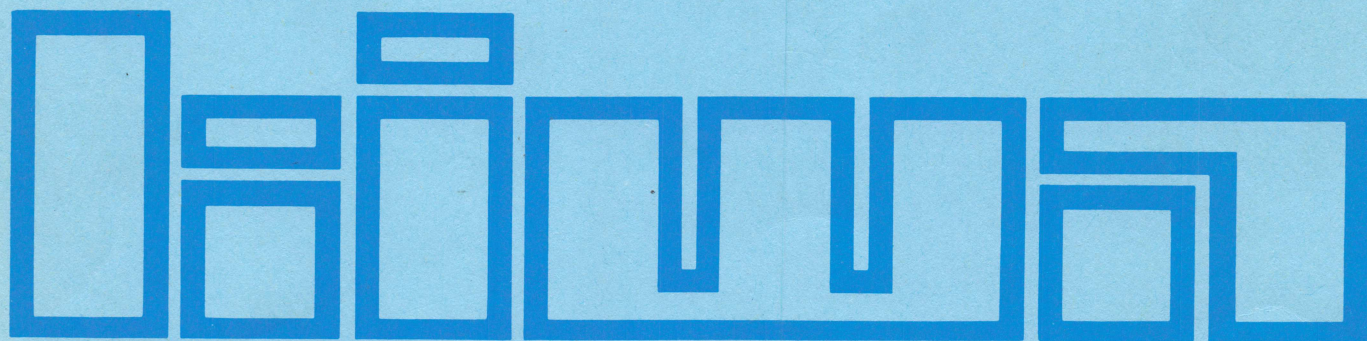


SWO-83.206

INVLOED VAN MECHANISCHE INGREPEN IN  
BESCHERMENDE GEOLOGISCHE LAGEN



keurings  
instituut  
voor  
waterleiding  
artikelen  
kiwa nv



Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen KIWA N.V.

**correspondentieadres**

Sir Winston Churchill-laan 273  
Postbus 70  
2280 AB Rijswijk  
Telefoon (070) 90 27 20  
Telex 32480  
Postrekening 52 92 95

**speurwerklaboratorium**

Groningenhaven 7  
Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein  
Telefoon (03402) 6 08 60



SWO-83.206

INVLOED VAN MECHANISCHE INGREPEN IN  
BESCHERMENDE GEOLOGISCHE LAGEN

Rapport samengesteld in opdracht van:  
Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne  
Afd. Onderzoek en Ontwikkeling DGMH  
VOLMIL/proj. M.247

ir. T.N. Olsthoorn  
Vakgroep Hydrologie  
KIWA N.V.  
februari 1983





| <u>INHOUD</u>                                                                      | <u>blz.</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| OPDRACHT                                                                           | 3           |
| SAMENVATTING                                                                       | 5           |
| 1 INLEIDING                                                                        | 7           |
| 2 MECHANISCHE INGREPEN                                                             | 9           |
| 2.1 Overzicht                                                                      | 9           |
| 2.2 Doorgravingen                                                                  | 10          |
| 2.3 Doorboringen                                                                   | 10          |
| 2.4 Doorheiingen                                                                   | 14          |
| 3 BEREKENING VAN DE ONDERGRONDSE REISTIJD                                          | 17          |
| 3.1 Uitgangspunten                                                                 | 17          |
| 3.2 Ondergrondse reistijd in de standaard situatie                                 | 21          |
| 3.3 Afwijkingen van de standaard situatie                                          | 30          |
| 3.3.1 Rechthoekige en andere, niet cirkelvormige doorsnijdingen                    | 30          |
| 3.3.2 Onvolkomen insnijdingen, transformatie naar een volkomen put                 | 31          |
| 3.3.3 Overige afwijkingen van de standaard situatie; "worst case analysis"         | 36          |
| 3.3.3.1 Overzicht                                                                  | 36          |
| 3.3.3.2 "Natuurlijke" stroming van het grondwater                                  | 37          |
| 3.3.3.3 Heterogeniteit van slecht doorlatende lagen                                | 40          |
| 3.3.3.4 Heterogeniteit en anisotropie van de watervoerende laag                    | 41          |
| 3.3.3.5 Stijghoogteverval over slecht doorlatende lagen in de natuurlijke situatie | 45          |



blz.

|         |                                                                                       |    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.3.6 | Stijghoogte ter plaatse van de doorsnijding                                           | 45 |
| 3.3.3.7 | De aanvoer van water naar de doorsnijding                                             | 46 |
| 3.3.3.8 | Verandering van het stroombeeld door andere oorzaken                                  | 47 |
| 3.3.3.9 | Gebruik van verkeerde bodemconstanten                                                 | 47 |
| 4       | SCHEIDENDE LAGEN, "MEMBRAAN OF GATEN-KAAS?"                                           | 49 |
| 4.1     | Inleiding                                                                             | 49 |
| 4.2     | Vergelijking van een geperforeerde laag met een homogene laag met constante weerstand | 51 |
| 4.3     | Onderscheidbaarheid van geperforeerde en homogene lagen met behulp van pompproeven    | 56 |
| 4.3.1   | Algemeen                                                                              | 56 |
| 4.3.2   | Uitgangspunten en het consolidatieproces                                              | 56 |
| 4.3.3   | Oplossing van de differentiaalvergelijking                                            | 59 |
| 4.3.4   | Schatting van de reactietijd van het systeem                                          | 63 |
| 4.3.5   | Conclusies                                                                            | 63 |
| 5       | CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN                                                           | 67 |
| 6       | LITERATUUR                                                                            | 71 |

BIJLAGEN

## OPDRACHT

Op verzoek van de Hoofdafdeling Bodembescherming van het (voormalige) Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, diende het KIWA op 6 december 1979 2 projectvoorstellen bij dit Ministerie in (Brief 44819/MdB/me).

De voorstellen waren getiteld:

- a. onderzoek naar de invloed van inhomogeniteiten op de verblijftijden van het grondwater;
- b. onderzoek naar de invloed van mechanische ingrepen in beschermende geologische lagen.

Onderzoek a. werd op 13 mei 1980 opgedragen en is inmiddels (oktober 1981) gereed.\* De onder b. genoemde opdracht werd op 2 oktober 1980 verleend (brief DGMM/AOO/BSG; M.247) en vervolgens door het KIWA aanvaard (zie brief 59926/MdB/rs).

Ten einde het KIWA-voorstel nader af te stemmen op de wensen van het Ministerie, vond op 5 maart 1981 een gesprek plaats tussen de heren ir. E.C. de Jongh, drs. W.J. Willems van het Ministerie en ir. T.N. Olsthoorn van het KIWA. Afgesproken werd het project b. in 3 stukken te verdelen:

1. verschaffen van een instrumentarium om snel het gevaar van doorsnijdingen van beschermende geologische lagen te voorspellen in termen van verblijftijdsveranderingen;
2. het omschrijven van een zogenaamde "Worst Case Analysis" voor het onder 1.) opgestelde geïdealiseerde systeem;

\* Jonge, ir. H.G. de: Onderzoek naar de invloed van inhomogeniteiten op de verblijftijden van het grondwater; KIWA, april 1981



3. aangegeven in hoeverre beschermende geologische lagen als homogeen, poreus membraan, dan wel als geperforeerde plaat ("gatenkaas") kunnen worden beschouwd.

Gezien de raakvlakken met het onderzoek dat het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening in opdracht van genoemd Ministerie uitvoert naar het macrodispersieve gedrag van de grondwaterstroming, zijn de projecten in elke fase besproken in een speciaal hiertoe opgerichte KIWA-RID-V.&M.-projectgroep.

In deze KIWA-RID-V.&M.-projectgroep nemen deel:

Ir. M.G.M. den Blanken (KIWA N.V.)

Ir. G.A. Bruggeman (RID)

Ir. E.C. de Jongh (V. & M.)

Ir. T.N. Olsthoorn (KIWA N.V.)

Ir. G.J.M. Uffink (RID)

Drs. J. Willems (V. & M.).

## SAMENVATTING

Zoals in een stapel boterhammen met plakjes worst ertussen worden in de Nederlandse ondergrond goed doorlatende lagen (zand en grind) afgewisseld met lagen die het grondwater niet of nauwelijks doorlaten (klei- en veenlagen). Het zijn de goed doorlatende lagen waar doorheen het grondwater over soms grote afstanden kan stromen en waaruit de industrie en de waterleidingbedrijven water winnen. Watervoevende pakketten, zoals zand-, grind- en andere goed doorlatende lagen, worden van nature tegen verontreiniging beschermd indien zij door slecht doorlatende lagen worden afgedekt.

Door natuurlijke of kunstmatige verstoringen en door onderbrekingen van zulke beschermende geologische lagen kan een groot deel van de beschermende werking verloren gaan. Dit probleem dient te worden bekeken tegen de achtergrond van het grote verontreinigingsgevaar dat van onze hoog geïndustrialiseerde maatschappij uitgaat.

Dit rapport bestudeert de kwantitatieve gevolgen van verstoringen van beschermende geologische lagen waarbij de aard en de hoeveelheid van de eventuele verontreinigende stoffen buiten beschouwing blijven. Het adequaat beschrijven van het gedrag van verontreinigingen in de ondergrond is een geheel andere kwestie, namelijk een die, naast de kennis van de betreffende stoffen, een orde meer aan kennis van de ondergrond nodig maakt dan waarover we normaliter beschikken.

Na een overzicht van soorten verstoringen van beschermende, geologische lagen en aanduiding van de herkomst van de gevaren, wordt een eenvoudige, ana-



lytische werkwijze afgeleid, waarmee snel schattingen kunnen worden gemaakt van veranderingen die vergravingen veroorzaken in de verblijftijden van het grondwater op zijn ondergrondse weg van de vergraving tot de onttrekking. De voorwaarden waaronder deze werkwijze mag worden toegepast worden gegeven.

Indien niet in voldoende mate aan deze voorwaarden wordt voldaan, kunnen verkeerde antwoorden en conclusies het gevolg zijn. De factoren die in onveilige richting tot fouten kunnen leiden worden gegeven en hun relatieve belang wordt aangeduid.

Tenslotte wordt aangetoond, dat het in het algemeen onmogelijk zal zijn, uit een pompproef af te leiden of een slecht doorlatende, beschermende geologische laag als aaneengesloten membraan, dan wel als geperforeerde plaat ("gatenkaas") moet worden beschouwd.

1

## INLEIDING

Onze grondwatervoorraden worden op veel plaatsen afgedekt door horizontale lagen die slecht en soms zelfs nagenoeg ondoorlatend zijn (fig. 1). Waar zulke lagen een aanzienlijke uitgestrektheid hebben (enkele kilometers of meer) is sprake van een beschermende, geologische laag die het

grondwater van nature tegen verontreiniging beschut. Doorboringen, vergravingen of andere doorsnijdingen creëren echter een directe weg tussen het aardoppervlak en het veelal kostbare grondwater in de afgedekte, watervoerende laag (fig. 2). Vanuit zo'n doorsnijding kan een verontreiniging relatief snel en over grotere afstanden met het grondwater worden meegevoerd en kan hierdoor veel sneller en intenser een bedreiging vormen voor winningen van de industrie en die van openbare en particuliere drinkwatervoorzieningen.

De ernst van een mechanische verstoring van een beschermende, dat wil zeggen slecht doorlatende, bodemlaag hangt enerzijds van de eventuele verontreinigingen af en anderzijds van het (geo)hydrologisch

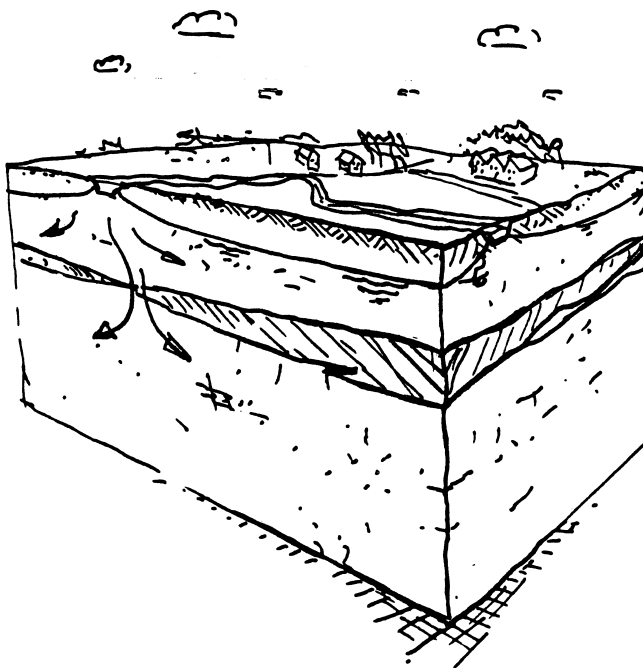


Fig. 1 - Watervoerende (gestippeld) en beschermende (gearceerd), geologische lagen

systeem, alsmede van de nabije aanwezigheid van kwetsbare objecten. Kwetsbare objecten zijn met name onttrekkingen voor of mede voor menselijke consumptie. Maar ook veedrenkputten en beregeningsinstallaties (oogst) kunnen door verontreinigd grondwater worden bedreigd. Natuurgebieden en oppervlaktewater (beken) kunnen in kwaliteit achteruit gaan, terwijl ondergrondse leidingen, funderingen en dergelijke door agressieve stoffen kunnen worden aangetast. Afgezien van deze voorbeelden is ook het watervoerend pakket zelf als een kwetsbaar object te beschouwen; kwetsbaar in de zin van ongeschikt worden voor toekomstig gebruik.

Deze studie is niet gericht op zulke kwetsbare objecten of de verontreinigingen als zodanig. Het rapport behandelt uitsluitend kwantitatieve gevolgen, namelijk de gevolgen die doorsnijdingen van beschermende, afdekkende lagen hebben voor de grondwatersnelheid. Deze doorsnijdingen kunnen namelijk in belangrijke mate bepalend zijn voor de tijd waarbinnen een verontreinigende stof, die door een verstoorde bovenlaag gemakkelijk in de watervoerende laag kan binnendringen, kwetsbare objecten zal kunnen bereiken.

De wijze waarop een verontreiniging zich ondergronds verbreidt, is sterk afhankelijk van een groot aantal plaatsgebonden factoren (zie par. 3.3.3). Deze factoren zullen in een concrete situatie altijd nader bekeken moeten worden. Voor een snelle, eerste indruk van de ernst van een verstoring van een beschermende laag, zal een eenvoudiger analyse een belangrijk hulpmiddel zijn. Zo'n analyse wordt in hoofdstuk 3 behandeld.



## 2 MECHANISCHE INGREPEN

### 2.1 Overzicht

Mechanische ingrepen in een beschermende, geologische laag (fig. 1) verstoren de natuurlijke samenhang van deze laag en de natuurlijke scheiding tussen grondwatervoerende lagen. Gemeenschappelijk is hierbij, dat zulke ingrepen de ontvankelijkheid van watervoerende lagen vergroot voor verontreinigingen. Gaat de ingreep samen met infiltratie van water, dan zullen naar binnen gedrongen verontreinigingen zich bovendien relatief snel in de ondergrond kunnen verbreiden. Het zal duidelijk zijn, dat sanering dan sterk bemoeilijkt zal worden, zo niet geheel onmogelijk zal blijken te zijn.

Mechanische ingrepen in beschermende geologische lagen kunnen worden verdeeld in (fig. 2).

1. Doorgravingen. (Het resultaat van graaf- en baggerwerkzaamheden van allerlei aard, zoals ten behoeve van havens en kanalen, tunnels en kelders, de zand- en leemwinning, alsmede bewuste verwijdering van slecht doorlatende toplagen met als doel de infiltratie te bevorderen.)
2. Doorboringen. (Doorboringen van allerlei aard, zoals het maken van waterwinputten voor de drink- en industriewatervoorziening, voor noodwatervoorziening, brandwaterputten en bemalingsputten, waarnemingsputten, olie- en gaswinputten, injectieputten, putten die speciaal zijn bedoeld voor de diepe infiltratie van vloeibaar afval en, tenslotte, alsmede exploratie- en verkenningsboringen van allerlei aard.)
3. Doorheiling. (Vooraf en misschien uitsluitend door heipalen met verbrede voet.)

## 2.2

### Doorgravingen

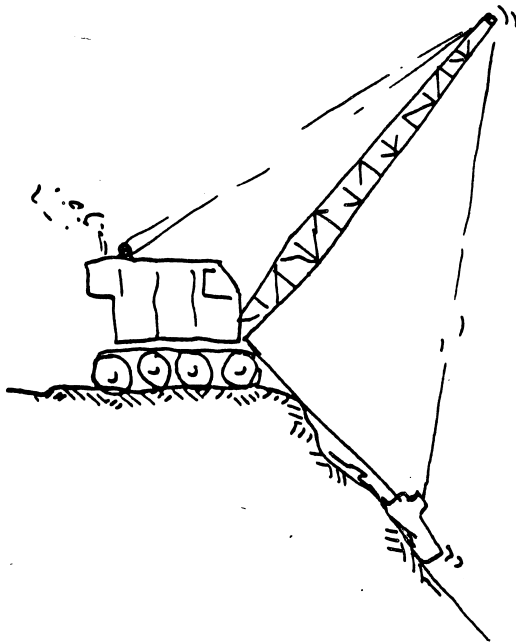


Fig. 2a. Doorgraven

Bij doorgravingen gaat het doorgaans om grote, civiel-technische werken. De verstoring of de verwijdering geschiedt daarbij over een aanzienlijk tot groot oppervlak. Daar tijdens de werkzaamheden als regel bemaling plaatsvindt (ook bij de natte zandwinning vindt netto een ont-trekking plaats), zal verontreiniging van watervoerende bodemla-

gen in deze fase niet of nauwelijks optreden. Het optreden van daadwerkelijke verontreiniging is vooral afhankelijk van het gebeuren achteraf. Zo is het van groot belang of de verstoorde laag al dan niet wordt hersteld en met welk materiaal het gegraven gat weer wordt aangevuld. Juist op dit punt is zorgvuldigheid van belang.

## 2.3

### Doorboringen

Bij doorboringen gaat het vooral om lekkages van allerlei aard, waarbij het spectaculaire boren naar olie en gas wellicht het meest op de voorgrond treedt. Zo zijn er "blow-out"-risico's bij het exploratieboren naar olie en gas (ongeluk in Drenthe, waarbij een hele boorinstallatie onder de grond verdween tot 140 m diep) en de risico's tijdens de produktie (ongeluk in Schoonebeek, waar een injec-

tieput enkele dagen lang "modder" spoot en Schoonebeek met omgeving daarmee bedekte; de chemische eigenschappen van materialen uit een olie- of gashoudend pakket kunnen bijzonder milieu-onvriendelijk zijn en na zo'n ongeluk over een groot oppervlak in het grondwater terecht komen). Verder spelen er minder in het oog springende risico's een rol, die juist door hun onopvallendheid langdurig werkzaam en gevaarlijk kunnen zijn. Zulke risico's zijn ondergrondse lekkage van de stijgbuis ("casing") van olie- en gasputten en van injectieputten, inclusief die voor de ondergrondse lozing van afvalstoffen. In zekere zin hiermee samenhangend zijn oude, verlaten mogelijk ook illegale putten die niet of

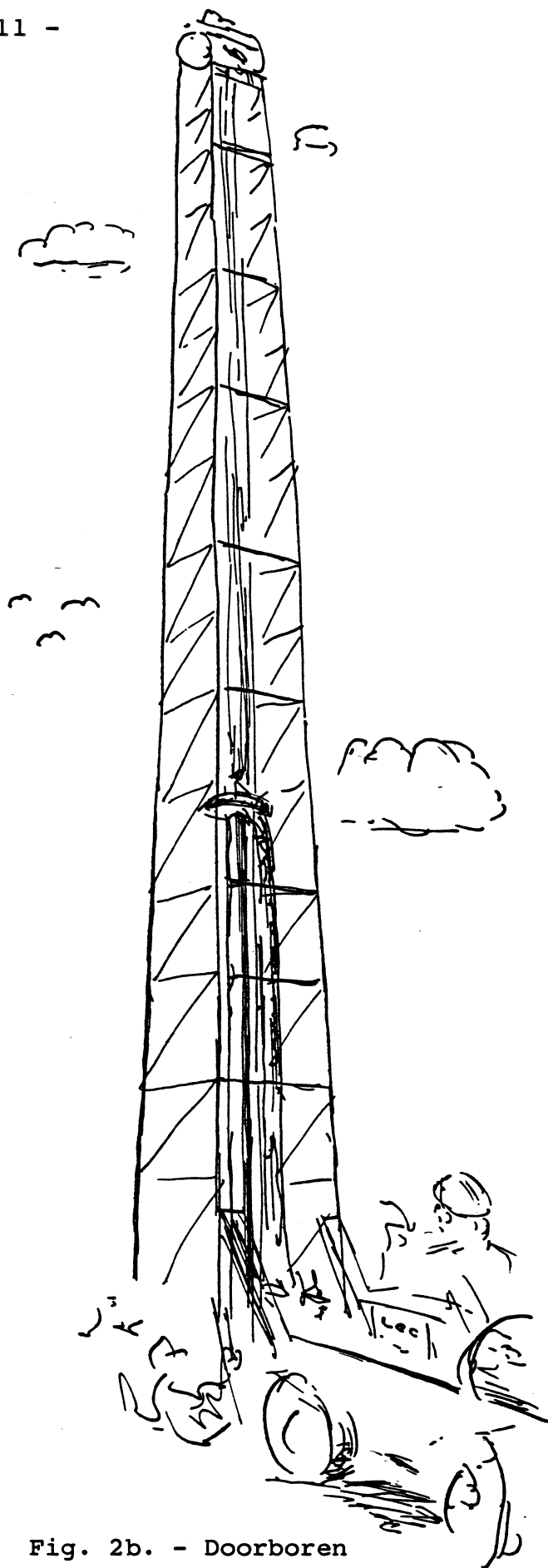


Fig. 2b. - Doorboren

onvoldoende zijn afgedicht (bijvoorbeeld volgestort met puin). Via zulke putten kunnen verontreinigingen, bewust of onbewust, in het watervoerende pakket onder een beschermende laag terecht komen. Bij doelbewuste infiltratie van verontreinigingen (denk aan "deep well waste disposal") zijn er nauwelijks grenzen aan de aard en de hoeveelheid maar ook onbewust kunnen grote hoeveelheden water (maar dan waarschijnlijk minder verontreinigd) via zulke putten infiltreren. Dit zal het geval zijn, wanneer de stijghoogte in het diepe pakket, bijvoorbeeld door onttrekking, sterk verlaagd is. Dit is zeker het geval, wanneer de al dan niet oude putten filters hebben ter weerszijden van de slecht doorlatende, beschermende laag en op deze wijze de pakketten kortsluiten.

Een bijzonder aspect is de zwavelzuurvorming, die in sommige watervoerende lagen optreedt bij contact met zuurstof. Het zuur ontstaat door oxydatie van natuurlijke sulfiden als pyriet,  $\text{FeS}_2$ , in het drooggevallede deel van het pakket (fig. 3). Het zuur wordt in het grondwater opgenomen, zodra het drooggevallede pakketgedeelte weer nat wordt. Dit verschijnsel wordt in de hand

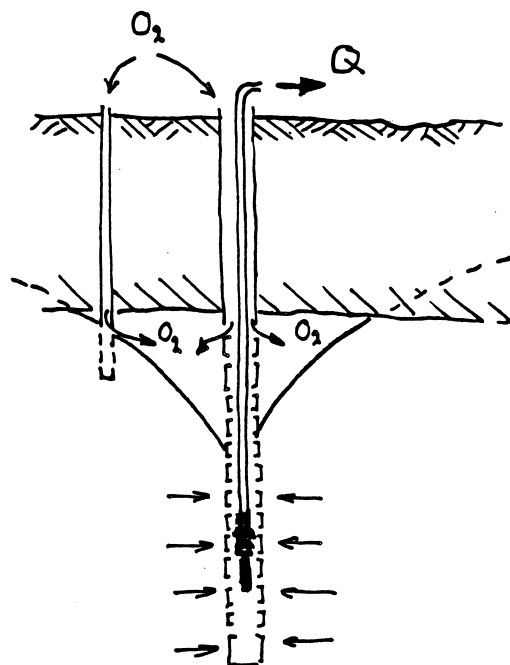


Fig. 3 - Zuurstoftoetreding geeft soms pyriet-oxidatie bij droogtrekken van tevoren geheel verzadigde pakketten.



gewerkt door een te grote onttrekking uit het onderliggende pakket, ten gevolge waarvan daarin onderdrukken ontstaan. Via peilputten en andere putten kan dan atmosferische lucht in het pakket stromen. Deze verschijnselen treden op onder Londen en te Enschede. Behalve een zeer lage pH (circa 2) zijn kenmerkend een sterke stijging van de ijzerconcentratie (van enkele tot honderden milligrammen per liter) en de sulfaatconcentratie (van enkele tot soms duizenden milligrammen per liter). Deze concentraties maken het water totaal onbruikbaar als bron voor industrie- en drinkwatervoorziening.

