

Kwaliteitsverbetering bij kunstmatige infiltratie

Grondslagen basisplannen 6

1. Inleiding

Voor de toekomstige drinkwatervoorziening van Nederland zal op grote schaal gebruik moeten worden gemaakt van het water, dat door de Rijn van buiten de landsgrenzen wordt aangevoerd [1]*). Onder alle omstandigheden is de afvoer van deze rivier voor dit doel toereikend, doch de kwaliteit van het rivierwater laat veel te wensen over. Door grote lozingen van huishoudelijk en industrieel afvalwater is het Rijnwater namelijk sterk vervuild, waarbij de concentratie aan verontreinigingen nog van rivierafvoer en watertemperatuur afhangen [2]. In de zomer zullen de organische afvalstoffen ten dele door zelfreiniging worden afgebroken, terwijl in perioden van hoge rivierafvoer een sterke verdunning aanwezig is. De meest ongunstige situatie treedt dientengevolge op bij lage afvoeren in het najaar en de kwaliteit van het rivierwater kan dan zo slecht zijn, dat rechtstreekse verwerking tot drinkwater niet wel mogelijk is. Elk project voor een openbare of industriële watervoorziening met Rijnwater als grondstof, zal dan ook voorraadvorming moeten omvatten teneinde de bovengenoemde droge perioden te overbruggen, c.q. de kwaliteitswisselingen van het rivierwater af te vlakken. Bij gebruik van rivierwater dient voorts een zekere voorraad aanwezig te zijn om in geval van een calamiteit op de rivier een ongestoorde watervoorziening te kunnen waarborgen. Deze voorraadvorming kan op verschillende manieren worden verkregen, door middel van open reservoirs met een constant of variabel peil, dan wel in de vorm van grondwaterreservoirs, gebruik makende van de bergingsmogelijkheid in de poriën tussen de afzonderlijke korrels van een watervoerende zand- of grindlaag. Kwaliteitsverbetering in open reservoirs is reeds uitvoerig in [3] en [4] beschreven, waardoor deze publikatie zich tot het gebruik van grondwaterreservoirs kan beperken. In de waterleidingtechniek staat deze werkwijze bekend als kunstmatige infiltratie.

2. Kunstmatige infiltratie

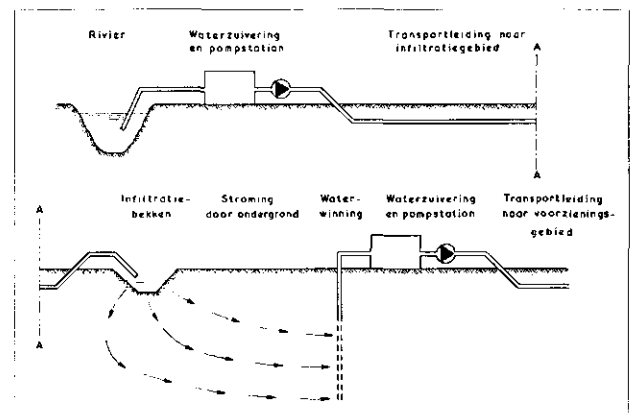
Bij kunstmatige infiltratie wordt het te verwerken oppervlaktewater aan de rivier onttrokken, ter plaatse behandeld, naar het infiltratieterein vervoerd en hier door middel van geulen, bekkens, drains of puttenreeksen in de watervoerende laag tot wegzijgen gebracht. Het zo gevormde kunstmatige grondwater wordt weer onttrokken met behulp van open kanalen, gesloten drains of puttenreeksen en vaak nog aan een verdere zuivering onderworpen alvorens het naar het voorzieningsgebied wordt getransporteerd (afb. 1). Bij het verblijf van het water in de open infiltratiegeulen en bekkens en vooral bij de stroming door de ondergrond treedt nu een aanzienlijke kwaliteitsverbetering op. De zuiverende werking van kunstmatige infiltratie hangt echter nog af van de

wijze waarop deze is ingericht, in het bijzonder van de capaciteit van infiltratie- en winningsmiddelen en hun onderlinge afstand, welke tezamen de grootte van de door de bodem af te leggen weg en de hiervoor nodige tijd bepalen. De voor de laatstgenoemde grootheden aan te houden waarden zijn intussen afhankelijk van het beoogde resultaat. In dit verband kunnen bij de kwaliteitsverbetering door kunstmatige infiltratie vier aspecten worden onderscheiden:

- vermindering van de aantallen bacteriën, virussen en andere pathogene organismen door zelfreiniging;
- vermindering van de organische verontreiniging, inclusief reuk- en smaakstoffen door oxydatieve afbraak;
- verandering van de gehalten aan ijzer, mangaan, koolzuur, kalk- en magnesiumverbindingen (hardheid) en dergelijke door chemische reacties in de infiltratiebekkens en in de ondergrond;
- afvlakking van de variaties in zoutgehalte en temperatuur door menging.

Bij de eerste toepassingen van kunstmatige infiltratie aan het einde der vorige eeuw en het begin van deze eeuw, werd uitgegaan van een goede kwaliteit oppervlaktewater, dat hoogstens licht was verontreinigd. Door contact met de omgeving was het water echter bacteriologisch besmet en kunstmatige infiltratie werd nu gebruikt om een hygiënisch betrouwbaar water te verkrijgen. Desinfectie was toen immers nog onbekend en de kunstmatige infiltratie vormde dan ook de enige barrière tegen doordringen van pathogene organismen tot in het afgeleverde water. Deze barrière moest onder alle omstandigheden effectief zijn, waarvoor een minimum verblijftijd van het water in de bodem noodzakelijk was [5]. In verband met het voorkomen van anomalieën in de watervoerende laag werd deze minimum verblijftijd verzekerd door de gemiddelde verblijfsduur hoog te kiezen,

Afb. 1 - Drinkwatervoorziening met behulp van kunstmatige infiltratie.



