld door plaatsing van enkele kleine winputjes op een rij in de stroomrichting) zou dit punt, in theorie, kunnen verhelpen. In de praktijk mag aan een dergelijke oplossing echter nauwelijks waarde worden gehecht. Immers, naarmate de bel langer en smaller is komt het er meer op aan de precieze richting van de natuurlijke stroming te kennen. Bovendien is het dan van toenemend belang dat deze richting altijd konstant is. Beide eisen zijn in de praktijk in zijn algemeenheid niet of nauwelijks realiseerbaar met het risico dat de bel in zijn geheel wordt gemist. Deze praktische problemen en onzekerheden zullen de toepassingsmogelijkheden in watervoerende pakketten met een sterke natuurlijke stroming klein maken, althans voor kleinschalige individuele toepassing. Wanneer geen geschiktere pakketten voorhanden zijn, kan een uitweg worden gevonden door schaalvergroting, d.w.z. samenwerking tussen een aantal bedrijven. Bij samenwerking is wellicht tevens de financiele draagkracht groot genoeg om in voorkomende gevallen (door middel van een rondpompsysteem) de grondwaterstroming ter plaatse tot staan te brengen, af te

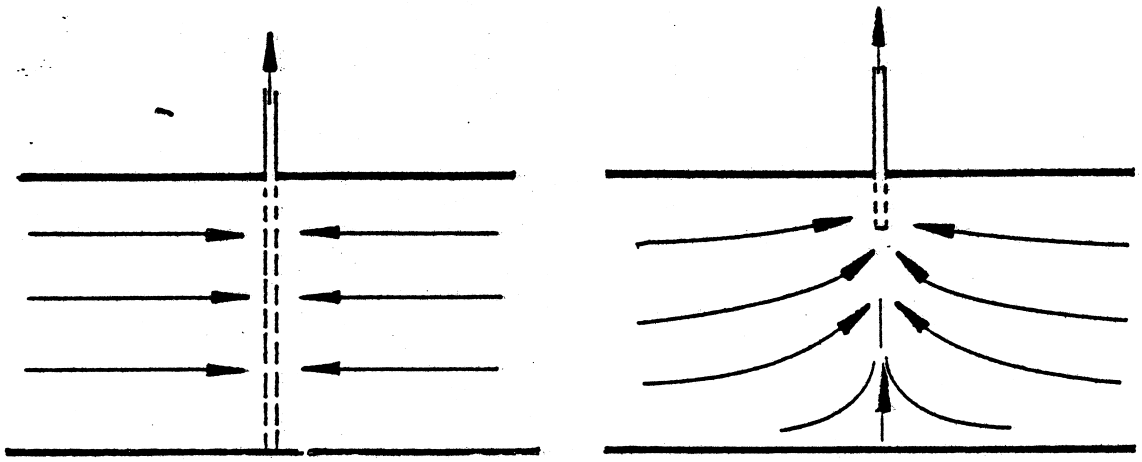
remmen of diens richting te reguleren.

Figuur 4.5: Asymmetrie van de bel geïnfiltreerd water ten opzichte van de infiltratieput: het gevolg van natuurlijke stroming.



4.5 Volkomen en onvolkomen putten

Een onvolkomen put is een put waarvan het geperforeerde gedeelte (het zgn. putfilter) korter is dan het watervoerend pakket dik. Een onvolkomen put veroorzaakt hierdoor in zijn direkte omgeving een afwijkend stroombeeld ten opzichte van datrond een volkomen put (figuur 4.8).



Figuur 4.8: Afwijkend stroombeeld nabij een onvolkomen put.

Op enige afstand, zeg 1,5 a 2,5 maal de pakketdikte, zijn beide stroombeelden nauwelijks meer van elkaar te onderscheiden.

Onvolkomenheid kan nu worden benut om de stroming plaatselijk te versterken of te verzwakken. Deze mogelijkheid is met name interessant voor de onttrekkingsput. Door diens filter namelijk geheel bovenin het watervoerend pakket te plaatsen wordt de stroming onderin het pakket verzwakt en daarmee de aantrekking van het zoute water daar vertraagt. Bovenin het pakket wordt de stroming versterkt, doch daar bevindt zich het zout door de rotatie van het grensvlak op grotere afstand. Relatief sterk onttrekken is daar juist een mogelijkheid een groter aandeel van het zoete water terug te winnen.

Kan bij de winput een duidelijk voordeel worden bereikt door hem onvolkomen te maken, bij de infiltratieput ligt deze kwestie ingewikkelder. Een filter onderin het pakket zou het zoutfront daar verder van de put kunnen dwingen. Zo'n put is echter niet in staat om het zoute water te verdringen dat zich, bij de allereerste in bedrijfname van het infiltratiesysteem, bovenin het pakket bevindt. Dit kan

onvoorspelbare gevolgen hebben, aangezien zwaardere zoutwaterpakketten, die zich boven zoet water bevinden, op eigen kracht en naar eigen goeddunken door het zoete water heen naar beneden zakken. Het resultaat is naar alle waarschijnlijkheid een mengwater van sterk wisselende kwaliteit in de onttrekkingsput.

Voor de infiltratiezijde lijkt een volkomen put veiliger. Het is natuurlijk denkbaar putten te maken waarin de waterverdeling over de pakkethoogte instelbaar is. De kosten van een dergelijke konstruktie zullen ongetwijfeld hoog zijn en het ondeskundig gebruik ervan zal gepaard gaan met de nodige risico's voor de ondergrondse voorraad.

Het gebruikte computerprogramma kan rekening houden met onvolkomen putten. Een onvolkomen put wordt hierbij, omwille van de overzichtelijkheid, geschematiseerd tot een zgn. "bolbronnetje" geheel boven- of onderin het pakket. Het is dus met het programma in principe mogelijk om een situatie te simuleren waarbij op dezelfde plaats een infiltratieput onder en een onttrekkingsput boven in het pakket aanwezig is. Wanneer de onvolkomenheid in het programma wordt gekombineerd met dichtheidstroming, blijkt het programma echter resultaten te geven die tever van de werkelijkheid verwijderd zijn om te kunnen worden gebruikt voor de beschrijving va het gedrag van de bel infiltratiewater. De oorzaak ligt vooral in het nu volledig mank gaan van de aanname die aan de implementatie van de dichtheidsstroming ten gronslag ligt, nl. dat het grensvlak bij benadering een plat vlak zou blijven.

Om deze redenen was het programma in zijn huidige vorm onbruikbaar voor het doorrekenen van de voor de praktijk zo belangrijke combinatie van onvolkomen putten en dichtheidsstroming. Om toch iets te kunnen zeggen over dit fenomeen, is een aantal gesimplificeerde berekeningen gemaakt met het model SWIP-2. Dit geavanceerde computermodel kan de genoemde kombinatie van faktoren wel aan:

Voor de berekeningen, met SWIP-2, van de dichtheidsstroming ten gevolge van onvolkomen putten, is een radiaalsymmetrisch netwerk opgezet. Hierdoor is een berekening van dichtheidsstroming met onvolkomen putten tegen beperkte kosten mogelijk, maar natuurlijke stroming kan zo niet op een eenvoudige manier worden meegenomen. Het model is als het ware een dichte, cilindervormige trommel van 25m hoog en met een straal van 50m, waarin het grensvlak op tijdstip t=0 vertikaal staat op een afstand van 20m vanaf het centrum van de put in het hart van de "trommel". De porositeit bedraagt 35%, de doorlatendheid 35m/d en het oorspronkelijke grondwater heeft een chloridegehalte dat 3000mg hoger is dan dat van het geinfiltreerde water. Op t=0 wordt het grensvlak aan zijn lot overgelaten terwijl, boven in het centrum van het model een put begint te onttrekken met een capaciteit van 20m3/d en onderin, in het centrum van het model, een even sterke put begint te infiltreren. Deze putten hebben

een verwaarloosbare filterlengte. Figuur 4.9 geeft het verloop van het grensvlak in de tijd.

In figuur 4.9 zien we hoe het grensvlak zich aanvankelijk over de bodem van het pakket naar de infiltratieput toebeweegt. De dichtheidsstroming heeft dus aanvankelijk de overhand. Het grensvlak wordt pas dichtbij de infiltratieput tot staan gebracht, waarbij het in het onderste deel van het pakket een nagenoeg vertikale stand inneemt.

Bovenin het pakket treedt geen evenwicht op; de invloed van de infiltratieput is daar steeds groter dan die van de onttrekkingsput en werkt dezelfde richting uit als de dichtheidsstroming. Hier wordt de stand van het grensvlak met het verstrijken van de tijd meer en meer horizontaal.

De figuur levert bewijs voor de eerder gedane bewering, dat het grensvlak bij de combinatie van dichtheidsverschillen en onvolkomen putten alles behalve vlak blijft en de benadering volgens appendix 1 niet meer opgaat.

Een derde facet dat de figuren 4.9 tonen is het effekt van mengprocessen. In SWIP-2 treedt vermenging op door het verschijnsel van numerieke dispersie; iets dat geheel en uitsluitend aan het rekenproces is toe te schrijven. Desondanks kan hieruit iets worden geleerd over het effekt van echte vermenging die in de bodem optreedt:

Ten gevolge van de dispersie vervaagt de overgang tussen het zoete en het zoutere water meer en meer. Ook het effect van de dichtheidsstroming vervaagt hierdoor in toenemende mate. In theorie zal uiteindelijk een toestand ontstaan met water van een gemiddelde zoutconcentratie waarbij uit de aard van de zaak geen dichtheidsstroming optreedt. In de figuur zien we hiervan de eerste gevolgen, nl. dat de dichtheidsstroming aan kracht inboet en hierdoor de putstroming steeds beter voelbaar wordt. In de figuur blijkt dit uit het feit dat na verloop van tijd de grensvlakbeweging langs de bovenzijde van het pakket voor de lagere concentraties wordt omgekeerd en deze lijnen worden opgezogen door de winput. Na voldoend lange tijd zal dit voor steeds meer lijnen en hogere concentraties het geval worden. In de praktijk, waar vermenging altijd in zekere mate optreedt, zijn dezelfde verschijnselen te verwachten. Als remedie hiertegen moet worden aanbevolen gemiddeld netto meer te infiltreren dan terug te winnen.

{Berekeningen met SWIP-2 waarin buiten dichtheidsstroming en onvolkomen putten tevens de natuurlijke stroming wordt meegenomen waren te gecompliceerd, kostbaar en tijdrovend voor deze orienterende studie. Voor zulke berekeningen is een aparte opdracht noodzakelijk}

4.6 Pakketkeuze

Op veel plaatsen in de regio zijn meerdere zandpakketten aanwezig; boven het nagenoeg overal aanwezige Pleistocene pakket bevinden zich dunnere zandlagen uit het Holoceen (zie hoofdstuk 3, geologie). In principe kan op zulke plaatsen worden gekozen welk pakket voor de voorraadvorming zal worden gebruikt.

De Pleistocene zandlaag is in de regel zo'n 20 tot 25m dik en heeft een aanzienlijke doorlatendheid, in de orde van 35 tot 50m/d. Het zoutgehalte van het grondwater in deze laag varieert van plaats tot plaats. Zo zijn er gebieden in het Westland waar 4000mg Cl-/l wordt aangetroffen. Daarnaast zijn er evenzeer gebieden waar het chloridegehalte niet meer bedraagt dan enkele tientallen tot enkele honderden milligrammen per liter. De natuurlijke grondwaterstroming kan van plaats tot plaats sterk verschillen. Hierbij is 20m/jr een relatief hoge en 4m/jr een relatief lage snelheid.

De zandpakketten in het Holoceen zijn beduidend dunner, veelal slechts enkele tot ongeveer 10m dik. Ook is de doorlatendheid geringer. 10m/d is een redelijke schatting. Van de grondwaterstroming in deze lagen is weinig bekend. Toch kan worden verwacht dat wanneer een dergelijke laag tussen slecht doorlatende lagen is ingeklemd, de natuurlijke stroming daarin in principe wordt bepaald door een gradient die inligt tussen die van het onderliggende Pleistocene pakket en het bovenliggende nagenoeg horizontale maaiveld. Grote snelheden zullen derhalve normaliter in deze lagen niet voorkomen, ook al niet omdat de doorlatendheid er geringer is. Het chloridegehalte in de Holocene zandbanen is eveneens een grotendeels onbekende factor. 1000mg/l lijkt een redelijke schatting voor het zoutgehalte waarop men in dergelijke lagen moet rekenen.

Voor kleinschalige projecten, zoals regenwateropslag voor individuele tuindersbedrijven feitelijk is, is benutting van zulke dunnere Holocene zandlagen (voor zover aanwezig) het overwegen waard. Veelal zal minder hinder worden ondervonden van zout grondwater en natuurlijke stroming dan dat in het diepere Pleistocene pakket het geval zal zijn. (Dit punt is feitelijk een kwestie van schaal).

Het totale doorlaatvermogen van een Holocene zandlaag (bijv. 5m dikte * 10m/dag = 50m²/d) is beduidend geringer dan van het Pleistocene zandpakket (25m dikte * 35m/d = ca. 900m²/d). Er moet met een verhouding van 50/900 is ongeveer 1:20 worden gerekend. Dit betekent dat een infiltratieput in een Holocene zandlaag een duidelijk geringere capaciteit heeft dan zijn collega in de diepere Pleistocene laag. Een dergelijke put kan desalniettemin enkele kubieke meters water per uur opnemen. Dit is veelal voldoende om tezamen met een groter buffervat (in de orde van 400 tot 500m³/ha in plaats van 160 tot 240m³/ha) een ondergrondse regenwateropslag te realiseren. Ter illustratie mag erop worden gewezen dat de

gemiddelde neerslaghoeveelheid tijdens de winterperiode rond 20m³/d per ha is (zie tabel 3.2) dit komt neer op minder dan 1m³/h.

4.7 Schaal

In vorige paragraaf is het belang van de schaal voor een project voor onderdrukse opslag van hemelwater reeds meermalen ter sprake gekomen. Wat daar is gezegd kan hier worden samengevat als de conclusie dat schaal een kwestie is van verhouding tussen het volume van de voorraad, de afmetingen van het gebied en de weg die de natuurlijke stroming in een kenmerkende tijd (bijv. een half jaar) aflegt. Vergroting van de schaal dringt een reeks storende factoren, als de diffusie van het zout en de natuurlijke stroming van het water, naar de achtergrond. Waar deze factoren een grote rol spelen dient schaalvergroting te worden overwogen.

4.8 Strategie

Met de hierna te beschrijven strategie wordt door de tuinder een doel nagestreefd. Dit doel kan worden omschreven als: "Zoveel als mogelijk is gebruik maken van het gratis hemelwater om zo de afhankelijkheid van het openbare leidingnet en ontziltingssystemen te minimaliseren." Er zal hiertoe worden gestreefd naar het zover mogelijk terugbrengen van de benodigde capaciteit van andere waterbronnen als ontziltingsinstallaties of leidingwater.

Aangezien de waterbehoefte het aanbod aan hemelwater regelmatig overtreft (zie hoofdstuk 3; zeker wanneer met de onvermijdeijke verliezen rekening wordt gehouden), zijn extra hulpbronnen steeds noodzakelijk. Een bedrijfsvoering waarbij in eerste instantie de voorraad wordt gebruikt om pas op de genoemde uitwijkbronnen over te schakelen wanneer de voorraad hemelwater in de zomer is uitgeput, is op een aantal punten nadelig.

In de eerste plaats betekent deze werkwijze dat de capaciteit van de hulpbronnen gelijk moet zijn aan de maximum behoefte van de kas. Dit is een dure zaak. In de tweede plaats betekent dit dat na uitputting van de voorraad plotseling op een andere waterkwaliteit wordt overgeschakeld. Ook dit kan een nadelig punt zijn, wanneer de kwaliteit van de hulpbron te wensen overlaat. Door zijn te hoge chlorideconcentratie is dit bij leidingwater nog steeds het geval.

Een zinvolle strategie lijkt derhalve die waarbij men de voorraad bewust niet geheel uitput. Hiervoor is het noodzakelijk om voortdurend voor een gedeelte water van de hulpbronnen te betrekken. Hun aansluitwaarde kan dan kleiner zijn en de kwaliteit is konstant.

De strategie kan in praktijk worden gebracht door steeds voor een bijvoorbeeld constante fractie van de waterbehoefte drink- of ander water te betrekken. Behoudens onder zeer ongunstige geohydrologische omstandigheden, is het dan waarschijnlijk mogelijk steeds in de orde van 75% van de waterbehoefte te dekken vanuit de ondergrondse voorraad.

Aangezien er bij een dergelijk terughoudend gebruik gemiddeld minder water wordt onttrokken dan geinfiltreerd (uit hst. 3 blijkt immers dat de waterbehoefte gemiddeld ongeveer gelijk is aan de neerslag die op de kas valt), zal dit percentage op den duur in een gunstige omstandigheden gevallen kunnen stijgen. Laat men dit percentage niet stijgen, levert de gemiddeld van jaar tot jaar groeiende bel geinfiltreerd water een steeds grotere zekerheid tegen extreme droogte en reeksen van opeen volgende droge jaren.

Binnen deze strategie zijn enkele varianten mogelijk die voor het beheer van de voorraad belangrijk kunnen zijn.
Deze varianten zijn:

1) Alle neerslag wordt geinfiltreerd; steeds wordt slechts

een bepaald vast gedeelte van de behoefte aan de voorraad onttrokken.

2) *De beschikbare neerslag wordt zoveel mogelijk gebruikt om de momentane behoefte te dekken (tot een maximum van bijvoorbeeld 75%); alleen het eventuele restant wordt geinfiltreerd.*
3) *Een derde, minder reele mogelijkheid is de volledige behoefte aan de voorraad te onttrekken en steeds de gehele neerslag te infiltreren plus bijvoorbeeld 25% van de behoefte welke van de hulpbronnen afkomstig is.*

In het tweede geval is de stroom hemelwater via de grond minimaal, en in het derde geval maximaal. Gezien de verliezen die bij opslag niet zijn te vermijden zal men niet snel tot de derde mogelijkheid besluiten en bijvoorbeeld kostbaar drinkwater infiltreren.

De tweede mogelijkheid lijkt het aantrekkelijkst. De stroom door de grond is dan echter minimaal en het is mogelijk dat deze nu zo klein wordt dat de natuurlijke stroming het bovenstroomse front achter de infiltratieput kan drijven. Deze situatie dient ten alle tijde vermeden te worden, omdat daarna het aantrekken van mengwater in de onttrekkingsput niet meer te vermijden is. De voorraad moet dan praktisch als verloren worden beschouwd.

{Om controle mogelijk te maken die een dergelijke noodsituatie kan voorzien, is een waarnemingsput op beperkte afstand bovenstrooms van de infiltratieput noodzakelijk.}

Op grond van deze noodzaak moet de voorkeur aan de eerste strategie worden gegeven waarbij het gewenst is om in noodgevallen hulpbronwater hiervoor in te zetten.

In de berekeningen die verder in dit rapport zijn gemaakt wordt uitsluitend de eerste strategie toegepast.