Tenslotte speelt mogelijke lekkage buiten langs de putstijgbuis "casing" een rol, wanneer het boorgat ter hoogte van beschermende (klei)lagen slecht is afgedicht (fig. 4). De hoeveelheid water die zo in het diepe pakket kan dringen, zal in de regel nagenoeg verwaarloosbaar zijn en speelt geen rol, indien de omgeving van de putten adequaat te-

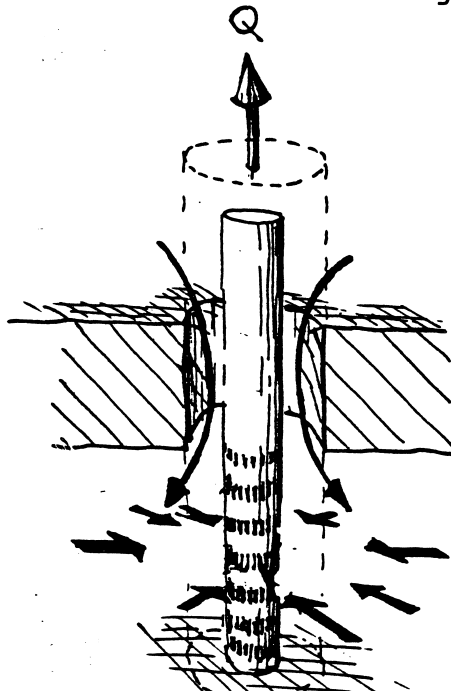


Fig. 4 - Lekkage door slecht afgedichte kleilaag

gen verontreiniging wordt beschermd. Een rekenvoorbeeld moge dit illustreren: de hoeveelheid water,  $Q_v$ , die langs de stijgbuis naar beneden zijgt, kan onder condities van semi-spanningswater als volgt worden geschat:

$$Q_v < \frac{\pi(r_o^2 - r_s^2)k_v}{D_v} \cdot \frac{Q}{2\pi kD} \ln \left( \frac{1.123\lambda}{r_o} \right)$$

Waarin:

$r_o$  = boorgatradius (L)

$r_s$  = stijgbuisradius (L)

$k_v$  = verticale doorlatendheid in het aangevulde boorgat buiten de stijgbuis (L/T)

$D_v$  = dikte van de slecht doorlatende, beschermende laag (L)

$k$  = horizontale doorlatendheid van het onderliggende, watervoerende pakket (L/T)

$D$  = dikte van dit pakket (L)

$\lambda$  =  $\sqrt{(kDc)}$  met  $c$  de weerstand van de slecht doorlatende laag (T)

$Q$  = onttrekking uit het onderliggende, watervoerende pakket ( $L^3/T$ ).

Met als min of meer representatieve waarden:

$r_o = 0,3$  m,  $r_s = 0,15$  m,  $D_v = 10$  m,  $D = 60$  m,  $1,123\lambda = 1000$  m en een hoge schatting van  $k_v$  door  $k_v = k$ , te stellen, volgt:

$$Q_v/Q < 6 \cdot 10^{-5} = 0,00006$$

zodat  $Q_v$  slechts een zeer klein deel van  $Q$  uitmaakt.

## 2.4

### Doorheiingen

Doorheiingen zullen nauwelijks gevaar opleveren, wanneer het palen betreft die van onder naar boven dikker worden (houten palen) of van constante dikte zijn. Alleen palen met verdikte voet kunnen een verbinding veroorzaken tussen de boven- en de onderzijde van een slecht doorlatende, beschermende laag. Het effect van zo'n verbinding kan op de-

zelfde wijze worden  
geschat als hiervoor  
werd gedaan voor lek-  
kage langs de stijg-  
buis van een put en  
stelt derhalve in  
kwantitatief opzicht  
nauwelijks iets voor.

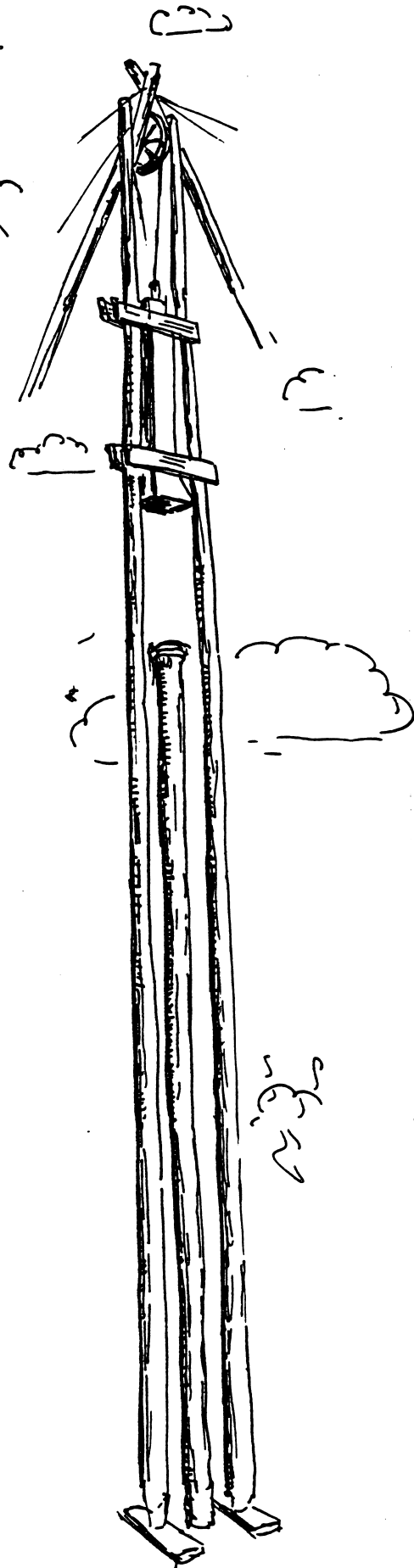


Fig. 2c. - Doorheien



3

BEREKENING VAN DE ONDERGRONDSE REISTIJD

3.1

Uitgangspunten

In dit hoofdstuk wordt de berekening van de reistijd behandeld van het ondergronds stromende water vanaf een doorsnijding tot aan een onttrekkingspunt. De reistijd geldt onder de hierna aan te geven omstandigheden voor een verontreinigende stof die, zonder wisselwerking met de bodem, ondergronds met het water wordt meegevoerd. De berekeningen vinden plaats aan de hand van een vereenvoudigde, geohydrologische standaardsituatie die kenmerkend is voor de onderhavige problematiek. Afwijkingen van deze standaardsituatie, die in de praktijk steeds voor zullen komen, worden in de volgende paragrafen nader behandeld.

De standaardsituatie (zie fig. 5) betreft een ho-

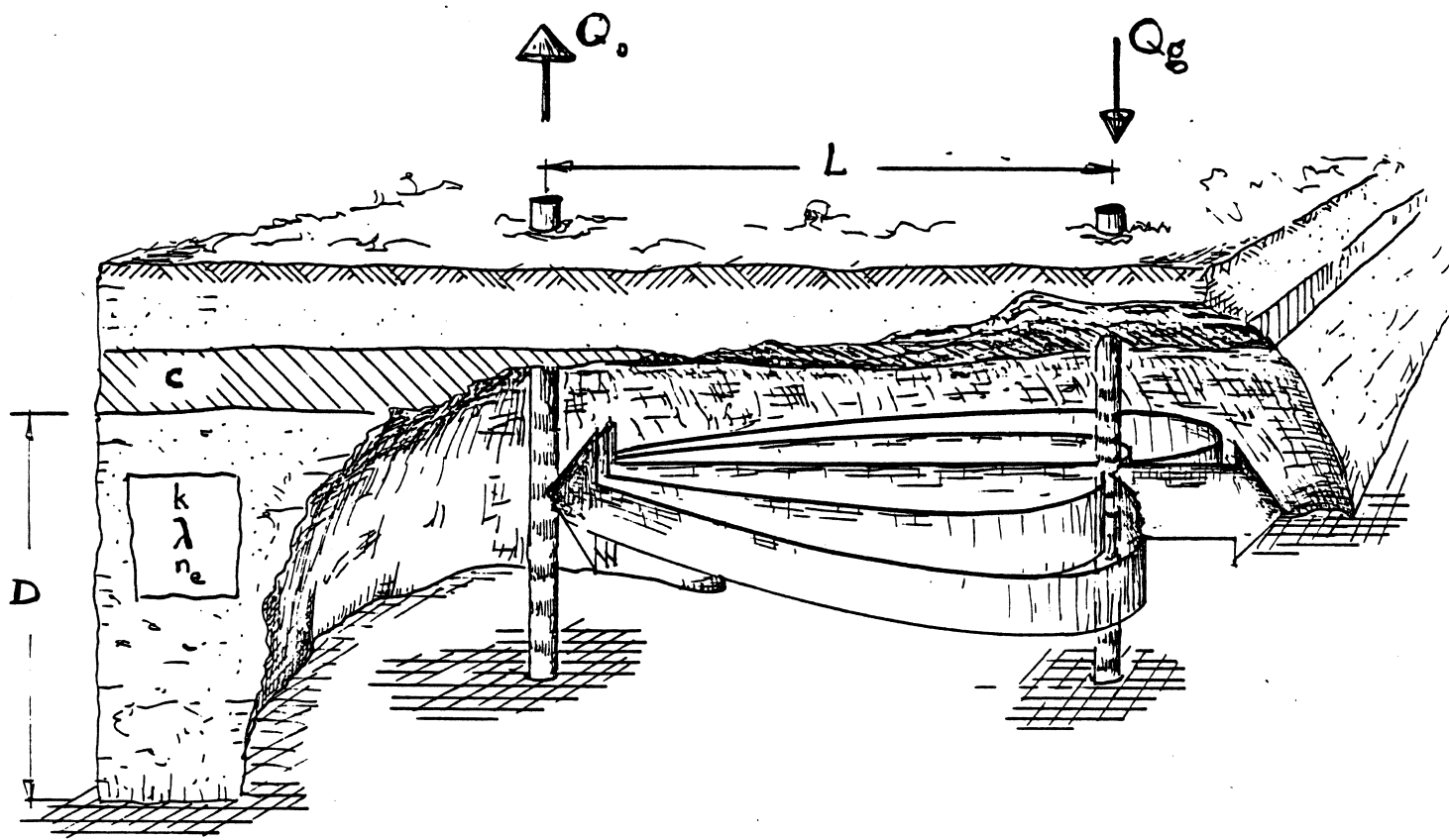


Fig. 5 - De standaardsituatie



mogene, isotrope, oneindig ver uitgestrekte, horizontale, watervoerende laag, die aan de onderzijde is afgesloten en aan de bovenzijde is afgedekt door een slecht doorlatende (beschermende) laag met overal dezelfde weerstand,  $c$ , tegen verticale waterbeweging. In de watervoerende laag bevindt zich een volkomen penetrerende onttrekkingsput die een constante volumestroom,  $Q_0$ , onttrekt. Gezien de tijdsschaal waarop de stroming van de doorsnijding tot aan de onttrekking zich afspeelt (jaren) ten opzichte van die waarbinnen drukpulsen ondergronds uitdempen (dagen tot weken), mag met een stationaire ("steady state") berekening worden volstaan. De doorsnijding van de beschermende laag wordt geschematiseerd tot een volkomen penetrerende infiltratieput op afstand  $L$  van de onttrekking (fig. 3), waarvan de afmetingen in de volgende paragrafen worden bepaald. De stijghoogte (grondwaterstand) aan de bovenzijde van de afdekkende laag wordt op grote afstand gelijk verondersteld aan die in de watervoerende laag. Deze stijghoogte is bovendien overal op de waarde nul gefixeerd. Ter plaatse van de doorsnijding is tevens de stijghoogte in de watervoerende laag op nul gefixeerd. (Overeenkomstig de volgende paragrafen is deze laatste, enigszins kunstmatig aandoende eis eenvoudig met de praktijk in overeenstemming te brengen.) Tenslotte worden de natuurlijke grondwaterstroming, dichtheidsstromingen en dispersie in deze paragraaf buiten beschouwing gelaten (zie hiervoor paragraaf 3.3.3).

Voor de zojuist beschreven standaardsituatie wordt berekend, hoeveel tijd een waterdeeltje nodig heeft, om van verschillende punten van de omtrek

van de doorsnijding naar de onttrekkingsput te stromen (fig. 6). Dit resultaat wordt vergeleken met de oorspronkelijke situatie (zonder doorsnijding maar met onttrekking (fig. 7). De verhouding van de oude en de nieuwe reistijd in de watervoerende laag geeft een direct inzicht in de mogelijke gevolgen van een al dan niet geplande doorsnijding van een beschermende, geologische laag.

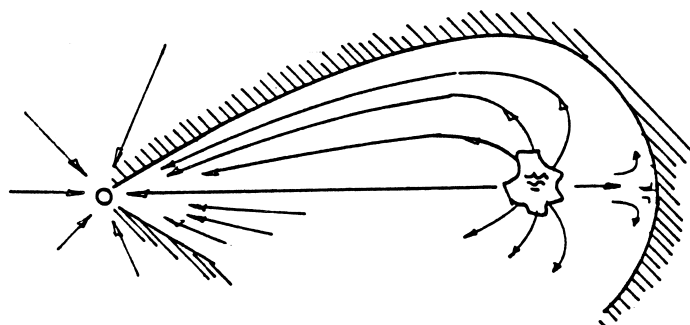


Fig. 6 - Stroomlijnen en reistijd tussen infiltratie- en onttrekkingsput

De getroffen vereenvoudigingen maken het mogelijk het aantal vrijheidsgraden van de berekeningsformules tot 3 te beperken, zijnde het maximum dat nog enigszins overzichtelijk in tabellen en grafieken worden weergegeven. (Elke veralgeme-

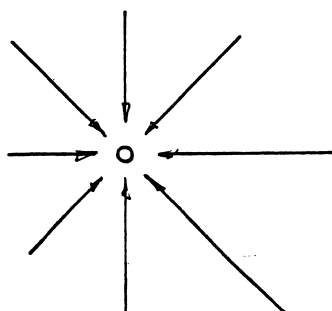


Fig. 7 - Als figuur 6, zonder infiltratie

nisering maakt het vraagstuk minder overzichtelijk door de daarbij optredende extra vrijheidsgraden; reeds de introductie van de natuurlijke stroming levert 2 vrijheidsgraden extra op.) De resterende

3 vrijheidsgraden zijn dimensieloze parametergroepen, die als resultaat een dimensieloze reistijd opleveren. Het dimensieloos maken is essentieel ter beperking van het aantal vrijheidsgraden, en heeft het voordeel dat de resultaten algemeen toepasbaar worden in situaties die in voldoende mate de kenmerken hebben van de standaardsituatie.

De gepresenteerde resultaten zijn direct toepasbaar voor elke situatie die bij benadering aan de standaardsituatie voldoet en kunnen zo voor allerlei praktijkgevallen een snelle indicatie verschaffen, op grond waarvan tot het nemen van maatregelen kan worden besloten. Voor een gedetailleerde studie van een praktijkgeval, zijn de verkregen resultaten echter niet bruikbaar, daar de diverse vereenvoudigingen dan niet verwaarloosd mogen worden. Er zullen dan aparte berekeningen moeten worden gemaakt, waarin de natuurlijke grondwaterstroming en dergelijke wel worden meegenomen. De hiertoe benodigde computerprogrammatuur is tegenwoordig op veel plaatsen in Nederland aanwezig (onder meer bij het RID en het KIWA) en zal geen problemen opleveren. De grootste moeilijkheden zijn in de praktijk te verwachten bij het verkrijgen van de benodigde gegevens. Het ontbreken van gegevens is er de oorzaak van, dat in de praktijk, veelal in eerste instantie, met een eenvoudige, snelle analyse, op de wijze zoals hier wordt behandeld, zal moeten worden volstaan. Voor het verkrijgen van een gedetailleerder beeld is plaatselijk, geohydrologisch onderzoek normaliter onontbeerlijk.

### 3.2 Ondergrondse reistijd in de standaardsituatie

In de aan de hiervoor beschreven standaardsituatie veroorzaakt de onttrekking een stijghoogteverandering volgens De Glee (zie bijvoorbeeld Huisman, 1972):

$$h = - \frac{Q_o}{2\pi kD} K_o \left( \frac{r}{\lambda} \right); \text{ met } \lambda^2 = kDc \quad (1)$$

Hierin is:

$h$  = de grondwaterstijghoogte ten opzichte van het oorspronkelijke stijghoogtevlak ( $L$ )

$Q_o$  = constante volumieke onttrekking ( $L^3/T$ )

$k$  = doorlatendheid van de watervoerende laag ( $L/T$ )

$D$  = dikte van de watervoerende laag ( $L$ )

$r$  = afstand tot het hart van de onttrekking ( $L$ )

$K_o$  = gemodificeerde Bessel-functie van de tweede soort en orde nul, (dimensieloos)

$c$  = weerstand van de afdekkende laag ( $T^{-1}$ )

De stijghoogte ten opzichte van het oorspronkelijke stijghoogtevlak,  $h$ , wordt ter plaatse van de insnijding, het gat, op de waarde nul gefixeerd. Hierdoor infiltreert door het gat een constante volumestroom,  $Q_g$ .  $Q_g$  volgt nu uit deze eis, onder gebruikmaking van (1):

$$Q_g = Q_o \frac{K_o \left( \frac{L}{\lambda} \right)}{K_o \left( \frac{r_{ge}}{\lambda} \right)} \quad (2)$$

Hierin is:

$Q_g$  = de infiltratiestroom door het gat ( $L^3/T$ )

$L$  = afstand van het hart van het gat tot de onttrekking ( $L$ )

$r_{ge}$  = radius (halve diameter) van de equivalente, volkomen infiltratieput waartoe het gat is geschematiseerd ( $L$ )

overige parameters als boven gedefinieerd.

De overgang van de afmetingen van het werkelijke gat naar deze equivalente infiltratieput wordt in hoofdstuk 3.3 behandeld.

Tabel 1 op bijlage 1 geeft de inzigging door het gat  $Q_g$ , voor een vaste onttrekking  $Q_o$ , van 1000 eenheden en verschillende waarden van de dimensieloze afstand,  $L/\lambda$ , en de dimensieloze "gatdiameter",  $2r_{ge}/\lambda$ . De waarden in de tabel zijn op te vatten als promillen van  $Q_o$ .

De snelheidsvector,  $\vec{v}$ , waarmee het grondwater door de watervoerende laag stroomt, de opdringsnelheid, wordt gegeven door:

$$\vec{v} = - \frac{k}{n_e} \left\{ \left( \frac{dh}{dx} \right); \left( \frac{dh}{dy} \right) \right\} \quad (3)$$

Indien alleen de onttrekking aanwezig is, is de snelheid steeds naar deze onttrekking gericht, zodat (3) reduceert tot de ééndimensionale betrekking:

$$v = - \frac{k}{n_e} \frac{dh}{dr} \quad (4)$$

met:

- $v$  = opdringsnelheid van het grondwater (L/T)
- $n_e$  = porositeit van de watervoerende laag (dimensieloos, fractie)
- $x, y$  = coördinaten van een carthesisch assenstelsel (L)
- $r$  = afstand tot het hart van de onttrekking (L)

Met betrekking (1) gaat (4) over in:

$$v = \frac{Q_o}{2\pi\lambda} \cdot \frac{1}{n_e D} \cdot K_1 \left( \frac{r}{\lambda} \right) \quad (5)$$

Waarin  $K_1$  de gemodificeerde Besselfunctie van de tweede soort en orde 1 (zie bijvoorbeeld Huisman, 1972).

Ofwel:

$$v = v_* K_1\left(\frac{r}{\lambda}\right) \quad (6)$$

met:

$$v_* = \frac{Q_0}{2\pi\lambda n_e D} \quad (7)$$

waarin  $v_*$  een karakteristieke grondwatersnelheid is (L/T), namelijk de snelheid die het grondwater op afstand  $\lambda$  van de onttrekking zou hebben, bij volkomen afgesloten grondwater (spanningswater).

Indien uitsluitend van onttrekking door put 1 sprake is, geldt voorts:

$$dt = \frac{dr}{v(r)} \quad (8)$$

zodat met (6):

$$dt = \frac{dr}{v_* K_1\left(\frac{r}{\lambda}\right)} \quad (9)$$

Dit kan met:

$$t_* = \frac{v_* t}{\lambda} \text{ en } r_* = r/\lambda \quad (10)$$

omgewerkt worden tot

$$dt_* = \frac{dr_*}{K_1(r_*)} \quad (11)$$



zodat, met  $L_* = L/\lambda$

$$t_* = \int_{L_*}^0 \frac{du}{K_1(u)} \quad (12)$$

waarin:

- $t$  = tijd (T)
- $t_*$  = dimensieloze tijd (-)
- $r_*$  = dimensieloze afstand tot onttrekking (-)
- $L_*$  = dimensieloze afstand van het startpunt tot de onttrekking (-)

De dimensieloze tijd,  $t_*$ , is volgens (12) dus van slechts één dimensieloze parameter afhankelijk, namelijk  $L_*$ . Deze dimensieloze tijd is weergegeven in tabel 2, op bijlage 1. Deze zogenaamde multitijden gelden dus voor de situatie zonder gat. Zie verder de tekst onder de tabellen 1 en 2 van bijlage 1 en het daar gegeven voorbeeld voor specificatie van de voorwaarden waaronder de tabellen gelden en voor praktisch gebruik ervan.

Indien op afstand  $L$  van de onttrekking een insnijding (volkomen infiltratieput) door de afdekkende laag wordt aangebracht wordt  $t_*$  tevens afhankelijk van de dimensieloze diameter van de tot infiltratieput geschematiseerde insnijding,  $2r_{ge*} = 2 r_{ge}/\lambda$  welke bepalend is voor de volumestroom,  $Q_g$ , die door de insnijding zal infiltreren (tabel 1, bijlage 1). Bovendien heerst er, als gevolg van de infiltratie, rond de insnijding een radiale, van het gat af gerichte stroming. "Oneindig veel" verschillende stroomlijnen verbinden nu het gat met de onttrekking, zodat de verblijftijd tevens afhankelijk is geworden van de keuze van de stroomlijn, respec-

tievelijk het vertrekpunt langs de omtrek van het gat.

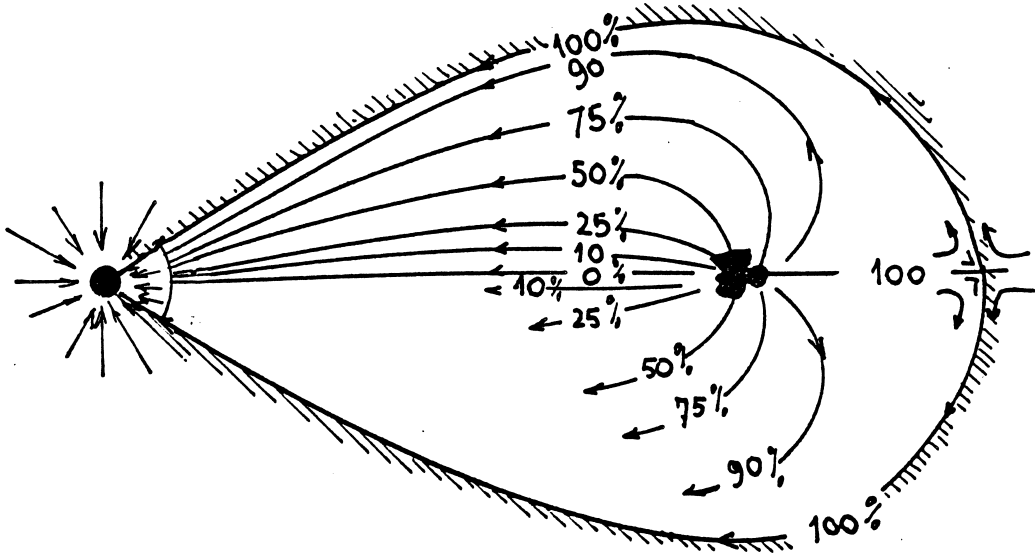


Fig. 8 - Stroomlijnaanduiding

Op grond van het bovenstaande geldt voor de dimensioneloze verblijftijd,  $t_*$ , in de standardsituatie:

$$t_* = t_*(L_*, 2r_{ge*}, \text{stroomlijnenkeuze}^1) \quad (13)$$

en is derhalve van slechts 3 dimensioneloze parameters afhankelijk, namelijk van  $L_*$ ,  $2r_{ge*}$  en de stroomlijn. De werkelijke verblijftijd,  $t$ , volgt direct uit:

$$t = \frac{\lambda t_*}{v_*} = \zeta t_* = \left( \frac{2\pi\lambda^2 n_e D}{Q_0} \right) t_* \quad (14)$$

<sup>1)</sup> De stroomlijn wordt met een percentage aangegeven. De kortste (de rechte) stroomlijn wordt aangeduid met 0 % en de langste met 100 %, terwijl er, per procent, tussen twee stroomlijnen een zelfde volumestroom plaatsvindt (fig. 8).