*) De tussen haakjes geplaatste cijfers verwijzen naar de literatuurlijst aan het einde van dit artikel.

veelal 2 maanden en de werken zodanig aan te leggen, dat het water een zoveel mogelijk gelijke weg van ten minste 50 à 100 m door de ondergrond moest afleggen. Dat hiermede slechts een geringe spreiding in verblijftijden gepaard ging en van afvlakking van wisselingen in zoutgehalte en temperatuur [6] weinig sprake was, werd niet als bezwaar aangevoerd.

Ook bij de kunstmatige infiltratie van vandaag is de hiermede te verkrijgen verbetering van de hygiënische kwaliteit van groot belang. Deze verbetering wordt thans echter ook op andere wijze bereikt, bij de zuivering en chlorering van het rivierwater voorafgaande aan het transport naar het infiltratiegebied en bij de zuivering en veiligheidschlorering van het teruggewonnen water alvorens het wordt afgeleverd. Vooral de desinfectie met chloor of chloorverbindingen is hierbij zo effectief, dat water van goede bacteriologische kwaliteit wordt gefiltreerd en een wat minder goede kwaliteit van het teruggewonnen water geen overwegend bezwaar meer behoeft te zijn. Dit betekent intussen dat ten aanzien van deze hygiënische gesteldheid doorgaans niet langer de minimale, doch de gemiddelde kwaliteitsverbetering bij kunstmatige infiltratie van doorslaggevende betekenis kan worden geacht. De hiervoor nodige verblijftijd is echter veel korter en wordt slechts in dagen gemeten [7], welke periode ook voor afbraak van organische stof ruim voldoende is [8]. Dit opent echter de mogelijkheid om in plaats van een zoveel mogelijk constante verblijftijd van 2 maanden, een verblijftijd te kiezen welke bij dezelfde gemiddelde waarde bijvoorbeeld tussen 0,5 en 3,5 maand varieert. Het behoeft geen betoog dat met een dergelijke variatie in verblijftijden de wisselingen in de kwaliteit van het toegevoerde rivierwater in belangrijke mate worden afgevlakt. Voor de Rijn met een minimum afvoer van slechts 1/3 der gemiddelde waarde en daarnaast een vrijwel constante belasting met afvalstoffen, is deze afvlakking zelfs van essentiële betekenis. Welke resultaten op deze wijze kunnen worden verkregen, zal in de volgende paragrafen nader worden onderzocht.

3. Verblijftijden bij kunstmatige infiltratie

Bij het infiltratieschema van afb. 2 zijn infiltratiegeul en draineerleiding op constante onderlinge afstand ij gelegen, waardoor alle stroomlijnen hier gelijke lengten hebben. Wanneer nu ook de doorlatendheidscoëfficiënt k over de volle lengte en hoogte van het watervoerende pakket dezelfde waarde heeft, is de verblijftijd van het water constant en gelijk aan:

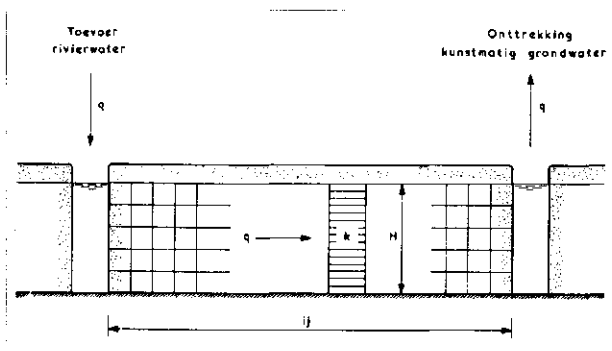
$$T_0 = \frac{\mu \cdot H \cdot ij}{q}$$

waarbij μ = werkzame poriënvolume
 H = hoogte watervoerende pakket
 ij = lengte watervoerende pakket
 q = debiet per eenheid van breedte en per eenheid van tijd

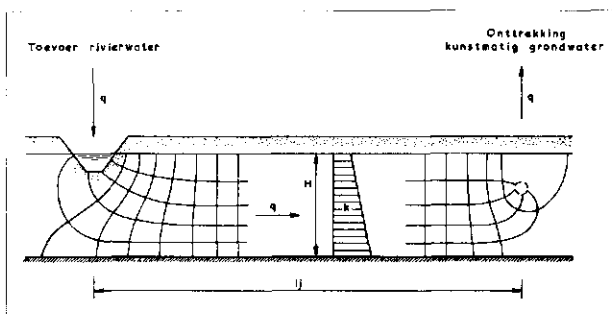
Infiltratiegeulen en draineerleidingen welke met verticale wanden de volle hoogte van het watervoerende pakket doorsnijden komen echter nimmer voor, waardoor in de praktijk steeds een variatie in de lengte der stroomlijnen zal optreden (afb. 3). Een homogeen grondpakket met constante doorlatendheidscoëfficiënt k is eveneens uitzondering en door beide oorzaken tezamen

kan een aanzienlijke spreiding in de verblijftijden optreden. De gemiddelde verblijftijd T_a blijft gelijk aan de vorengenoemde waarde T_0 , doch de minimum verblijftijd T_i is een weinig kleiner en de maximum verblijftijd T_m aanzienlijk groter (afb. 4).