5 Berekeningen met meteorologische gegevens

5.1 Berekeningswijze

Voor een goed inzicht in de werking van het geohydrologische systeem over een langere periode, zijn berekeningen uit de voorgaande hoofdstukken, d.w.z. met gestileerde gegevens, onvoldoende. In dit hoofdstuk worden daarom berekeningen gemaakt met de cijfers van de waterbehoefte die uit de werkelijke meteorologische gegevens zijn verkregen en zich over een langere periode uitstrekken(in dit geval de periode 1971-1980).

Ervan uitgaande dat een plaatje meer zegt dan duizend woorden, worden de berekeningsresultaten als een soort film gepresenteerd (als een reeks plaatjes die elkaar in de tijd opvolgen). De tijdstippen waarop de plaatjes zijn gegeven vallen bij benadering samen met die in tabel 3.1, om zo een beeld te geven van de jaarlijkse maxima en minima in de voorraad.

Bij de berekeningen is uitgegaan van de behoeftecijfers van teelt 2, d.w.z. de teelt met de relatief grote waterbehoefte. Als strategie is aangehouden dat de dekking van de waterbehoefte steeds voor 75% vanuit de voorraad geschiedt, terwijl de overige 25% van elders komen (bijv. drinkwaterleiding of ontziltingsinstallaties).

Voordat het rekenen met de werkelijke cijfers van start gaat, wordt de voorraad gedurende 180d opgeladen met een capaciteit van 20m3/d (totaal 3600m3). De start vindt vervolgens steeds plaats in het voorjaar, t.w. decade 7 (dit is de tweede week in maart); het opladen vond dan als het ware plaats in de winter voorafgaande aan de startdatum.

Alvorens zout en onvolkomen putten in de berekeningen te betrekken, wordt begonnen met volkomen putten in een situatie zonder zout. Deze werkwijze verduidelijkt de grote invloed van de natuurlijke stroming waarschijnlijk het best.

Aangezien de natuurlijke stroming in de dunne zandpakketjes van het Holoceen geen rol van betekenis zal spelen, worden slechts de situatie "Bleiswijk" en de situatie "Westland" beschouwd. (Deze situaties zijn gedefinieerd in hoofdstuk 3.1.) Deze situaties verschillen door de diverse hiervoor genoemde uitgangspunten alleen in pakketdikte (resp. 25 en 20m) en de sterkte van de natuurlijke stroming (resp. 0,01 en 0,05m/d).

Tenslotte merken we op, dat de onttrekkingsput in deze situatie op resp. 2 en 10m stroomafwaarts van de infiltratieput is geprojecteerd. Dit is gedaan omdat bij een gemiddelde verblijftijd van een half jaar een stroomafwaartse afstand gelijk aan een half jaar natuurlijke stroming een goede eerste benadering voor de plaats van de onttrekkingsput is. Het effect van een verkeerde plaatsing zal verderop worden aangestipt.

5.2 Berekeningen met volkomen putten en zonder zout (dus zonder dichtheidsverschillen.

5.1.1 Situatie "Bleiswijk"

De eerste "film", d.w.z. figurenreeks 5.1, geeft het verloop van de vorm en de omvang van de bel infiltratiewater voor de situatie "Bleiswijk" over de periode 1971 t/m 1980 (De figuren zijn aan het einde van hoofdstuk 5 geplaatst.).
Na opladen van de voorraad is gestart op decade 7 in 1971. De situatie op dit moment wordt gegeven door het eerste plaatje uit de reeks. De overige plaatjes geven tussenstanden die bij benadering vallen op de momenten die in tabel 3.1 zijn gegeven. Aangezien vanaf 1978 geen bijzondere situaties meer optreden is van daar direkt de sprong gemaakt naar eind 1980. Ter verduidelijking van de vorm van de bel is deze in de laatste plaatjes met de tekenpen geaccentueerd.

Uit de reeks figuren 5.1 blijkt onder meer het volgende:

-Gedurende het gehele decennium kan in de situatie "Bleiswijk" (volkomen putten en geen zout) de uitgangsstrategie worden aangehouden zonder dat zich problemen voordoen. Dit impliceert dat nooit meer dan 25% van de waterbehoefte door andere bronnen hoeft te worden gedekt. Ook de aansluitcapaciteit aan het openbare leidingnet of de capaciteit van ontziltingsinstallaties behoeft in deze situatie niet groter te zijn dan genoemde 25% van de maximum waterbehoefte van de kas (i.c. ca 15m3/ha/d).
-Doordat bij de aangehouden strategie gemiddeld meer water wordt geinfiltreerd dan wordt onttrokken, groeit de omvang van de bel water in de ondergrond van jaar tot jaar. Het merendeel van het water bevindt zich door de natuurlijke stroming echter buiten bereik van de onttrekkingsput. Op grond hiervan is het het overwegen waard om zich deze afstromende voorraad op de een of andere wijze ten nutte te maken, bijvoorbeeld:
-als uitgangsbel voor een grotere installatie;
-als noodvoorraad die, als het erop aankomt, letterlijk kan worden aangeboord stroomafwaarts van de onttrekkingsput;
-ter vergroting van het percentage van de waterbehoefte dat men vanuit de voorraad dekt (in de aangehouden strategie is dit 75%);
-combinatie van deze mogelijkheden.

(Men mag er niet op rekenen, dat de volledige stroomafwaartse regenwatervoorraad winbaar zal zijn. Het brakke mengwater dat onstaat door dispersie en andere mengprocessen verzamelt zich immers in de buurt van het stroomafwaartse stagnatiepunt (zie hoofdstuk 2). De hoeveelheid brak water die zich daar ophoopt kan aanzienlijk zijn. Het is derhalve altijd nodig dat gemiddeld meer water wordt geinfiltreerd dan wordt terug gewonnen (zie hoofdstuk

2.3

5.2.2 Situatie "Westland"

De figuren 5.2 betreffen de situatie "Westland" (echter zonder zout en met volkomen putten). De onttrekkingsput is hier op 5m benedenstrooms van de infiltratieput geplaatst, ofschoon bij de sterke natuurlijke grondwaterstroming 10m stroomafwaarts nodig zou zijn. Figuur 5.2 is derhalve een illustratie van de invloed die een te dichtbij geplaatste winput heeft in een dergelijke situatie (i.c. bij een dergelijk sterke natuurlijke stroming).

De bovenste figuur van fig. 5.2 geeft de uitgangssituatie (direkt nadat het systeem gedurende 180 dagen met een capaciteit van 20m^3/d is opgeladen. Dit was steeds de uitgangssituatie bij de berekeningen met werkelijke meteorologische cijfers.). Nog in dezelfde zomer van dat jaar blijkt er een situatie te ontstaan waarbij oorspronkelijk grondwater wordt meegepompt (fig 5.2 onder).

Ook wanneer men de put wel op de juiste afstand (10m in plaats van 5m) plaatste, treden deze problemen op, zij het een jaar later, t.w. begin mei 1972. (De betreffende figuren zijn niet in dit rapport opgenomen).

Om een enigzins gunstige start te verkrijgen begint de "Westlandse film" (figurenreeks 5.3) niet in de droge jaren 1971/72, maar met decade 7 (1 maart) in 1973. (De uiteen lopende belvormen in de figuur zijn met de tekenpen geaccentueerd).

Reeds in hetzelfde jaar (1973) ontstaat een kritische situatie door insnoering van de bel. Deze insnoering blijft in de volgende plaatjes zichtbaar. De figuren 5.3 maken duidelijk, dat de infiltratieput slechts ter nauwernood in staat is om weerstand te bieden tegen de sterke natuurlijke stroming. Een direkt gevolg hiervan is de situatie in 1976 (laatste plaatje). Het was toen zo lang droog, dat de natuurlijke stroming, geholpen door de onttrekkingput, in staat was het oorspronkelijk bovenstroomse front tot achter de infiltratieput te drijven. Aantrekken van grondwater is dan niet meer te voorkomen.

De sterke natuurlijke stroming ontneemt de infiltratieput ook de mogelijkheid om de bel de breedte te verschaffen die nodig is om insnoering te voorkomen ter plaatse van de onttrekkingsput. Het direkte gevolg hiervan blijkt eveneens in het droge jaar 1976. Door deze insnoering onttrekt de winput dan een aanzienlijk percentage oorspronkelijk grondwater, terwijl een groot deel van het in de voorgaande jaren geinfiltreerde regenwater afstroomt, onbereikbaar voor de onttrekkingsput.

Uit de figuren kan het volgende worden gekonkludeerd:

-Bij een sterke natuurlijke stroming is een voorraadsysteem

als aangegeven, d.w.z. met een enkele infiltratie- en winput, nauwelijks mogelijk wanneer geen speciale maatregelen worden getroffen als:

..vergroting van de schaal van het systeem;

..verdeling van de onttrekking over meerdere kleinere putten en deze te plaatden op een lijn in stroomafwaartse richting van de infiltratieput; verdeeld over een grotere afstand dan de in dit voorbeeld gegeven 10m.

-Hiermee wordt het mogelijk om

..insnoering te voorkomen;

..een aanzienlijk deel van het water in de afstromende bel te benutten;

..de afstromende bel in te zetten voor noodsituaties als de droogte in 1976. (Het water in de afstromende bel kan dan gedeeltelijk via de infiltratieput worden geinfiltreerd om zo het bovenstroomse front in stand te houden.

Het zal uit bovenstaande uiteenzettingen duidelijk zijn, dat een adequaat ontwerp in omstandigheden met een sterke natuurlijke stroming geen sinecure is, zeker wanneer ook de dichtheidsverschillen (zout) en onvolkomenheid van putten nog in rekening gebracht dienen te worden.

Op plaatsen met van oorsprong brak of zout grondwater is het nauwelijks mogelijk om met volkomen onttrekkingsputten een redelijk rendement van de ondergrondse opslag te verwachten. Steeds zal kort nadat de infiltratie wordt gestaakt, zout of brak, oorspronkelijk grondwater mede de onttrekkingsput instromen. In zulke gevallen dient het zoete water met hooggeplaatste, onvolkomen putten te worden onttrokken. Hoofdstuk 4.5 geeft een goed beeld van de stromingssituatie die in zulke gevallen ontstaat en het daarbij optredende gedrag van het grensvlak.

Het was helaas onmogelijk om met het ontwikkelde computermodel de in de kop van dit hoofdstuk genoemde combinatie van factoren op verantwoorde wijze gezamenlijk te berekenen. Zoals in hoofdstuk 4.5 is vermeld, is dit te wijten aan de sterke afwijking tussen de werkelijke vorm van het grensvlak en de voorwaarde die ten grondslag ligt aan de benadering die in het model is verwerkt, nl. dat het grensvlak ongeveer een plat vlak blijft.

Om toch enig zicht te krijgen op het gedrag van dit grensvlak in de buurt van een onvolkomen put, zijn met het model SWIP-2 enkele orienterende berekeningen gemaakt met een radiaal symmetrische situatie, waarin echter de natuurlijke stroming niet is meegenomen. De resultaten van deze berekeningen zijn gegeven in figurenreeks 5.4 aan het eind van dit hoofdstuk. De figuren geven het verloop aan van de vlakken met gelijke dichtheden voor een reeks van maanden na de start. De startpositie was een vertikale zoet/zout-overgang met een dikte van 5m tussen 22,5 en 27,5m afstand van de linkerzijde van het getekende model (zie eerste figuur van figurenreeks 5.4). Het zwaardere, zoutere water bevindt zich aan de bijtenzijde, dit is de

rechterzijde van de figuur. Deze linkerzijde is in feite het centrum van het radiaal symmetrische model. Vanaf tijdstip t=0 wordt in het centrum van het model, aan de bovenzijde en via een puntbron, water onttrokken met een capaciteit van 20m³/d. Tegelijkertijd start in het centrum van het model, aan de onderzijde, een infiltratie met dezelfde capaciteit, eveneens door een puntbron. De doorlatendheid van het model is zowel vertikaal als horizontaal 35m/d en het dichtheidsverschil komt overeen met 3000mgCl^-/l. De hoogte van het model bedraagt 25m; de opgegeven dispersiecoefficient is nul en de diffusiecoefficient bedraagt 0,025m²/d.

Zoals in het vorige hoofdstuk reeds is gezegd, treedt in de berekening sterke vermenging op ten gevolge van numerieke dispersie, d.w.z. ten gevolge van het rekenproces. Niettemin geven de figuren een goed beeld van het gedrag van het grensvlak in dergelijke omstandigheden. Zo blijkt onder meer, dat het grensvlak door het zwaardere zoute water aan de onderzijde in de richting van het modelcentrum wordt gedrongen, alhoewel daar een infiltratieput aanwezig is die het tegenovergestelde tracht te bereiken. Het grensvlak aan de onderzijde van het pakket komt na enkele maanden op ongeveer 5 meter van de infiltratieput tot staan. De dichtheidsstroming en de stroming die de infiltratieput veroorzaakt zijn dan op deze plek met elkaar in evenwicht. Een dergelijk evenwicht wordt niet bereikt langs de bovenzijde van het pakket. Het grensvlak verplaatst zich daar door de dichtheidsverschillen van het centrum van het model af; de onttrekkingsput heeft er te weinig vat op om dit te belemmeren. Naarmate het grensvlak langs de bovenzijde van het model verder van het centrum afraakt, vermindert bovendien de invloed van de putten. Er kan dus aan de bovenzijde geen direkt evenwicht optreden. Het gevolg is, dat het grensvlak alles behalve vlak blijft. Dit is dan ook de reden waarom de eenvoudige benadering in het andere model niet meer opgaat, wanneer onvolkomen putten in het spel zijn.

Behalve het bovenstaande zijn er nog meer verschijnselen aan de figurenreeks waarneembaar. Zo veroorzaakt de numerieke dispersie een voortgaande vermindering van het dichtheidscontrast. Het gevolg hiervan is, dat de dichtheidsstroming steeds meer aan kracht inboet. De stroming in het model gaat hierdoor in toenemende mate lijken op die van een enkele vloeistof met gemiddelde dichtheid. We zien dan ook, dat de, van de onttrekkingsput af gekeerde, beweging van enkele dichtheidslijnen op den duur overgaat in een beweging die naar de onttrekkingsput toe is gericht. Zo wordt na 8 maanden de 0,1_lijn (overeenkomend met een chlorideverschil van 0,1 * 3000=300mg/l) door de winput opgeslokt. De 0,2_lijn volgt na 13 maanden. De andere zullen later volgen; zolang is de berekening echter niet voortgezet.

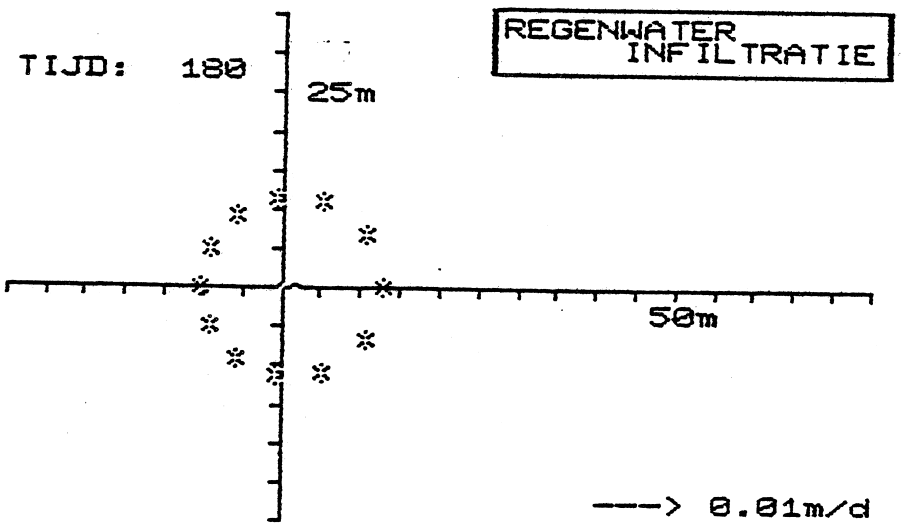
Hoewel in dit model de grensvlakvervaging praktisch geheel is toe te schrijven aan numerieke dispersie, treedt vermenging door (hydrodynamische) dispersie in de

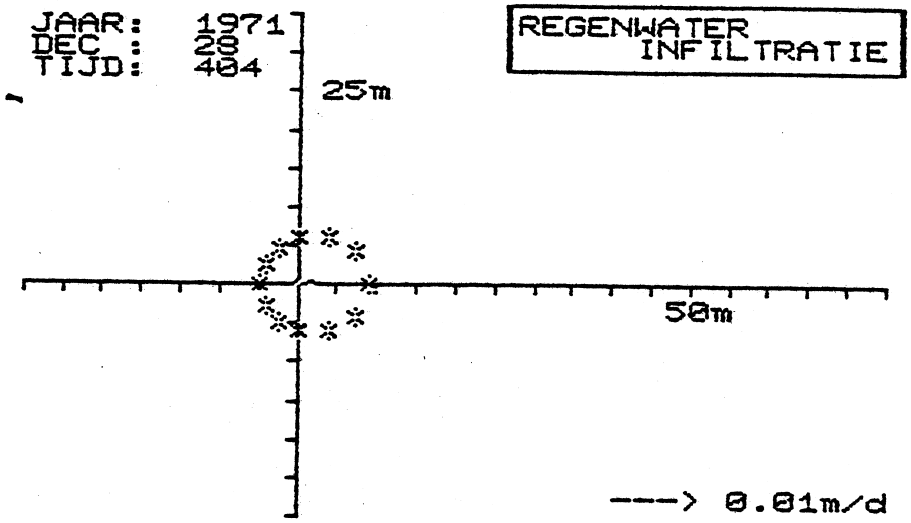
werkelijkheid ook op. Door gelaagdheid en heterogeniteit kan de dispersie in de werkelijkheid aanzienlijk zijn, zodat een vergelijkbaar gedrag zich zal voordoen. Slechts de mate van dispersie zal in de werkelijkheid anders zijn. Het is echter niet uit te sluiten dat deze onder omstandigheden van dezelfde orde kan zijn als de numerieke dispersie in dit voorbeeld. Een nauwkeuriger bestudering van dit fenomeen, maar dan in combinatie met natuurlijke grondwaterstroming, zal essentieel kunnen zijn voor praktische toepassing van de regenwaterinfiltratie in de wat ongunstiger situaties zoals die in het Westland op veel plaatsen worden aangetroffen. Een nader onderzoek op dit punt is dan ook in de aanbevelingen opgenomen.