$\zeta = \frac{\lambda}{v_*}$  is op te vatten als de tijd nodig om met de reeds eerder genoemde constante, karakteristieke snelheid,  $v_*$ , vanaf afstand  $\lambda$  de onttrekking te bereiken.  $\zeta$  is derhalve een karakteristieke verblijftijd met dimensie (T).

De dimensieloze verblijftijd,  $t_*$ , is per dimensieloze gatdiameter,  $2r_{ge}/\lambda$ , voor verschillende dimensieloze afstanden,  $\frac{L}{\lambda}$ , en stroomlijnen in de tabellen 3 van bijlage 1 gegeven.

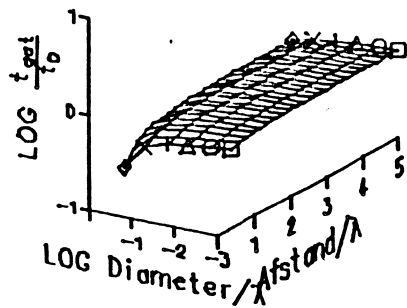
In veel gevallen zal reeds tevoren enig inzicht bestaan in de verblijftijdsituatie voorafgaand aan de verstoring van de afdekkende laag. Met name is dit het geval bij grondwaterpompstations waarvoor reeds beschermingszones waren vastgesteld op basis van berekende reistijden. In zulke situaties is het praktisch, om direct te weten in welke mate de reistijd verandert, ten gevolge van de aangebrachte insnijding. De tabellen 4 (bijlage 1) geven hiertoe per stroomlijn, voor verschillende dimensieloze equivalente gatdiameters en afstanden, de verhouding tussen de nieuwe en de oorspronkelijke reistijd. De getallen van de tabellen 4 zijn in figuur 9 en de figuren op bijlage 2 weergegeven. Ter illustratie van het gebruik van de tabellen en de figuren volgt hieronder een voorbeeld.

#### Voorbeeld

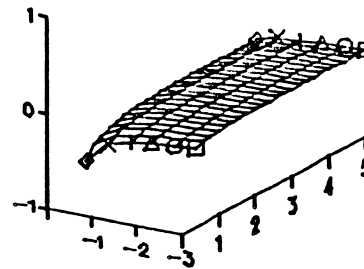
Stel dat een pompstation 5 miljoen kubieke meter per jaar ( $m^3/a$ ) onttrekt aan een 30 m dikke watervoerende laag met een porositeit,  $n_e$ , van  $1/3$  en een karakteristieke lengte,  $\lambda$ , van 1000 m. Op een afstand  $L$ , van 1200 m wordt een diepe bouwput gepland, die tot een equivalente, volkomen infiltratieput met een diameter,  $2r_{ge}$ , van 30 m kan worden geschematiseerd.

# Genormaliseerde Verblijftijden

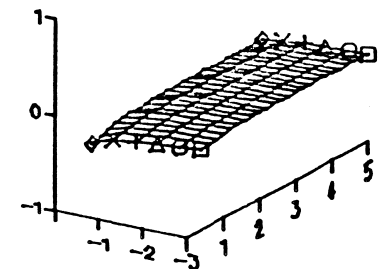
0% stroomlijn



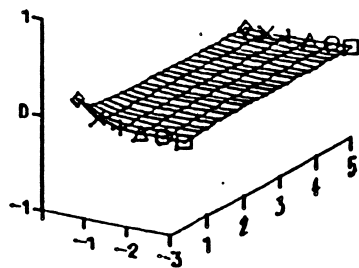
10% stroomlijn



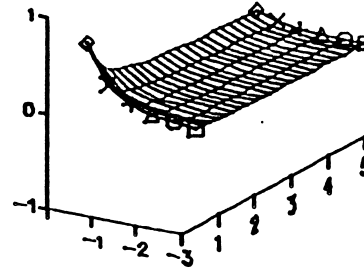
25% stroomlijn



50% stroomlijn



75% stroomlijn



90% stroomlijn

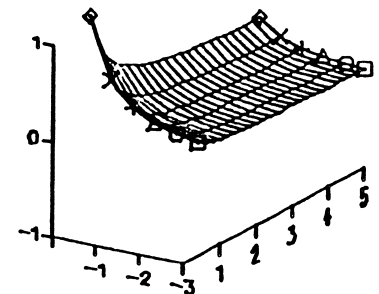


Fig. 9 - Genormaliseerde verblijftijden, per stroomlijn 3-dimensionaal weergegeven.

Wat zijn de mogelijke gevolgen van de insnijding voor de grondwaterreistijden?

Oplossing:

de dimensieloze afstand,  $L_*$ , bedraagt:

$L/\lambda = 1,2$  en de dimensieloze equivalente gatdiameter,  $2r_{ge*}$  bedraagt  $2r_{ge}/\lambda = 0,03$ .

De karakteristieke tijd,  $\zeta$ , bedraagt nu dus:

$$\zeta = \frac{\lambda}{v_*} = \frac{2\pi\lambda^2 n_e D}{Q_0} = \frac{(2)\pi(1000)^2(\frac{1}{3})(30)}{(5 \cdot 10^6)} = 12,6 \text{ jaar}$$

Uit tabel 1 op bijlage 1 kan de te verwachten infiltratiestroom,  $Q_g$ , worden afgelezen:

$$Q_g = 0,074 Q_0 = 370000 \text{ m}^3/\text{a} (= 42 \text{ m}^3/\text{h})$$

Uit tabel 2 (bijlage 1) blijkt, dat de dimensieloze verblijftijd,  $t_*$ , zonder de insnijding 1,07 bedroeg, zodat de werkelijke verblijftijd wordt berekend door  $t_*$  te vermenigvuldigen met de karakteristieke verblijftijd  $\zeta$ :

$$t = \zeta t_* = (12,6)(1,07) = 13,5 \text{ jaar}$$

Uit tabel 3 van bijlage 1 blijkt de nieuwe verblijftijd (dus voor  $Q_g = 0,074 Q_0$ ) voor de verschillende stroomlijnen respectievelijk te bedragen (tabel 3.4, namelijk voor  $2 r_{ge}/\lambda = 0,03$ )

| stroomlijn<br>(%) | $\zeta$<br>(-) | $t_*$<br>(-) | $t=\zeta t_*$<br>(jaar) |
|-------------------|----------------|--------------|-------------------------|
| 0                 | 12,6           | 0,722        | 9,1                     |
| 10                | 12,6           | 0,727        | 9,2                     |
| 15                | 12,6           | 0,754        | 9,5                     |
| 50                | 12,6           | 0,869        | 10,9                    |
| 75                | 12,6           | 1,166        | 14,7                    |
| 90                | 12,6           | 1,700        | 21,4                    |

Hieruit blijkt direct, dat nu rond 30 % van het geïnfiltreerde water een reistijd verkrijgt van minder dan 10 jaar. Zou een beschermingszone zijn vastgesteld op grond van de 10-jaars verblijftijdslijn, dan valt de plaats van de bouwput daar formeel buiten. De ingraving echter veroorzaakt een zodanige verblijftijdsvermindering voor 30 % van het via de bouwput geïnfiltreerde water, dat de bouwput nu feitelijk binnen de 10-jaarsgrens is komen te vallen.

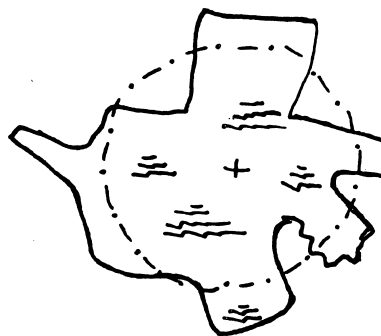
Met behulp van de bekende, oorspronkelijke verblijftijd,  $t_o$ , (hier namelijk 13,5 jaar) volgen de nieuwe verblijftijden ook uit de tabellen 4 (bijlage 1, voor  $2 r_{ge}/\lambda = 0,03$ ):

| stroomlijn<br>(%) | $t_o$<br>(jaar) | $t/t_o$<br>(-) | $t=t_o*/t/t_o$<br>(jaar) |
|-------------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| 0                 | 13,5            | 0,674          | 9,1                      |
| 10                | 13,5            | 0,679          | 9,2                      |
| 15                | 13,5            | 0,704          | 9,5                      |
| 50                | 13,5            | 0,810          | 10,9                     |
| 75                | 13,5            | 1,086          | 14,7                     |
| 90                | 13,5            | 1,581          | 21,3                     |

### 3.3 Afwijkingen van de standaardsituatie

#### 3.3.1 Rechthoekige en andere, niet cirkelvormige doorsnijingen

Een vergraving is slechts bij hoge uitzondering cirkelvormig. Zo heeft een bouwput meestal een langwerpige, rechthoekige of L-vorm. Nochtans wordt in de berekeningen in de



voorgaande paragraaf uitsluitend de cirkelvorm gehanteerd. tot equivalente cirkel

Het is derhalve noodzakelijk, om een, in de praktijk aangetroffen, willekeurig gevormde doorsnijing in de berekeningen door een cirkelvormige te vervangen, evenwel met de juiste equivalente straal of diameter (fig. 10). Brandes en Olsthoorn (1978) besteedden aan dit onderwerp reeds aandacht in het kader van de KIVI-studie naar retourbemaling. Een door het RID met zogenaamd Teledeltos-papier voor een rechthoekige sleuf uitgevoerde verificatie, leidde tot het in figuur 11 gegeven resultaat voor de equivalente radius,  $r_e$ .

Zoals reeds theoretisch was voorspeld, verschilt de met het Teledeltospapier gemeten curve nauwelijks van de equivalente radius die berekend werd door de omtrekken van rechthoek en cirkel aan elkaar gelijk te stellen:

$$r_e \approx (a+b)/\pi \quad (15)$$



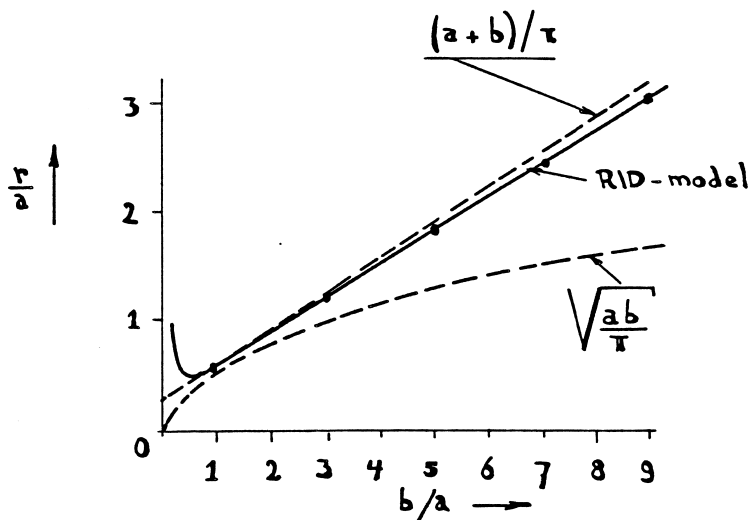


Fig. 11 - Equivalente straal,  $r (= r_e)$ , van een rechthoekige insnijding met zijde  $a$  en  $b$ .

De veel toegepaste gelijkstelling van beide oppervlakken, namelijk  $r_e = \sqrt{(a \cdot b / \pi)}$ , of het gemiddelde van beide schattingen voldoen duidelijk slechter dan het resultaat uit gelijkstelling van de omtrekken.

Het is onmogelijk, om voor elke willekeurige vorm a priori een exacte waarde voor de equivalente radius op te geven. In de praktijk kan deze echter, met inachtneming van het bovenstaande, voldoende nauwkeurig worden geschat.

### 3.3.2 Onvolledige insnijdingen; transformatie naar een volkomen infiltratieput

Vergravingen en dergelijke reiken slechts bij hoge uitzondering tot aan de basis van de watervoerende laag die zij aansnijden. Zij zijn derhalve steeds als onvolkomen te beschouwen. Het wegzijgende water ondervindt door deze onvolkomenheid een extra weerstand ten opzichte van de situatie waarbij de ontgraving wél tot aan de basis van de watervoerende

rende laag reikt. Ook al is de ontgraving overeenkomstig de voorgaande paragraaf tot een cirkelvormige getransformeerd met radius  $r_e$ , dan blijft de onvolkomenheid bestaan. Deze wordt nu weggenomen door de verkregen cirkelvormige onvolkomen vergraving te vervangen door een volkomen infiltratieput met equivalente radius  $r_e$  (fig. 12).

De weerstand ten gevolge van de onvolkomenheid leidt tot een toename van de benodigde stijghoogte bij een infiltratiestroom  $Q_g$ , volgens

$$\Delta h = \frac{Q_g}{2\pi k D} w \quad (16)$$

waarin:

$\Delta h$  = het niveauverschil is tussen een onvolkomen en een volkomen vergraving met dezelfde radius en hetzelfde infiltratiedebiet ( $L$ )

$w$  = de weerstand door onvolkomenheid (dimensieloos)

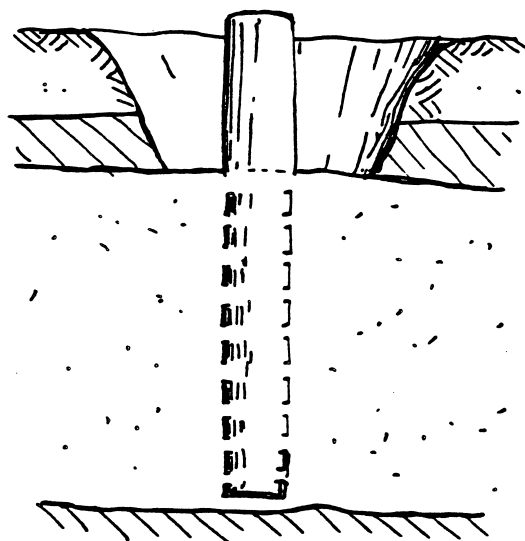


Fig. 12 - De onvolkomen insnijding vervangen door een volkomen put met equivalente diameter

Voor de meest voorkomende situatie waarbij de in-steek van de vergraving onder de afdekkende laag klein is ten opzichte van de laagdikte,  $D$ , geldt het volgende verband tussen de weerstand,  $w$ , en de (nu anders gedefinieerde) dimensieloze gatdiameter,  $2r_e/D$  (Huisman en Olsthoorn, 1983):

$$\log(w) = 0,18 - 1,29x + 0,008x^2 + 0,039^3x \quad (17a)$$

waarin:

$$x = \log \left( \frac{2r_e}{D} \right) \quad (17b)$$

ofwel:

$$\ln(w) = 0,4144 - 1,29y + 0,00382 y^2 + 0,00735 y^3 \quad (18a)$$

waarin:

$$y = \ln \left( \frac{2r_e}{D} \right) \quad (18b)$$

Dit verband is in figuur 13 weergegeven, en verkregen door interpolatie tussen een aantal numeriek verkregen punten.

**Intredeweerstand  $w$  van een schone ronde vijver**

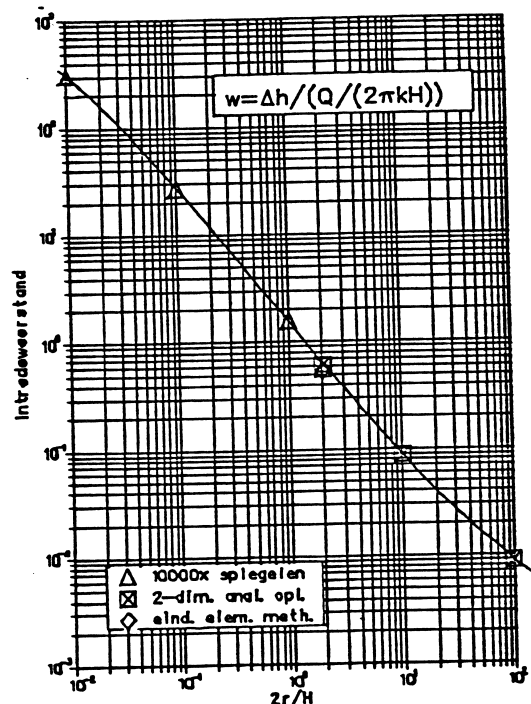


Fig. 13 - Intredeweerstand,  $w$ , van een schone ronde vijver ( $H$  in figuur = pakketdikte  $D$ )

De equivalente radius  $r_{ge}$  volgt nu uit:

$$h + \Delta h = \frac{Q_g}{2\pi kD} K_0\left(\frac{r_{ge}}{\lambda}\right) = \frac{Q_g}{2\pi kD} K_0\left(\frac{r_e}{\lambda}\right) + w \quad (19)$$

ofwel:

$$K_0\left(\frac{r_{ge}}{\lambda}\right) = K_0\left(\frac{r_e}{\lambda}\right) + w \quad (20)$$

Daar  $r_g$  en dus  $r_{ge}$  ( $r_{ge} < r_g$ ) steeds klein zal zijn ten opzichte van  $\lambda$ , kan deze betrekking worden benaderd door:

$$\ln\left(\frac{1,123\lambda}{r_{ge}}\right) = \ln\left(\frac{1,123\lambda}{r_e}\right) + w \quad (21)$$

waaruit direct volgt:

$$r_{ge} \approx r_e \exp(-w) \quad (22)$$

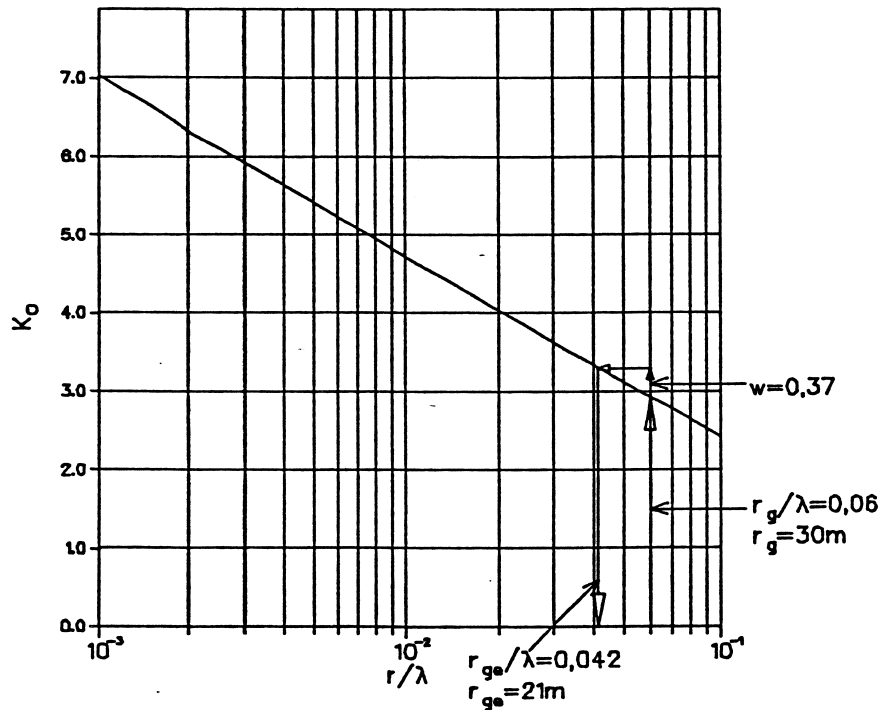
In die gevallen dat  $r_e$  niet veel kleiner is dan  $\lambda$  ( $r_e > 0,2\lambda$ ) kan  $r_{ge}$  met betrekking (20) in tabel 1e van de  $K_0$ -functie (zie bijvoorbeeld Huisman, 1972) of grafisch uit een  $K_0$ -grafiek worden bepaald (zie fig. 14).

In die gevallen dat de vergraving over een aanzienlijke diepte in de watervoerende laag snijdt, ligt de juiste equivalente straal tussen  $r_e$  en  $r_{ge}$  in. Daar het verschil tussen  $r_e$  en  $r_{ge}$  in de praktijk veelal niet groot is, kan de juiste equivalente radius in voorkomende gevallen met voldoende nauwkeurigheid worden geschat. Een voorbeeld van de procedure wordt hierna gegeven:

Stel dat de equivalente straal,  $r_{ge}$ , gezocht wordt voor een cirkelvormige, nauwelijks penetrerende ontgraving onder de volgende omstandigheden:

### Voorbeeld

grafische bepaling  $r_{ge}$   
 $r_g = 30\text{m}$ ,  $\lambda = 500\text{m}$ ,  $w = 0,37$



Figuur 14 - Grafische bepaling van de equivalente radius  $r_{ge}$  van een onvolkomen put met radius ( $r_g = r_e$ ); voorbeeld

$$D = 20 \text{ m}, r_e = 30 \text{ m}, \lambda = 500 \text{ m}.$$

$$r_e/\lambda = 0,06 \text{ en } 2 r_e/D = 3$$

Volgens (18b):  $y = \ln(3) = 1,0986$ .

Uit (18a) of figuur (6) volgt:

$$\ln(w) = -0,9889, \text{ respectievelijk } w = 0,372.$$

$r_{ge}$  volgt nu direct uit:

$$r_{ge} = (30) \exp(-0,372) = 20,6 \text{ m}.$$

Grafische bepaling met figuur 14 levert

$$r_{ge}/\lambda = 0,042$$

en dus:

$r_{ge} = (500)(0,042) = 21 \text{ m}$ , hetzelfde antwoord als hiervoor.

### 3.3.3 Andere afwijkingen van de standaardsituaties; worst case analysis

#### 3.3.3.1 Overzicht

De berekeningsmethodiek, de tabellen in bijlage 1 en de figuren die in de voorgaande paragrafen zijn opgezet gaan uit van bepaalde, geïdealiseerde en verregaand vereenvoudigde aannamen betreffende het geohydrologische systeem. Hoe goed deze ook mogen zijn, in de praktijk zullen steeds afwijkingen van dit schematische beeld optreden. Het is derhalve van belang zich een beeld te vormen van de mogelijk relevante verschillen en hun gewicht in te schatten. Vooral de ongunstige afwijkingen verdienen aandacht en leiden tot, wat met een zwaar woord wordt genoemd, een "worst case analysis".

De navolgende opsomming geeft de factoren die van belang kunnen zijn:

- A. "Natuurlijke" stroming van het grondwater.
- B. Heterogeniteit van de slecht doorlatende lagen.
- C. Heterogeniteit en anisotropie van de watervoevende laag:
  - a. in het verticale vlak
  - b. in het horizontale vlak.
- D. Stijghoogteverval over de slecht doorlatende lagen in de natuurlijke situatie.
- E. De stijghoogte ter plaatse van de doorsnijding.

- F. Aanvoer van water naar de doorsnijding
- G. Verandering van het stroombeeld door andere oorzaken
- H. Gebruik van verkeerde bodemconstanten.