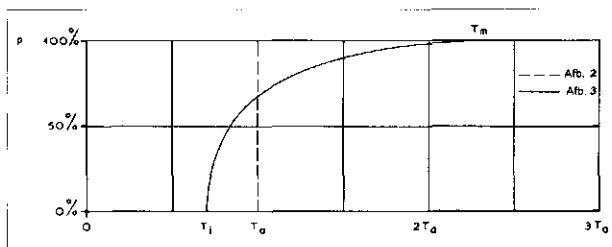
Naast de vorengenoemde ongewilde wisseling in verblijftijden is het ook mogelijk opzettelijk een spreiding in deze verblijftijden te verkrijgen door de afstand en/of het verval tussen infiltratiegeul en draineerleiding te variëren. Voor een dwarsdoorsnede over het infiltratiegebied zoals in afb. 2 getekend, kan de met een getrokken lijn in afb. 5 aangegeven lineaire spreiding in ver-



Afb. 2 - Kunstmatige infiltratie met constante verblijftijd.

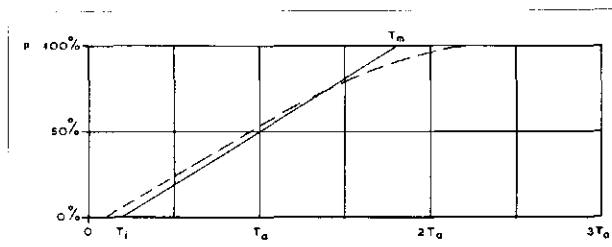


Afb. 3 - Kunstmatige infiltratie met variabele verblijftijd.



Afb. 4 - Cumulatieve verdeling van de verblijftijden voor de infiltratieschema's van afb. 2 en 3.

Afb. 5 - Cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden bij kunstmatige infiltratie en een variabele afstand tussen infiltratiegeul en draineerleiding.



blijftijd worden verkregen door de plattegrond van het infiltratiegebied de in afb. 6 (sterk overdreven) getekende vorm te geven. Uitgaande van een constant verval z tussen infiltratieleiding en draineerleiding kan deze vorm, d.w.z. het verband tussen de afstand x van het beginpunt van de infiltratieleiding (totale lengte L) en de afstand ij tussen infiltratieleiding en draineerleiding, als volgt worden afgeleid:

$$q_x = k.H. \frac{z}{ij}$$

$$T_x = \frac{\mu.H.ij}{q_x} \rightarrow T_x = \frac{\mu}{k.z} . ij^2 \rightarrow \frac{dT}{dx} = \frac{\mu}{k.z} . 2ij . \frac{dij}{dx} \quad (1)$$

Voor een lineaire verblijftijdverdeling moet gelden:

$$T_x = T_i + (T_m - T_i) \cdot \frac{\int_0^x q_x dx}{\int_0^L q_x dx} = T_i + \frac{T_m - T_i}{Q} \cdot \int_0^x q_x dx, \text{ waaruit volgt:}$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_m - T_i}{Q} \cdot q_x = \frac{T_m - T_i}{Q} \cdot k.H. \frac{z}{ij} \quad (2)$$

Gelijkstelling van de formules (1) en (2) levert een differentiaalvergelijking met als oplossing:

$$ij = \left[\frac{kz}{\mu} \right]^{1/2} \cdot \sqrt{(T_m^{3/2} - T_i^{3/2}) \cdot \frac{x}{L} + T_i^{3/2}} \quad (3)$$

Het benodigde verval bedraagt

$$z = \frac{4}{9} \cdot \frac{Q^2}{\mu.k.H^2.L^2} \cdot \left[\frac{T_m^{3/2} - T_i^{3/2}}{T_m - T_i} \right]^2 \quad (4)$$

zodat formule (3) ook als volgt kan worden geschreven

$$ij = \frac{2}{3} \cdot \frac{Q}{\mu.H.L} \cdot \frac{T_m^{3/2} - T_i^{3/2}}{T_m - T_i} \cdot \sqrt{(T_m^{3/2} - T_i^{3/2}) \cdot \frac{x}{L} + T_i^{3/2}} \quad (5)$$

In afwijking met de aan afb. 2 ten grondslag gelegde onderstellingen, zijn infiltratiegeul en draineerleiding in de praktijk doorgaans onvolkomen en zal ook de doorlatendheidscoëfficiënt k over het oppervlak en de watervoerende diepte van het pakket variëren. Voor het infiltratieschema van afb. 6 zal daarom in werkelijkheid de met een gestippelde lijn in afb. 5 aangegeven frequentieverdeling van de verblijftijden worden verkregen. Is de geo-hydrologische gesteldheid van het infiltratiegebied echter bekend, dan kan bij de aanleg van de werken met deze afwijkingen rekening worden gehouden en nagenoeg de met een getrokken lijn in afb. 5 getekende frequentieverdeling worden bereikt.