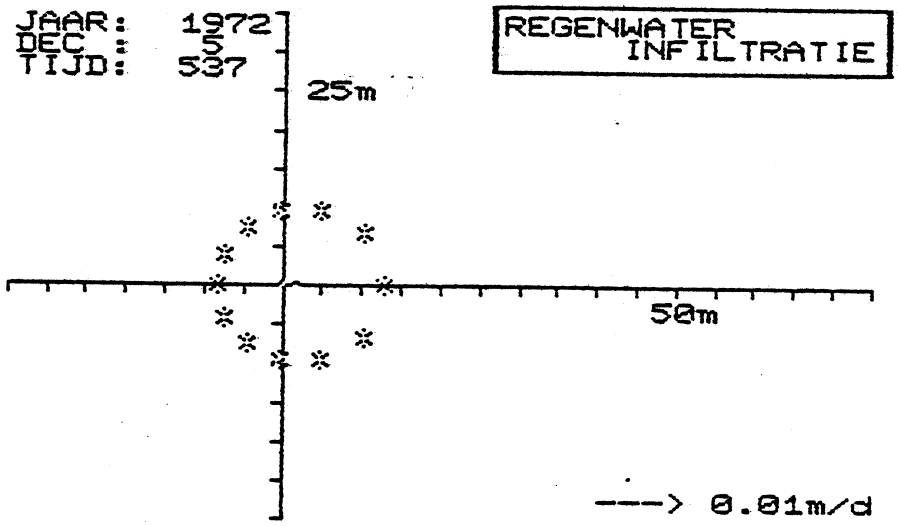
Figuren en figurenreeksen
van
hoofdstuk 5

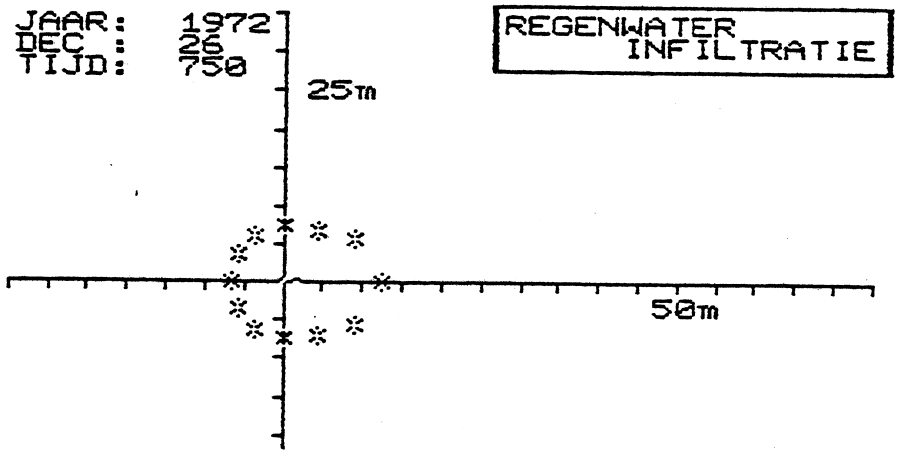
Figurenreeks 5.1: Verloop van de vorm en de grootte van de infiltratiebel in de situatie "Bleiswijk" (volkomen putten en zonder zout) vanaf 1 maart 1971, nadat tevoren gedurende 180d 20m3/d was geinfiltreerd (3600m3).

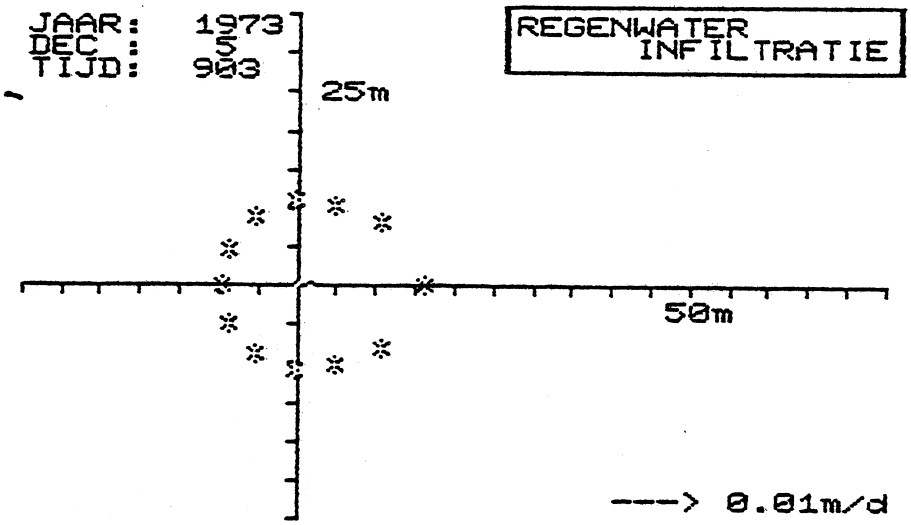
Geohydrologische gegevens: k=35m/d, pakketdikte=25m, porositeit=0,35, natuurlijke stroming=0,01m/d (werkelijke snelheid), infiltratie=neerslag op een ha, onttrekking=75 % van de behoefte per ha van teelt 2 (d.w.z. de teelt met de relatief grote waterbehoefte). De einput op 2m benedenstrooms van de infiltratieput.

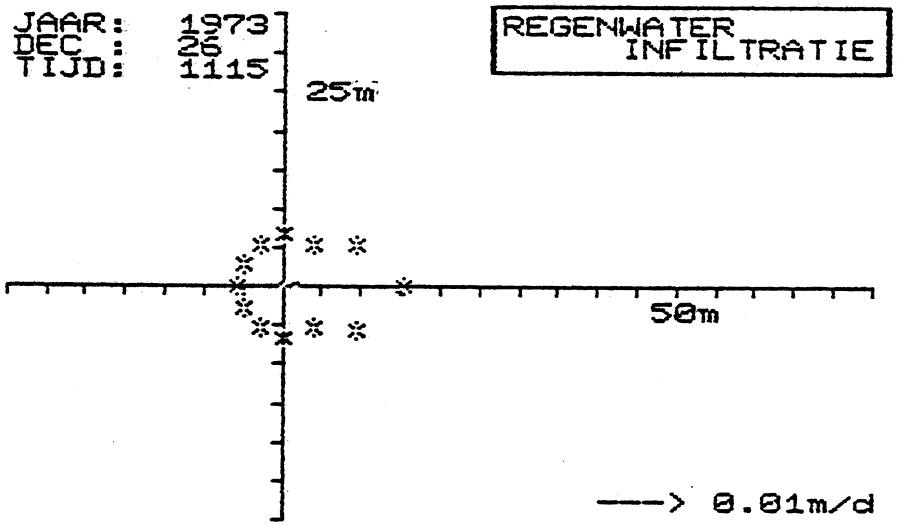


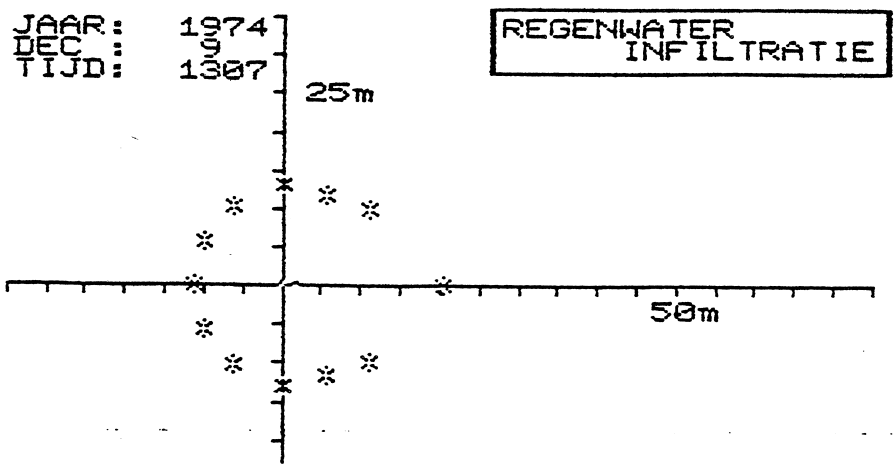

JAAR: 1971
DEC : 28
TIJD: 404
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

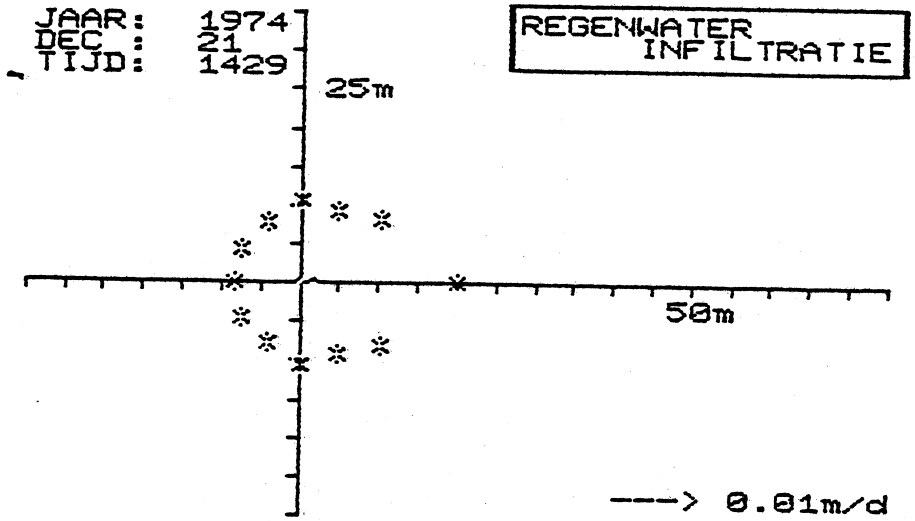

JAAR: 1972
DEC : 5
TIJD: 537
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

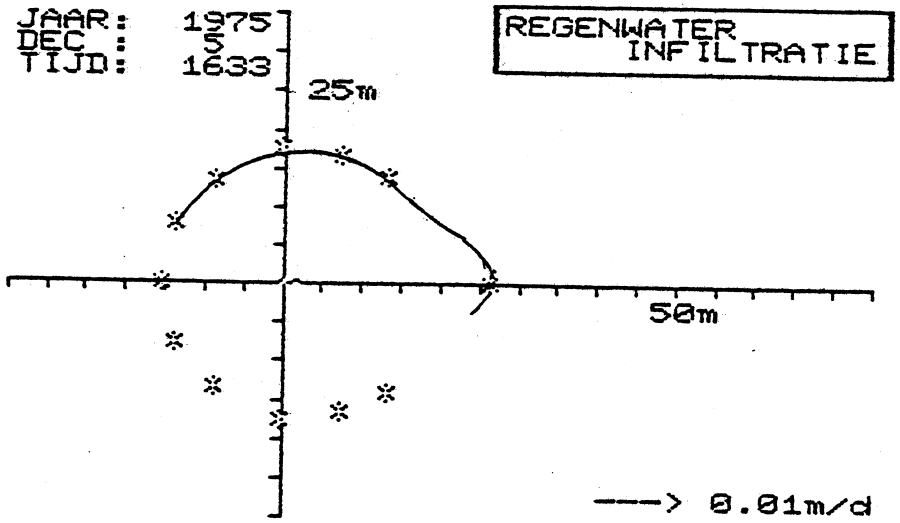

JAAR: 1972
DEC : 26
TIJD: 750
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m

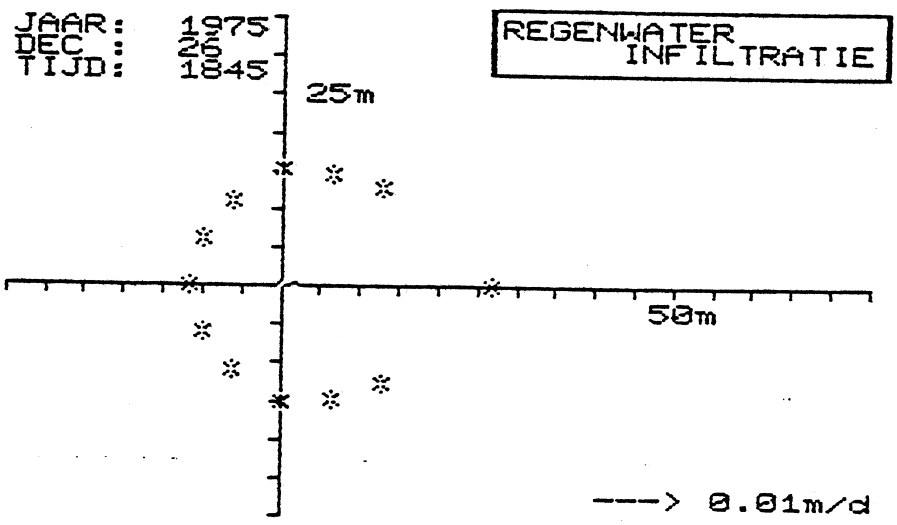

JAAR: 1973
DEC : 5
TIJD: 903
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

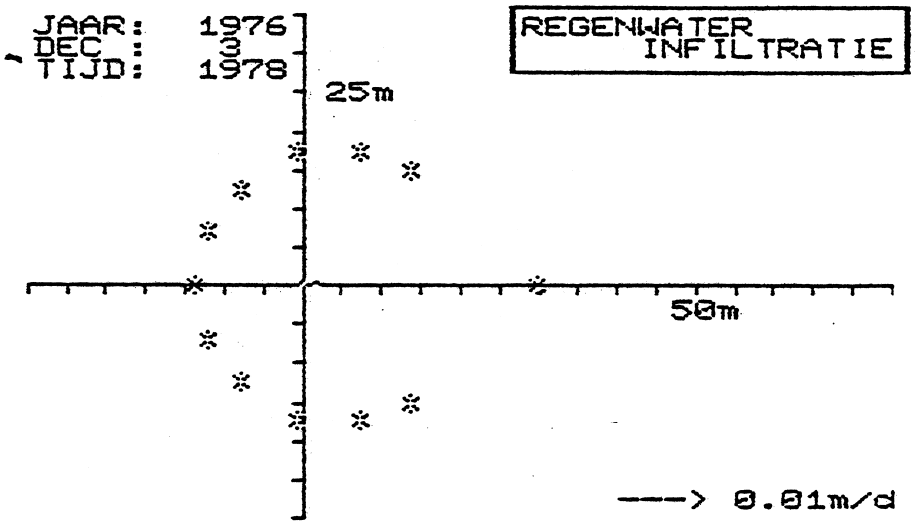

JAAR: 1973
DEC : 26
TIJD: 1115
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

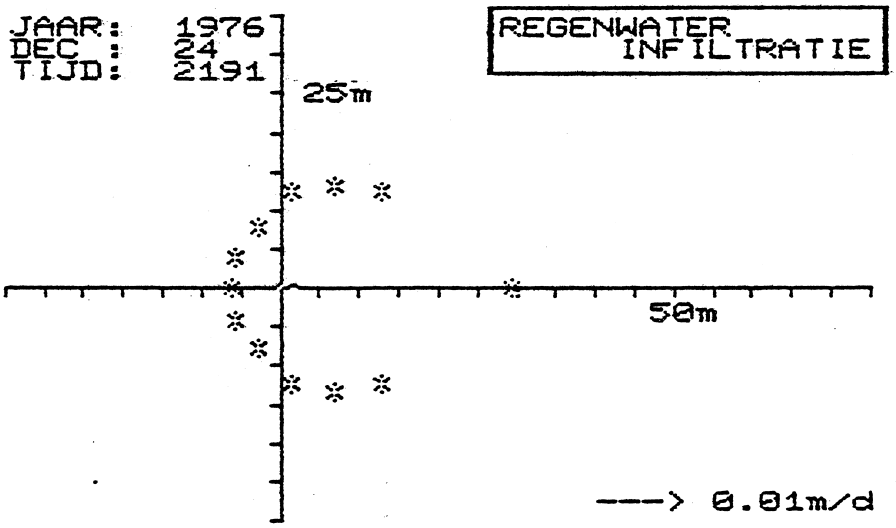

JAAR: 1974
DEC : 9
TIJD: 1307
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m

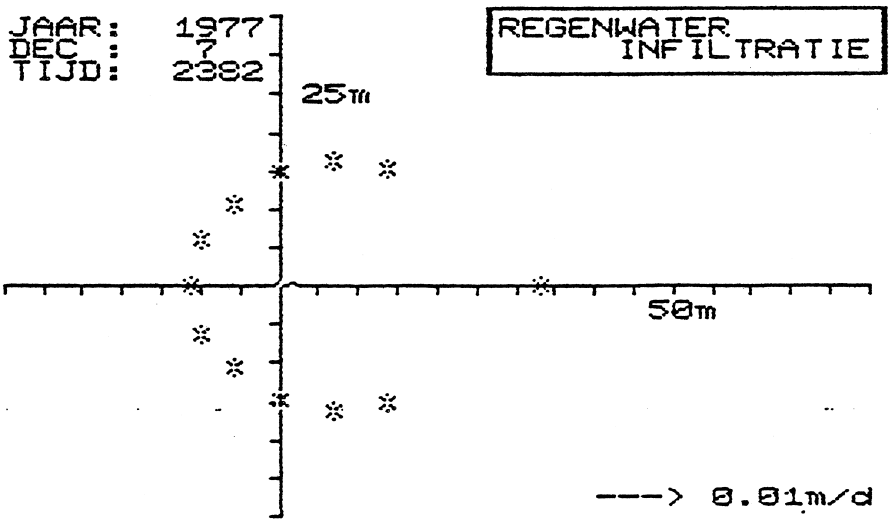

JAAR: 1974
DEC : 21
TIJD: 1429
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

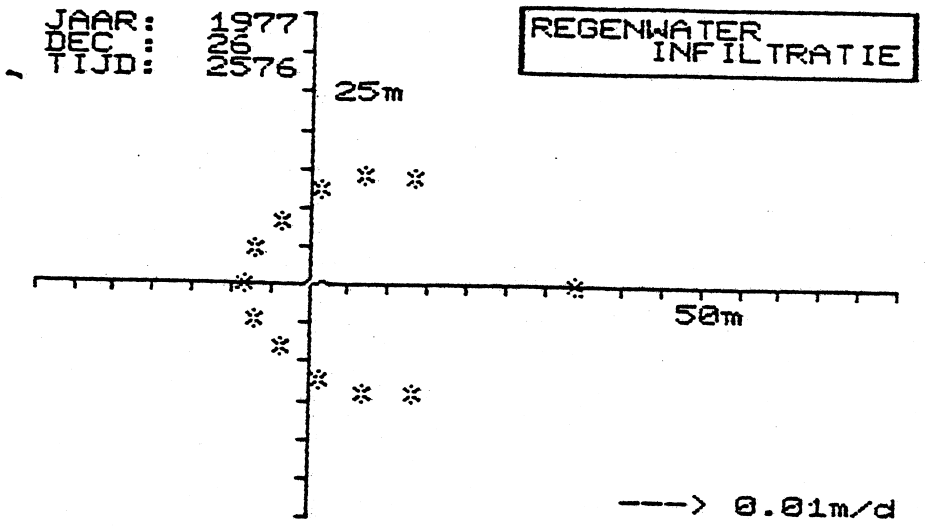

JAAR: 1975
DEC : 5
TIJD: 1633
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