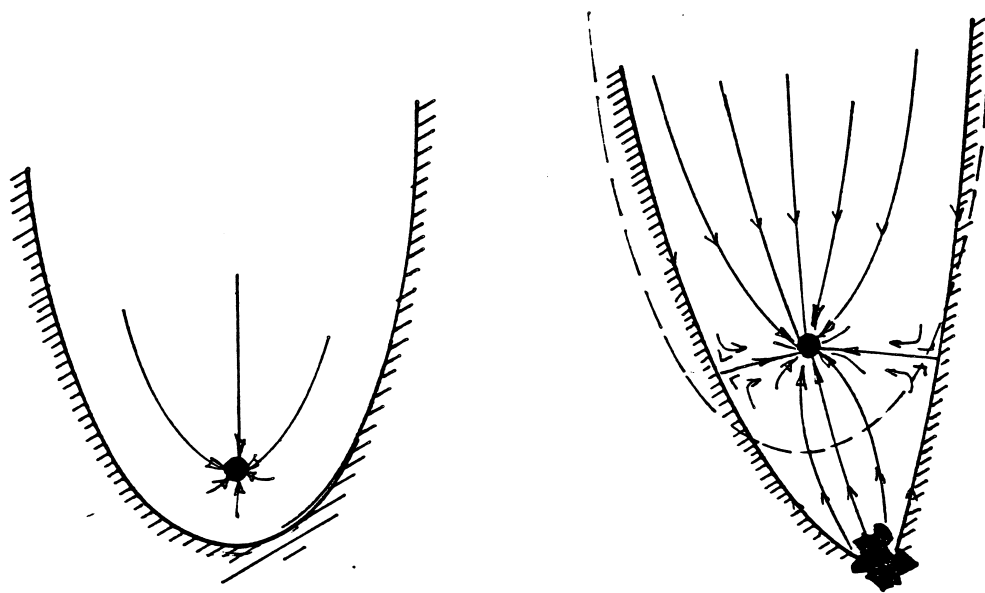
### 3.3.3.2 "Natuurlijke" stroming van het grondwater

De afleidingen in de voorgaande hoofdstukken gaan uit van een situatie zonder "natuurlijke" grondwaterstroming. De "natuurlijke" stroming is per definitie de grondwaterstroming die overblijft, wanneer de beschouwde onttrekking en de doorsnijding er niet zouden zijn.

Deze basisstroming kan het totale stroombeeld sterk beïnvloeden en daarmee ook de reistijd van een druppel water tot aan de onttrekking. Omgekeerd mogen de tabellen en formules uit dit rapport dus niet worden gebruikt in gevallen waarin de basisstroming een merkbare rol speelt. Men dient dan terug te grijpen op een nadere berekening - bijvoorbeeld met de computer (de bekende FLOP-programma's, zoals die voor het eerst door v.d. Akker (1975, 1982) zijn ontwikkeld) of een programmeerbare handrekenmachine - waarin de "natuurlijke" stroming op de juiste wijze wordt meegenomen. (Zie voor het gebruik van handrekenmachines bijvoorbeeld Olsthoorn, 1982.)

Verblijftijdsgrenzen rond een onttrekking zijn geen vaste grenzen; zij hangen af van het totale stroombeeld en veranderen, zodra in dit stroombeeld wordt ingegrepen. Het doorsnijden van een beschermende, afsluitende laag is zo'n ingreep die ertoe kan leiden, dat vroeger berekende verblijftijds- en beschermingsgrenzen rond een grondwaterwinplaats niet

meer kloppen. Bij aanwezigheid van een basisstroming vallen op beperkte afstand benedenstrooms gelegen gebieden veelal geheel buiten het intrekgebied (figuur 15). Indien de infiltratie via zo'n doorsnijding benedenstrooms van de onttrekking plaatsvindt, kan deze doorsnijding plotseling tot het intrekgebied gaan behoren, te zamen met in de buurt gelegen punten. Doorsnijdingen benedenstrooms van onttrekkingen dienen derhalve de nodige aandacht te krijgen, vooral ook wanneer zij een stukje buiten de buitenste beschermingszône worden aangebracht en zelfs wanneer zij buiten het (oorspronkelijke) intrekgebied vallen.



Figuur 15 - Stroming met basisstroming,  $q_n$ ; links uitsluitend onttrekking, rechts met infiltrerende insnijding. Grens van het intrekgebied is gearceerd



Een globale controle of de waterscheiding tussen 2 punten, A en B, verloopt is mogelijk, indien de afstand, L, tussen A en B niet groot is ten opzichte van de karakteristieke lengte  $\lambda$ , bijvoorbeeld kleiner dan  $0,3\lambda$ . Is dit het geval, dan is de fout beperkt, die wordt gemaakt door een nu te volgen, eenvoudige benadering als volkomen spanningswater:

De stromingscomponent langs AB, in de richting van B naar A, is dan te schrijven als (figuur 16).

$$q_{BA} = + \frac{Q_1}{2\pi\alpha L} - \frac{Q_2}{2\pi(1-\alpha)L} + q_n$$

of, met

$$\frac{Q}{2\pi L} = q$$

$$q_{BA} = + \frac{q_1}{\alpha} + \frac{q_2}{(1-\alpha)} + q_n$$

Hierin zijn  $Q_1$  en  $Q_2$  positief maar  $Q_1$  is de onttrekking in punt A en  $Q_2$  de infiltratie in punt B.  $q_n$  is de component van de natuurlijke stroming langs AB, van B naar A positief gerekend. Indien de waterscheiding de lijn AB tussen A en B snijdt, is  $q_{BA}$  ergens nul:

$$(1-\alpha)q_1 + \alpha q_2 + \alpha(1-\alpha)q_n = 0$$

of wel:

$$\alpha^2 q_n + \alpha(q_1 - q_2 - q_n) - q_1 =$$

en dus

$$\alpha_{12} = \frac{-q_* \pm \sqrt{(q_*)^2 + 4 q_n q_1}}{2q_n}$$

$$\text{met } q_* = q_1 - q_2 - q_n$$

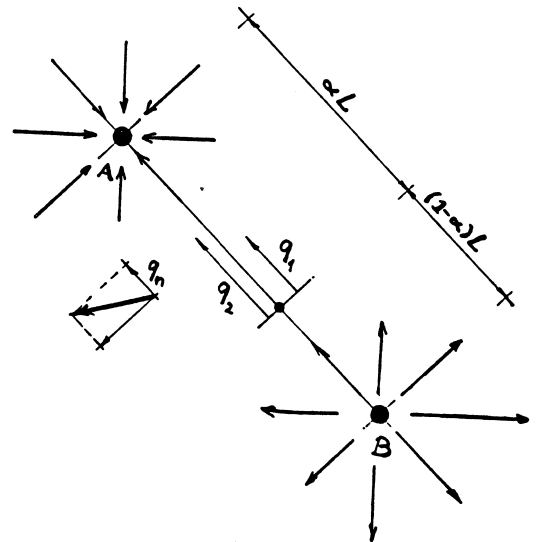


Fig. 16 - Stroom-snelheid langs de lijn BA

Indien hieruit een  $\alpha$  volgt die tussen nul en één in ligt, is tussen A en B een waterscheiding aanwezig en valt B binnen het intrekgebied van A.

### 3.3.3.3 Heterogeniteit van slecht doorlatende lagen

De heterogeniteit van slecht doorlatende, afsluitende lagen is mede bepalend voor het stroombeeld dat de doorsnijding opwekt. De heterogeniteit, dat wil zeggen variaties in de weerstand van kleilagen van plaats tot plaats, is feitelijk alleen goed rekenkundig te verwerken met computerprogramma's die op numerieke methodes (eindige elementen respectievelijk differenties) zijn gebaseerd. Het probleem is echter, dat in de praktijk in de regel zeer weinig concreets over de voorkomende heterogeniteit kan worden gezegd. Soms is iets bekend omtrent het verloop van de dikte van een kleilaag maar daar houdt het dan ook mee op. Een zeer kostbaar, gedetailleerd onderzoek ter plaatse zou nodig zijn om hier in voorkomende gevallen duidelijker kijk op te krijgen. Het zal daarbij vooral van belang zijn om te weten, in hoeverre de weerstand biedende lagen als een aaneengesloten geheel mogen worden beschouwd (zie hoofdstuk 4). Komen gaten veelvuldig voor, dan heeft een doorsnijding elders in het gebied geen betekenis. (Dit is intuïtief duidelijk; in de berekeningen zal in zo'n geval blijken dat de karakteristieke pakketlengte,  $\lambda = \sqrt{kDc}$ , klein is, wat tot dezelfde conclusie leidt.) Anderzijds kan bij een aaneengesloten, dikkere weerstandslaag in de regel met een gemiddelde weerstand worden gewerkt, zeker wanneer de karakteristieke lengte van het pakket,  $\lambda$ , groot is.

#### 3.3.3.4 Heterogeniteit en anisotropie van de watervoerende laag

Hierbij moet onderscheid worden gemaakt tussen het verticale vlak en het horizontale vlak. Gelaagdheid, afwisseling van meer en minder doorlatende laagjes, komt in elk watervoerend pakket voor en leidt tot heterogeniteit en anisotropie in het verticale vlak. Echter ook het horizontale vlak is vaak niet homogeen. In hoeverre heterogeniteit en anisotropie zich voordoen wordt bepaald door de omstandigheden waaronder de pakketten zijn gevormd. Rivierafzettingen zijn verre van homogeen. Grind en zand van diverse gradaties wisselen zich over korte afstanden af als gevolg van allerlei meander-effecten en andere stroombedverleggingen die plaatsvonden tijdens de vorming van de pakketten. Dit is begrijpelijk aangezien er veelal miljoenen jaren mee gemoeid waren om een flink pakket op te bouwen. Afgezien hiervan spelen andere effecten als stuwing door landijs, tektoniek en de daaraan gekoppelde lokale erosie alsmede pakquetsplijting een rol van betekenis.

Desondanks kan veelal in een groter gebied een watervoerend pakket dat in een bepaald geologisch tijdperk is gevormd, onder voorwaarde van voldoende dikte en bij beschouwing van een voldoende omvang als min of meer homogeen worden beschouwd ten aanzien van het doorlaatvermogen. In gestuwde gebieden kan het zijn dat het pakket in kwestie niet alleen heterogeen, maar bovendien anisotroop is, omdat de doorlatendheid in de ene richting afwijkt van die in een andere.

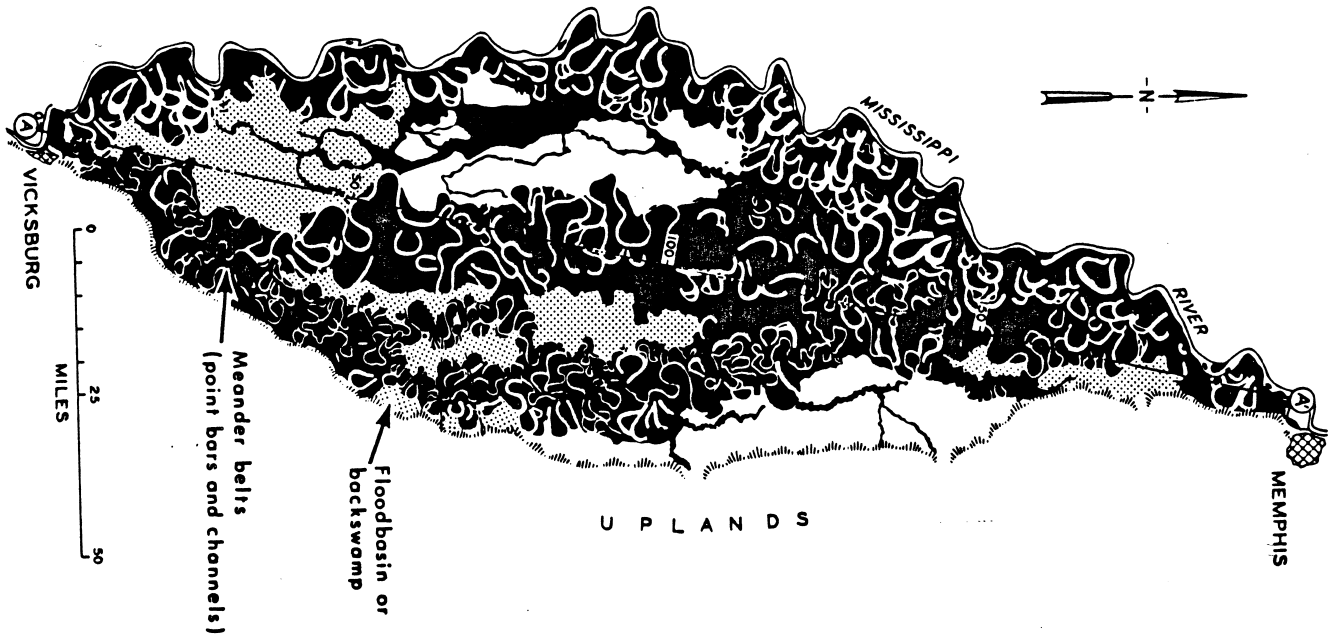
Voor wat betreft watersnelheden leidt de natuur-

tuurlijke afwisseling van grof en fijn materiaal in watervoerende pakketten tot verschillen bij een zelfde verhang. Zit hierin geen bepaalde structuur die grovere delen van het pakket met elkaar verbindt, dan valt het effect mee en kan de verblijftijd worden berekend op grond van gemiddelde bodemeigenschappen en de variatie daarop (macrodispersie, zie De Jonge, 1981). De afstand waarover het water stroomt moet dan wel een orde of meer groter zijn dan de schaal van de heterogeniteiten. In de praktijk zal dit neerkomen op afstanden groter dan bijvoorbeeld 500 m.

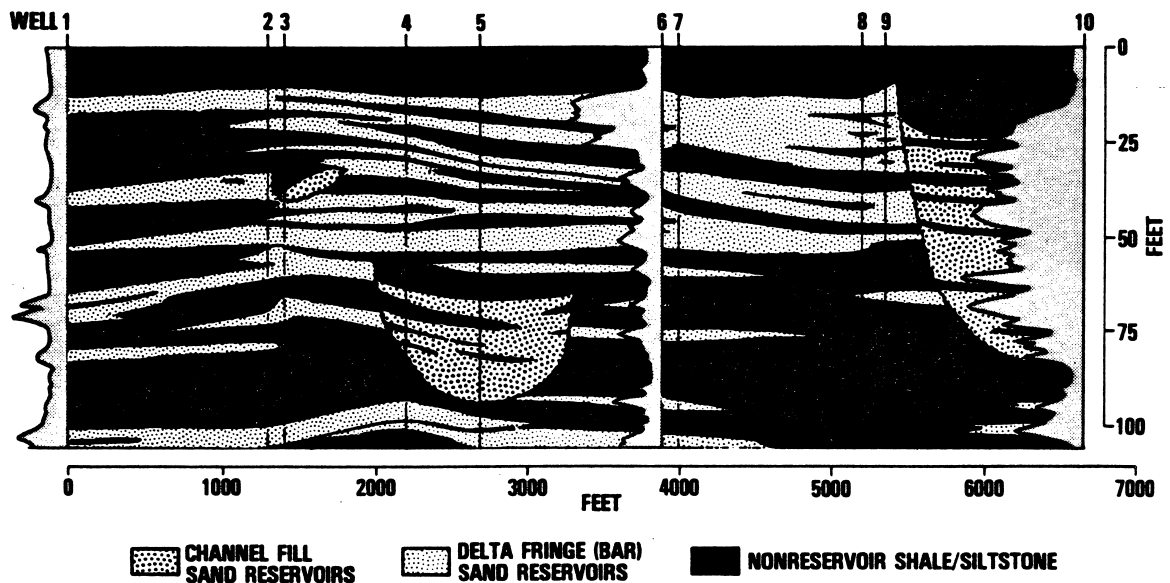
Dispersie doet elke stroomlijn vervagen. Een aanvankelijk smalle lijn wordt hierdoor stroomafwaarts steeds breder. Van belang is, dat een deel van een hoeveelheid verontreinigende stof waterwinputten bereiken kan, ook al bevond deze hoeveelheid zich aanvankelijk geheel buiten het intrekgebied (Uffink, 1982, lopend RID-onderzoek "Macrodispersie").

Indien er sprake van is dat grove delen van het pakket met elkaar verbonden zijn en over grotere afstanden doorlopen, is een grondwatertransport mogelijk dat veel sneller verloopt dan werd verwacht op grond van gemiddelde bodemeigenschappen. Dit kan in ongeconsolideerd materiaal optreden via grindlagen (oude rivierbeddingen). Zoals figuur 17 op fraaie wijze laat zien voor een deltagebied zo groot als Nederland, zullen zulke beddingen regionaal gezien in een bepaalde richting georiënteerd zijn. Zij kunnen hierdoor enigszins tot uiting komen in pompproeven, en wel in de vorm van anisotropie (Olsthoorn, 1982).

Komen zulke grove grindafzettingen maar op een bepaalde hoogte van het watervoerende pakket voor, dan ontstaat er een ernstige discrepantie tussen gemiddelde omstandigheden en de omstandigheden die feitelijk worden aangetroffen (figuur 18).



Figuur 17 - Vervlochten rivierbeddingen bij Mississippi (Le Blanc, 1977)



Figuur 18 - Gelaagd, watervoerend pakket (Sneider e.a., 1978)

Zo'n gelaagdheid is in de kwantitatieve hydrologie veelal van weinig betekenis. Dit ligt echter geheel anders wanneer verblijftijden van het grondwater en spreiding van verontreinigingen in het geding zijn. Het onderstaande rekenvoorbeeld illustreert het grote verschil tussen een homogeen pakket en een sterk gelaagd pakket.

Stel een watervoerend pakket heeft een totaal doorlaatvermogen van  $2000 \text{ m}^3/\text{d}$  bij een totale dikte van 60 m. De gemiddelde doorlatendheidscoëfficiënt bedraagt derhalve  $33,3 \text{ m/d}$ . Bij een verhang van  $1 \text{ }^0/_{00}$  en een porositeit van 35 % zou een gemiddelde snelheid van  $0,95 \text{ m/d}$  ( $35 \text{ m/a}$ ) horen.

Indien dit pakket echter in werkelijkheid opgebouwd zou zijn uit zônes met verschillende doorlatendheid, kan bovenstaand gemiddelde een verkeerd beeld geven. We nemen aan dat er (in dit voorbeeld) twee zônes kunnen worden onderscheiden, namelijk een tien meter dikke grofzandige zône met een doorlatendheidscoëfficiënt van  $100 \text{ m/d}$  en fijnere zônes met een totale dikte van 50 m met een doorlatendheidscoëfficiënt van  $20 \text{ m/d}$ . Aangezien het totale doorlaatvermogen van beide zônes dezelfde is, namelijk respectievelijk  $10 \times 100 \text{ m}^2/\text{d}$  en  $50 \times 20$ , stroomt de ene helft van het water door de dunne, grove zône en de andere helft door de dikke, fijnzandige zône.

Daar de grondwatersnelheid evenredig is met de doorlatendheidscoëfficiënt is deze (een uniforme porositeit van 35 % veronderstellende) in de grofzandige zône echter het vijfvoudige van die in de fijnzandige en ruim driemaal de snelheid die zou zijn berekend op basis van de gemiddelde doorlatendheidscoëfficiënt van het totale pakket.

Het behoeft nauwelijks betoog, dat berekeningen met

zulke gemiddelde waarden een scheef beeld geven, wanneer het pakket in werkelijkheid sterk gelaagd is. In het algemeen dient men met dit soort verschijnselen rekening te houden, bij berekeningen van verblijftijden en verspreiding van stoffen in watervoerende pakketten.

De noodzakelijke bodemconstanten dienen hiertoe bekend te zijn. Gemiddelde waarden zoals die waarmee men in de kwantitatieve hydrologie normaliter kan volstaan, zijn voor dit doel ontoereikend.

#### 3.3.3.5 Stijghoogteverval over de slecht doorlatende lagen in de natuurlijke situatie

Een stijghoogteverval over de slecht doorlatende lagen impliceert in- of uitstroming van water. Dit veroorzaakt een natuurlijke stroming in het watervoerende pakket welke als zodanig moet worden behandeld (paragraaf 3.3.3.2). Verdere consequenties zijn er in dit kader van dit rapport niet.

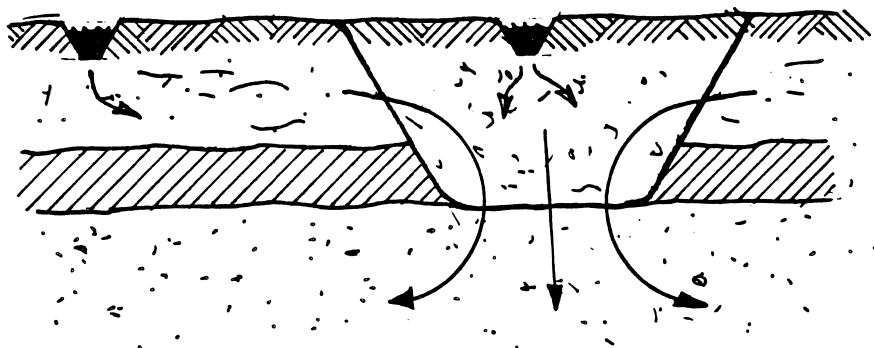
#### 3.3.3.6 De stijghoogte ter plaatse van de doorsnijding

Indien een afsluitende laag wordt doorsneden ten behoeve van een bouwput, zal dit met een intensieve bemaling gepaard gaan en is er, zolang deze bemaling voortduurt, geen sprake van infiltratie naar het diepe watervoerende pakket. Het tegenovergestelde is ook denkbaar, bijvoorbeeld doorgraving van een "zachte" laag ten behoeve van wegaanleg gevolgd door opvulling en opspuiting met zand en mogelijk met andere materialen. De stijghoogte kan dan juist relatief hoog zijn met versterkte infiltratie als gevolg.

Indien de doorsneden laag na gereedkomen van het werk niet meer wordt afgedicht blijft een ondergrondse verbinding tussen twee watervoerende pakketten over, via welke infiltratie kan blijven plaatsvinden (figuur 19). Verontreinigingen die doorgaans juist bij werken (gebouwde fabrieken, wegenbouw) plaatsvinden, kunnen dan gemakkelijk in de van oorsprong goed beschermde, watervoerende laag dringen.

### 3.3.3.7 De aanvoer van water naar de doorsnijding

Blijvende infiltratie is alleen mogelijk wanneer water kan toestromen. Deze toevoer is mogelijk via sloten en dergelijke (figuur 19), maar vooral via een ondieper gelegen watervoerend pakket. Indien er geen slootbedding precies over de ontgraving loopt, eventuele sloten praktisch waterdicht zijn en geen grondwatervoerend pakket boven de afsluitende laag aanwezig is, zal de toevoer naar het gat weldra tot verwaarloosbare hoeveelheden afnemen.



Figuur 19 - Opge vulde vergraving die lekt



#### 3.3.3.8 Verandering van het stroombeeld door andere oorzaken

Aanleg van kanalen, cultuurtechnische werken, stichting van nieuwe onttrekkingen en dergelijke kunnen en zullen het oorspronkelijke stroombeeld wijzigen. De oorspronkelijke verblijftijdsgrenzen verliezen hun geldigheid en er stelt zich een andere basisstroming in. De situatie dient voor deze nieuwe "natuurlijke" stroming opnieuw te worden bekeken, waarbij geschikte computerprogrammatuur dient te worden gebruikt. De Flopprogramma's vormen in zulke gevallen een uitstekend instrument (zie paragraaf 3.3.3.2).

#### 3.3.3.9 Gebruik van verkeerde bodemconstanten

Het behoeft geen betoog dat gebruik van verkeerde bodemconstanten en andere, verkeerde uitgangspunten tot foute uitkomsten en conclusies leidt. Van belang is echter de constatering dat de normaal gebruikte bodemconstanten, die met pompproeven werden verkregen, gemiddelden zijn voor een zeker gebied en de gehele pakketdikte rond de proefpompput en als zodanig juist zijn. In paragraaf 3.3.3.4 is echter reeds beschreven, dat voor de bepaling van grondwater snelheden en verblijftijden zulke gemiddelden irrelevant kunnen zijn. Ook de anisotropie wordt in de praktijk nogal eens tekort gedaan en leidt bij verwaarlozing tot aanzienlijke verschillen met de werkelijkheid (Olsthoorn, 1982).



## 4 SCHEIDENDE LAGEN, "MEMBRAAN OF GATENKAAS?"

### 4.1 Inleiding

Beschermende, geologische lagen zijn (horizontale) lagen die weerstand bieden aan de ondergrondse waterstroming. Zulke lagen zijn "natuurprodukten" en hoeven dus niet over uitgestrekte gebieden één samenhangend geheel te vormen. Evenmin mag worden verwacht dat de samenstelling (korrelopbouw en -structuur) van plaats tot plaats dezelfde is. De beschermingscapaciteit van dergelijke lagen zal derhalve van plaats tot plaats verschillen.