Het is intussen beslist niet noodzakelijk dat de vorm van het infiltratieterrein precies zo wordt gekozen als is aangegeven in afb. 6. Het is ook denkbaar dat in plaats van een gebogen draineerleiding een aantal rechte draineerleidingen evenwijdig aan de infiltratieleiding wordt gekozen waarmede de in afb. 6 geschetste vorm wordt benaderd. Voorts behoeft het infiltratieterrein niet aaneengesloten te zijn, een verdeling over meerdere terreinen is geenszins bezwaarlijk.

Het staat intussen nog niet vast dat lineaire spreiding van de verblijftijden als de meest gunstige moet worden gekenmerkt voor de afvlakking van de kwaliteit van te infiltreren oppervlaktewater. Op deze problematiek zal in paragraaf 5 nader worden ingegaan.

Bij een lineaire spreiding van de verblijftijden geldt:

$$T = T_i + \frac{p}{100} \cdot (T_m - T_i)$$

waarin p het percentage water is met een verblijftijd T of korter. Alleen het verschil $\Delta T = T_m - T_i$ bepaalt de afvlakkende werking op de wisseling in samenstelling van het te infiltreren rivierwater.

Voor een infiltratiecapaciteit Q in een terrein met watervoerende dikte H is een oppervlakte nodig gelijk:

$$F = \frac{Q}{\mu \cdot H} \cdot T_a$$

waarin de gemiddelde verblijftijd T_a gelijk is aan

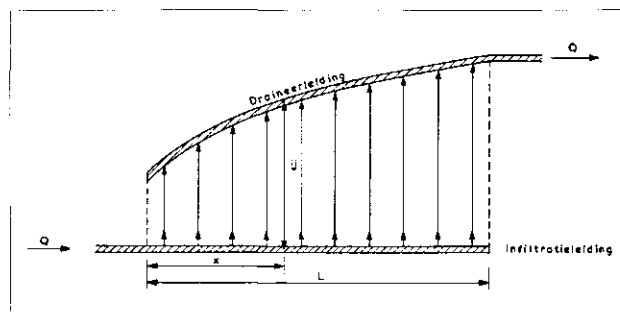
$$T_a = T_i + \frac{\Delta T}{2} = \frac{T_m + T_i}{2}$$

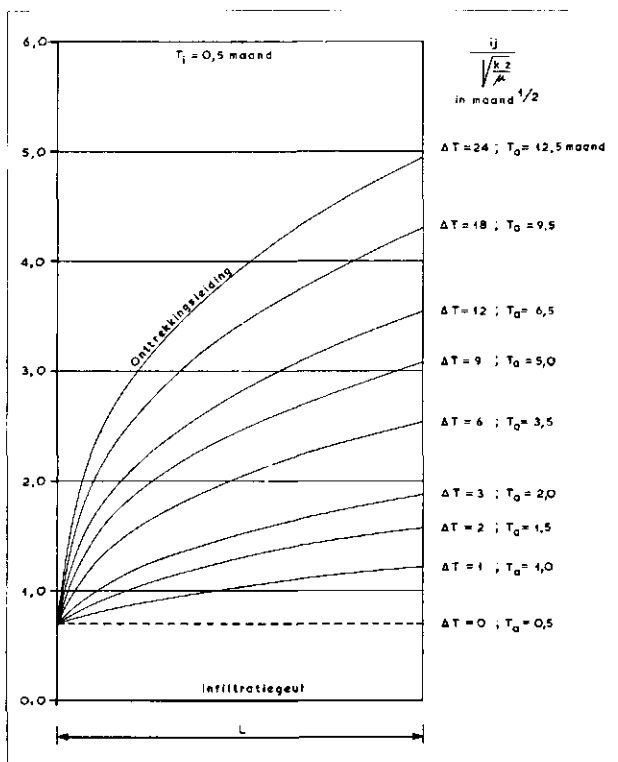
Hoe langer de minimum verblijftijd T_i dus wordt gekozen, hoe groter het nodige terreinoppervlak zal zijn. Voor de berekeningen in deze publikatie zal T_i onveranderlijk op 0,5 maand worden gesteld, terwijl voor ΔT verschillende waarden zullen worden onderzocht, variërend van 3 maanden tot enkele jaren. Met behulp van formule (3) is voor verschillende waarden van ΔT de vorm van de draineerleiding ten opzichte van de infiltratieleiding berekend. De afstand tussen beide leidingen is uitgedrukt in de grootheid

$$\frac{ij}{\sqrt{\frac{k.z}{\mu}}}$$

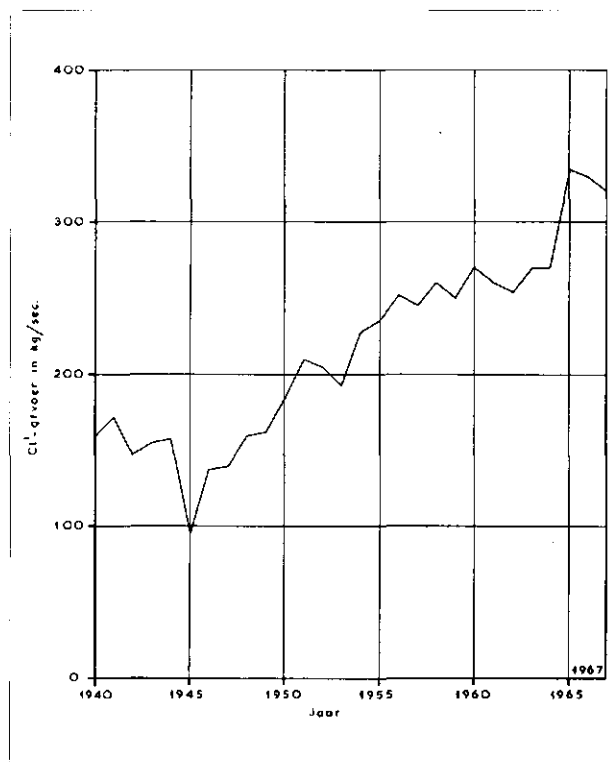
met dimensie maand^{1/2}, waarbij k wordt aangehouden in m/maand. De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in afb. 7.