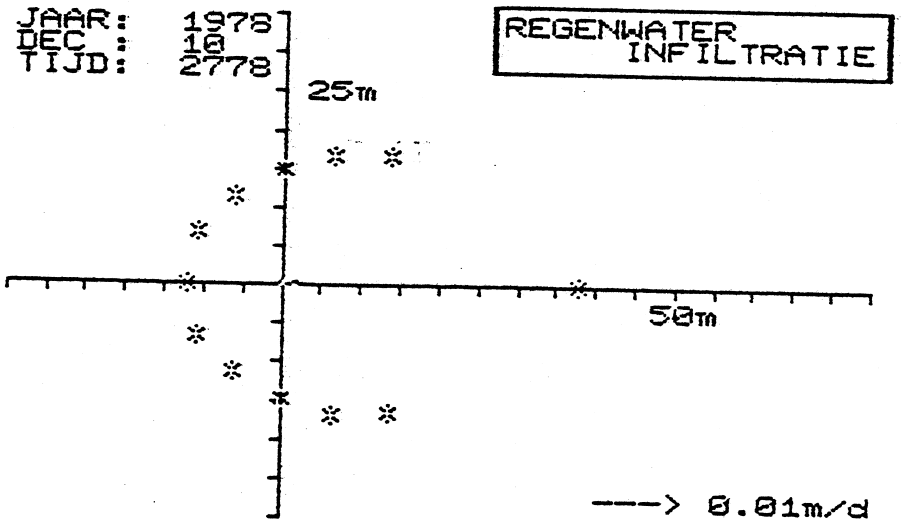

JAAR: 1975
DEC : 26
TIJD: 1845
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

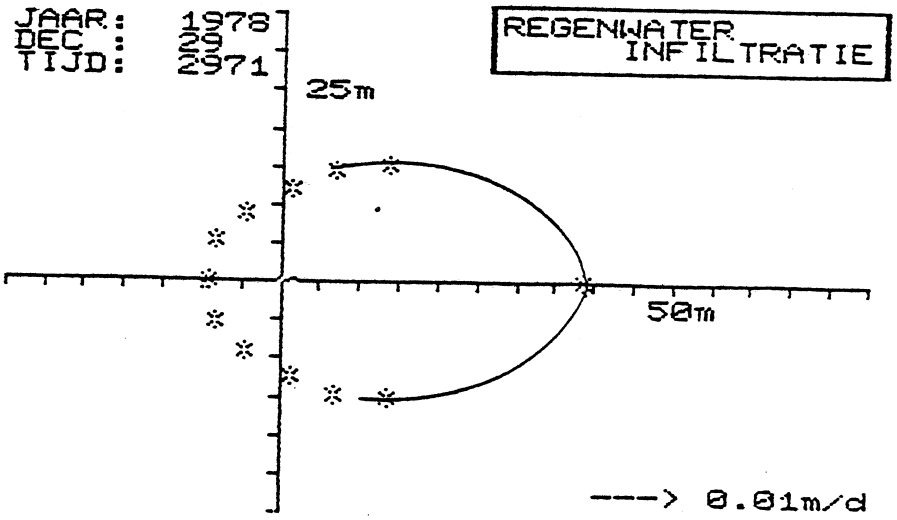

JAAR: 1976
DEC : 3
TIJD: 1978
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

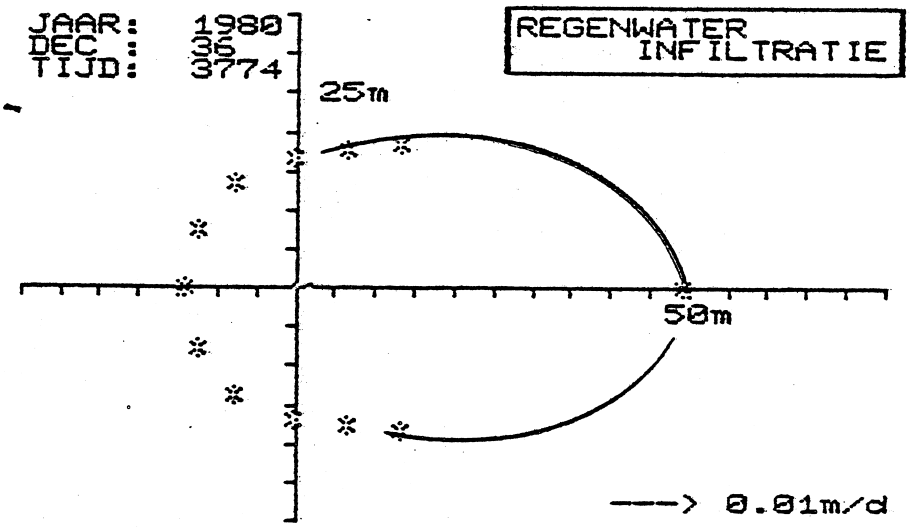

JAAR: 1976
DEC : 24
TIJD: 2191
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d


JAAR: 1977
DEC : 7
TIJD: 2382
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

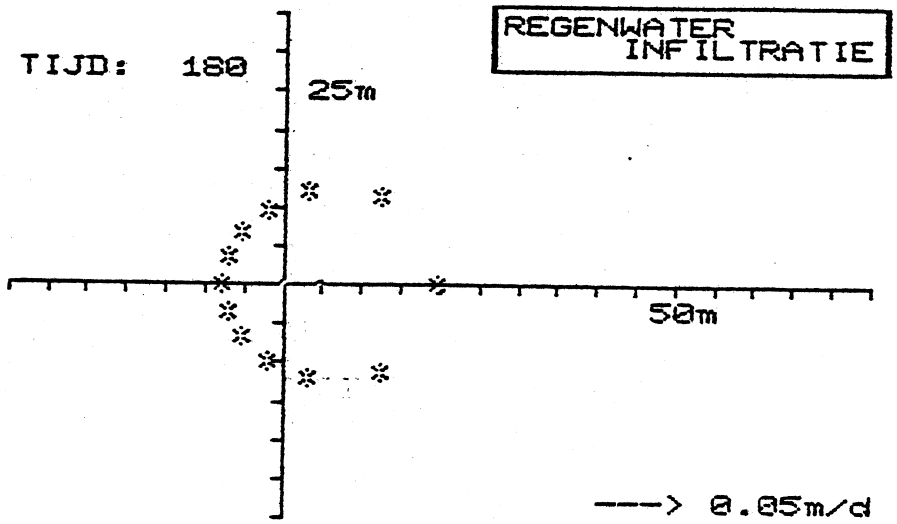

JAAR: 1977
DEC : 26
TIJD: 2576
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

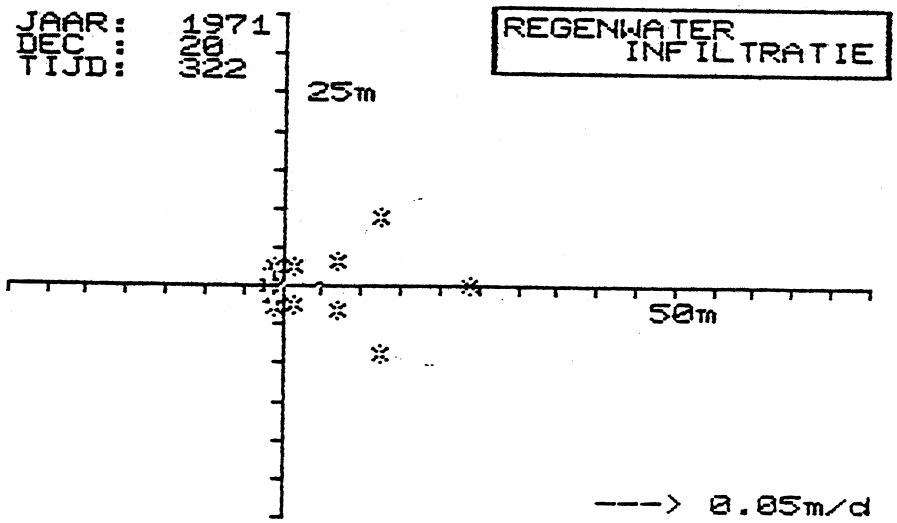

JAAR: 1978
DEC : 10
TIJD: 2778
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d


JAAR: 1978
DEC : 29
TIJD: 2971
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
---> 0.01m/d

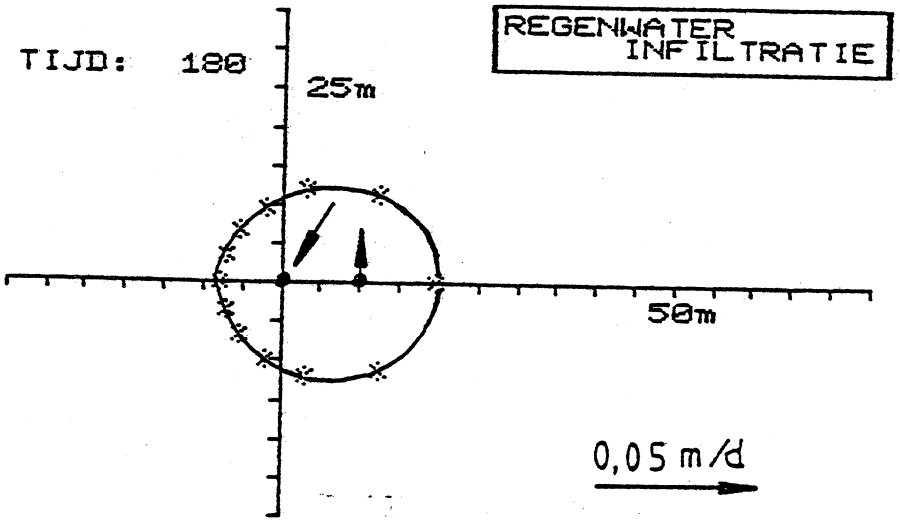

JAAR: 1980
DEC : 36
TIJD: 3774
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m
0.01m/d

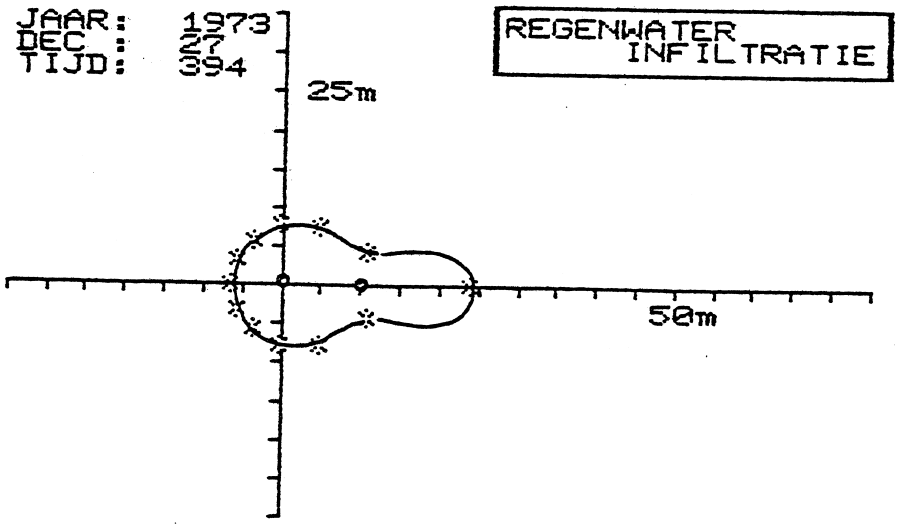
Figuur 5.2: Situatie "Westland" (situatie als in figuur 5.1, doch met pakketdikte=20m, natuurlijke stroming=0,05m/d en de winput op 5m stroomafwaarts van de infiltratieput.
Boven: Uitgangssituatie na opladen van de voorraad.
Onder: Meepompen van oorspronkelijk grondwater reeds in juli van het eerste jaar.

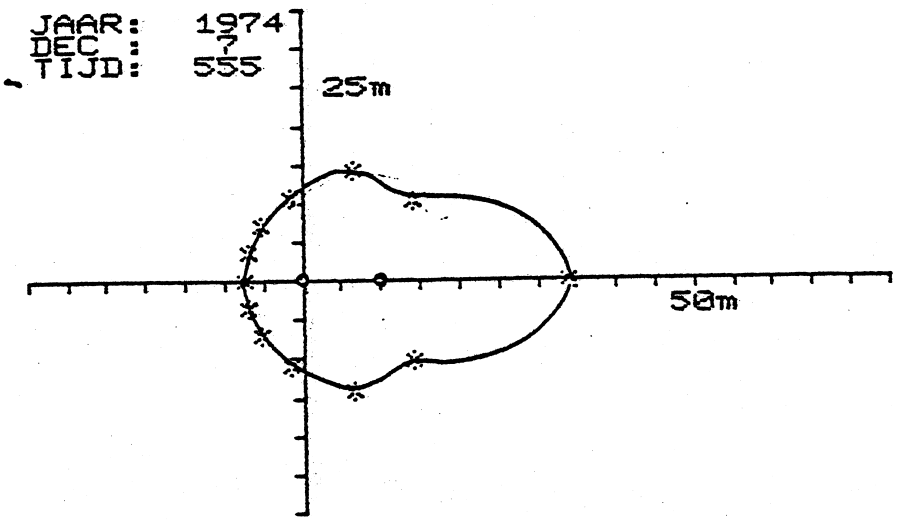


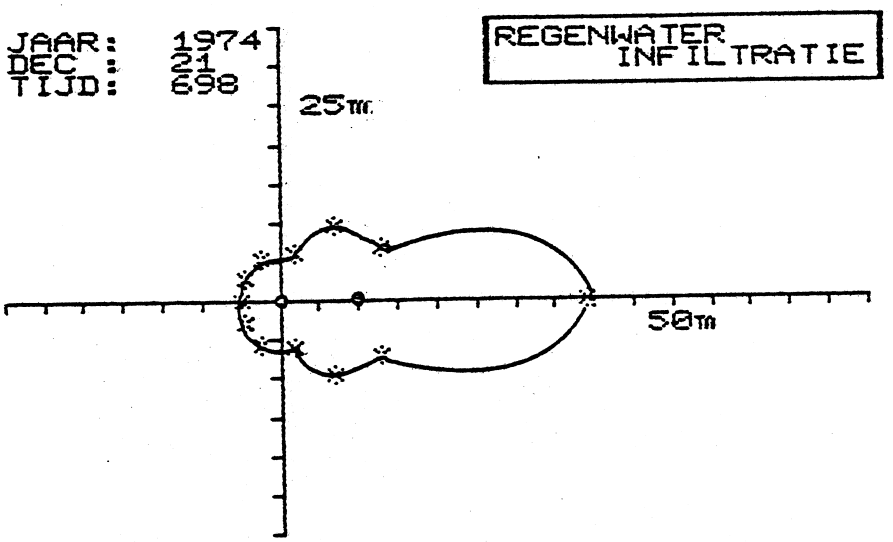


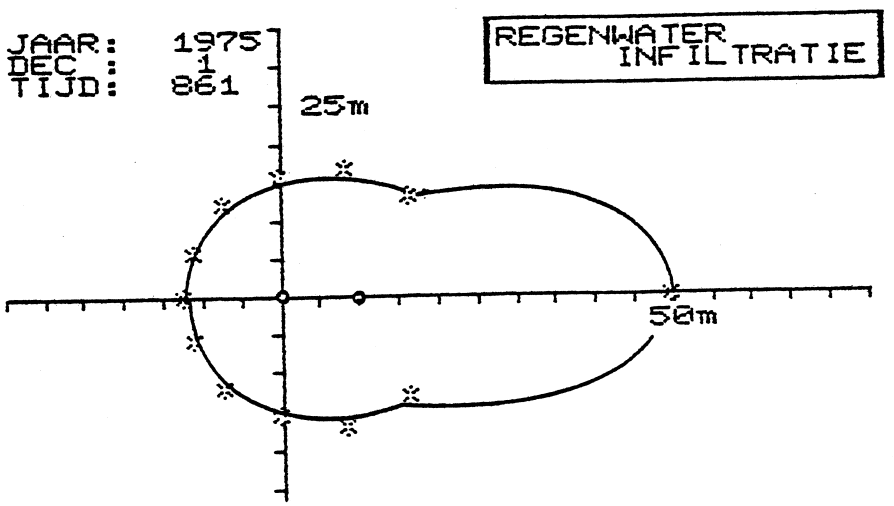
Figurenreeks 5.3: Situatie "Westland". Als in figuur 5.2 maar met winput op 10m benedenstrooms en na opladen niet in 1971 gestart, maar op 1 maart 1973. De reeks is in 1976 beeindigd omdat toen oorspronkelijk grondwater werd meegepompt.