Indien beschermende lagen aaneengesloten zijn, garanderen zij in het algemeen een grote verblijftijd. Bevatten zij echter gaten dan ligt de situatie anders, met name bij verontreinigingen in de buurt van zulke gaten. De tijd nodig voor passage van de beschermende laag is dan plaatselijk nagenoeg verwaarloosbaar (Den Blanken, 1979). Watervoevende pakketten zijn dan steeds erg kwetsbaar en men kan zich in zulke omstandigheden met reden afvragen of nog wel rekening gehouden mag worden met een beschermende werking van afdekkende geologische lagen. De Commissie Bescherming Waterwingebieden (1980) houdt hier evenmin rekening mee. Het betreft hier beschermingszones rond grondwaterwinplaatsen. De reden hiervoor is echter een wat andere; namelijk de noodzaak het gevaar in te dammen van bepaalde activiteiten, met name degenen die door zulke lagen heen kunnen gaan (bijvoorbeeld boringen en vergravingen).

Het is derhalve van belang over inzicht te beschikken omtrent de continuïteit van beschermende, geo-

logische lagen. De in de geohydrologie gebruikelijke veldproeven als geo-elektrisch en seismisch onderzoek en vooral pompproeven geven te weinig detailinformatie in de samenhang en structuur van beschermende lagen. Veel meer worden gemiddelden over wat grotere gebieden verkregen. Zeker bij ruim opgezette pompproeven is dit het geval.

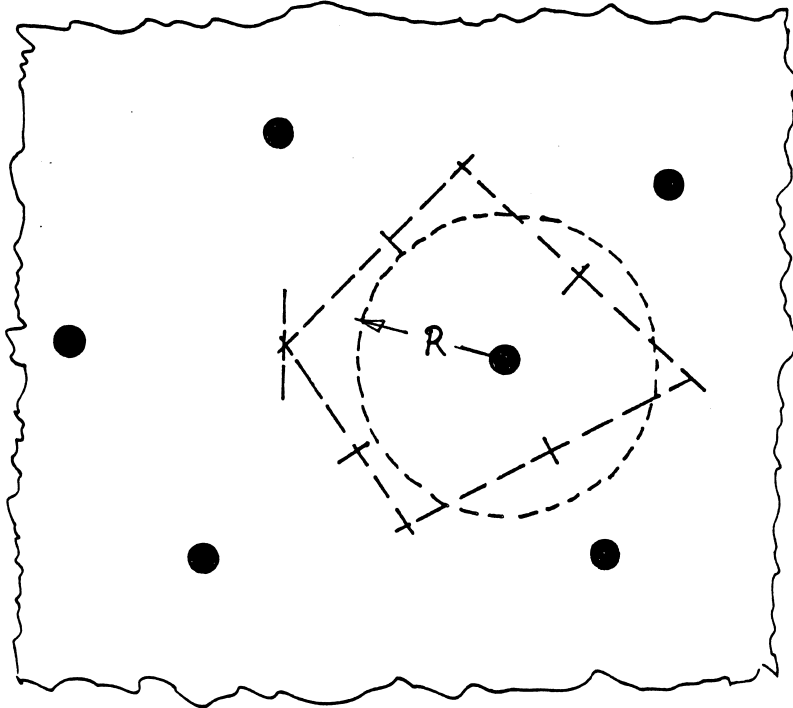
Andere onderzoekingen, met name boringen met daaraan gekoppelde, adequate bemonstering, geven wel veel detailinformatie, doch het zijn steeds steekmonsters (speldeprikken) op een beperkt aantal plaatsen. Bovendien geven verschillende onderzoeksmethoden vaak uiteenlopende resultaten (Den Blanken, 1979).

Op grond van het bovenstaande werd de vraag gesteld in hoeverre het mogelijk en verantwoord is, om uit pompproefmetingen toch meer over de continuïteit van slecht doorlatende lagen te zeggen. Hiertoe zal hierna eerst een vergelijking worden gemaakt tussen het "membraan" en de "gatenkaas" dat wil zeggen tussen een aaneengesloten beschermende, geologische laag met overal een zelfde weerstand,  $c$ , en een andere laag die volledig dicht is doch op regelmatige afstanden gaten bevat.

Vervolgens wordt nagegaan hoe snel een drukverandering door slecht doorlatende lagen heen in aangrenzende pakketten kan doordringen. Zou dit theoretisch slechts traag kunnen geschieden, maar zouden tijdens een pompproef toch snel verlagingen in aangrenzende lagen worden gemeten, dan is dit een belangrijke aanwijzing dat een bepaalde beschermende laag niet continu is.

4.2 Vergelijking van een geperforeerde laag met een homogene laag met constante weerstand

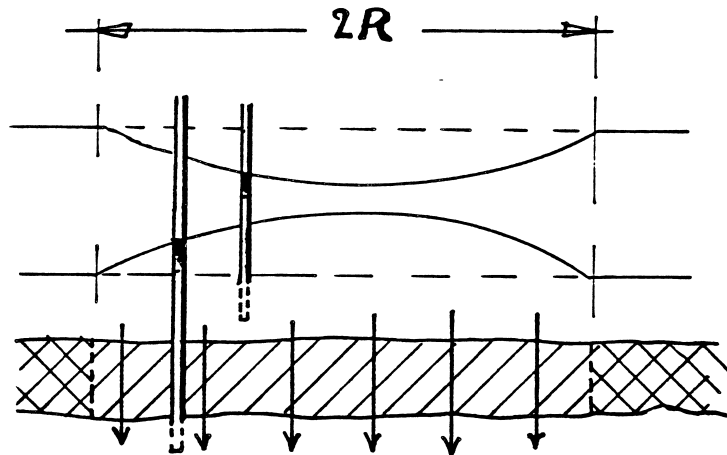
Een geheel waterdichte laag met gaten erin uit zich tijdens een pompproef op eenzelfde wijze als een uniforme slecht doorlatende laag met overal een zelfde weerstand tegen verticale waterstroming. In het geval dat de perforaties in de dichte laag gelijkmatig zijn verdeeld kan aan elke perforatie een gebiedje worden toegekend met oppervlak  $A$  en equivalente radius,  $R$ . De radius van de perforaties bedraagt  $r_0$  (figuur 20). Op grond van het superpositiebeginsel is het voldoende om uitsluitend zo'n deelgebiedje te beschouwen, geschematiseerd tot een cirkel met radius  $R$  en met in het midden een gat met radius  $r_0$ . In het geval van de uniforme slecht doorlatende laag beschouwen we een even groot ge-



Figuur 20 - Geperforeerde laag, deelgebiedje met equivalente radius,  $R$

biedje echter zonder gat erin maar met een uniforme weerstand  $c$ . Als randvoorwaarden worden gekozen een stijghoogte  $s = 0$  op de rand van het deelgebiedje in het bovenste pakket en  $s = s_0$  op dezelfde rand maar in het onderliggende pakket.

De stijghoogte in het midden van de kleilaag bedraagt bij benadering  $\Delta s_1/2$  en kan als uniforme randvoorwaarde voor zowel het bovenste als het onderste pakket worden gehanteerd (figuur 21).



Figuur 21 - Potentiaalverloop door het hart van een deelgebiedje met weerstand,  $c$ , terwijl de rest van de scheidingslaag ondoorlatend is

Het totale stijghoogteverval,  $\Delta s$  (m), bedraagt nu (zie Huisman, 1972, p. 101):

$$\Delta s = \frac{Q}{2\pi k_1 D_1} \cdot \frac{\lambda_1}{R} \cdot \frac{I_1}{I_0} \cdot \frac{(R/\lambda_1)}{(R/\lambda_1)} + \frac{Q}{2\pi k_2 D_2} \cdot \frac{\lambda_2}{R} \cdot \frac{I_1}{I_0} \cdot \frac{(R/\lambda_2)}{(R/\lambda_2)} \quad (23)$$

Hierin is:

$Q$  = de totale volumestroom die binnen het deelgebiedje met radius  $R$  door de slecht doorlatende laag zijgt ( $L^3/T$ )

$k_1 D_1$  = het doorlaatvermogen van het bovenste watervoerende pakket ( $L^2/T$ )

$$\lambda_1 = \sqrt{k_1 D_1 c/2}, \quad \lambda_2 = \sqrt{k_2 D_2 c/2} \quad (L) \quad (24)$$

$I_0$  = gemodificeerde Besselfunctie van de eerste soort en nulde orde (dimensieloos)

$I_1$  = idem, van de eerste soort en eerste orde (dimensieloos).

Voor het andere geval, de waterdichte laag met een gat in het midden geldt (figuur 22):

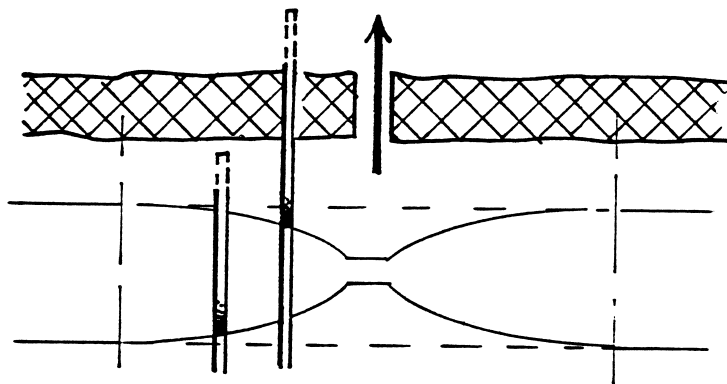
$$\Delta s = \frac{Q}{2\pi k_1 D_1} \cdot \ln \cdot \left( \frac{R}{r_0} \right) + \frac{Q}{\pi r_0^2} \cdot \frac{D_v}{k_v} + \frac{Q}{2\pi k_2 D_2} \cdot \ln \cdot \left( \frac{R}{r_0} \right) + \Delta_{pp} \quad (25)$$

$r_0$  = de radius van de perforatie (L)

$k_v$  = de verticale doorlatendheid van het materiaal in de perforatie (L/T)

$D_v$  = de dikte van de kleilaag ter plaatse van de perforatie (L)

$\Delta_{pp}$  = een extra term (pp = "partial penetration") die de verticale stromingscomponenten direct boven en onder de perforatie tot uiting brengt (L)



Figuur 22 - Potentiaalverloop door het hart van het deelgebiedje met een gat in het midden

$\Delta_{pp}$  is te benaderen door het gat vervangen te denken door een putfilter over de volle pakkethoogte met hetzelfde totale intrede oppervlak, dus

$$\pi r_o^2 = 2\pi r_{p_1} D_1 \text{ respectievelijk: } 2\pi r_{p_2} D_2 \quad (26)$$

Waarin:

- $r_o$  = gatradius
- $r_{p_1}$  = equivalente putfilterradius in het bovenpakket (dikte  $D_1$  (m))
- $r_{p_2}$  = equivalente putfilterradius in het onderpakket (dikte  $D_2$  (m))

Stellen we bij wijze van voorbeeld:

$c = 1000 \text{ d}$ ,  $k_1 D_1 = 1000 \text{ m}^2/\text{d}$ ,  $k_2 D_2 = 1000 \text{ m}^2/\text{d}$ , zodat  $\lambda_1 = \lambda_2 = 707 \text{ m}$  en  $R = 100 \text{ m}$ , dan volgt voor de uniforme weerstandbiedende laag:

$$\frac{\Delta s}{Q} = 2 \frac{1}{2\pi 1000} \cdot \frac{707}{100} \cdot \frac{I_o(100/707)}{I_1(100/707)} = 12,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{d})$$

Nemen we verder aan:

$$D_1 = 10 \text{ m}, k_v = 10 \text{ m}/\text{d} \text{ en } D_v = 10 \text{ m}/\text{d}$$

dan volgt:

$$\frac{\Delta s}{Q} = \frac{1}{2\pi 1000} \cdot \ln \left( \frac{100}{r_{p_1}} \right) + \frac{1}{2\pi 1000} \cdot \ln \left( \frac{100}{r_{p_2}} \right) + \frac{1}{\pi r_o^2} \cdot \frac{10}{10}$$

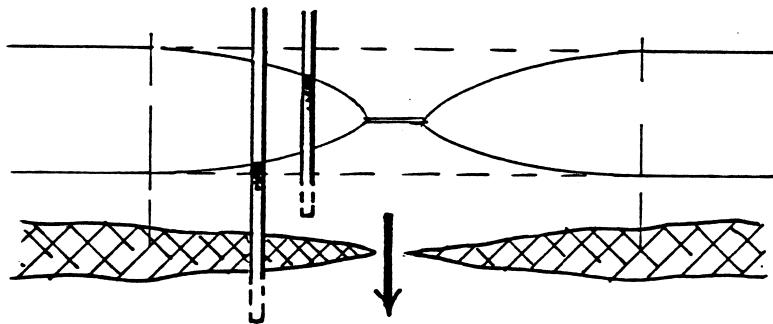
Waaruit de waarden volgen die hierna zijn getabelleerd:



| Radius van het gebied = 100 m |         |       |       |      |       |      |                                              |
|-------------------------------|---------|-------|-------|------|-------|------|----------------------------------------------|
| $r_o$                         | 0,33    | 1     | 3,3   | 5    | 5     | 10   | (m)                                          |
| $r_{P_1}$                     | 0,00545 | 0,05  | 0,545 | 1,25 | 1,25  | 5,0  | (m)                                          |
| $r_{P_2}$                     | 0,00054 | 0,005 | 0,054 | 0,25 | 0,125 | 0,5  | (m)                                          |
| $\frac{\Delta s}{Q}$          | 2930    | 321   | 31,3  | 12,7 | 14,5  | 4,50 | ( $10^{-3} \text{m}/(\text{m}^3/\text{d})$ ) |

In dit voorbeeld geeft een enkel gat met een radius van 5 m in een gebiedje met een radius van 100 m dezelfde overall weerstand als de aangenomen uniforme weerstand van 1000 dagen. Het gat beslaat echter slechts een oppervlak van  $2,5 \text{ }^0/_{00}$  van het totale oppervlak van het beschouwde gebiedje.

Veelal zullen lagen uitwiggan. In zulke gevallen is de laagdikte,  $D_v$ , ter plaatse van het gat gelijk aan nul (figuur 23). Met bovenstaande gegevens zou de equivalente gatdiameter nog ordes kleiner zijn.



Figuur 23 - Potentiaalbeeld door een deelgebiedje met gat dat wordt gevormd door een uitwiggende kleilaag

|              |           |      |      |      |      |      |      |      |                         |
|--------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------------|
| $r_o$        | $10^{-6}$ | 0,1  | 0,33 | 1    | 3,3  | 5    | 10   | 33   | (m)                     |
| $\Delta s/Q$ | 11,6      | 4,25 | 3,49 | 2,79 | 2,03 | 1,76 | 1,32 | 0,56 | (m)/(m <sup>3</sup> /d) |

Uit bovenstaande berekeningen blijkt dat gaten in een kleilaag een grote vermindering van de overall-weerstand tot gevolg kunnen hebben.

#### 4.3 Onderscheidbaarheid van geperforeerde en homogene lagen met behulp van pompproeven

##### 4.3.1 Algemeen

Klei en veen hebben dikwijls een dusdanig kleine doorlatendheidscoëfficiënt, dat spannings- of stijghoogteveranderingen zich slechts vertraagd daarin kunnen uitbreiden. Bij spanningsverandering ontstaat in de slechtdoorlatende laag een proces van consolidatie, een in het algemeen traag proces waarbij, behalve genoemde doorlatendheid van de slecht doorlatende laag, de samendrukbaarheid van het korrelskelet een centrale rol speelt. Hoe groter deze is, hoe trager de druk- of stijghoogteveranderingen doorwerken.

Het is denkbaar dat de traagheid van dit consolidatieproces een aanknopingspunt biedt om conclusies te trekken ten aanzien van het al dan niet geperforeerd zijn van beschermende, geologische lagen. Het zal echter blijken dat dit, op grond van pompproefcijfers alleen, in zijn algemeenheid een onmogelijke zaak is.

##### 4.3.2 Uitgangspunten en het consolidatieproces

Onder de aanname dat de doorlatendheid als constant mag worden beschouwd en dat het verband tussen sa-

mendrukking van het korrelskelet en druk- of stijghoogteveranderingen lineair is, geldt de volgende waterbalans voor een klein elementje van de homogeen beschouwde slecht doorlatende laag (figuur 24).

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} dV dt + \frac{\partial q_y}{\partial y} dV dt + \frac{\partial q_z}{\partial z} dV dt + \frac{\partial (V/dV)}{\partial t} dV dt = 0 \quad (27)$$

waarin  $dV = dx dy dz$  en  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$  de fluxen in de respectievelijke richtingen.

Aan bovengenoemde voorwaarden van constante doorlatendheid en lineaire samendrukbaarheid wordt bij pompproeven in redelijkheid voldaan op grond van hun korte duur (aantal weken) en de geringe drukveranderingen die daarbij teweeg worden gebracht ten opzichte van de heersende drukken. Aan

de eisen van homogeniteit zal als regel niet worden voldaan. Op grond hiervan kan het drukverloop in een slecht doorlatende laag aanzienlijk afwijken van het hierna uit te werken theoretische verloop. Dit theoretische verloop zal derhalve uitsluitend betrouwbaarheid hebben voor zover het overall-beeld wordt beschouwd. Voor detaillering van de druk op elke tijd en plaats in een slecht

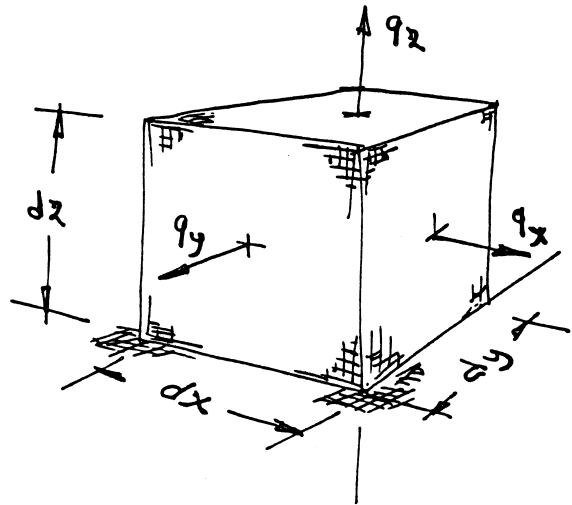


Fig. 24 Elementair elementje,  $dV$ , van de slecht doorlatende laag

Ervan uitgaande dat de horizontale afmetingen van de slecht doorlatende lagen en de opgewekte drukveranderingen beduidend groter zijn dan de verticale en dat de verticaal een hoofdrichting is van de doorlatendheidstensor, kan de voortplanting van een druk- of stijghoogteverandering door een slecht doorlatende laag vereenvoudigd worden beschreven volgens de theorie van Terzaghi voor ééndimensionale, verticale consolidatie. Er geldt daarin dat  $q_x \approx 0$  en  $q_y \approx 0$  zodat (27) reduceert tot onderstaand verband tussen stroming en volumeverandering.

$$\frac{\partial q_z}{\partial z} + \frac{(\partial V/dV)}{\partial t} = 0 \quad (28)$$

Met de lineaire, elastische, samendrukbaarheid (Terzaghi):

$$\frac{\partial V}{dV} = S \partial \phi \quad (29)$$

en de wet van Darcy:

$$q_z = - k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (30)$$

resteert de differentiaalvergelijking voor ééndimensionale consolidatie:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{S}{k_z} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (31)$$

waarin  $\phi$  de opgewekte stijghoogteverandering (L) ( $\phi = \frac{p}{\rho g}$  met  $p$  de drukverandering ( $F/L^2$ ),  $\rho$  de dichtheid van het water ( $M/L^3$ ) en  $g$  de sterkte van het zwaartekrachtsveld ( $F/M$ ))  $S$  de specifieke samendrukbaarheidscoëfficiënt van de beschouwde laag ( $L^{-1}$ ) en  $k_z$  de verticale doorlatendheidscoëfficiënt van de klei- of veenlaag ( $L/T$ ).

#### 4.3.3 Oplossing van de differentiaalvergelijking

Vergelijking (31) is de bekende diffusievergelijking die in veel vakgebieden opduikt. De diffusievergelijking is dan ook opgelost voor uiteenlopende randvoorwaarden. In de geohydrologie is het deze vergelijking die de ééndimensionale, instationaire grondwaterstroming beschrijft in een half oneindig uitgestrekte strook land. Vier oplossingen staan bekend als de vier gevallen van Edelman (Huisman, 1972); zij zijn hier direct toepasbaar.

De kenmerkende situatie in de onderhavige problematiek is die van een slecht doorlatende laag (verder kleilaag genoemd) met een beperkte dikte,  $H$ , waarbij de stijghoogte aan één zijde plotseling met een bepaalde waarde verandert, maar die aan de andere kant van de kleilaag gefixeerd blijft. De analytische oplossing van deze situatie wordt verkregen uit die voor een oneindig dik pakket (Edelman, figuur 25).

$$\phi = \phi_0 \operatorname{erfc}(u);$$

$$u^2 = \frac{Sz^2}{4k_z t} \quad (32)$$

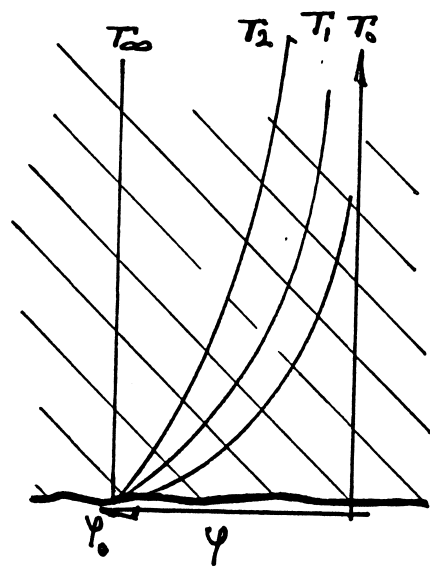


Fig. 25 Instationair stijghoogte- of potentiaalverloop in zeer dikke kleilaag, na plotselinge potentiaalverandering,  $\phi_0$  aan de onderzijde (oplossing van Edelman)



Bij de onderhavige studie van de snelheid waarmee een stijghoogteverandering naar aangrenzende pakketten doorwerkt is slechts de mate,  $q^*$ , van belang waarin  $q_0$  op elk moment  $q_\infty$  benadert:

$$q^* = \frac{q_0}{q_\infty} = \frac{D}{\phi_0} \left( \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right)_{\xi=0} \quad (38)$$

Daar

$$\frac{\partial \text{erf}(u)}{\partial u} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} \quad (39)$$

en vervolgens

$$\frac{\partial u_{n,+}}{\partial \xi} = \sqrt{\left(\frac{S}{4kt}\right)} \frac{d}{d\xi} \{(2n-1)D+\xi\} = \sqrt{\frac{S}{4kt}} \quad (40a)$$

en

$$\frac{\partial u_{n,-}}{\partial \xi} = \sqrt{\left(\frac{S}{4kt}\right)} \frac{d}{d\xi} \{2n-1)D-\xi\} = - \sqrt{\frac{S}{4kt}} \quad (40b)$$

volgt met  $\xi = 0$

$$q^* = \frac{4D}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\left(\frac{S}{4kt}\right)} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-u^2); \quad u = (2n-1) \sqrt{\frac{D^2 S}{4kt}} \quad (41)$$