Afb. 6 - Kunstmatige infiltratie met lineair gespreide verblijftijden.





Afb. 7 - Inrichting van het infiltratieterein bij lineaire verdeling van de verblijftijden en verschillende waarden van ΔT en T_0 , $T_1 = 0,5$ maand.



Afb. 8 - Chlorideafvoer van de Rijn te Lobith over de periode 1940-1967.

De minimale oppervlakte van het infiltratieterein voor $\Delta T = 0$ en $T_a = T_1 = 0,5$ maand wordt voorgesteld door de betrekking:

$$F_0 = \frac{Q}{\mu \cdot H} \cdot T_1$$

4. Chloridegehalte van het Rijnwater

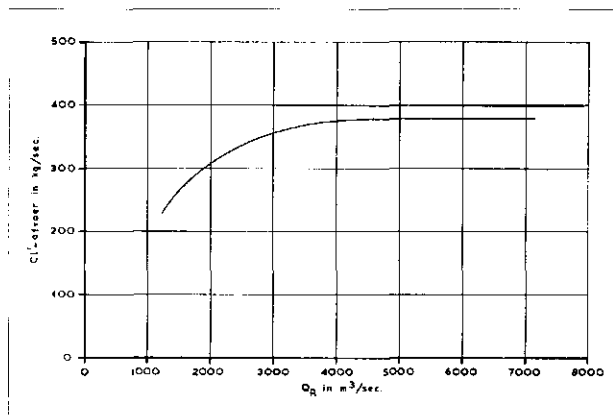
Tallos zijn de afvalstoffen welke in het dichtbevolkte en sterk geïndustrialiseerde achterland op de Rijn worden geloosd, met een sterke verzouting en vervuiling van deze rivier tot gevolg. De vervuiling met organische afvalstoffen heeft in het verleden ongetwijfeld de meeste moeilijkheden (reuk- en smaakbezwaren) veroorzaakt, doch deze verontreiniging kan vergaand door oxydatie en adsorptie worden verwijderd. Dit is niet het geval met de anorganische zouten, welke na lozing onveranderd in het rivierwater blijven en evenmin door de gebruikelijke zuiveringsmethoden kunnen worden weggenomen. In feite is de verzouting dan ook ernstiger dan de vervuiling, vooral ook omdat het chloride-ion hierbij zulk een belangrijke plaats inneemt. Dit chloride-ion kan daardoor zelfs als kenmerkend voor de verzoutings-toestand van de rivier als geheel worden beschouwd en dit is de reden dat in deze publikatie alleen hieraan aandacht zal worden gegeven. Ook al omdat de invloed van kunstmatige infiltratie op de organische verontreiniging (nog) niet voor berekening vatbaar is.

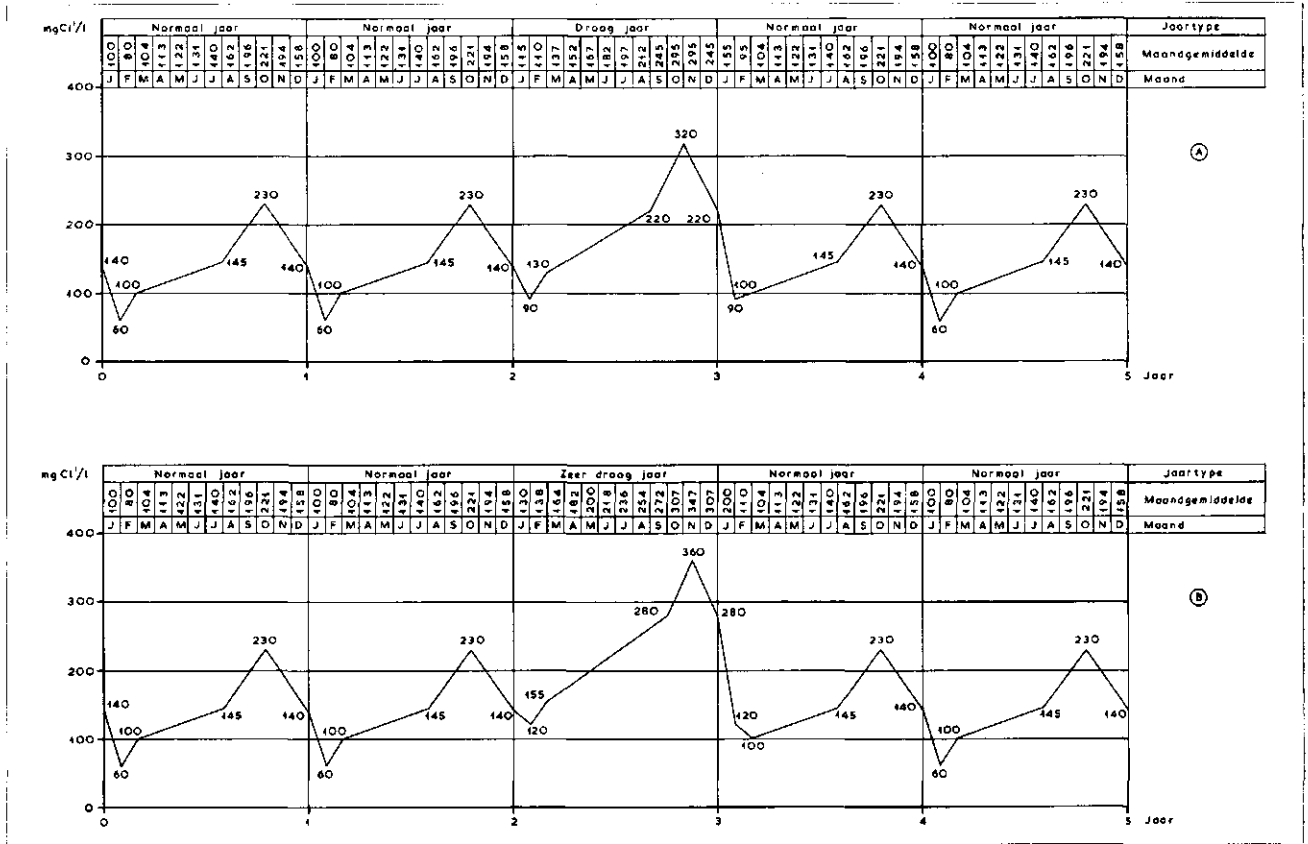
Met de onveranderlijkheid van de eenmaal geloosde chloride-ionen, kan het gehalte hiervan worden berekend als quotiënt van de Cl' -belasting en de waterafvoer van de rivier.