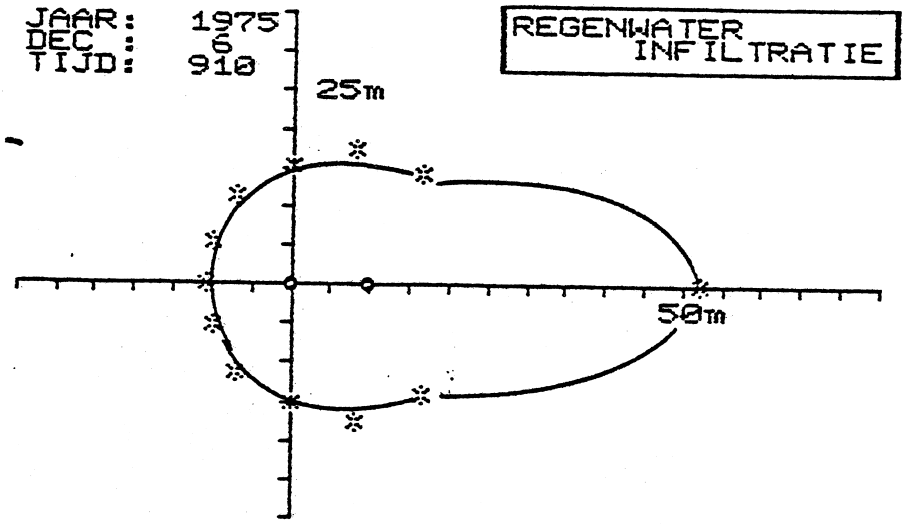


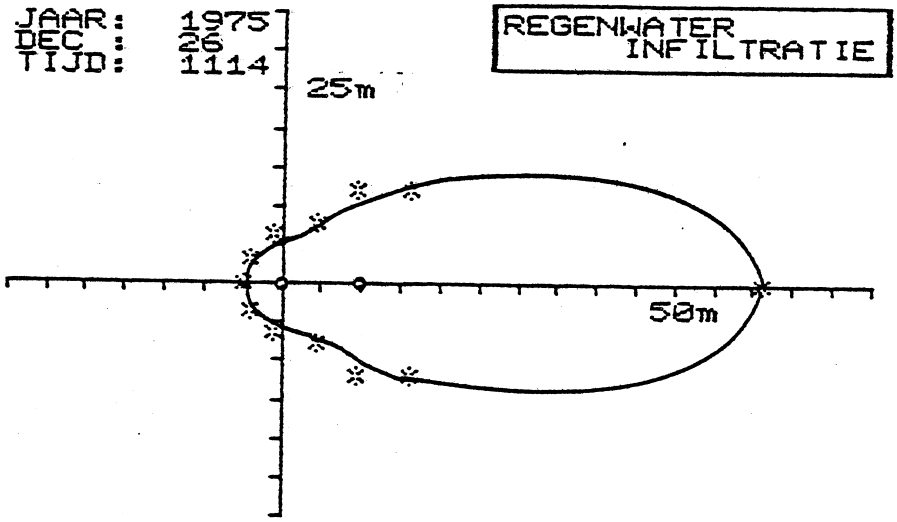


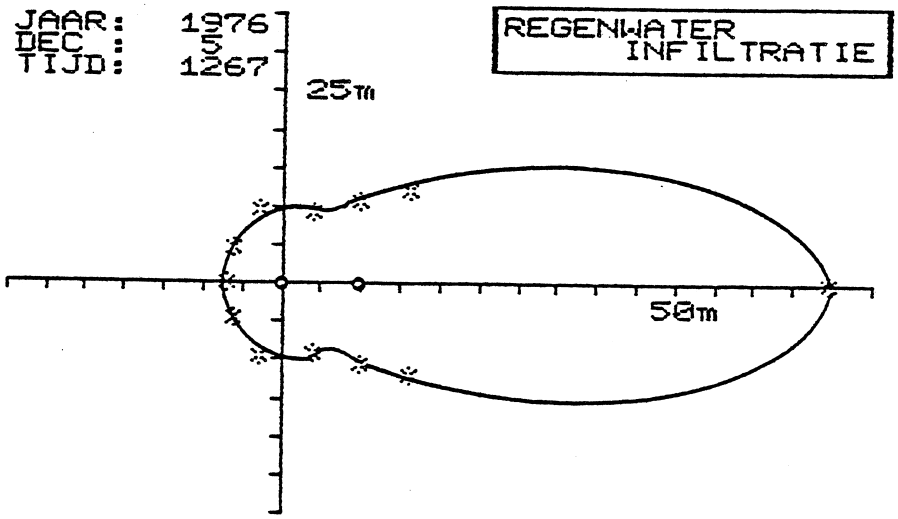

JAAR: 1974
DEC : 7
TIJD: 555
25m
50m

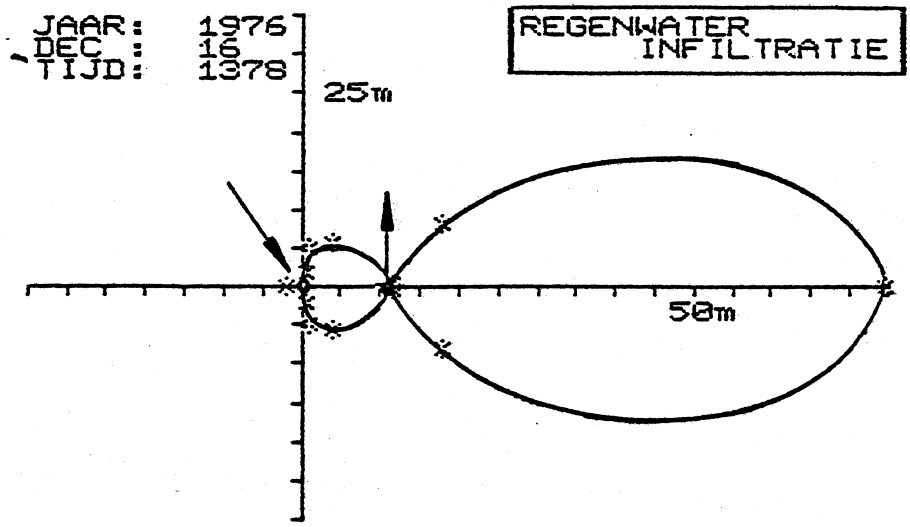

REGENWATER
INFILTRATIE
JAAR: 1974
DEC : 21
TIJD: 698
25m
50m


REGENWATER
INFILTRATIE
JAAR: 1975
DEC : 1
TIJD: 861
25m
50m

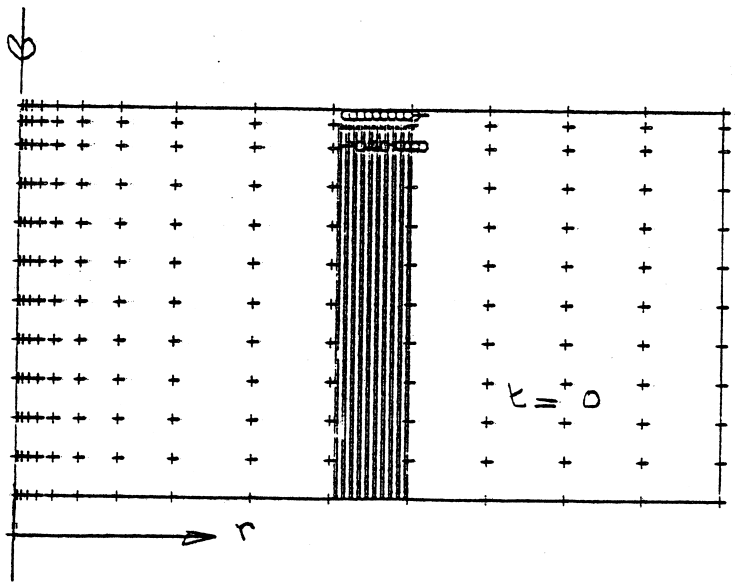

JAAR: 1975
DEC : 6
TIJD: 910
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m

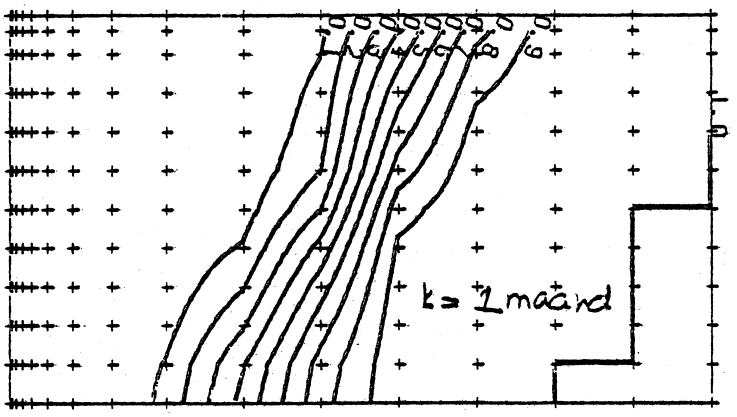

JAAR: 1975
DEC : 26
TIJD: 1114
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m

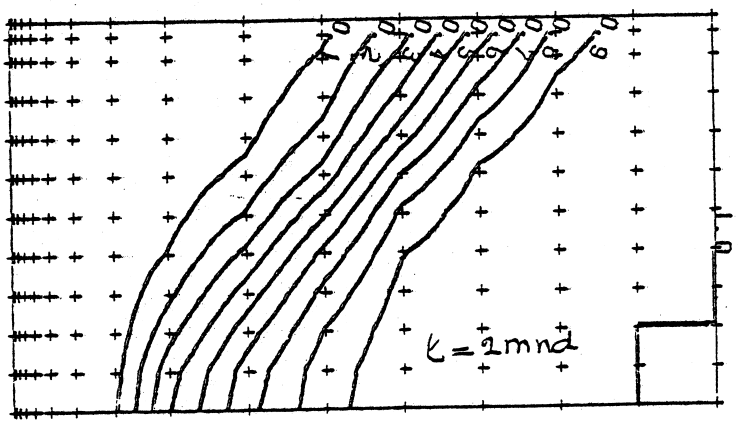

JAAR: 1976
DEC : 5
TIJD: 1267
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m

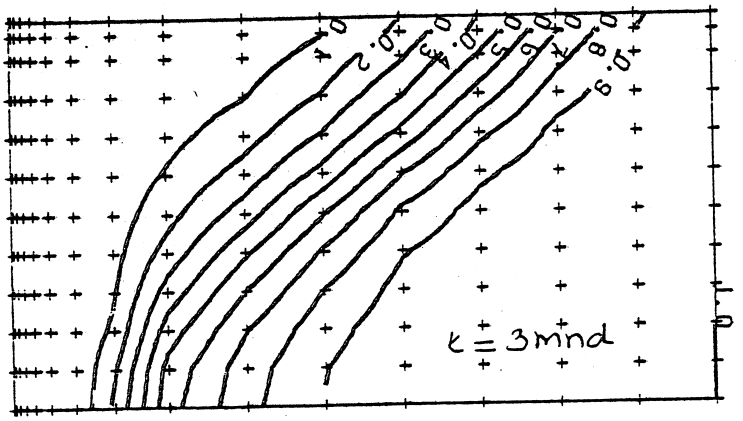

JAAR: 1976
DEC : 16
TIJD: 1378
REGENWATER
INFILTRATIE
25m
50m

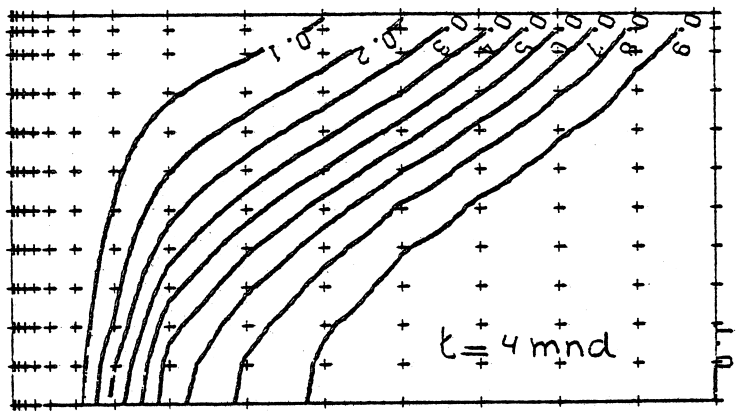
Figurenreeks 5.4: Resultaten van de berekeningen met het programma SWIP-2: Verloop van lijnen met gelijke dichtheid (de dichtheid van lijn_0=0 en van lijn_=3000mg Cl^-/l) in een radiaal symmetrische dichte bak met radius 47,5m. Op t=0 is het grensvlak 5m dik en vertikaal (tussen 22,5 en 27,5m van het centrum van het model) en wordt er in het centrum van het model (links) aan de bovenzijde een puntbron gestart met een onttrekking van 20m³/d. Tegelijk wordt in het centrum aan de onderzijde een puntbron aangezet met een infiltratie van 20m³/d. Het model is 25m hoog, de doorlatendheid is 35m/d in vertikale en in horizontale richting, de diffusiecoefficient is 0,025m²/d en de opgegeven dispersiecoefficient is nul. De sterke optredende dispersie is het gevolg van de numerieke oplosmethode (numerieke dispersie).