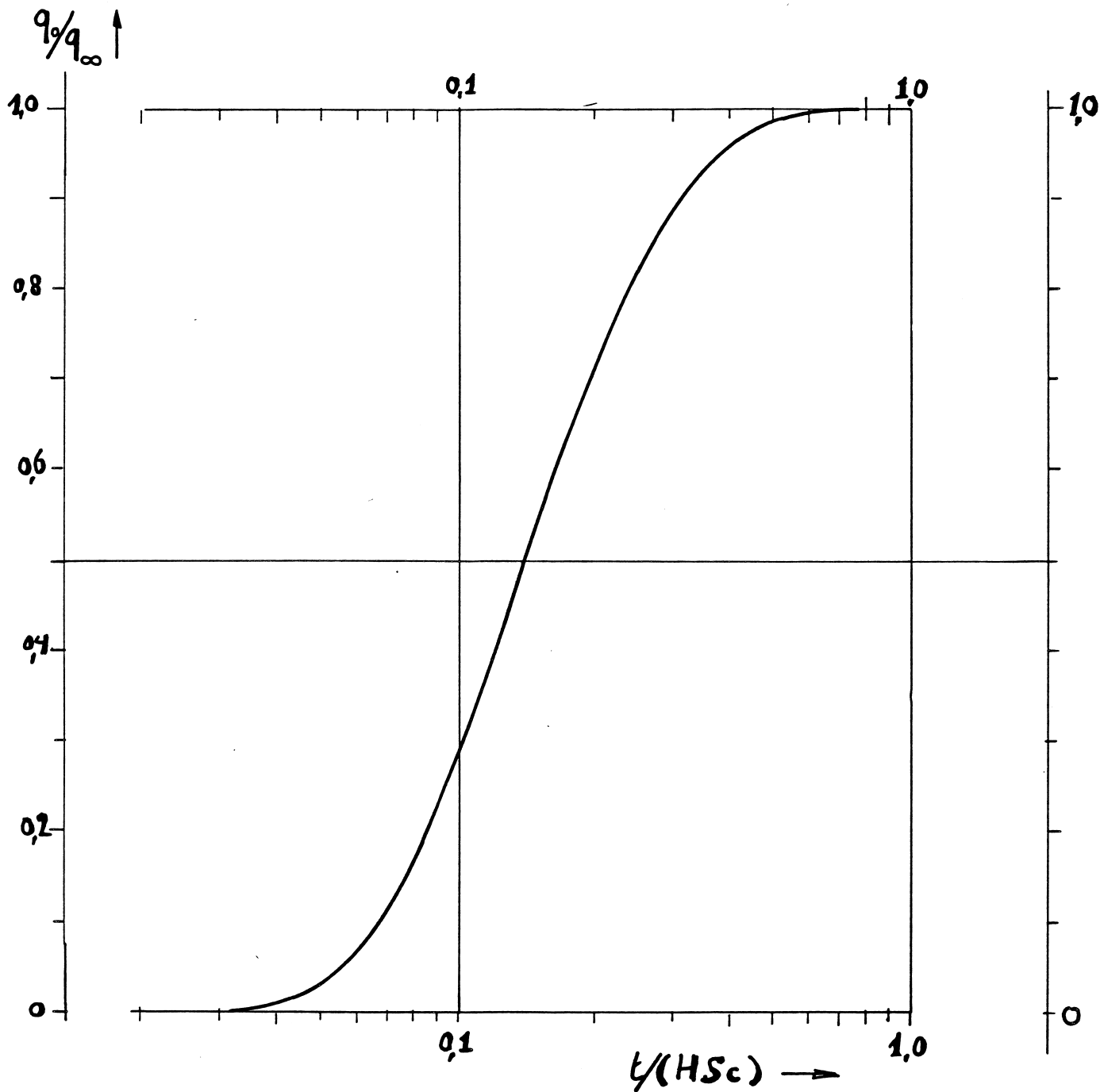
of, met

$$\alpha = D^2 S / (4kt) = DSc / (4t) \quad (42)$$

(In vergelijking (42) is  $c$  de totale weerstand van de kleilaag volgens  $c = D/k$ .)

volgt uiteindelijk:

$$q^* = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{(\alpha)} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \{ - (2n-1)^2 / \alpha \} \quad (43)$$



Figuur 29 - Relatieve stroomsterkte  $q_0/q_\infty$  (de mate waarin de potentiaalverandering aan de andere kant van de kleilaag wordt gevoeld) als functie van de (dimensieloos gemaakte) tijd,  $t/(HSc)$



Uit vergelijking 43 blijkt dat  $q^*$  uitsluitend van  $\alpha$  afhangt en zodoende eenvoudig in een enkelvoudige grafiek (figuur 29) of tabel (zie hieronder) kan worden vastgelegd.

|                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t/HSc$        | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,20 |
| $q_0/q_\infty$ | 0,01 | 0,03 | 0,07 | 0,12 | 0,18 | 0,23 | 0,29 | 0,41 | 0,51 | 0,59 | 0,66 | 0,72 |
| $t/HSc$        | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,0  |
| $q_0/q_\infty$ | 0,72 | 0,83 | 0,90 | 0,94 | 0,96 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

#### 4.3.4 Schatting van de reactietijd van het systeem

Met behulp van de hiervoor berekende getallen kan een eerste schatting worden gemaakt van de tijd waarin een aangrenzend pakket op een pompproef zal kunnen reageren. Stel bijvoorbeeld  $c = 1000$  d bij  $H = 10$  m en  $S = 10^{-5}/m$  (zandige klei, met een samendrukbaarheid als van zand) dan:

$$t/(HSc) = 10 \text{ t}$$

Uit figuur 28 blijkt nu dat  $q_0$  80 % van zijn uiteindelijke waarde bereikt voor  $t/(HSc) = 0,24$ . Dat wil met deze waarde zeggen  $10 \text{ t} = 0,24$  of  $t = 0,024$  dagen ofwel iets minder dan een half uur. Zelfs indien de samendrukkingscoëfficiënt 100 keer zo groot zou zijn, zou deze tijd met 2,4 dagen nog gering genoemd moeten worden.

#### 4.3.5 Conclusies

Om op grond van een pompproef te kunnen besluiten of een scheidende laag gaten bevat danwel een gelijkmatige weerstand heeft, is het nodig dat tij-

dens de pompproef de stijghoogte in aangrenzende pakketten beduidend sneller reageert op de pompproef, dan op grond van de bovenstaande consolidatietheorie mag worden verwacht. Aangezien niet a priori kan worden gesteld dat de samendrukkingscoëfficiënt,  $S$ , van de scheidende lagen belangrijk groter is dan van zand (immers, scheidende lagen kunnen ook veel zand bevatten of door de eeuwen heen sterk gecompriëerd zijn) dan wel de doorlatendheid beduidend kleiner dan  $H/c$ , kunnen potentiaalveranderingen, ondanks het consolidatieproces, in zeer korte tijd aan aangrenzende pakketten worden doorgegeven. Bedoelde conclusies ten aanzien van aaneengeslotenheid van scheidende lagen zullen in de praktijk dus niet of nauwelijks mogelijk zijn op grond van pompproeven alleen. Ook op grond van andere proeven, met name grondmechanische laboratoriumbepalingen, zijn wat dit betreft, gezien het steekproefkarakter ervan, nauwelijks conclusies mogelijk. Het meest belovend zijn in dit opzicht geochemische onderzoeken waaronder tracerproeven en isotopenonderzoek. Bij processen of ingrepen die nog moeten plaatsvinden zal zulk onderzoek veel tijd in beslag kunnen nemen, daar aangetoond moet worden dat de tracers beduidend sneller dan verwacht het diepe, beschermde pakket blijken te kunnen binnendringen. Pompproeven echter, zullen deze vraag niet of zelden met zekerheid kunnen beantwoorden. Toch zullen gaten indien zij voorkomen een grote invloed op de "overall" weerstand van kleilagen hebben. Dat kleilagen op veel plaatsen onderbroken zijn staat wel vast;  $c$ -waarden uit pompproeven verschillen nogal eens van waarden die op grond van boorstaten te verwachten zijn terwijl voorts geologische profielen dikwijls een zeer grillig beeld vertonen wat betreft het voorkomen, de aan-

eensluiting en de dikte van kleilagen (ook als boringen, zoals op een puttenveld, dicht opeenstaan). Bovendien worden vaak weerstandwaarden gevonden die niet in verhouding staan tot de dikte van de slecht doorlatende lagen, die in de betreffende boring werden aangetroffen.

In kwantitatief opzicht telt slechts de gemeten "macroweerstand". Het maakt daarbij geen verschil of deze het gevolg is van "semipermeabiliteit" van een afdekkende laag of van "perforaties" daarin. Wanneer echter het gedrag en het transport van verontreinigingen het onderwerp van studie zijn, is dit onderscheid echter wel belangrijk. Bij een "gatenkaas" kan de verontreiniging vele malen sneller een beschermende laag passeren, dan men op grond van theoretische berekeningen - waaraan het semi-permeable membraan ten grondslag ligt - had verwacht.



## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In het overzicht van de catagoriën verstoringen, hoofdstuk 2, zijn tevens kanttekeningen geplaatst bij de grootte van de potentiële gevaren. Een van de zaken die veelal worden gememoreerd, namelijk lekkage langs de stijgbuis, blijkt in kwantitatief opzicht in de praktijk slechts een ondergeschikte rol te kunnen spelen, evenals effecten van doorheiling van kleilagen. Het is aannemelijk dat dit doorgaans ook in kwalitatief opzicht zo zal zijn. Bij waterwinputten lijkt een adequate bescherming van de directe omgeving van de putten afdoende om gevaar van deze kant te vermijden.

Bij grotere, civiel-technische werken is vooral de latere afwerking en herstel/aanvulling van het gegraven gat bepalend voor het verontreinigingsgevaar.

Een ander gevaar schuilt in oude, verlaten maar slecht afgedichte putten en putten die ter weerszijden van de beschermende laag een filter hebben en zo kortsluiting veroorzaken. Volstorten met puin, zoals nogal eens blijkt te gebeuren, is volstrekt onafdoende. Het hiervoor gebruikte materiaal dient in elk geval zo goed als ondoorlatend te zijn (klei, cement).

De consequenties van lekkende of spuitende olie-, gaswin- en exploratieboringen behoeven geen betoog. Hetzelfde geldt voor lekkende afval-injectieputten. Hier dienen preventieve maatregelen de grootste nadruk te krijgen.

Waar watervoerende pakketten verontreinigd worden

of kunnen worden speelt de snelheid waarmee het grondwater stroomt en daarmee reis- en verblijftijden van het grondwater een belangrijke rol. Deze immers bepalen in welke mate en hoe snel verontreinigingen zich ondergronds kunnen verspreiden.

Met de gegeven tabellen en grafieken kan, in principe, snel worden geschat hoe groot de reistijd is van water vanaf een gekozen punt tot aan een grondwateronttrekking (of een ander gekozen punt), zowel voor als nadat een beschermende geologische laag is doorgraven. De tabellen en de werkwijze hiertoe zijn eenvoudig, doch de voorwaarden waaronder zij gelden zijn stringent. In het algemeen dient sprake te zijn van afgesloten grondwater in een watervoe-rend pakket dat door een homogene slecht doorlatende laag, de beschermende geologische laag, wordt afgedekt. Boven deze laag dient de grondwaterstijg-hoogte op peil te blijven en gelijk te zijn aan die onder de scheidende laag indien deze intact zou zijn en indien geen onttrekking zou plaatsvinden. Natuurlijke grondwaterstroming, de basis-grondwaterstroming, dient eveneens afwezig te zijn. Van-zelfsprekend dienen de noodzakelijke bodemconstan-ten,  $k_D$ ,  $c$  en  $n_e$  voldoende bekend te zijn. Zonder dat aan bovenstaande voorwaarden in voldoende mate wordt voldaan, is normaliter geen zinvol gebruik van de gegeven tabellen en grafieken mogelijk. In het algemeen zullen dan computerberekeningen noodzakelijk zijn en vaak zal nog hydrologisch veldonderzoek moeten worden uitgevoerd.

Indien wel in voldoende mate aan de gestelde voor-waarden wordt voldaan, is de methode efficiënt en zeer eenvoudig toe te passen. Met name voor eerste schattingen van mogelijke consequenties is hij nuttig en algemeen.

De paragraaf "Worst Case Analysis", paragraaf 3.3.3, geeft aan welke factoren een belangrijke invloed op het resultaat kunnen hebben. Het is nuttig deze steeds goed in gedachten te houden. Zij kunnen ook als handleiding dienen voor de planning van eventueel nader onderzoek.

Veelal wordt de vraag gesteld, in hoeverre slecht doorlatende, beschermende geologische lagen als aaneengesloten membraan dan wel als geperforeerde plaat ("gatenkaas") moeten worden beschouwd. Dit immers bepaalt voor een aanzienlijk deel de beschermende eigenschappen van zo'n laag. Het blijkt echter, dat deze vraag niet op grond van een pomp-proef beantwoord kan worden, tenzij, wellicht, in uitzonderingsgevallen. Alternatieven om hier toch achter te komen zijn zonder uitzondering extreem kostbaar en tijdrovend en vaak zelfs ongeschikt. Dit geldt met name ook voor laboratoriumproeven op kleimonsters, afkomstig uit een of enkele boringen in het betreffende gebied. Toch hebben "gaten" in slecht doorlatende, beschermende lagen veelal een grote invloed op de "overall" weerstand en maken zij kortsluiting naar diepere lagen in zeer korte tijd mogelijk. Hierbij komt dat op veel plaatsen het voorkomen van "zwakke plekken" in slecht doorlatende lagen nagenoeg zeker is. Het is in de praktijk derhalve in veel gevallen een hachelijke zaak teveel absolute waarde toe te kennen aan het vermogen van afdekkende, beschermende geologische lagen om watervoerende pakketten voor verontreinigingen te behoeden.





LITERATUUR

1. Akker, C. v.d.; Toelichting bij het computer-programma FLOP-1.  
RID-mededeling 75-3, RID, Leidschendam 1975.
2. Akker, C. v.d.; Numerical analysis of the stream function in plane groundwater flow.  
Thesis, TH-Delft, Delft, 15 juni 1982.
3. Blanken, M.G.M den; De beschermende werking van afdekkende lagen voor de grondwaterkwaliteit.  
H<sub>2</sub>O 12(1979)23, pp. 514-517
4. Brandes, M.C. en T.N. Olsthoorn. Bijlage 8A: Globale berekening van het totale onttrekkings-debiet en infiltratiedebiet.  
In: Brandes e.a., Retourbemaling. KIVI-rapport, en Haag, 1978
5. Commissie Bescherming Waterwingebieden; Richtlijnen en aanbevelingen voor de bescherming van waterwingebieden. VEWIN, Rijswijk en RID, Leidschendam, 1980
6. Huisman, L. Groundwater, Recovery.  
Macmillan, London and Basingstoke, 1972, 336 pp
7. Huisman, L. and T.N. Olsthoorn, Artificial Groundwater Recharge.  
Pitman Books Ltd, London etc., 1983, 310 pp
8. Jonge, H.G. de; Onderzoek naar de invloed van inhomogeniteit op de verblijftijden van het grondwater. KIWA, SWO-326 (Rapport in opdracht

van het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, hoofdafdeling Bodem) Rijswijk, 1981.

9. Le Blanc, R.J. Distribution and Continuity of Sandstone.  
Reservoirs.  
Part I: Journ. of Petr. Techn. July 1977,  
pp. 776-792  
Part I: Journ. of Petr. Techn. July 1977,  
pp. 793-804
10. Olsthoorn, T.N.; Anisotropie, een verwaarloosd verschijnsel bij grondwatervraagstukken, H<sub>2</sub>O 15(1982)11, pp. 262-267, 273
11. Olsthoorn, T.N.; Berekening van verblijftijden van grondwater, H<sub>2</sub>O 15(1982)4, pp. 59-61
12. Sneider R.M.; C.N. Tinker; L.D. Meckel: Deltic Environment Reservoir Types and Their Characteristics. Journ. of Petr. Techn. Nov. 1978, pp. 1538-1546
13. Terzaghi, K.; Theoretical Soil Mechanics, Wiley, New York, 1973, 510 pp.

## BIJLAGE 1

### INHOUD

Tabel 1 Relatief infiltratiedebiet

Tabel 2 "Nultijden"; resttijd zonder infiltratie

Tabel 3 Genormaliseerde verblijftijden (6 bladen)

Tabel 4 Relatieve verblijftijden (relatief ten opzichte van de situatie zonder infiltraite, 6 bladen)



| DIAMETER/LAMBDA = | .001    | .003    | .010    | .030    | .100    | .300    |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| AFSTAND/LAMBDA    |         |         |         |         |         |         |
| .400              | 144.428 | 168.403 | 205.850 | 258.236 | 357.882 | 549.022 |
| .600              | 100.757 | 117.482 | 143.606 | 180.151 | 249.667 | 383.011 |
| .800              | 73.262  | 85.423  | 104.418 | 130.991 | 181.536 | 278.492 |
| 1.000             | 54.559  | 63.616  | 77.762  | 97.551  | 135.194 | 207.398 |
| 1.200             | 41.274  | 48.126  | 58.827  | 73.798  | 102.275 | 156.898 |
| 1.400             | 31.574  | 36.816  | 45.002  | 56.455  | 78.239  | 120.025 |
| 1.600             | 24.356  | 28.400  | 34.715  | 43.549  | 60.353  | 92.587  |
| 1.800             | 18.911  | 22.050  | 26.953  | 33.812  | 46.859  | 71.886  |
| 2.000             | 14.759  | 17.209  | 21.036  | 26.389  | 36.572  | 56.105  |
| 2.200             | 11.568  | 13.488  | 16.488  | 20.684  | 28.665  | 43.974  |
| 2.400             | 9.099   | 10.610  | 12.969  | 16.269  | 22.547  | 34.589  |
| 2.600             | 7.179   | 8.371   | 10.232  | 12.836  | 17.789  | 27.289  |
| 2.800             | 5.678   | 6.621   | 8.093   | 10.153  | 14.071  | 21.586  |
| 3.000             | 4.502   | 5.249   | 6.416   | 8.049   | 11.155  | 17.113  |
| 3.200             | 3.576   | 4.170   | 5.097   | 6.394   | 8.861   | 13.593  |
| 3.400             | 2.845   | 3.318   | 4.056   | 5.088   | 7.051   | 10.817  |
| 3.600             | 2.268   | 2.644   | 3.232   | 4.055   | 5.619   | 8.620   |
| 3.800             | 1.810   | 2.110   | 2.579   | 3.236   | 4.485   | 6.880   |
| 4.000             | 1.446   | 1.686   | 2.061   | 2.586   | 3.583   | 5.497   |
| 4.200             | 1.157   | 1.349   | 1.649   | 2.068   | 2.867   | 4.398   |
| 4.400             | .926    | 1.080   | 1.320   | 1.656   | 2.296   | 3.522   |
| 4.600             | .743    | .866    | 1.058   | 1.328   | 1.840   | 2.823   |
| 4.800             | .596    | .695    | .849    | 1.065   | 1.476   | 2.265   |
| 5.000             | .478    | .558    | .682    | .855    | 1.185   | 1.818   |

$$\lambda = \sqrt{(kDc)}$$

Tabel 1 - Het infiltratiedebiet (infiltratievolumestroom) via een gat vanuit een aangrenzend pakket met constante stijghoogte als functie van de afstand tot de onttrekking bij een onttrekkingsdebiets van 1000 eenheden ( $L^3/T$ ).

De cijfers gelden voor de stationaire situatie:

- zonder natuurlijke of basisstroming
- zonder natuurlijk stijghoogteverschil tussen beide pakketten
- constant gehouden stijghoogte in het aangrenzende pakket
- homogeen, isotroop watervoerend pakket op een ondoorlatende basis en afgedekt door een semipermeabele laag met constante, uniforme weerstand  $c$  (T)

## AFSTAND/LAMBDA

|       |         |
|-------|---------|
| .400  | .086    |
| .600  | .207    |
| .800  | .398    |
| 1.000 | .677    |
| 1.200 | 1.070   |
| 1.400 | 1.605   |
| 1.600 | 2.327   |
| 1.800 | 3.283   |
| 2.000 | 4.537   |
| 2.200 | 6.168   |
| 2.400 | 8.350   |
| 2.600 | 11.066  |
| 2.800 | 14.540  |
| 3.000 | 18.967  |
| 3.200 | 24.591  |
| 3.400 | 31.614  |
| 3.600 | 40.617  |
| 3.800 | 51.973  |
| 4.000 | 66.274  |
| 4.200 | 84.250  |
| 4.400 | 106.814 |
| 4.600 | 135.097 |
| 4.800 | 170.504 |
| 5.000 | 214.929 |

$$\lambda = \sqrt{(kDc)}$$

Tabel 2 - Reistijden tot aan de onttrekking vóór de realisatie van de doorsnijding, voor  $Q = 1000 \text{ (L}^3/\text{T)}$ , als functie van de relatieve afstand tot de onttrekking. De reistijden zijn uitgedrukt in het dimensieloze getal  $t_*$  volgens formule (14):

$$t = \frac{\lambda}{v_*} t_* = \left( \frac{2\pi\lambda n_e D}{Q_0} \right) \lambda t_*$$

Voorbeeld:

$\lambda = 1000 \text{ m}$ ,  $n_e = 1/3$ ,  $D = 30 \text{ m}$   
 $Q_0 = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  en een afstand  $L$  van  
 1200 m tot de onttrekking  
 $L/\lambda = 1,2$  zodat  $t_* = 1,070$

$$v_* = \frac{Q_0}{2\pi\lambda n_e D} = \frac{5 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 1000 \cdot \frac{1}{3} \cdot 30} = 79,6 \text{ m/a}$$

$$t = \frac{1000}{79,6} \cdot 1,07 = 13,5 \text{ jaar}$$

## DIAMETER .001 LAMBDA

| STROOMLIJN =   | 0       | 10      | 25      | 50      | 75      | 90      |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| AFSTAND/LAMBDA |         |         |         |         |         |         |
| .400           | .056    | .056    | .058    | .067    | .091    | .130    |
| .600           | .143    | .144    | .148    | .165    | .209    | .282    |
| .800           | .286    | .287    | .294    | .322    | .394    | .512    |
| 1.000          | .500    | .502    | .513    | .556    | .664    | .840    |
| 1.200          | .808    | .810    | .826    | .888    | 1.044   | 1.294   |
| 1.400          | 1.225   | 1.231   | 1.253   | 1.348   | 1.579   | 1.929   |
| 1.600          | 1.803   | 1.808   | 1.840   | 1.966   | 2.275   | 2.756   |
| 1.800          | 2.571   | 2.579   | 2.621   | 2.791   | 3.202   | 3.840   |
| 2.000          | 3.585   | 3.595   | 3.649   | 3.875   | 4.412   | 5.253   |
| 2.200          | 4.909   | 4.922   | 4.993   | 5.286   | 5.991   | 7.090   |
| 2.400          | 6.669   | 6.687   | 6.788   | 7.201   | 8.183   | 9.677   |
| 2.600          | 8.885   | 8.910   | 9.039   | 9.564   | 10.818  | 12.734  |
| 2.800          | 11.726  | 11.755  | 11.924  | 12.593  | 14.196  | 16.649  |
| 3.000          | 15.355  | 15.394  | 15.602  | 16.458  | 18.496  | 21.622  |
| 3.200          | 19.972  | 20.022  | 20.286  | 21.370  | 23.956  | 27.925  |
| 3.400          | 25.767  | 25.826  | 26.151  | 27.593  | 30.671  | 35.533  |
| 3.600          | 33.177  | 33.251  | 33.662  | 35.468  | 39.381  | 45.556  |
| 3.800          | 42.533  | 42.628  | 43.146  | 45.405  | 50.366  | 58.191  |
| 4.000          | 54.326  | 54.443  | 55.097  | 57.921  | 64.194  | 74.086  |
| 4.200          | 69.159  | 69.307  | 70.130  | 73.658  | 81.577  | 94.054  |
| 4.400          | 87.790  | 87.977  | 89.009  | 93.412  | 103.388 | 119.103 |
| 4.600          | 111.156 | 111.390 | 112.685 | 118.178 | 130.723 | 150.480 |
| 4.800          | 140.423 | 140.718 | 142.339 | 149.187 | 164.944 | 189.744 |
| 5.000          | 177.038 | 177.408 | 179.435 | 187.968 | 207.726 | 238.822 |

$$\lambda = \sqrt{(kDc)}$$

Tabel 3.1 - Reistijden vanaf de rand van het gat tot aan de onttrekking. De reistijden zijn uitgedrukt als in tabel 2 en de voorwaarden genoemd onder tabel 1 zijn hier ook van toepassing. Ten gevolge van de infiltratie door het gat is de reistijd nu tevens een functie van de stroomlijn. De "nul procent stroomlijn" is de kortste, de 100 % de langste; deze heeft een oneindig lange reistijd. De betekenis van de stroomlijnen (percentages) is als volgt: voor de 25 % lijn geldt dat 25 % van het water dat via het gat infiltreert een verblijftijd heeft die korter is dan aangegeven. Voor de andere percentages geldt, mutatis mutandis, hetzelfde.