De waterafvoer van de Rijn is uitvoerig door Martijn

bestudeerd [9], doch over de toekomstige Cl' -afvoer van de Rijn staan onvoldoende gegevens ter beschikking. Enerzijds is in het verleden door toenemende industrialisatie een sterke stijging van deze Cl' -afvoer opgetreden (afb. 8), terwijl thans ook een duidelijke correlatie met de waterafvoer aanwezig is (afb. 9). Aan de andere kant echter worden door de Internationale Commissie voor bescherming van de Rijn tegen verontreiniging krachtige pogingen aangewend om tot een beperking van deze Cl' -belasting te geraken. Het is thans nog onmogelijk om te voorspellen welke uitwerking deze factoren zullen hebben en daarom zal — arbitrair — worden uitgegaan van de waarden welke Martijn als gemiddelde voor 1963 vond, d.w.z. een natuurlijk Cl' -gehalte van 20 mg/l en

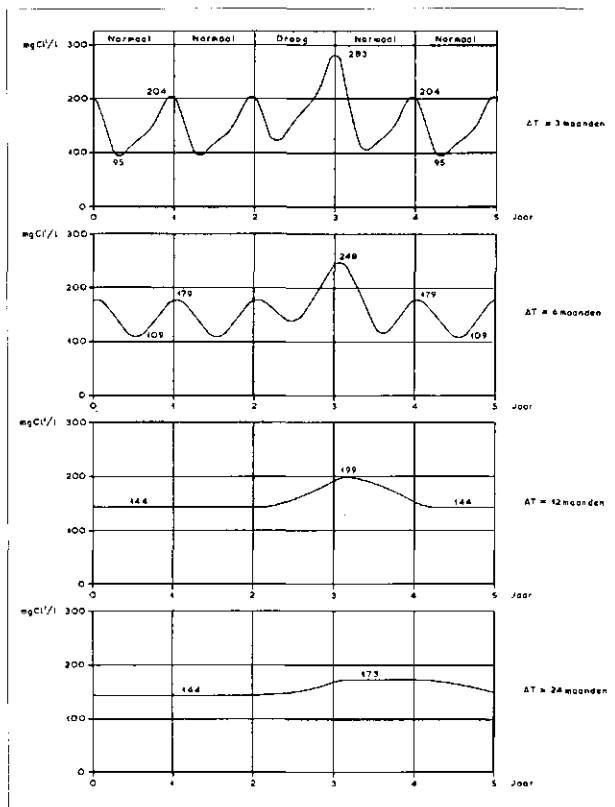
Afb. 9 - Verband tussen chlorideafvoer en waterafvoer (Q_R) van de Rijn te Lobith in 1967.





Afb. 10 - Verloop van het chloridegehalte van het Rijnwater te Lobith in een reeks van normale jaren onderbroken door een droog jaar (A), respectievelijk een zeer droog jaar (B).

Afb. 11 - Verloop van het chloridegehalte van het rivierwater te Lobith na infiltratie volgens figuur 6 met $T_i = 0,5$ maand en $T_m - T_i = \Delta T$ variabel. Opeenvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar.



een kunstmatige Cl^- -afvoer van 230 kg/sec. of een totaal gehalte gelijk

$$c = 20 + \frac{230.000}{Q_R} \text{ mg/l,}$$

waarin Q_R de Rijnafvoer in $m^3/sec.$ voorstelt. Uitgaande van deze chloridebelasting is het verloop van het Cl^- -gehalte van het Rijnwater in normale en droge jaren eveneens in [9] aangegeven. Ter vereenvoudiging van de berekeningen zal dit verloop intussen worden geschematiseerd op de wijze als in afb. 10 is getekend. Deze schematisatie wijkt iets af van die welke in Grondslagen basisplannen 3 en 5 is toegepast, doch een verschil in uitkomst behoeft niet te worden gevreesd. Onder een normaal jaar, een droog jaar en een zeer droog jaar wordt in dit verband tenslotte verstaan een jaar met een jaarafvoer met een kans van voorkomen van respectievelijk gemiddeld 50 %, 10 % en 2 %.