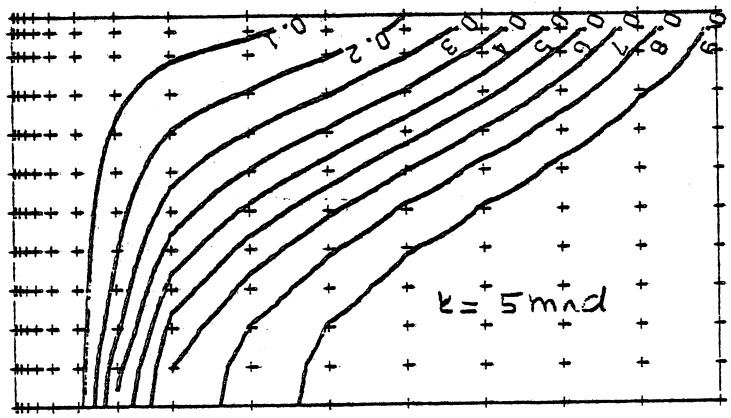


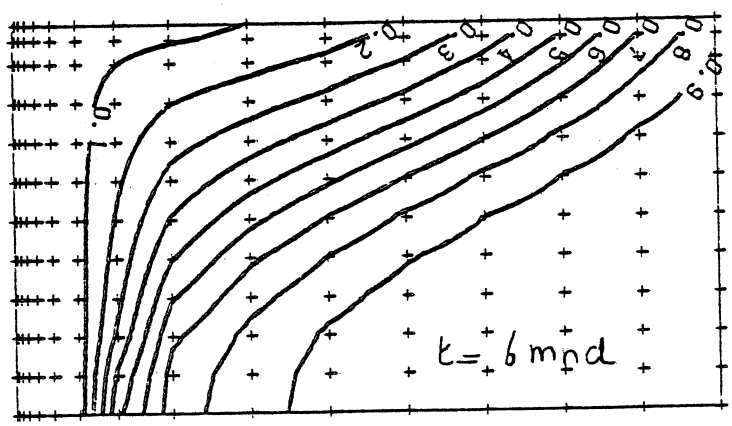

k = 1 maand

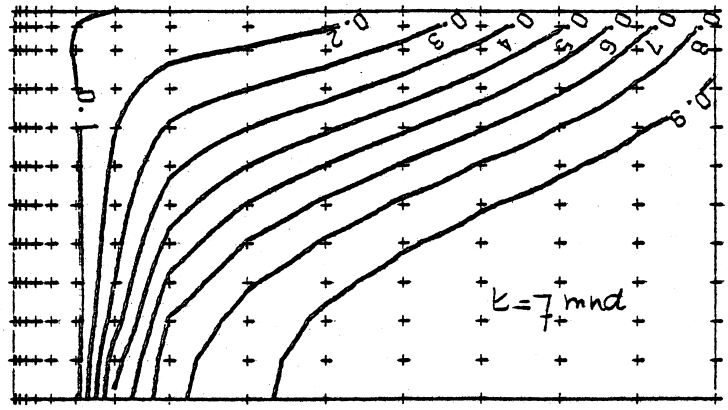

k = 2 mnd

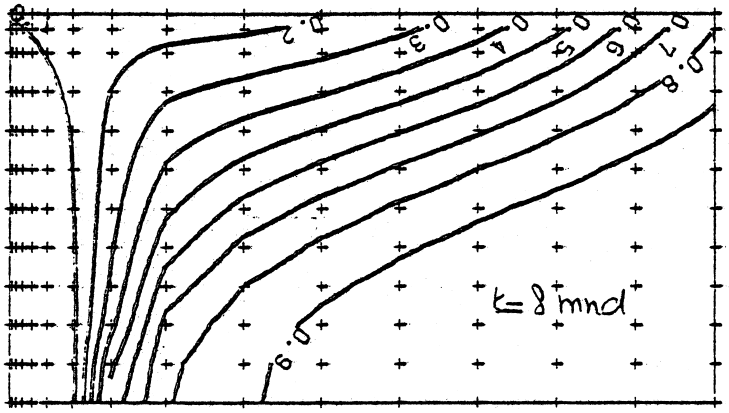

k = 3 mnd

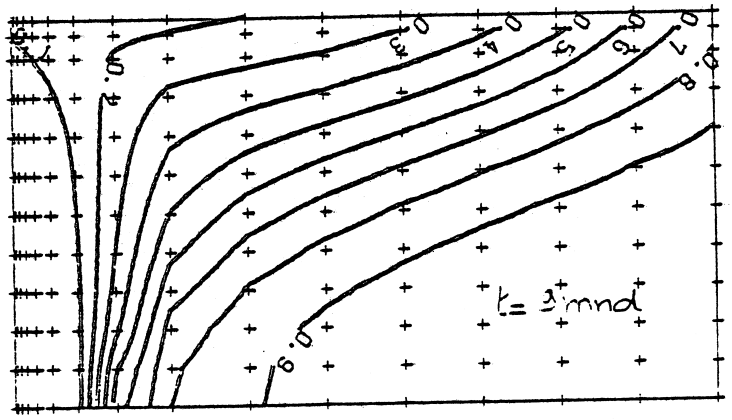

0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
t = 4 mnd

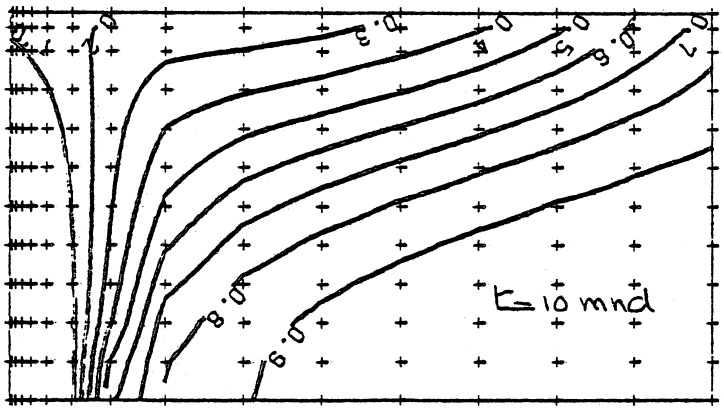

0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
t = 5 mnd

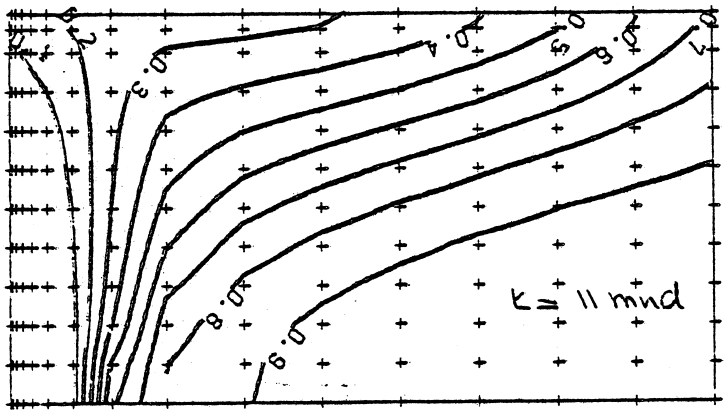

0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
t = 6 mnd

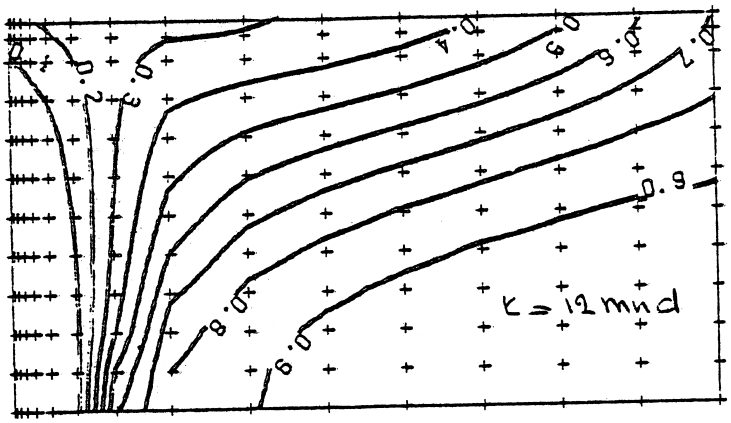

0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
t=7 mnd

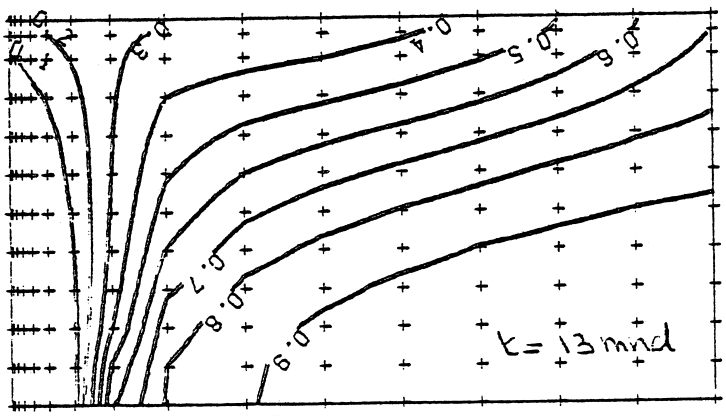

0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
t=8 mnd


0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
t=9 mnd


t = 10 mnd

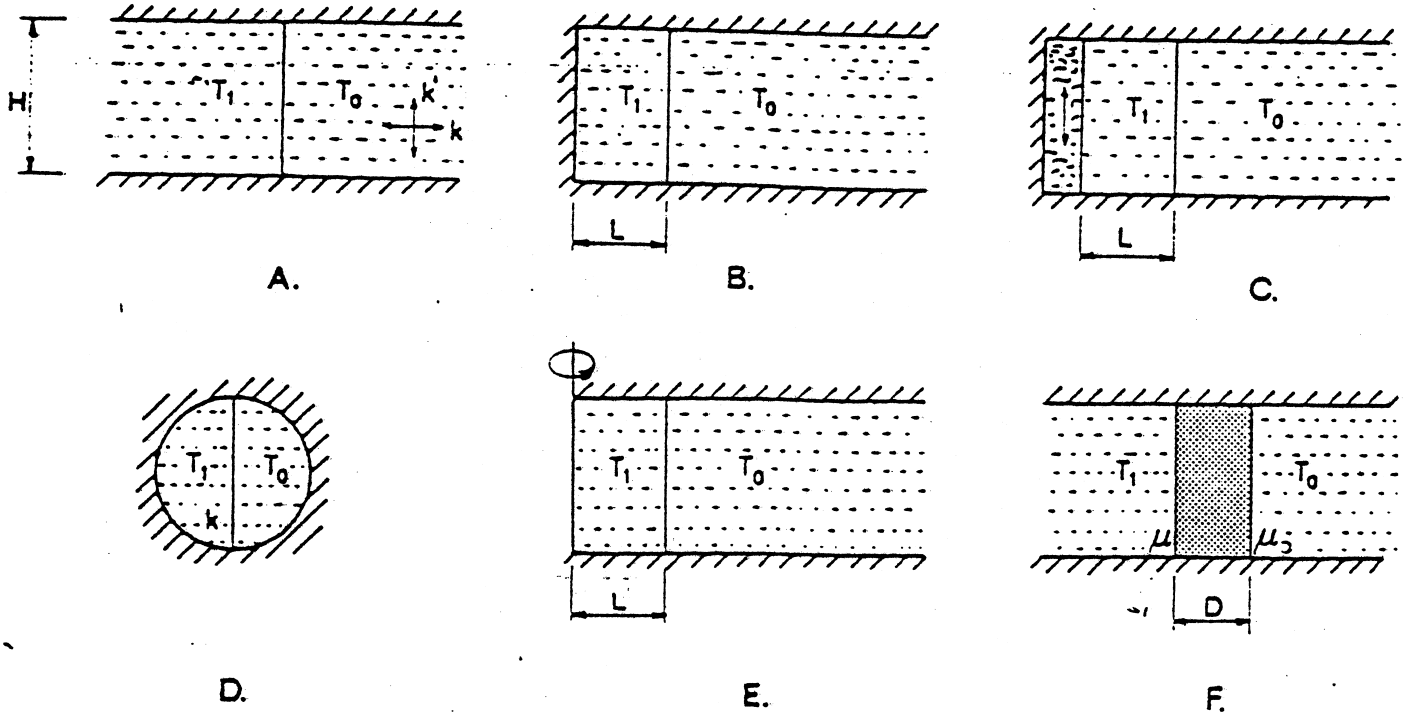

t = 11 mnd


t = 12 mnd


t = 13 mnd

Figuur A1.1_boven: Schema van de door Hellstroem e.a. onderscheiden 6 situaties.

Figuur A1.1_onder: Dichtheidsstroming bij een vertikaal grensvlak in schema A. (Beide figuren overgenomen uit Hellstroem e.a. (1979)).



Considered cases with analytical solutions.

A: Infinite strip.

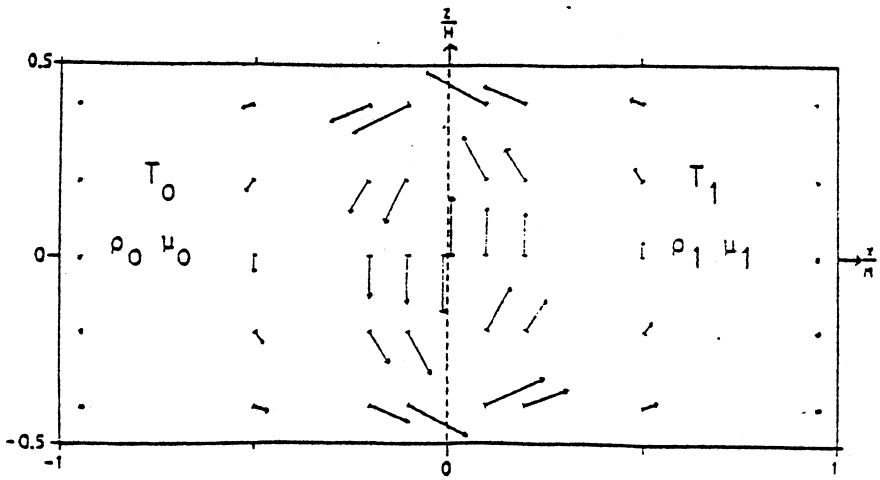
B: Semi-infinite strip with impermeable left boundary.

C: Semi-infinite strip with free flow in a well along the left boundary.

D: Circular disc.

E: Cylindrical case.

F: Infinite strip with thermal front thickness D.



Figuur A1.2: Analytische formules voor de stroming bij vertikaal grensvlak in de 3 belangrijkste situaties (Overgenomen uit Hellstroem e.a. 1979)).

A. Infinite strip.

$$q_f(z) = \kappa\, q_o \cdot \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{1+\sin(\frac{\pi z}{H})}{1-\sin(\frac{\pi z}{H})}\right]$$

E. Cylindrical case.

$$q_f(z) = \kappa\, q_o \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-)^n}{2n+1} \cdot \frac{\sin\left[\frac{(2n+1)\pi z}{H}\right]}{\frac{\mu_1}{\mu_o+\mu_1} \cdot \frac{I_o(\gamma_n)}{I_1(\gamma_n)} + \frac{\mu_o}{\mu_o+\mu_1} \cdot \frac{K_o(\gamma_n)}{K_1(\gamma_n)}}$$

$$\gamma_n = \frac{(2n+1)\pi\kappa L}{H}$$

Here we have used the modified Bessel functions K_n and I_n.

F. Infinite strip with diffuse thermal front.

$$q_f(z) = \kappa\, q_o \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-)^n}{2n+1} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{(2n+1)\pi\kappa\frac{D}{2}}{H}}}{\frac{(2n+1)\pi\kappa\frac{D}{2}}{H}} \cdot \sin\left[\frac{(2n+1)\pi z}{H}\right]$$

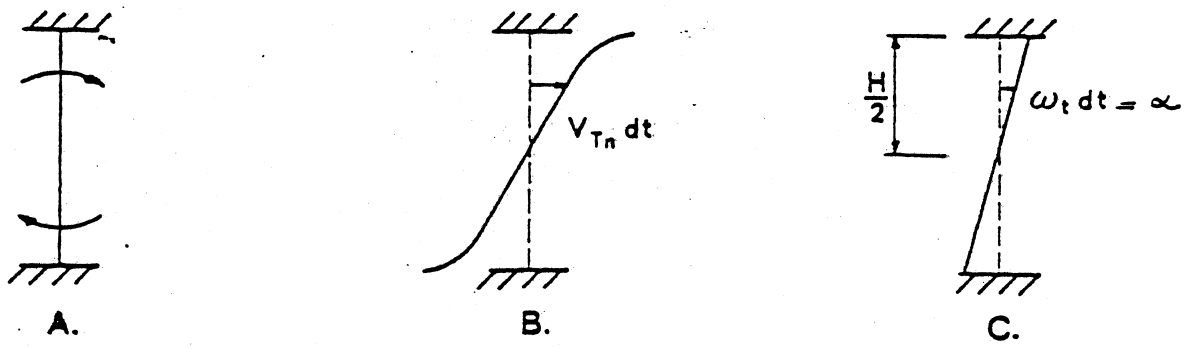
The flow $q_f(z)$ refers to the middle of the thermal front region. For large $\frac{\kappa D}{H}$ we have as a good approximation:

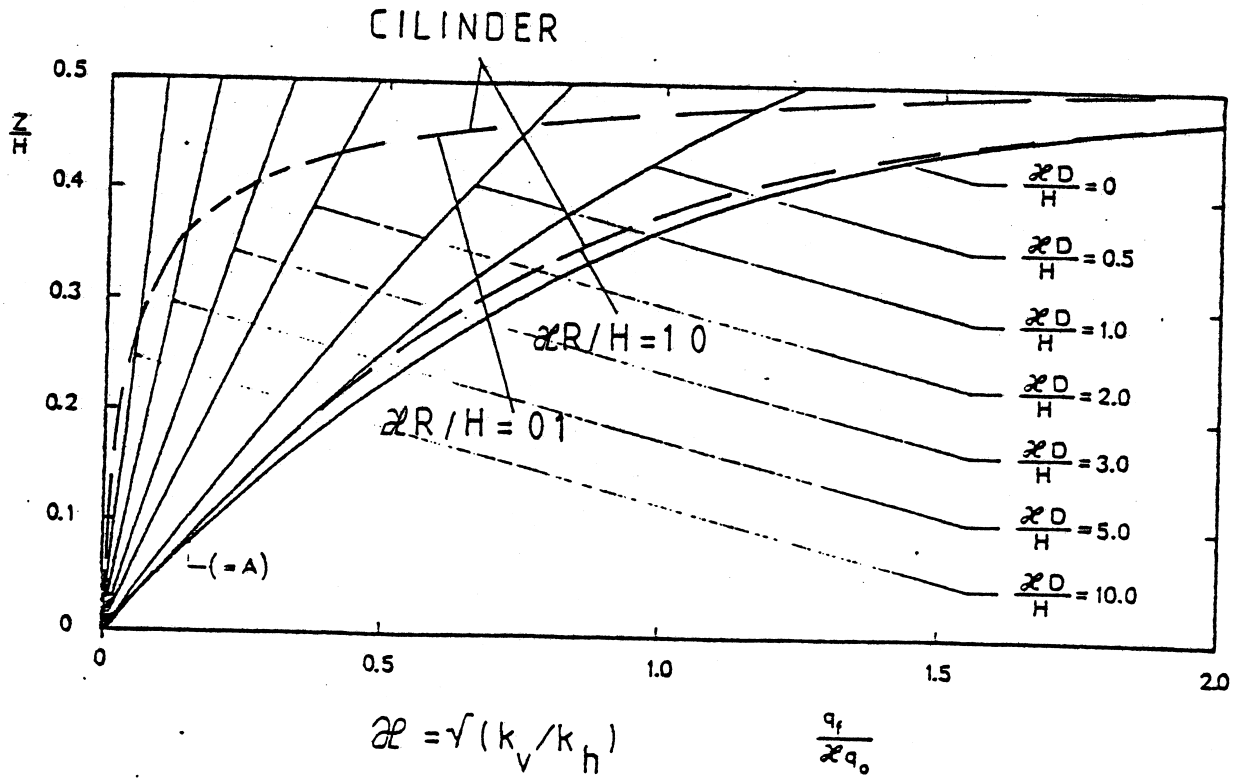
$$q_f(z) \cong 2q_o \cdot \frac{z}{D}$$

The flows $q_f(z)$ are all odd functions of z. Figures 9-14 show the thermal front flow $q_f(z)$, $0 \le z \le \frac{H}{2}$, in different cases. The curves show the dimensionless flow $q_f/(\kappa q_o)$.

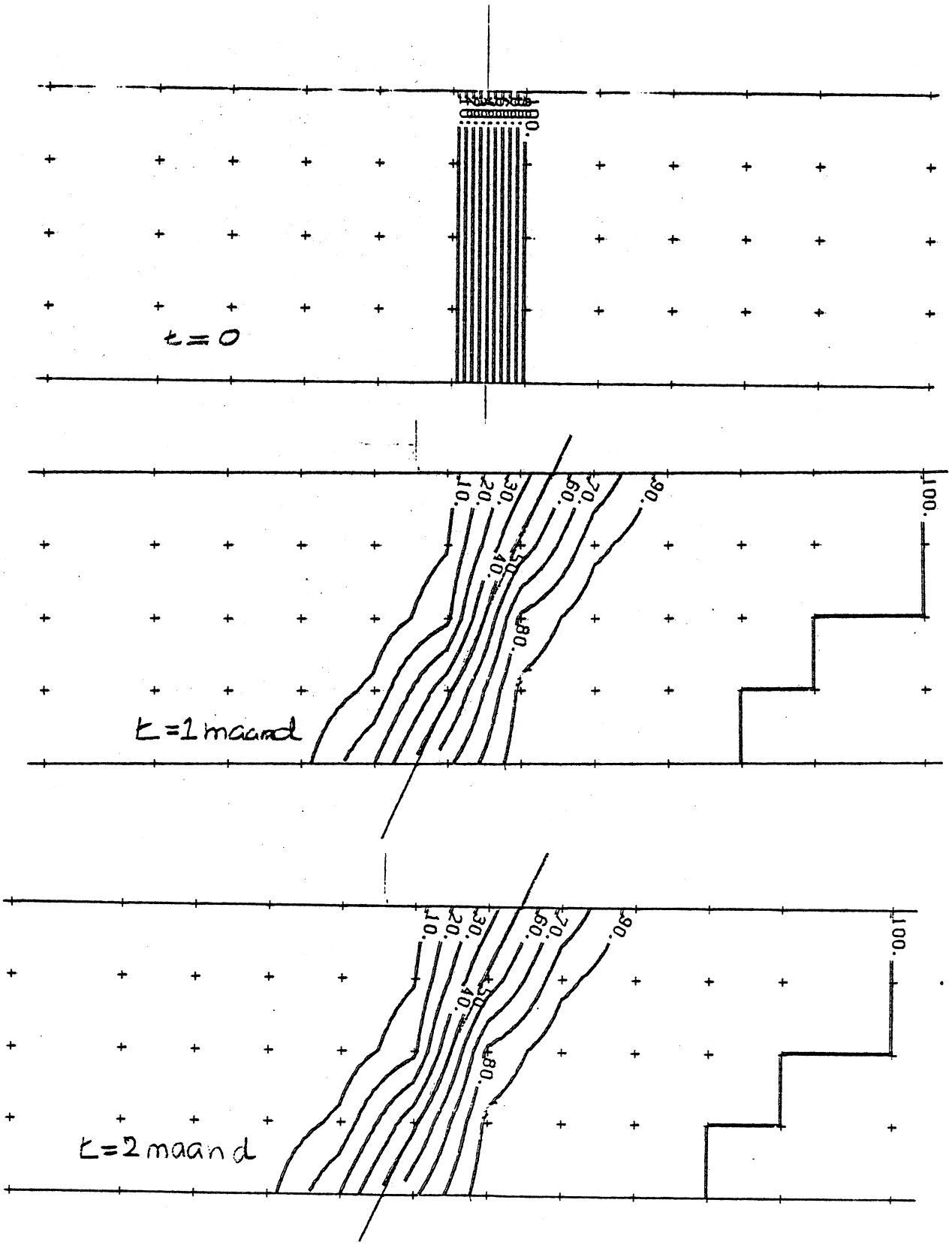
Boven ...Figuur A1.4:
A:Bewegingsrichting wanneer de dichtheid rechts groter is dan links;
B:Vorm van het front nadat enige tijd is verstreken;
C:Schematisering door middel van een plat vlak.

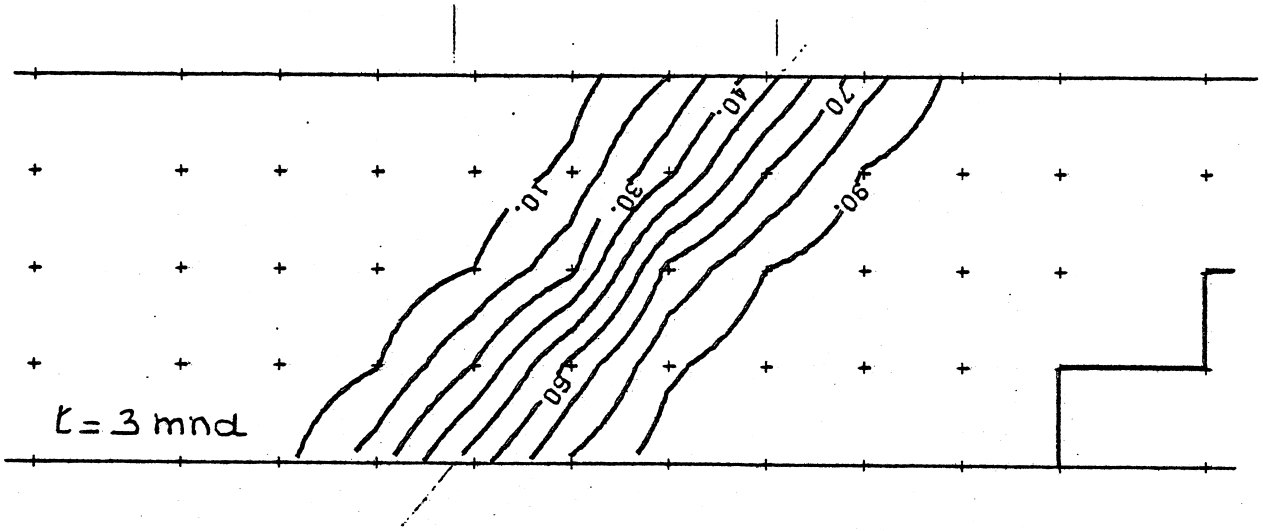
Onder ...Figuur A1.3:
Flux in bovenste helft van het pakket voor geval F; D/H=0 geeft geval A; tevens geval E ingetekend (uit Hellstroem e.a. 1979)