## DIAMETER .003 LAMBDA

| STROOMLIJN =   | 0       | 10      | 25      | 50      | 75      | 90      |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| AFSTAND/LAMBDA |         |         |         |         |         |         |
| .400           | .054    | .054    | .057    | .067    | .095    | .143    |
| .600           | .138    | .139    | .144    | .164    | .216    | .305    |
| .800           | .277    | .278    | .286    | .319    | .404    | .546    |
| 1.000          | .486    | .489    | .501    | .551    | .677    | .889    |
| 1.200          | .786    | .790    | .807    | .879    | 1.061   | 1.362   |
| 1.400          | 1.197   | 1.201   | 1.227   | 1.336   | 1.600   | 2.024   |
| 1.600          | 1.760   | 1.767   | 1.802   | 1.948   | 2.308   | 2.878   |
| 1.800          | 2.514   | 2.522   | 2.569   | 2.765   | 3.244   | 3.999   |
| 2.000          | 3.507   | 3.519   | 3.581   | 3.836   | 4.464   | 5.463   |
| 2.200          | 4.805   | 4.820   | 4.902   | 5.237   | 6.057   | 7.366   |
| 2.400          | 6.531   | 6.552   | 6.666   | 7.138   | 8.269   | 10.040  |
| 2.600          | 8.706   | 8.733   | 8.881   | 9.480   | 10.933  | 13.212  |
| 2.800          | 11.495  | 11.531  | 11.717  | 12.484  | 14.342  | 17.249  |
| 3.000          | 15.057  | 15.100  | 15.340  | 16.317  | 18.676  | 22.382  |
| 3.200          | 19.589  | 19.646  | 19.948  | 21.182  | 24.180  | 28.884  |
| 3.400          | 25.281  | 25.348  | 25.717  | 27.356  | 30.939  | 36.720  |
| 3.600          | 32.558  | 32.642  | 33.110  | 35.164  | 39.718  | 47.055  |
| 3.800          | 41.748  | 41.854  | 42.445  | 45.014  | 50.785  | 60.080  |
| 4.000          | 53.330  | 53.464  | 54.208  | 57.424  | 64.716  | 76.461  |
| 4.200          | 67.901  | 68.070  | 69.007  | 73.028  | 82.232  | 97.037  |
| 4.400          | 86.203  | 86.416  | 87.592  | 92.611  | 104.201 | 122.845 |
| 4.600          | 109.158 | 109.426 | 110.900 | 117.167 | 131.732 | 155.166 |
| 4.800          | 137.913 | 138.249 | 140.097 | 147.911 | 166.211 | 195.608 |
| 5.000          | 173.888 | 174.309 | 176.620 | 186.360 | 209.294 | 246.154 |

$$\lambda = \sqrt{(kDc)}$$

Tabel 3.2 - Als de tabel op de vorige bladzijde (tabel 3.1), met dien verstande dat de equivalente gatdiameter hier 0,003  $\lambda$  bedraagt in plaats van 0,001  $\lambda$ .



## DIAMETER .010 LAMBDA

| STROOMLIJN =   | 0       | 10      | 25      | 50      | 75      | 90      |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| AFSTAND/LAMBDA |         |         |         |         |         |         |
| .400           | .051    | .051    | .054    | .067    | .103    | .169    |
| .600           | .131    | .133    | .138    | .163    | .229    | .347    |
| .800           | .265    | .267    | .276    | .317    | .423    | .609    |
| 1.000          | .467    | .470    | .484    | .546    | .704    | .978    |
| 1.200          | .757    | .761    | .782    | .871    | 1.097   | 1.486   |
| 1.400          | 1.154   | 1.160   | 1.191   | 1.322   | 1.651   | 2.192   |
| 1.600          | 1.701   | 1.709   | 1.752   | 1.930   | 2.373   | 3.097   |
| 1.800          | 2.433   | 2.444   | 2.501   | 2.735   | 3.322   | 4.287   |
| 2.000          | 3.398   | 3.412   | 3.488   | 3.798   | 4.570   | 5.842   |
| 2.200          | 4.662   | 4.680   | 4.778   | 5.184   | 6.187   | 7.852   |
| 2.400          | 6.341   | 6.365   | 6.503   | 7.067   | 8.455   | 10.697  |
| 2.600          | 8.456   | 8.490   | 8.666   | 9.389   | 11.168  | 14.041  |
| 2.800          | 11.175  | 11.214  | 11.441  | 12.364  | 14.630  | 18.300  |
| 3.000          | 14.644  | 14.696  | 14.981  | 16.153  | 19.041  | 23.712  |
| 3.200          | 19.059  | 19.126  | 19.489  | 20.975  | 24.638  | 30.568  |
| 3.400          | 24.607  | 24.687  | 25.130  | 27.086  | 31.485  | 38.810  |
| 3.600          | 31.698  | 31.800  | 32.363  | 34.815  | 40.410  | 49.688  |
| 3.800          | 40.657  | 40.785  | 41.494  | 44.573  | 51.645  | 63.395  |
| 4.000          | 51.948  | 52.110  | 53.003  | 56.854  | 65.787  | 80.633  |
| 4.200          | 66.155  | 66.359  | 67.484  | 72.299  | 83.582  | 102.266 |
| 4.400          | 84.001  | 84.258  | 85.670  | 91.692  | 105.877 | 129.402 |
| 4.600          | 106.387 | 106.710 | 108.478 | 115.994 | 133.815 | 163.383 |
| 4.800          | 134.429 | 134.834 | 137.053 | 146.432 | 168.829 | 205.869 |
| 5.000          | 169.516 | 170.024 | 172.797 | 184.503 | 212.539 | 258.978 |

$$\lambda = \sqrt{(kDc)}$$

Tabel 3.3 - Als tabel 3.1, nu met equivalente gat-diameter van 0,01  $\lambda$ .

## DIAMETER .030 LAMBDA

| STROOMLIJN =   | 0       | 10      | 25      | 50      | 75      | 90      |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| AFSTAND/LAMBDA |         |         |         |         |         |         |
| .400           | .047    | .048    | .052    | .069    | .119    | .220    |
| .600           | .123    | .125    | .132    | .165    | .255    | .426    |
| .800           | .250    | .253    | .265    | .318    | .460    | .723    |
| 1.000          | .443    | .447    | .466    | .546    | .756    | 1.137   |
| 1.200          | .722    | .727    | .754    | .869    | 1.166   | 1.700   |
| 1.400          | 1.103   | 1.110   | 1.151   | 1.319   | 1.748   | 2.477   |
| 1.600          | 1.630   | 1.640   | 1.694   | 1.923   | 2.492   | 3.478   |
| 1.800          | 2.335   | 2.348   | 2.421   | 2.723   | 3.482   | 4.788   |
| 2.000          | 3.267   | 3.284   | 3.380   | 3.777   | 4.770   | 6.486   |
| 2.200          | 4.486   | 4.509   | 4.635   | 5.150   | 6.449   | 8.682   |
| 2.400          | 6.107   | 6.138   | 6.313   | 7.028   | 8.803   | 11.773  |
| 2.600          | 8.155   | 8.196   | 8.419   | 9.332   | 11.602  | 15.416  |
| 2.800          | 10.781  | 10.835  | 11.119  | 12.281  | 15.181  | 20.046  |
| 3.000          | 14.138  | 14.205  | 14.566  | 16.046  | 19.733  | 25.919  |
| 3.200          | 18.411  | 18.497  | 18.956  | 20.826  | 25.494  | 33.355  |
| 3.400          | 23.782  | 23.884  | 24.446  | 26.893  | 32.535  | 42.282  |
| 3.600          | 30.649  | 30.778  | 31.491  | 34.565  | 41.744  | 54.067  |
| 3.800          | 39.324  | 39.488  | 40.384  | 44.236  | 53.304  | 68.907  |
| 4.000          | 50.260  | 50.467  | 51.594  | 56.426  | 67.853  | 87.535  |
| 4.200          | 64.022  | 64.282  | 65.706  | 71.750  | 86.193  | 110.932 |
| 4.400          | 81.312  | 81.639  | 83.422  | 90.975  | 109.119 | 140.260 |
| 4.600          | 103.001 | 103.412 | 105.646 | 115.090 | 137.852 | 176.937 |
| 4.800          | 130.175 | 130.690 | 133.494 | 145.282 | 173.888 | 222.827 |
| 5.000          | 164.178 | 164.822 | 168.325 | 183.021 | 218.832 | 280.115 |

$$\lambda = \sqrt{(kDc)}$$

Tabel 3.4 - Als tabel 3.1, nu met equivalente gat-diameter van 0,03  $\lambda$ .

DIAMETER .100 LAMBDA

| STROOMLIJN =   | 0       | 10      | 25      | 50      | 75      | 90      |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| AFSTAND/LAMBDA |         |         |         |         |         |         |
| .400           | .040    | .041    | .048    | .078    | .173    | .395    |
| .600           | .108    | .111    | .123    | .177    | .333    | .668    |
| .800           | .224    | .228    | .248    | .333    | .570    | 1.052   |
| 1.000          | .402    | .407    | .437    | .563    | .905    | 1.578   |
| 1.200          | .660    | .668    | .710    | .888    | 1.364   | 2.283   |
| 1.400          | 1.014   | 1.026   | 1.088   | 1.346   | 2.009   | 3.246   |
| 1.600          | 1.507   | 1.522   | 1.606   | 1.951   | 2.833   | 4.476   |
| 1.800          | 2.168   | 2.188   | 2.299   | 2.753   | 3.921   | 6.075   |
| 2.000          | 3.042   | 3.070   | 3.215   | 3.812   | 5.336   | 8.136   |
| 2.200          | 4.189   | 4.224   | 4.414   | 5.188   | 7.171   | 10.790  |
| 2.400          | 5.717   | 5.766   | 6.022   | 7.071   | 9.738   | 14.499  |
| 2.600          | 7.647   | 7.709   | 8.037   | 9.383   | 12.774  | 18.859  |
| 2.800          | 10.125  | 10.202  | 10.623  | 12.330  | 16.656  | 24.391  |
| 3.000          | 13.296  | 13.394  | 13.925  | 16.097  | 21.589  | 31.396  |
| 3.200          | 17.332  | 17.457  | 18.131  | 20.880  | 27.816  | 40.237  |
| 3.400          | 22.403  | 22.556  | 23.386  | 26.779  | 35.407  | 50.911  |
| 3.600          | 28.894  | 29.088  | 30.137  | 34.425  | 45.326  | 64.909  |
| 3.800          | 37.098  | 37.343  | 38.666  | 44.077  | 57.826  | 82.492  |
| 4.000          | 47.443  | 47.751  | 49.419  | 56.237  | 73.550  | 104.570 |
| 4.200          | 60.465  | 60.853  | 62.951  | 71.528  | 93.297  | 132.250 |
| 4.400          | 76.828  | 77.316  | 79.953  | 90.728  | 118.059 | 166.908 |
| 4.600          | 97.360  | 97.973  | 101.281 | 114.801 | 149.071 | 210.255 |
| 4.800          | 123.089 | 123.856 | 128.002 | 144.944 | 187.862 | 264.409 |
| 5.000          | 155.289 | 156.249 | 161.439 | 182.644 | 236.333 | 332.001 |

$$\lambda = \sqrt{(kDc)}$$

Tabel 3.5 - Als tabel 3.1, nu met equivalente gat-diameter van 0,1  $\lambda$ .

## DIAMETER .300 LAMBDA

| STROOMLIJN =   | 0       | 10      | 25      | 50      | 75      | 90      |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| AFSTAND/LAMBDA |         |         |         |         |         |         |
| .400           | .023    | .025    | .040    | .116    | .434    | 1.623   |
| .600           | .076    | .081    | .106    | .223    | .640    | 1.864   |
| .800           | .172    | .179    | .217    | .390    | .955    | 2.435   |
| 1.000          | .322    | .332    | .388    | .634    | 1.396   | 3.260   |
| 1.200          | .543    | .558    | .637    | .976    | 1.992   | 4.371   |
| 1.400          | .851    | .871    | .983    | 1.456   | 2.811   | 5.866   |
| 1.600          | 1.282   | 1.309   | 1.458   | 2.081   | 3.850   | 7.759   |
| 1.800          | 1.863   | 1.900   | 2.096   | 2.912   | 5.211   | 10.193  |
| 2.000          | 2.638   | 2.685   | 2.940   | 4.004   | 6.971   | 13.319  |
| 2.200          | 3.657   | 3.718   | 4.048   | 5.422   | 9.230   | 17.285  |
| 2.400          | 5.025   | 5.106   | 5.541   | 7.356   | 12.322  | 22.660  |
| 2.600          | 6.752   | 6.854   | 7.409   | 9.720   | 16.025  | 29.060  |
| 2.800          | 8.969   | 9.100   | 9.807   | 12.747  | 20.734  | 37.147  |
| 3.000          | 11.810  | 11.976  | 12.874  | 16.600  | 26.698  | 47.344  |
| 3.200          | 15.435  | 15.644  | 16.782  | 21.497  | 34.241  | 60.176  |
| 3.400          | 19.971  | 20.235  | 21.660  | 27.567  | 43.522  | 75.931  |
| 3.600          | 25.806  | 26.139  | 27.941  | 35.400  | 55.497  | 96.151  |
| 3.800          | 33.186  | 33.606  | 35.879  | 45.280  | 70.550  | 121.485 |
| 4.000          | 42.501  | 43.029  | 45.890  | 57.718  | 89.446  | 153.189 |
| 4.200          | 54.232  | 54.897  | 58.493  | 73.351  | 113.132 | 192.818 |
| 4.400          | 68.984  | 69.818  | 74.331  | 92.968  | 142.783 | 242.304 |
| 4.600          | 87.504  | 88.549  | 94.204  | 117.552 | 179.862 | 304.043 |
| 4.800          | 110.721 | 112.030 | 119.109 | 148.321 | 226.180 | 381.002 |
| 5.000          | 139.906 | 141.544 | 150.408 | 186.969 | 284.263 | 477.272 |

$$\lambda = \sqrt{(kDc)}$$

Tabel 3.6 - Als tabel 3.1, nu met equivalente gat-diameter van  $0,3 \lambda$ .

| STROOMLIJN VAN 0.2 |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| DIAMETER/LAMBDA =  | .001 | .003 | .010 | .030 | .100 | .300 |
| AFSTAND/LAMBDA     |      |      |      |      |      |      |
| .400               | .652 | .627 | .592 | .549 | .463 | .266 |
| .600               | .691 | .668 | .636 | .596 | .523 | .369 |
| .800               | .719 | .697 | .667 | .630 | .564 | .432 |
| 1.000              | .739 | .718 | .690 | .655 | .594 | .475 |
| 1.200              | .755 | .735 | .708 | .674 | .617 | .507 |
| 1.400              | .763 | .745 | .719 | .687 | .632 | .530 |
| 1.600              | .775 | .756 | .731 | .701 | .648 | .551 |
| 1.800              | .783 | .766 | .741 | .711 | .660 | .568 |
| 2.000              | .790 | .773 | .749 | .720 | .670 | .581 |
| 2.200              | .796 | .779 | .756 | .727 | .679 | .593 |
| 2.400              | .799 | .782 | .759 | .731 | .685 | .602 |
| 2.600              | .803 | .787 | .764 | .737 | .691 | .610 |
| 2.800              | .806 | .791 | .769 | .742 | .696 | .617 |
| 3.000              | .810 | .794 | .772 | .745 | .701 | .623 |
| 3.200              | .812 | .797 | .775 | .749 | .705 | .628 |
| 3.400              | .815 | .800 | .778 | .752 | .709 | .632 |
| 3.600              | .817 | .802 | .780 | .755 | .711 | .635 |
| 3.800              | .818 | .803 | .782 | .757 | .714 | .639 |
| 4.000              | .820 | .805 | .784 | .758 | .716 | .641 |
| 4.200              | .821 | .806 | .785 | .760 | .718 | .644 |
| 4.400              | .822 | .807 | .786 | .761 | .719 | .646 |
| 4.600              | .823 | .808 | .787 | .762 | .721 | .648 |
| 4.800              | .824 | .809 | .788 | .763 | .722 | .649 |
| 5.000              | .824 | .809 | .789 | .764 | .723 | .651 |

Tabel 4.1 - De genormaliseerde verblijftijden van tabel 3.1 t/m 3.6 zijn hier gedeeld door de nultijden van tabel 2. Deze tabel geeft dus aan in welke mate de verblijftijd af- of toeneemt door het aanbrengen van een gat in de afdekkende laag.

Voorbeeld: De oorspronkelijke verblijftijd van het voorbeeld onder tabel 2 bedroeg 13,4 jaar ( $L/\lambda = 1,2$ ). Bij een gatdiameter van 0,03  $\lambda = 0,03 \cdot 1000 = 30$  m blijkt de minimum verblijftijd (die voor de 0 % stroomlijn) nu af te nemen tot 67,4 % hiervan dus tot  $0,674 \cdot 13,5 = 9,1$  jaar.

## STROOMLIJN VAN 10.2

| DIAMETER/LAMBDA = | .001 | .003 | .010 | .030 | .100 | .300 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| AFSTAND/LAMBDA    |      |      |      |      |      |      |
| .400              | .656 | .632 | .599 | .557 | .477 | .297 |
| .600              | .695 | .672 | .641 | .603 | .534 | .391 |
| .800              | .722 | .700 | .671 | .635 | .573 | .449 |
| 1.000             | .742 | .721 | .694 | .660 | .602 | .490 |
| 1.200             | .757 | .738 | .711 | .679 | .624 | .521 |
| 1.400             | .767 | .748 | .723 | .692 | .639 | .543 |
| 1.600             | .777 | .759 | .734 | .705 | .654 | .563 |
| 1.800             | .785 | .768 | .744 | .715 | .666 | .579 |
| 2.000             | .792 | .775 | .752 | .724 | .676 | .592 |
| 2.200             | .798 | .781 | .759 | .731 | .685 | .603 |
| 2.400             | .801 | .785 | .762 | .735 | .690 | .611 |
| 2.600             | .805 | .789 | .767 | .741 | .697 | .619 |
| 2.800             | .808 | .793 | .771 | .745 | .702 | .626 |
| 3.000             | .812 | .796 | .775 | .749 | .706 | .631 |
| 3.200             | .814 | .799 | .778 | .752 | .710 | .636 |
| 3.400             | .817 | .802 | .781 | .755 | .713 | .640 |
| 3.600             | .819 | .804 | .783 | .758 | .716 | .644 |
| 3.800             | .820 | .805 | .785 | .760 | .718 | .647 |
| 4.000             | .821 | .807 | .786 | .761 | .720 | .649 |
| 4.200             | .823 | .808 | .788 | .763 | .722 | .652 |
| 4.400             | .824 | .809 | .789 | .764 | .724 | .654 |
| 4.600             | .824 | .810 | .790 | .765 | .725 | .655 |
| 4.800             | .825 | .811 | .791 | .766 | .726 | .657 |
| 5.000             | .825 | .811 | .791 | .767 | .727 | .659 |

Tabel 4.2 - Als tabel 4.1, doch voor de 10 % stroomlijn.

Ook op de tabellen 4 zijn de voorwaarden van toepassing die onder tabel 1 zijn genoemd. Wordt met de tabellen 3 direct de verblijftijd berekend, met de tabellen 4 geschiedt dit via de nultijden van tabel 2, overeenkomstig de voorbeelden onder tabel 2 en tabel 4.1

## STROOMLIJN VAN 25.2

| DIAMETER/LAMBDA = | .001 | .003 | .010 | .030 | .100 | .300 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| AFSTAND/LAMBDA    |      |      |      |      |      |      |
| .400              | .680 | .659 | .633 | .604 | .557 | .471 |
| .600              | .714 | .694 | .668 | .640 | .594 | .513 |
| .800              | .739 | .720 | .695 | .667 | .623 | .547 |
| 1.000             | .757 | .739 | .715 | .688 | .645 | .573 |
| 1.200             | .771 | .754 | .731 | .704 | .663 | .594 |
| 1.400             | .780 | .764 | .742 | .716 | .678 | .612 |
| 1.600             | .790 | .774 | .753 | .728 | .690 | .626 |
| 1.800             | .798 | .782 | .761 | .737 | .700 | .638 |
| 2.000             | .804 | .789 | .768 | .745 | .708 | .648 |
| 2.200             | .809 | .794 | .774 | .751 | .715 | .656 |
| 2.400             | .813 | .798 | .779 | .756 | .721 | .663 |
| 2.600             | .816 | .802 | .783 | .761 | .726 | .669 |
| 2.800             | .820 | .806 | .787 | .764 | .730 | .674 |
| 3.000             | .822 | .808 | .790 | .768 | .734 | .679 |
| 3.200             | .825 | .811 | .792 | .771 | .737 | .682 |
| 3.400             | .827 | .813 | .795 | .773 | .739 | .685 |
| 3.600             | .828 | .815 | .797 | .775 | .742 | .688 |
| 3.800             | .830 | .816 | .798 | .777 | .744 | .690 |
| 4.000             | .831 | .818 | .799 | .778 | .745 | .692 |
| 4.200             | .832 | .819 | .801 | .780 | .747 | .694 |
| 4.400             | .833 | .820 | .802 | .781 | .748 | .696 |
| 4.600             | .834 | .821 | .803 | .782 | .749 | .697 |
| 4.800             | .835 | .821 | .804 | .783 | .750 | .698 |
| 5.000             | .835 | .821 | .804 | .783 | .751 | .700 |

Tabel 4.3 - Als tabel 4.1, doch voor de 25 % stroomlijn.

De stroomlijndefinitie is onder tabel 3.1 gegeven.

## STROOMLIJN VAN 50.2

| DIAMETER/LAMBDA = | .001 | .003 | .010 | .030 | .100 | .300  |
|-------------------|------|------|------|------|------|-------|
| AFSTAND/LAMBDA    |      |      |      |      |      |       |
| .400              | .782 | .777 | .780 | .803 | .907 | 1.340 |
| .600              | .796 | .789 | .786 | .796 | .853 | 1.075 |
| .800              | .809 | .801 | .795 | .798 | .835 | .979  |
| 1.000             | .819 | .811 | .804 | .804 | .829 | .934  |
| 1.200             | .828 | .820 | .812 | .810 | .828 | .910  |
| 1.400             | .838 | .830 | .822 | .820 | .837 | .905  |
| 1.600             | .843 | .836 | .828 | .825 | .837 | .893  |
| 1.800             | .849 | .841 | .832 | .828 | .837 | .885  |
| 2.000             | .853 | .844 | .836 | .831 | .839 | .881  |
| 2.200             | .856 | .848 | .839 | .834 | .840 | .878  |
| 2.400             | .861 | .854 | .845 | .841 | .846 | .880  |
| 2.600             | .863 | .855 | .847 | .842 | .847 | .877  |
| 2.800             | .865 | .857 | .849 | .843 | .847 | .875  |
| 3.000             | .867 | .859 | .851 | .845 | .848 | .874  |
| 3.200             | .868 | .860 | .852 | .846 | .848 | .873  |
| 3.400             | .869 | .861 | .853 | .847 | .843 | .868  |
| 3.600             | .870 | .862 | .854 | .848 | .844 | .868  |
| 3.800             | .871 | .863 | .855 | .848 | .845 | .868  |
| 4.000             | .871 | .864 | .855 | .849 | .846 | .868  |
| 4.200             | .872 | .864 | .856 | .849 | .847 | .868  |
| 4.400             | .872 | .865 | .856 | .850 | .847 | .868  |
| 4.600             | .873 | .865 | .857 | .850 | .848 | .868  |
| 4.800             | .873 | .866 | .857 | .850 | .848 | .868  |
| 5.000             | .874 | .866 | .857 | .851 | .849 | .869  |

Tabel 4.4 - Als tabel 4.1, doch voor de 50 %  
stroomlijn.