5. Verandering van het verloop van het chloridegehalte bij infiltratie met constante capaciteit

Bij een constante doorstroming van het infiltratiegebied blijft het gemiddelde chloridegehalte onveranderd en kunnen alleen de wisselingen in dit gehalte worden afgevlakt. Volgens afb. 10 bedraagt het gemiddelde Cl^- -gehalte in een

normaal jaar	144 mg/l
droog jaar	196 mg/l
zeer droog jaar	230 mg/l

waarbij het gemiddelde over een lange reeks van jaren gelijk kan worden gesteld aan het gemiddelde van het

normale jaar of wel 144 mg/l. De laatstgenoemde waarde zal des te meer worden benaderd naarmate de spreiding in de verblijftijden groter is.

Van het in afb. 6 getekende infiltratiegebied met een lineaire spreiding der verblijftijden

$$T = T_i + \frac{p}{100} \cdot (T_m - T_i)$$

zijn de te verkrijgen resultaten met $T_i = 0,5$ maand en $\Delta T = T_m - T_i$ gelijk 3, 6, 12 en 24 maanden in de afb. 11 en 12 weergegeven. De berekening geschiedt volgens het principe van het voortschrijdend gemiddelde. Zo kan bij $\Delta T = 9$ maanden in de cyclus normaal, normaal, droog, normaal en normaal jaar het maximale chloridegehalte in het afgeleverde water worden berekend op: $(167 + 182 + 197 + 212 + 245 + 295 + 295 + 245 + 155) : 9 = 222$ mg/l.

Uiteraard zijn de hoogste chloridegehalten na een droog jaar en na een zeer droog jaar van het grootste belang en daarom zijn deze waarden nog eens afzonderlijk in afb. 13 vermeld. Volgens deze afb. neemt het maximale chloridegehalte eerst snel en daarna langzaam met stijgende waarde van ΔT af. De overgang ligt globaal bij $\Delta T = 2$ jaar, hetgeen voor een minimum verblijftijd van 0,5 maand met een gemiddelde verblijftijd van 12,5 maand overeenkomt.

Nadere bestudering van afb. 11 en 12 doet het vermoeden rijzen, dat voor eenzelfde gemiddelde verblijftijd wellicht een beter resultaat wordt verkregen wanneer de verhouding tussen de maximale en de minimale verblijftijd groter is dan met lineaire spreiding kan worden verwezenlijkt. Om deze veronderstelling na te gaan is in afb. 14 voor $T_i = 0,5$ maand en $T_a = 6,5$ maand een serie van frequentieverdelingen voor de verblijftijd getekend:

$$T = 0,5 + 6 \cdot (n + 1) \cdot \left(\frac{p}{100}\right)^n$$

Voor $n = 1$ zijn de te verkrijgen resultaten reeds in de afb. 11 en 12 weergegeven ($\Delta T = 12$ maanden), terwijl deze voor n gelijk 2 en 3 in de afb. 15 en 16 zijn vermeld. Een gunstiger resultaat in de vorm van een lagere waarde van het maximale Cl'-gehalte na een droog jaar werd echter niet verkregen. Achteraf gezien was dit ook wel te verwachten.

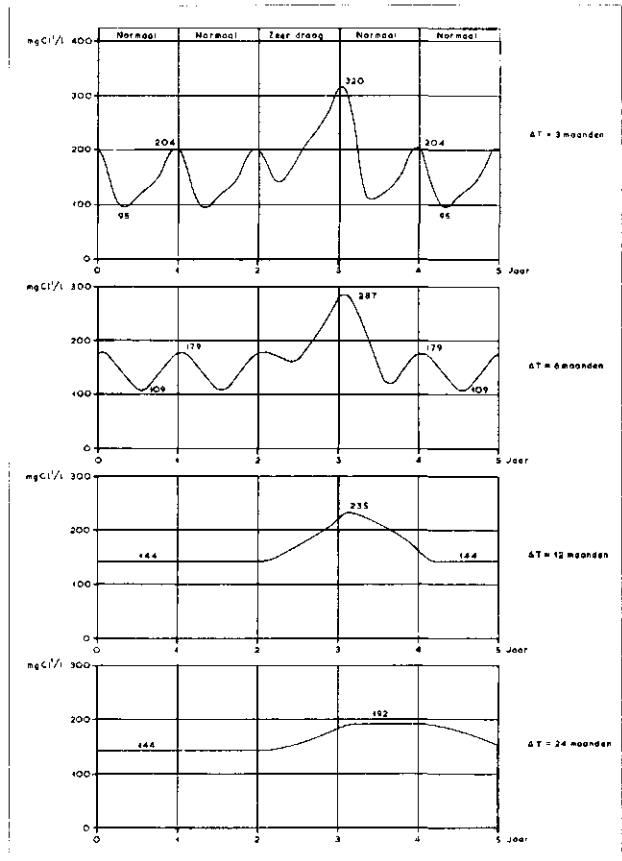
Bij de lineaire frequentieverdeling van de verblijftijden geeft, binnen de vastgestelde waarde van ΔT , iedere maandwaarde immers een gelijke procentuele bijdrage aan het chloridegehalte van het afgeleverde water; in het geval $n = 1$ is $p_{\max} = 8,3\%$. In de zojuist behandelde gevallen waarbij n de waarden 2 en 3 aannam, overheerst echter de bijdrage aan het chloridegehalte van het afgeleverde water van één maandwaarde zeer sterk, zoals in afb. 14 kan worden afgelezen.