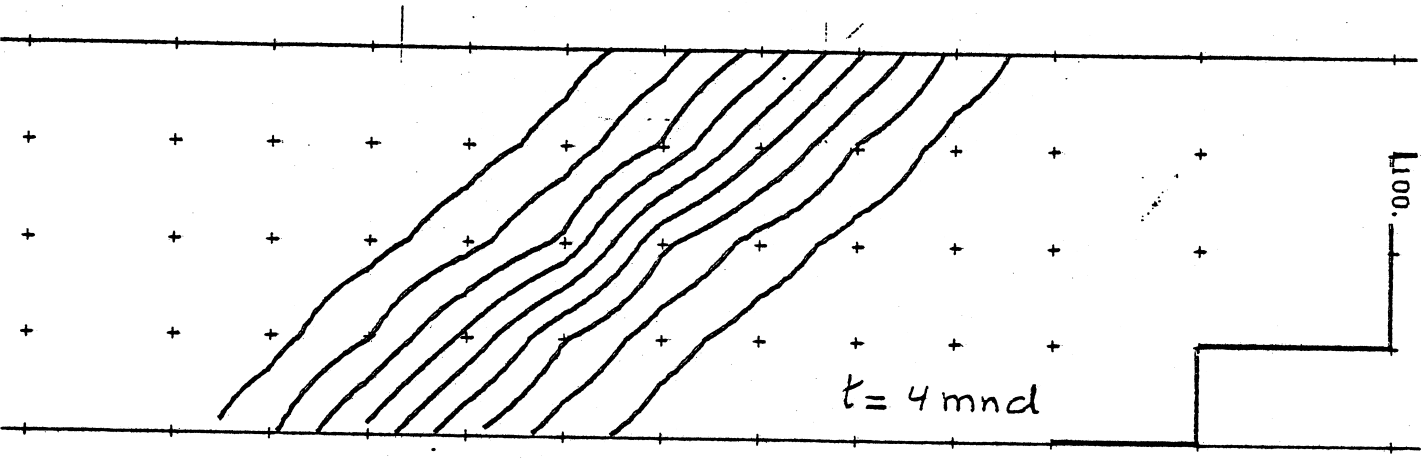


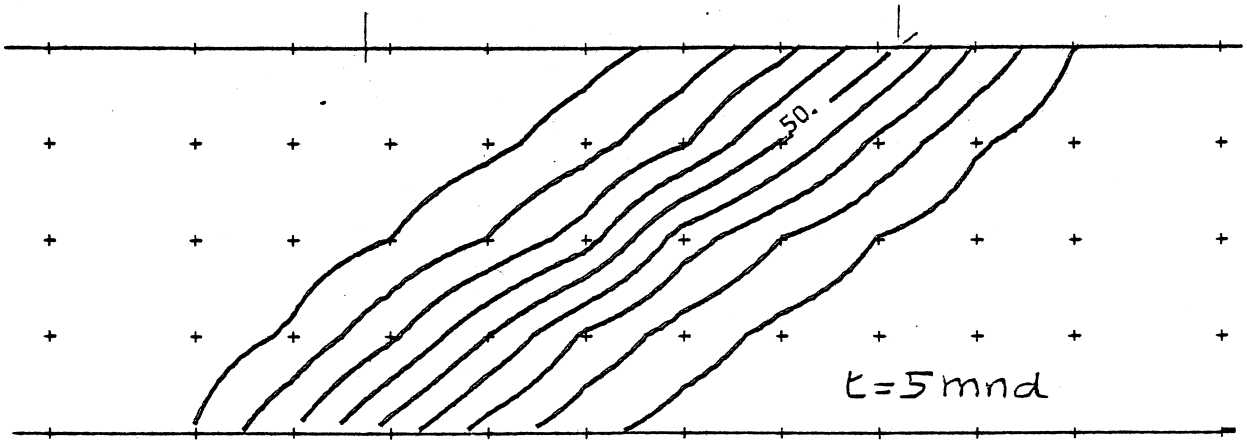


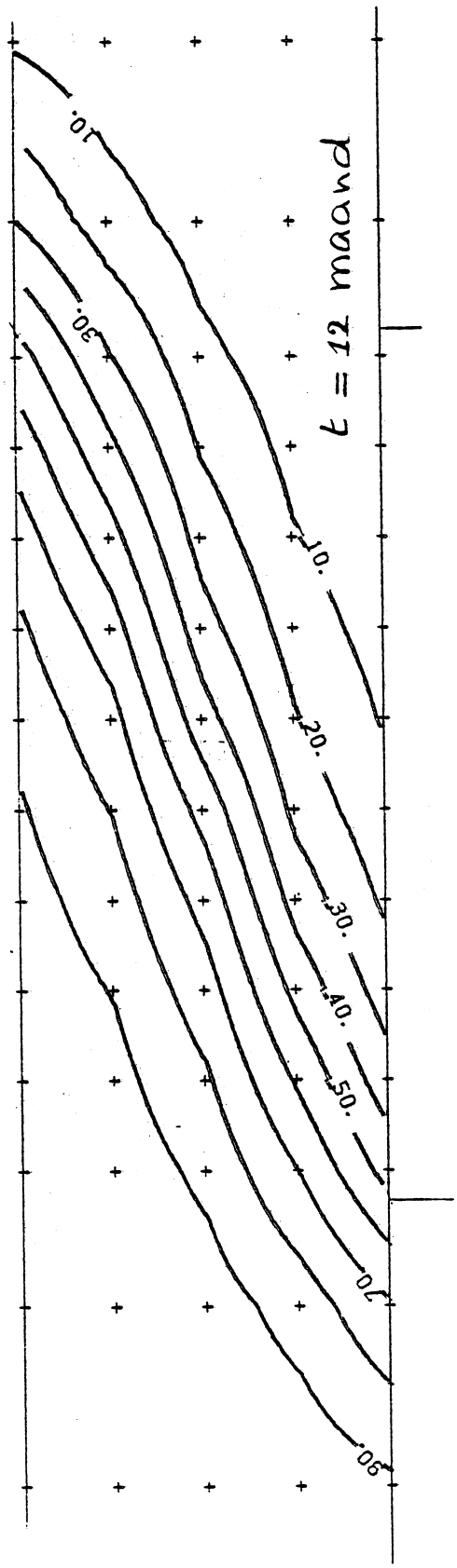
Figuur A1.5: Berekeningsresultaten met het Programma SWIP-2; voor een verticale strook, met 3000mg chlorideverschil/l, doorlatendheidscoefficient van 35m/d, een porositeit van 35%, een diffudiecoefficient gelijk aan 0,025/m²/d en een dispersiecoefficient gelijk aan nul.




10.
30.
40.
50.
70.
90.
t = 3 mnd


100.
t = 4 mnd


50.
t = 5 mnd


t = 12 maand
.10
.20
.30
.40
.50
.70
.90
.10
.30

A2 Anisotropie van de doorlatendheidscoefficient

Anisotropie van de doorlatendheidscoefficient is het verschijnsel, dat de doorlatendheidscoefficient in een op zichzelf homogeen medium niet in alle richtingen even groot is. Vooral de verticale doorlatendheid kan sterk afwijken van de horizontale. De achterliggende oorzaak is normaliter de geologische ontstaanswijze van het betreffende pakket, waarbij veelal van een laagsgewijze opbouw sprake is.

Daar bij rotatie van een grensvlak tevens verticale stroming optreedt is een dergelijke anisotropie van belang. De rotatiesnelheid blijkt namelijk in sterke mate hierdoor te worden bepaald.

Op microschaal hoeft er in een pakket geen sprake van anisotropie te zijn, wanneer het pakket is opgebouwd uit een veelheid van horizontale laagjes die elk voor zich homogeen en isotroop kunnen zijn. In zo'n situatie, die in de praktijk veel voorkomt, gedraagt het watervoerende pakket als geheel zich anisotroop.

Het is mogelijk om de anisotropie door verschaling van de lengteassen van het medium te elimineren. Door dit handig te doen kan hierna met het verschaalde, isotroop gemaakte probleem worden verder gewerkt, zonder zich zorgen te hoeven maken over schaling van andere factoren als druk, volumestromen en tijd. Deze blijven namelijk gelijk, evenals verblijftijden die met behulp van het verschaalde probleem worden berekend (Olsthoorn, 1982).

Moesten bij normale grondwatervraagstukken slechts de assen worden verschaald, in het geval van dichtheidsstroming dient tevens de zwaartekracht meeverschaald te worden. Voor het overige is de problematiek ongewijzigd.

Volgens de wet van Darcy geldt wanneer met drukken wordt gewerkt (bij variabele dichtheid mag niet met potentiaal worden gerekend):

$$q_x=-(k/mu)\ \ P/\ x;\quad q_y=-(k/mu)\ \ P/\ y;$$

$$q_z=-(k/mu)\ \ \{\ P/\ z\ +\ rho\ g\}$$

Hierin is:

qx	="Darcysnelheid" (=por * werkelijke snelheid = de flux in de x_richting [L/t]
qy	=idem in de y_richting
qz	=idem in de z_richting
x, y en z	=carthesische coordinaten t.o.v. een gekozen referentiepunt [L]
k	=intrinsieke doorlatendheidscoefficient [L^2]
P	=druk in punt (x,y,z) t.o.v. een gekozen referentiedruk [F/L^2]
rho, mu en g	als eerder gedefinieerd (resp. dichtheid, viscositeit en sterkte van het zwaartekrachtsveld)

De continuiteitseis,

$$\frac{@q_x}{@x} + \frac{@q_y}{@y} + \frac{@q_z}{@z} = 0$$

verbindt de Darcy-betrekkingen tot de volgende differentiaalvergelijking:

$$\frac{k_x}{mu}\frac{@^2P}{@x^2} + \frac{k_y}{mu}\frac{@^2P}{@y^2} + \frac{k_z}{mu}\frac{@^2P}{@z^2} + \frac{k_z}{mu}\frac{@(rho_g)}{@z} = 0$$

In bovenstaande formules is "@" gebruikt als teken voor het partieel differentieren}

Deze gaat in isotrope grond over in de betrekking van Knudsen (De Josselin de Jong, 1979):

nabla²_P + {@(rho g)/ @z} = 0

Onze algemenere differentiaalvergelijking kan tot die van Knudsen worden teruggebracht door de volgende simpele transformaties:

$x' = sqrt(k/k_x)\ x$
$y' = sqrt(k/k_y)\ y$
$z' = sqrt(k/k_z)\ z$
$(rho\ g)' = sqrt(k_z/k)\ (rho\ g)$

Hierin is:

x', y', z'	=carthesische coordinaten in het getransformeerde medium [L]
(rho g)' [F/L³]	=de getransformeerde (rho g)
k_x, k_y, k_z	=de doorlatendheden in de diverse richtingen in het oorspronkelijke, anisotrope medium [L²]
sqrt()	=vierkantswortel

Hierbij is het nog niet nodig om k te specificeren. k volgt pas uit een extra eis, waarvoor de praktische wordt gekozen die vereist dat het debiet door een willekeurig vlakje in het oorspronkelijke, anisotrope medium gelijk is aan het debiet door het getransformeerde vlakje in het nieuwe, isotrope medium. Aan deze eis wordt voldaan wanneer:

$$k = (k_x\ k_y\ k_z)^{1/3}$$

Elke andere keuze van k noodzaakt meeschaling van volumestromen en/of de tijd- en drukschaal, wat tot onnodige complicaties leidt. Een en ander is nader toegelicht door Olsthoorn (1982).

Hieronder volgt het bewijs dat het debiet door een vlakje door de transformatie niet verandert. Het bewijs is beperkt tot q_x, doch kan eenvoudig worden geleverd voor qSly en q_z (Bij q_z moet tevens de het specifieke gewicht moet worden meegeschaald volgens de hiervoor gegeven betrekkingen).

$$q_x = -\frac{k_x}{mu}\frac{@P}{@x}\ dy\ dz$$

$$(q_x)' = -\frac{k}{mu}\frac{@P'}{@x'}\ dy'\ dz'$$

$$= -\frac{k}{mu}\mathrm{sqrt}\left(\frac{k_x}{k}\frac{k}{k_y}\frac{k}{k_z}\right)\frac{@P'}{@x}\ dy\ dz$$

$$= -\frac{k_x}{mu}\frac{@P'}{@x}\ dy\ dz$$

Dus $q_x = (q_x)'$ omdat $P'=P$ welke als zodanig is opgelegd.

Hellstroem en anderen (1979) schalen de verticale doorlatendheid terug naar de horizontale. Dit heeft onpraktische meeschaling van de volumestromen tot gevolg. Het gebruik van de voorgaande methode heeft dit nadeel niet. Men kan dus zonder meer verschalen, rekenen en terugschalen. Het resultaat is dan goed. Deze techniek is in het programma toegepast: zodra alle invoer ingelezen is worden alle coordinaten inclusief pakketdikte en dichtheid verschaald en wordt vervolgens alleen met de zo verkregen getallen gerekend. Uitsluitend voor de uitvoer wordt terugverschaald. De gebruiker van het programma merkt dus niet dat met verschaalde getallen wordt gewerkt.

Ondanks het bovenstaande is het illustratief de rotatiesnelheid van het grensvlak in een anisotroop medium expliciet te maken:

De snelheid van het grensvlak aan de boven- en onderzijde van het pakket bedraagt in het geval van een isotroop medium, dat wil zeggen, in het geval van het reeds verschaalde medium:

$$v_o=(8G/pi^2)\ (delta_rho/rho)\ (k/por)\ f(\ tan(alfa)\ )$$

De enig noodzakelijke bewerking is derhalve deze formule terug te schalen naar het oorspronkelijke, anisotrope medium. Dit kan direkt met de gegeven transformatieformules worden gedaan:

Zij v_{ox} de component van v_o in de x-richting, dan geldt:

$$v_{ox} \text{ sqrt}(k/k_x) = (8G/pi^2) * (\text{delta_rho/rho}) \text{ sqrt}(k_z/k) \text{ (rho gk/por) } f(2x/H)$$

Na uitwerking wordt dit:

$$v_{ox} = (8G/pi^2) \text{ (delta_rho/rho) sqrt}(k_x k_z) * \text{(rho g/por) } f(\text{sqrt}(k_z/k_x) \tan(\text{alfa}))$$

Op dezelfde wijze kan de rotatiesnelheid evenwijdig aan de y-as worden afgeleid:

$$v_{oy} = (8G/pi^2) \text{ (delta_rho/rho) sqrt}(k_y k_z) * \text{(pg/por) } f(\text{sqrt}(k_z/k_y) \tan(\text{alfa}))$$

Uit deze formules blijkt, dat een grensvlak loodrecht op het xz-vlak tweedimensionaal reageert, alsof de y-as er niet was. Analoog is de situatie voor een grensvlak loodrecht op het yz-vlak. Deze oplossingen zijn in volledige overeenstemming met het fysisch inzicht. Ze zijn tevens gelijk aan de oplossing van Hellstroem en anderen (1979), die ze afleidden door direct van tweedimensionale stroming uit te gaan.

De anisotropie heeft blijkens deze formules een grote invloed op de rotatie van een grensvlak. Bij een vaak aangenomen verhouding tussen de vertikale en de horizontale doorlatendheid van 1:10, roteert het grensvlak ruim driemaal zo traag als in het geval waarin de vertikale doorlatendheid even groot is als de horizontale.

Blijkens het bovenstaande is een sterke vertikale anisotropie een voordeel bij ondergrondse opslag van regenwater, wanneer het oorspronkelijke grondwater een hogere dichtheid heeft (zouter is) dan het infiltratiewater. Dit is in het Westland vrijwel steeds het geval.

A3 Onvolkomenheid van de putten

De dichtheidsstroming als gevolg van het verschil in zoutgehalte tussen het geinfiltreerde regenwater en het oorspronkelijke grondwater maakt het noodzakelijk, om bij de terugwinning van onvolkomen putten gebruik te maken, wil men een enigzins redelijk rendement bereiken.

Gezien deze noodzaak is in het programma de mogeljkheid aangebracht om de putten onvolkomen te verklaren, waarbij hun positie naar keuze boven- of onderin het pakket kan zijn. Ter vermijding van teveel vrijheidsgraden worden de onvolkomen putten berekend als puntvormige bronnen die tegen de boven- of onderzijde van het pakket zijn geplaatst.

De watersnelheid ten gevolge van een dergelijke puntbron kan worden berekend via een reeksontwikkeling. Deze reeks ontstaat door een groot aantal spiegelingen van de puntbron, die er te zamen voor zorgen dat de stroming aan de randvoorwaarden voldoet, dat wil zeggen dat de stroming aan de onder- en de bovenzijde van het pakket horizontaal is.

De stroomsnelheid op een willekeurige plaats in het pakket ten gevolge van een puntbron aan boven of onderzijde wordt gegeven door:

$$v_o = 2\ Q/(\ 2\ pi\ por\ H^2\ );$$

$$rho = r\ /\ H;$$

$$arg_1 = \{\ 1/(rho^2 + (2n-1-z/H)^2)\}^{3/2}$$

$$arg_2 = \{\ 1/(rho^2 + (2n+z/H)^2)\}^{3/2}$$

$$v = v_o$$
$$*\ som\{(arg_1(rho,n,z/H)+(arg_2(rho,n,z/H)\}$$

waarbij n van 0 ... oneindig

Hierin is:

vo	=stroomsnelheid aan boven of onderzijde van het pakket [L/t]
Q	=volumestroom van de put [L^3/t]
pi	=3.1415965...
por	=porositeit [dimensieloos]
H	=pakketdikte [L]
rho	=dimensieloos gemaakte horizontale afstand tot de put [dimensieloos]
r	=horizontale afstand tot de put [L]
z	=verticale afstand gereken neerwaarts vanaf de bovenkant van het watervoerend pakket [L]

Met deze formule kan de snelheid op elke plaats worden uitgerekend. Ter besparing van de rekentijd is besloten alleen waterdeeltjes te beschouwen die zich bovenin het pakket bevinden en waterdeeltjes die zich onderin het pakket ophouden. De verticale snelheid is daar steeds nul en de machtreeks laat zich met een nauwkeurigheid van enkele procenten door eenvoudige formules benaderen.

Bij een puntbron aan een zijde wordt de snelheid van een waterdeeltje aan dezelfde zijde van het pakket benaderd door:

$$v = v_o * \{ 0,16 + 0,2/rho + 1,0/rho^2 \} /H$$

De snelheid van een waterdeeltje aan de andere zijde van het pakket wordt benaderd door de volgende vergelijkingen:

voor rho=<0,1:

$$v = v_o * 0,54 \ln(rho);$$

voor 0,1<=rho<0,77:

$$v = v_o \{ 0,795 - 0,432 \ln(rho) \} /H;$$

voor 0,77<=rho<2,5:

$$v = v_o \{ 1 + 0,351 \ln(rho) \} /H$$

6. SCHATTING VAN HET POTENTIEEL

Op grond van deze studie mag men ervan uitgaan, dat de ondergrondse opslag van regenwater, voor individuele tuindersbedrijven en combinaties van bedrijven, goede perspectieven biedt, op die plaatsen in het Westland en de zogenaamde B-driehoek, waar de grondwaterstroming gering is en het grondwater een zoutgehalte heeft dat niet meer bedraagt dan enkele honderden milligrammen per liter. Aan deze voorwaarden wordt in nagenoeg de gehele B-driehoek voldaan (althans volgens de geologische en grondwaterkwaliteitstgegevens die beschikbaar zijn. Deze geven een algemeen beeld; plaatselijk kunnen afwijkende situaties voorkomen). Ook in delen van het Westland wordt aan deze criteria voldaan (zie hoofdstuk 3).

Men mag verwachten dat de behoefte aan aansluitcapaciteit van drinkwater in deze gebieden op den duur zal worden beperkt tot in de orde van 25% van de maximum dagbehoefte van de aan te sluiten kassen. Individuele tuindersbedrijven kunnen deze behoefte nog verder terugschroeven met behulp van ontziltingsinstallaties. Voorwaarde voor een dergelijk grootschalig gebruik van ondergrondse opslag van regenwater, is vertrouwen in het systeem. Dit vertrouwen is slechts door succesvolle praktijktoepassing te verkrijgen. Het onderzoek met de nu lopende experimenten (die ongecoordineerd door toeleveringsbedrijven tezamen met belangstellende tuinders en boorfirma's worden uitgevoerd) zal nog enkele jaren vergen, terwijl succes ongewis is.