## STROOMLIJN VAN 75.2

| DIAMETER/LAMBDA = | .001  | .003  | .010  | .030  | .100  | .300  |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| AFSTAND/LAMBDA    |       |       |       |       |       |       |
| .400              | 1.046 | 1.093 | 1.185 | 1.376 | 2.000 | 5.020 |
| .600              | 1.004 | 1.036 | 1.099 | 1.224 | 1.602 | 3.075 |
| .800              | .986  | 1.010 | 1.058 | 1.152 | 1.427 | 2.390 |
| 1.000             | .977  | .996  | 1.035 | 1.111 | 1.330 | 2.052 |
| 1.200             | .972  | .988  | 1.021 | 1.086 | 1.270 | 1.854 |
| 1.400             | .980  | .994  | 1.025 | 1.085 | 1.248 | 1.746 |
| 1.600             | .975  | .989  | 1.017 | 1.068 | 1.214 | 1.650 |
| 1.800             | .973  | .985  | 1.009 | 1.058 | 1.191 | 1.583 |
| 2.000             | .970  | .981  | 1.005 | 1.048 | 1.173 | 1.532 |
| 2.200             | .969  | .979  | 1.000 | 1.043 | 1.160 | 1.492 |
| 2.400             | .978  | .988  | 1.010 | 1.052 | 1.163 | 1.472 |
| 2.600             | .975  | .986  | 1.007 | 1.046 | 1.152 | 1.445 |
| 2.800             | .974  | .984  | 1.004 | 1.042 | 1.143 | 1.423 |
| 3.000             | .973  | .982  | 1.002 | 1.038 | 1.136 | 1.404 |
| 3.200             | .972  | .981  | 1.000 | 1.034 | 1.129 | 1.389 |
| 3.400             | .968  | .977  | .994  | 1.027 | 1.118 | 1.374 |
| 3.600             | .968  | .976  | .993  | 1.026 | 1.114 | 1.363 |
| 3.800             | .967  | .975  | .992  | 1.023 | 1.110 | 1.355 |
| 4.000             | .967  | .974  | .991  | 1.022 | 1.108 | 1.347 |
| 4.200             | .966  | .974  | .990  | 1.021 | 1.105 | 1.340 |
| 4.400             | .966  | .974  | .989  | 1.020 | 1.103 | 1.334 |
| 4.600             | .966  | .973  | .989  | 1.018 | 1.101 | 1.329 |
| 4.800             | .965  | .973  | .988  | 1.018 | 1.100 | 1.324 |
| 5.000             | .965  | .972  | .987  | 1.016 | 1.097 | 1.320 |

Tabel 4.5 - Als tabel 4.1, doch voor de 75 %  
stroomlijn.

## STROOMLIJN VAN 90.2

| DIAMETER/LAMBDA = | .001  | .003  | .010  | .030  | .100  | .300   |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| AFSTAND/LAMBDA    |       |       |       |       |       |        |
| .400              | 1.500 | 1.656 | 1.954 | 2.537 | 4.555 | 18.735 |
| .600              | 1.355 | 1.464 | 1.668 | 2.045 | 3.206 | 8.947  |
| .800              | 1.280 | 1.366 | 1.524 | 1.808 | 2.631 | 6.088  |
| 1.000             | 1.234 | 1.306 | 1.438 | 1.671 | 2.318 | 4.791  |
| 1.200             | 1.204 | 1.268 | 1.382 | 1.581 | 2.124 | 4.067  |
| 1.400             | 1.197 | 1.256 | 1.360 | 1.537 | 2.015 | 3.641  |
| 1.600             | 1.180 | 1.233 | 1.326 | 1.489 | 1.917 | 3.323  |
| 1.800             | 1.166 | 1.214 | 1.302 | 1.454 | 1.844 | 3.095  |
| 2.000             | 1.154 | 1.200 | 1.284 | 1.425 | 1.788 | 2.926  |
| 2.200             | 1.146 | 1.191 | 1.269 | 1.403 | 1.744 | 2.794  |
| 2.400             | 1.156 | 1.199 | 1.277 | 1.406 | 1.731 | 2.706  |
| 2.600             | 1.148 | 1.191 | 1.266 | 1.389 | 1.700 | 2.619  |
| 2.800             | 1.142 | 1.183 | 1.255 | 1.375 | 1.673 | 2.548  |
| 3.000             | 1.137 | 1.177 | 1.247 | 1.363 | 1.651 | 2.490  |
| 3.200             | 1.133 | 1.172 | 1.240 | 1.353 | 1.632 | 2.441  |
| 3.400             | 1.121 | 1.159 | 1.225 | 1.334 | 1.606 | 2.396  |
| 3.600             | 1.119 | 1.156 | 1.220 | 1.328 | 1.594 | 2.362  |
| 3.800             | 1.117 | 1.153 | 1.217 | 1.323 | 1.583 | 2.332  |
| 4.000             | 1.115 | 1.151 | 1.214 | 1.318 | 1.574 | 2.306  |
| 4.200             | 1.114 | 1.149 | 1.211 | 1.314 | 1.566 | 2.283  |
| 4.400             | 1.112 | 1.147 | 1.209 | 1.310 | 1.559 | 2.263  |
| 4.600             | 1.111 | 1.146 | 1.207 | 1.307 | 1.553 | 2.245  |
| 4.800             | 1.110 | 1.145 | 1.205 | 1.304 | 1.547 | 2.230  |
| 5.000             | 1.109 | 1.143 | 1.202 | 1.300 | 1.541 | 2.216  |

Tabel 4.6 - Als tabel 4.1, doch voor de 90 %  
stroomlijn.

## BIJLAGE 2 (2-dimensionale weergaven van figuur 8)

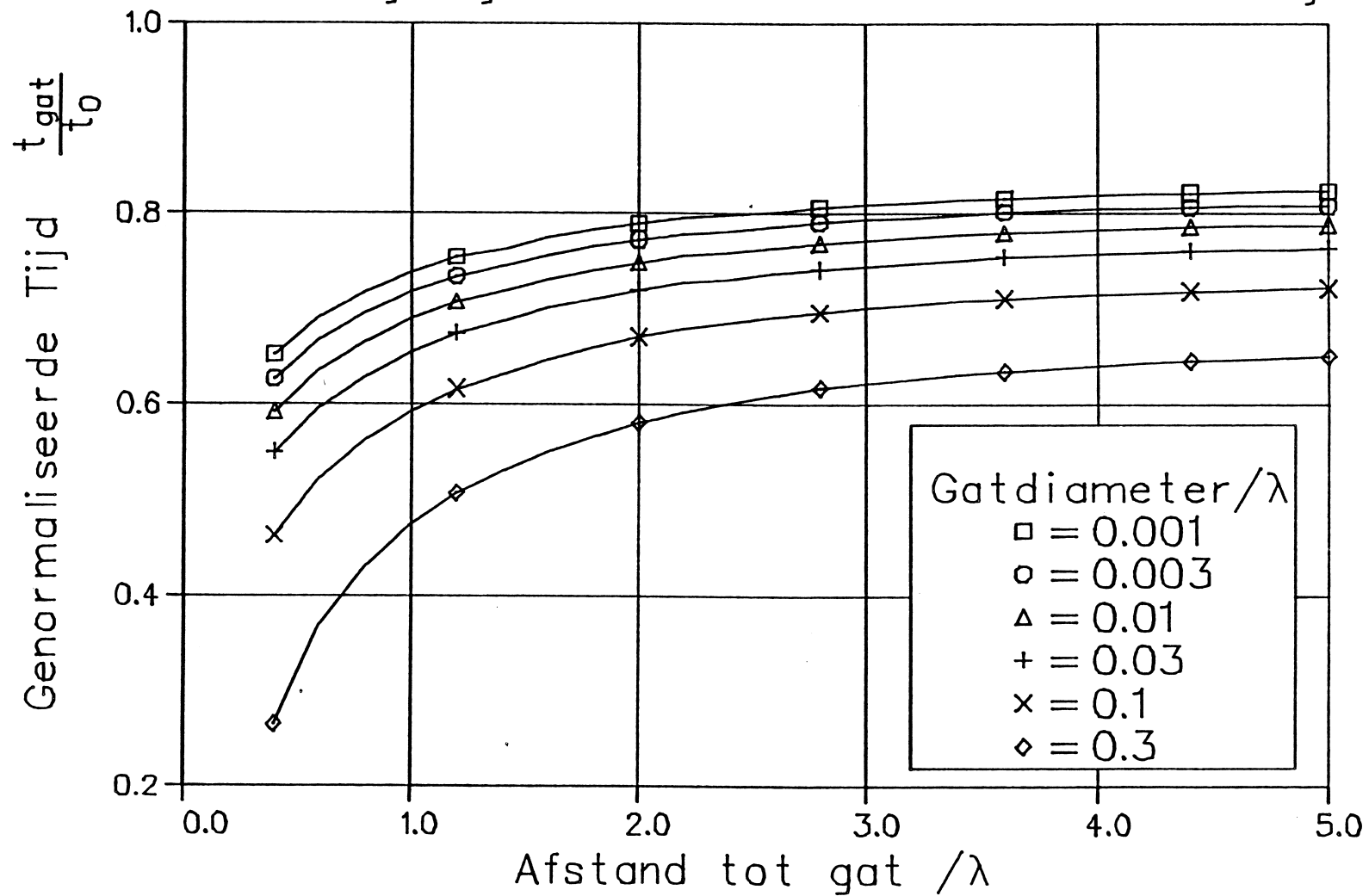
Grafische weergave van de relatieve, genormaliseerde verblijftijden, dat wil zeggen de verhouding tussen die met infiltratie via het gat,  $T_{\text{gat}}$ , en die zonder infiltratie,  $T_0$ .

De volgende figuren zijn een grafische weergave van de getallen van de tabellen 4.1 tot en met 4.6.

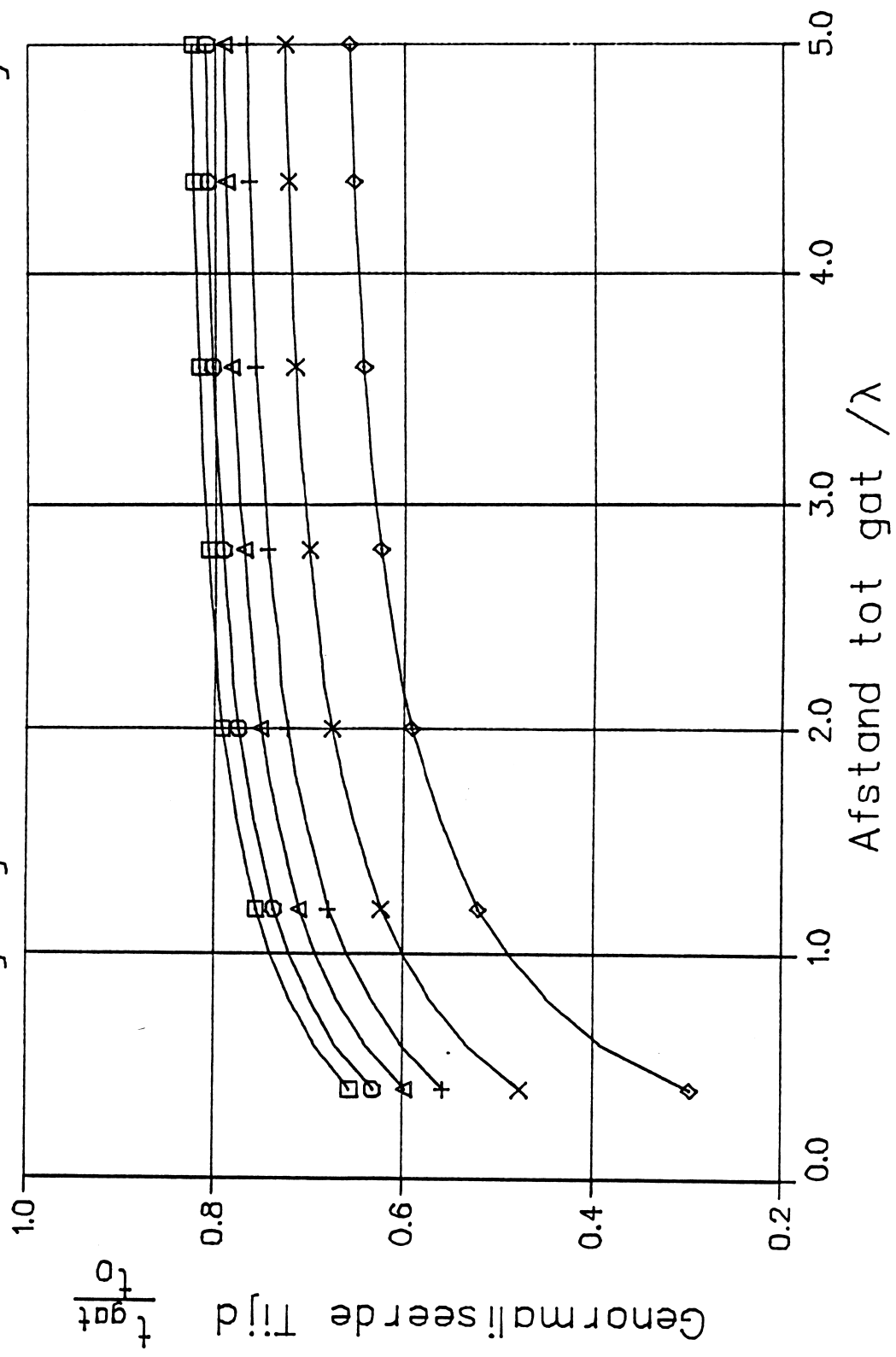
De legenda is uitsluitend in de eerste figuur opgenomen, maar geldt tevens voor alle volgende.



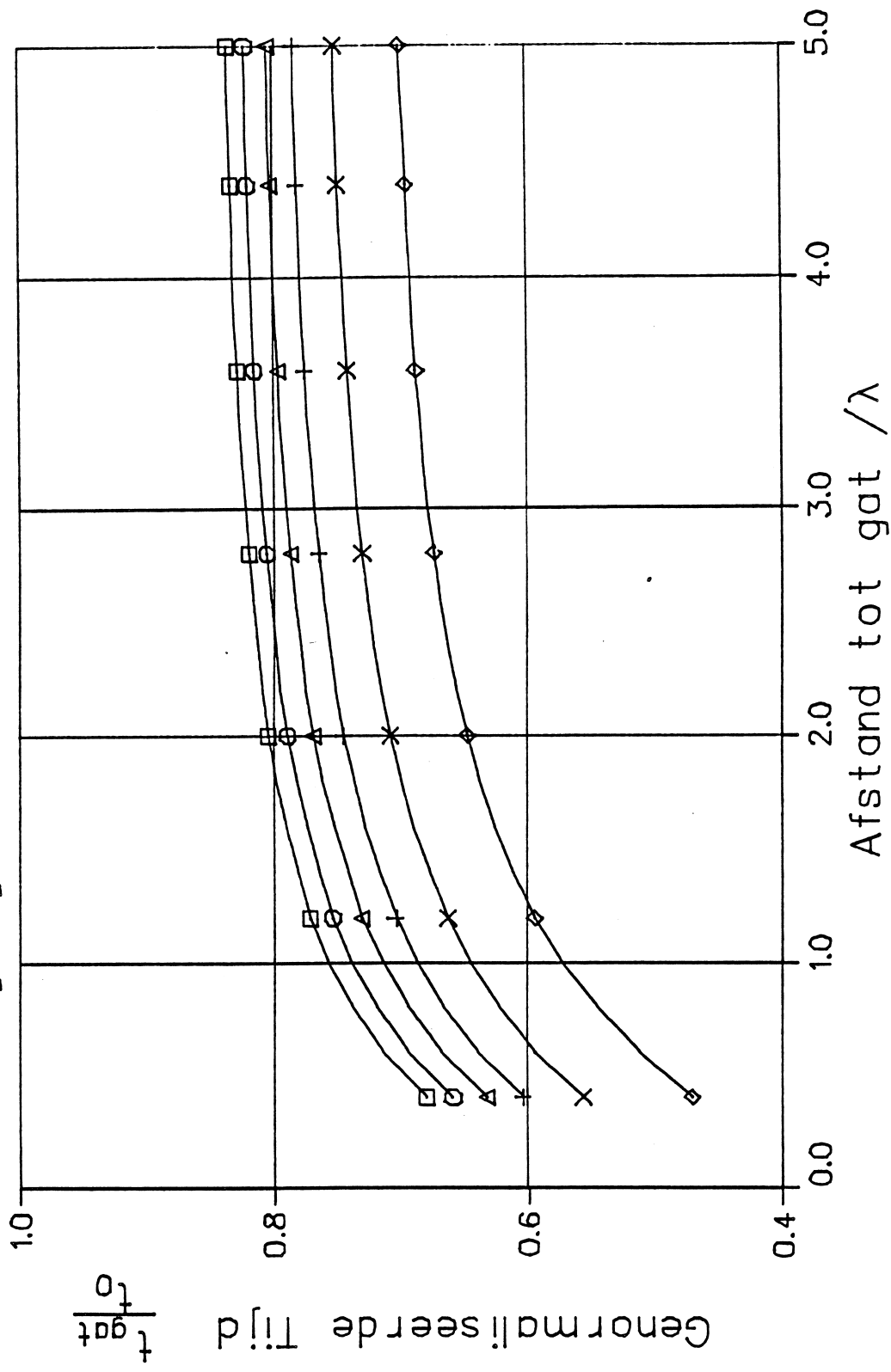
# "Verblijftijden" voor 0% stroomlijn

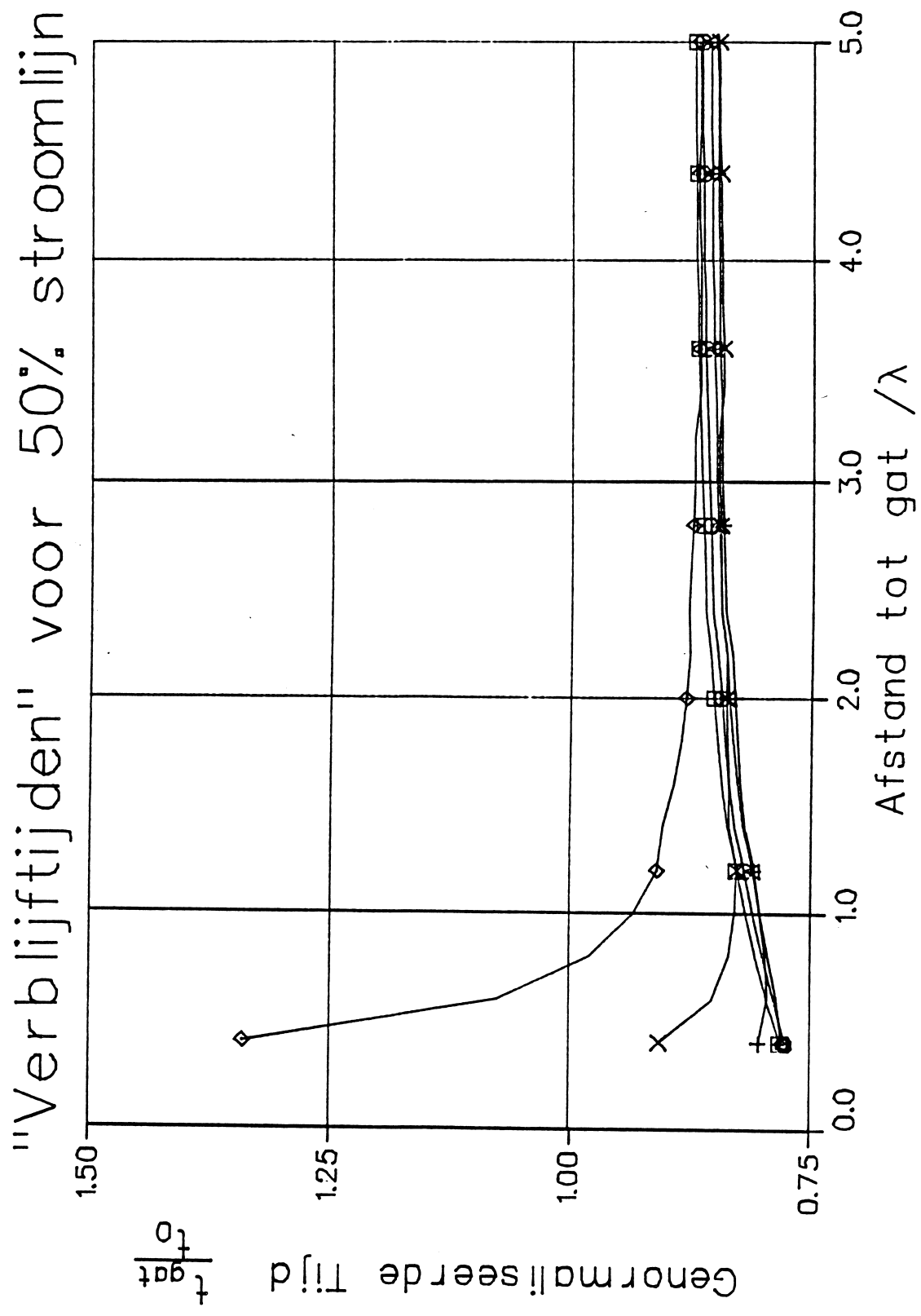


"Verblijftijden" voor 10% stroomlijn



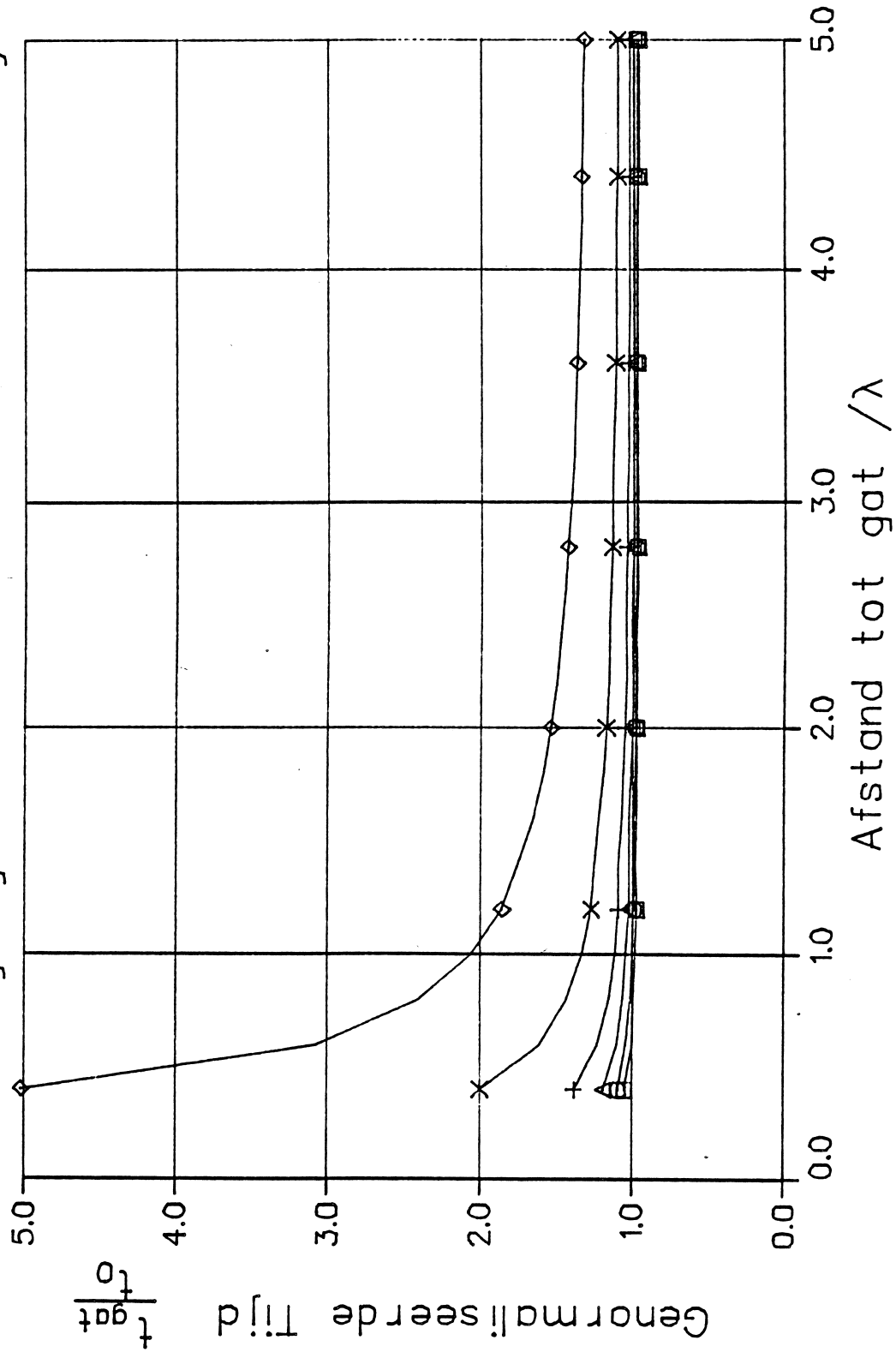
# "Verblijftijden" voor 25% stroomlijn







# "Verblijftijden" voor 75% stroomlijn



"Verblijftijden" voor 90% stroomlijn