Hoewel er ook in het Westland gebieden kunnen worden aangewezen die gunstig zijn voor het toepassen van ondergrondse opslag van regenwater, is de situatie daar over het geheel genomen ongunstiger; de grondwaterstroming is er over het algemeen een stuk sneller en vooral in het zuidelijke deel is het grondwater relatief zout, tot zo'n 4000mg Cl^-/l komt voor. Het is op dit moment niet te zeggen in hoeverre individuele ondergrondse voorraadvorming onder zulke minder gunstige omstandigheden kans van slagen heeft. Schaalvergroting bijvoorbeeld kan in veel gevallen een gunstiger uitgangspositie verschaffen. Hetzelfde geldt wanneer men bereid is een wat lager rendement te aanvaarden. In weer andere gevallen kan gebruik worden gemaakt van dunne zandpakketten die zich op een aantal plaatsen binnen de ondiepe, Holocene formatie bevinden. Hoe groot de mogelijkheden onder de minder gunstige omstandigheden zijn, welke oplossingen denkbaar zijn en met welk resultaat, kan, apart van deze studie, theoretisch worden onderzocht door middel van berekeningen met geavanceerde computermodellen als het programma SWIP-2. Uiteindelijk echter, zullen het de ervaringen in de praktijk zijn die over de toekomst van dergelijke systemen beslissen. Immers, hoe goed het theoretisch onderzoek ook moge zijn, onvoorziene praktijkproblemen zullen er nog genoeg overwonnen moeten worden.

Wat betreft de kosten van een ondergrondse opslag van regenwater is slechts een grove schatting mogelijk. Een

installatie vor een bedrijf met 1ha glasoppervlakte "produceert" per jaar ongeveer 5000m3 regenwater. De investering voor een installatie voor een bedrijf van 1 ha glas kan worden geraamd op ca. fl.35'000,-. Bij een afschrijving over 10 jaar en onderhoudskosten per jaar van resp. 1500,-, 2500,- en 3500,- komt een dergelijke opslag op fl.1,15,-, fl.1,25 resp fl.1,55 per kubieke meter water (reele kostprijs gerekend over de gehele periode, bij 4% reele rente per jaar; =unuiteit). Deze prijs is concurrerend met die van drinkwater, terwijl de kwaliteit beter is. De prijs is zeker concurrerend met die van omgekeerde osmose-installaties die voor ontzilting worden gebruikt.

7 LITERATUUR

Anoniem;
Nieuwe methode tuinbouw: gietwater ondergronds.
Westlandse Courant, do. 19 mei 1983; frontpagina.

Anoniem;
Onzekerheid bij regenwateropslag.
Vakblad voor bloemisterij 19(1983) p57.

Anoniem;
Vragen bij ondergrondse opslag.
Tuinderij 63(1983)15 9 juni.

Boswinkel, J.A.
Geohydrologisch onderzoek duingebied Zuid-Holland.
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft, 1980.

Esch, H.V.
Waterberging in ondergrondse zandlaag.
Groente en Fruit, 22 april 1983, p30-31.

Hellstroem, G.; C.F. Tsang; J. Claesson;
Heat storage in aquifers. Buoyancy flow and thermal stratification problems.
Lund Inst. of Technology; Dept. of Mathematical Physics; Sweden, 1979, 70pp.

De Josselin de Jong, G.
Vortex theory of multiple fluid in three dimensions.
Delft Progress Report No. 4, 1979, p87-102.

De Josselin de Jong, G.
Aantekeningen cursus dichtheidsstroming, gegeven op het RID, 1982.

Leijnse, A. en R. Lieste,
Handleiding voor het gebruik van het computerprogramma Intera (SWIP-2).
Rijksinst. voor Drinkw. Voorz., Leidschendam, 1983.

Obdam, A.
Compilatie van tabellen en grafiken voor geohydrologen betreffende enkele fysische constanten van water.
Rijksinsinstituut voor Drinkwatervoorzienig, Leidschendam 1983.

Olsthoorn, T.N.
Anisotropie, een verwaarloosd verschijnsel bij grondwatervraagstukken
H2O, 15(1982)11, p262-267.

Olsthoorn, T.N.
Verstopping van persputten.
KIWA-mededeling No. 71, Basisrapport, 450pp, KIWA, Rijswijk, 1982.
KIWA-mededeling No. 72, Hoofdlijnen, 145pp, KIWA, Rijswijk, 1982.

Staalduinen, C.J. van
Toelichting op de geologische kaart van Nederland 1:50'000; blad Rotterdam West (37W).
Rijks Geologische Dienst (RGD), Haarlem, 1979.

Tangena, B.H. en Ph. Hamaker;
De toekomstige behoefte aan suppletiewater van de glastuinbouw in Zuid-Holland. (Rapport in het kader van het Integraal Onderz. Drinkw.voorz. Zuid-Holland).
RID WV82-3/TH 83-06, Leidschedam, 1983, 50pp.

Uffink, G.J.M.
De afvlakking van temperatuurvariaties in het grondwater door warmteuitwisseling tussen het watervoerende pakket en de boven- en ondergelegen pakketten.
RID-mededeling 81-4, Rijksinst. voor Drinkw. Voorz., Leidschendam, 1981, 41pp.

Wenden, M. v.d.;
Zoutgehalte, het grote probleem; gietwater opslaan in zandlaag onder westland.
Westlandsche Courant; bijlage Stad en Streek, p3, di 31 mei 1983.

Werkgroep Watervoorziening Tuinbouw Westland;
De watervoorziening voor de tuinbouw in het Westland.
Tuinbouwstructuurcommissie Zuid-Holland; Bachmanstraat 10a; 2596 JC 's Gravenhage, april 1983.

Wit, K.E. en anderen,
Hydrologie en waterkwaliteit van Midden West-Nederland.
Regionale Studies No.9;
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, 1976

APPENDICES

A.1 Verdiscontering van de dichtheidsstroming (zoet/zout)

Zout water is (bij dezelfde temperatuur) zwaarder dan zoet water. Wanneer het zoete water op het zoute rust, met een horizontaal grensvlak ertussen, is er niets aan de hand: De dichtheid varieert dan uitsluitend in verticale richting. Is het grensvlak niet horizontaal, zoals bij de infiltratie van regenwater in een pakket met brak of zout grondwater, dan is de situatie anders: De dichtheid varieert dan in horizontale richting en het water gaat hierdoor stromen. Bij deze zogenaamde dichtheidsstroming tracht het zoutere onder en het zoete boven te komen.

De adequate berekening van een dergelijke dichtheidsstroming is een gekompliceerde kwestie, en kunnen alleen met geavanceerde computermodellen goed worden uitgevoerd. Een voorbeeld van een dergelijk programma is het model SWIP-2 van de Amerikaanse firma "Intera" dat op het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening aanwezig is. Daar de berekeningen met een dergelijk programma voor deze orienterende studie te veel tijd en geld zouden vergen, is SWIP-2 slechts ingezet ter controle van een eenvoudiger analytische benadering en voor het zichtbaar maken van de dichtheidsstroming rond onvolkomen putten in een radiaal-symmetrische situatie. De meeste berekeningen zijn echter met een speciaal ontworpen programma uitgevoerd, waarin de zoet/zout-stroming sterk is geschematiseerd. De vele computerfiguren in dit rapport die de verbreiding van de bel infiltratiewater aangeven zijn met dit programma gemaakt. De benadering die in dit aparte programma is toegepast wordt nu toegeisht. die is toegepast en nu wordt toegelicht.

Door Hellstroem en anderen (1979) wordt een praktische, analytische benadering gegeven van de beweging van het grensvlak tussen watersoorten met verschillende dichtheid en viscositeit. Hun benadering is hier gekozen omdat het betreffende rapport een mathematisch en fysisch elegante en uiterst verantwoorde onderbouwing levert.

Hellstroem en anderen (1979) schrijven vooral met het oog op de problematiek van de opslag van warm water in de ondergrond en niet zo zeer met het oog op zoet en zout water. In hun verhaal speelt de viscositeit derhalve een belangrijke rol. In onze situatie mogen viscositeitsverschillen buiten beschouwing worden gelaten, omdat we er in dit rapport van uitgaan dat de temperatuur van het infiltratiewater en het oorspronkelijke grondwater gemiddeld aan elkaar gelijk zijn of dat door geleiding zullen worden (Dit is overigens een punt dat nadere studie behoeft.). Viscositeitsverschillen ten gevolge van verschillen in zoutconcentraties worden pas belangrijk bij veel hogere zoutconcentraties dan waar we hier mee te maken hebben (Dode Zeewater bijvoorbeeld).

Deze constatering, namelijk dat in ons geval de viscositeit buiten beschouwing mag blijven, vereenvoudigt de problematiek aanzienlijk. De belangrijkste konsekwentie is, dat hierdoor de beweging van het grensvlak onafhankelijk wordt van de andere, horizontale stromingen in het pakket (dus van de natuurlijke en de infiltratie- en onttrekkingsstroming). Het grensvlak gaat als het ware zijn eigen gang, iets dat niet het geval is wanneer de viscositeiten verschillen.

Hellstroem en anderen (1979) geven voor zes verschillende situaties de analytische oplossing voor de snelheidsverdeling over een vertikaal grensvlak (zie figuur A1.1*) en de "inzet"* ("inzet"=figuur A1.2) waarin deze situaties en de bijbehorende analytische formules zijn weergegeven. De belangrijkste situaties zijn de "oneindige strip", en de "cilinder", alsmede de "oneindige strip met een grenszone waarin de dichtheid lineair verloopt van die in de ene vloeistof tot die in de andere vloeistof".

Wat opvalt bij de door Hellstroem en anderen (1979) berekende curven, is het geringe verschil tussen de diverse situaties (figuur A1.3). Ook blijkt uit deze figuur, dat er nauwelijks verschil is tussen de beweging van het grensvlak in de oneindige strip, geval A, en die van een cilindervormig grensvlak, geval B, wanneer de straal van deze cilinder minstens van de orde van de pakketdikte is. Deze constatering was aanleiding de door Hellstroem en anderen (1979) nader uitgewerkte rotatie van het grensvlak in de oneindige strip ook te hanteren voor het grensvlak rond een put. Uiteraard is de toepasbaarheid dan wel aan grenzen gebonden.

Hellstroem en anderen (1979) geven een diepgaande analyse voor de situatie van de oneindige strip voor andere tijden dan t=0. Het grensvlak wordt hierbij benaderd door een plat vlak dat roteert en met de grondwaterstroming wordt meegevoerd (figuur A1.4). Het grensvlak is mathematisch gedefinieerd als het platte vlak, waarvan de waterverplaatsing dezelfde is, als die van het werkelijke, niet geheel vlakke grensvlak:

Voor de oneindige strip met scherp grensvlak geldt:

$$w = (32G/pi^2) * q_o/(por * H) * f(tan(alfa));$$

Hierin is:

w =rotatiesnelheid [radiale/t]
G =Catalaanse coeff. : 9,15...;pi =3.1415965...
^ =machtverheffing
* =vermenigvuldiging
q_o wordt hierna gedefinieerd.
por =porositeit [dimensiloos]
H =pakketdikte [L]

* Figuren en "inzet" zijn achteraan de paragraaf geplaatst

alfa =hoek tussen het grensvlak en de verticaal.

f(tan(alfa)) is een nog nader te bepalen funktie die de rotatiesnelheid aangeeft bij een niet-vertikale stand van het grensvlak. Twee waarden van deze funktie zijn reeds bij voorbaat bekend:

f(0)=1; en f(pi/4)=0, voor respectievelijk de verticale en de horizontale stand van het grensvlak.

q_o is een eigenschap van grond en het water en is konstant in een gegeven situatie.

$q_o=k_1 g\ (rho_o-rho_1)/(mu_o-mu_1)$

Hierin is:

k_1 =intrinsieke doorlatendheid van de grond, een grondeigenschap die onafhankelijk is van de viscositeit van het water en dus van de temperatuur en het zougehalte [L^2]

g =sterkte van het zwaartekrachtsveld [F/M]

rho_o =dichtheid van het zoete water [M/L^3]

rho_1 =dichtheid van het zoute water [M/L^3]

mu_o =viscositeit van het zoete water [Ft/L^2]

mu_1 =viscositeit van het zoute water [Ft/L^2]

Zonder viscositeitsverschillen bedraagt q_o:

$q_o=(1/2)\ (delta_rho/rho)\ (rho\ gk_1/mu)$

$q_o=(1/2)\ (delta_rho/rho)\ k$

Hierin is:

k =doorlatendheidscoefficient zoals die in de geohydrologie meestal wordt gebruikt. Deze k is een eigenschap van de grond en het water tezamen en hangt met k_1 als volgt samen:

$k= (rho\ g/\ mu) * k_1$

Uit bovenstaande formules volgt de rotatiesnelheid van het grensvlak op tijdstip t=0:

$w=(16G/pi^2)\ (delta_rho/rho)\ (k/por)\ /\ H$

Nu is de snelheid v_o van het vlakke grensvlak aan de boven, resp. de onderzijde van het pakket gelijk aan:

$v_o = w\ H/2$

zodat v_o onafhankelijk blijkt te zijn van de

pakketdikte en op eenvoudige wijze kan worden uitgedrukt:

$$v_o = (8G/pi^2)\ (delta_rho/rho)\ (k/por)\ /H$$

Om de snelheid v_o op andere tijden dan t=0 te berekenen dient de formule te worden vermenigvuldigd met de funktie f(tan(alfa)) die hiervoor reeds is aangestipt. Hellstroem en anderen (1979) geven een analyse van deze funktie en tonen aan dat zij, bij afwezigheid van vicositeitsverschillen en in een homogene, isotrope grond, alleen van tangens alfa afhangt. Vervolgens geven zij deze door hun numeriek berekende funktie (Zie onderstaande tabel).

alfa (graden)	*0*	*15*	*30*	*45*	*60*	*75*	*90*
tan(alfa)	*0*	*0,268*	*0,577*	*1,000*	*1,732*	*3,732*	*oo*
f(tan(alfa))	*1*	*0,937*	*0,864*	*0,765*	*0,593*	*0,329*	*0*

Tabel A1. Funktie f(tan(alfa)) ter berekening van de rotatiesnelheid wanneer het grensvlak niet vertikaal staat (overgenomen uit Hellstroem e.a., 1979)

Het blijkt nu dat de funktie nauwkeurig kan worden beschreven door de formule:

$$f(\ tan(alfa)\ ) = exp\{\ -0{,}302 * tan(alfa)\}$$

Met andere woorden in elk pakket met een gegeven doorlatendheid en dichtheidsverschil is de snelheid van het grensvlak langs boven- en onderzijde van het pakket gelijk, of het pakket nu 10cm dik is of 100m. Echter bij een pakket van 10cm dikte groeit de hoek van het grensvlak met de vertikaal zo snel, dat reeds na korte tijd de vaart eruit is. In het 100m dikke pakket blijft de snelheid gedurende lange tijd gehandhaafd, omdat, in een dergelijk dik pakket, tangens alfa slechts langzaam toeneemt. In het computerprogramma is dan ook gebruik gemaakt van de formule:

$$v_o=(8G/pi^2)\ (delta_rho/rho)\ (k/por)\ * e^{-0.3tan(alfa)}$$

- Controle van het resultaat

Het rapport van Hellstroem en anderen (1979) leverde dus eenvoudige, praktisch toepasbare betrekkingen op. We hebben getracht deze te controleren door middel van een onafhankelijke berekening met het programma SWIP-2. Bij deze berekening is een verticale strip grond gesimuleerd met een vertikaal zoet/zout-grensvlak erin dat vanaf t=0 aan zichzelf werd overgelaten.

De berekeningsresultaten kwamen in orde van grootte overeen met de bovenstaande formule, doch de rotatiesnelheid volgens SWIP-2 was ongeveer 50% kleiner. Dit nu is toe te schrijven

aan de numerieke dispersie die bij de SWIP-berekening optrad (zie figuur A1.5).

Numerieke dispersie veroorzaakt een vermenging tussen beide watersoorten welke uitsluitend het gevolg is van het rekenproces en de toegepaste verdeling van het watervoerende pakket in blokken. De numerieke dispersie was bij de SWIP-2-berekeningen echter zo sterk, dat de overgangszone reeds na een maand een dikte had van de ordegrootte van die van het pakket (in dit geval 20m). Een geleidelijke overgang nu, zoals die door de numerieke dispersie ontstond, heeft tot gevolg dat de rotatiesnelheid volgens de SWIP-2-berekening kleiner is dan volgens de analytische formule in ons model, die geldt voor een scherp grensvlak.

In welke mate de rotatiesnelheid door deze grensvlakvervaging geringer is, kan worden berekend met de betrekking die Hellstroem en anderen (1979) geven voor het geval dat de dichtheid tussen beide watersoorten in de grenszone lineair verloopt. Bij een dikte D van deze grenszone gaat de snelheid v_o met toenemende D de volgende formule benaderen (zie ook de inzet met de analytische formules van Hellstroem en anderen, 1979).

$$v_o \cong (1/2)\ (\text{delta_rho}/\text{rho})\ (k/\text{por})\ (H/D)$$

Deze formule geldt, wanneer de dikte D van de overgangszone tussen het zoete en het zoute water minstens van de orde H (pakketdikte) is (zie figuur A1.3). Dit is bij de SWIP-2-berekeningen het geval. De snelheid van het grensvlak uit de berekening met SWIP-2 blijkt nu overeen te komen met deze formule. *(Bestrijden van de numerieke dispersie vergt verfijning van het toegepaste netwerk).*

De Josselin de Jong (1982) geeft een betrekking voor de situatie in een oneindig uitgestrekt vertikaal vlak waarin de dichtheid in een bepaalde richting lineair verloopt. De rotatie van het water ten gevolge van de dichtheidvariatie wordt gegeven door:

$$w = (1/2)\ (\text{delta_rho}/\text{rho})\ (\text{rho}\ gk/mu)/\text{por}\ \cos(\text{alfa})$$

Bij nadere inspectie van beide formules blijkt dat zij aan elkaar gelijk zijn, hetgeen op grond van de overeenkomstige uitgangspunten ook te verwachten is.

De coefficient bij het lineaire dichtheidsverloop bedraagt 0,5. Dit is beduidend kleiner dan die bij het scherpe grensvlak. Daar is de coefficient gelijk aan 8G/(pi^2) = 0,742. De laatste coefficient is aangehouden in het toegepaste computermodel, waarin de benadering van Hellstroem en anderen (1979) is toegepast. De rotatiesnelheid in dit model is derhalve te groot, wanneer een aanzienlijke dispersie optreedt. Anderzijds houdt het model geen rekening met de in de werkelijkheid optredende dispersie. De hoogte van de aangehouden coefficient (0,742) staat borg voor een aanmerkelijke, zo niet volledige compensatie van het ontbreken van dispersie in het

toegepaste model.