Met $T_i = 0,5$ en $T_a = 6,5$ maand geldt voor

$n =$	1	2	3
$p_{\max} =$	8,3	23,6	34,7%

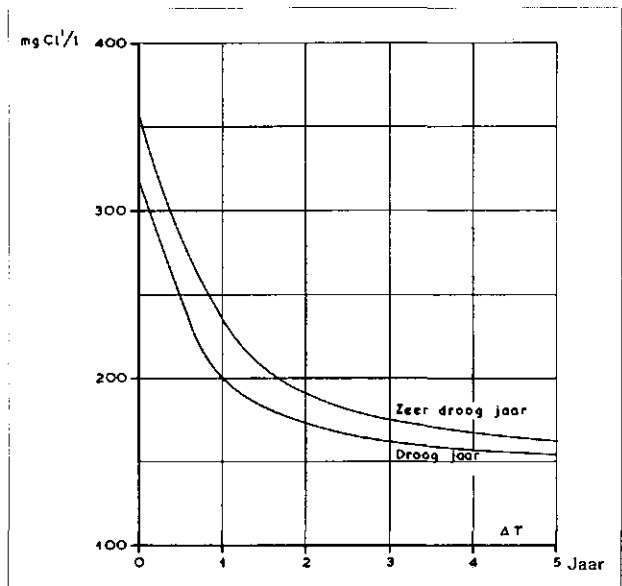
Uiteraard geldt deze overheersende bijdrage ook een keer voor de hoogste maandwaarde die in de cyclus van jaren voorkomt en deze bijdrage is dan zo groot dat de resultaten minder goed zijn dan bij de lineaire frequentieverdeling van de verblijftijden werd verkregen.

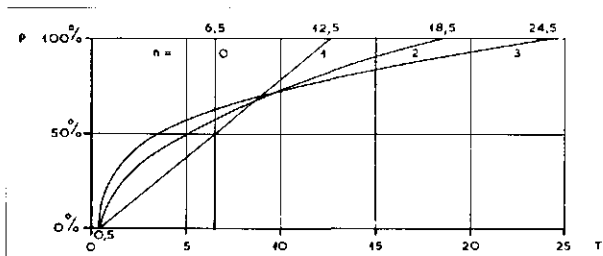
Tot nu toe werd steeds uitgegaan van een gekozen frequentieverdeling van de verblijftijden, waarna werd



Afb. 12 - Verloop van het chloridegehalte van het rivierwater te Lobith na infiltratie volgens afb. 6 met $T_i = 0,5$ maand en $T_m - T_i = \Delta T$ variabel. Opeenvolging van normale jaren onderbroken door een zeer droog jaar.

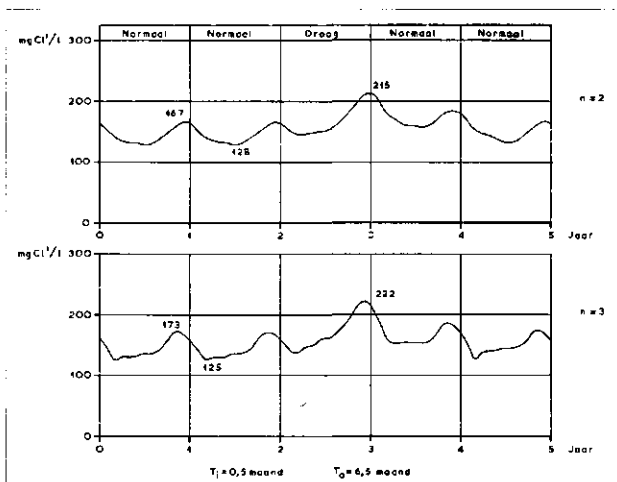
Afb. 13 - Maximum chloridegehalte van het rivierwater te Lobith in een droog en een zeer droog jaar, na infiltratie volgens afb. 6, als functie van $T_m - T_i = \Delta T$.



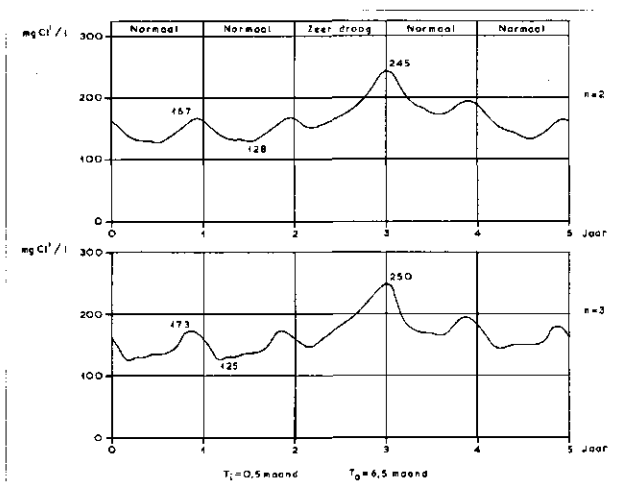


Afb. 14 - Frequentieverdeling van de verblijftijden volgens de be-

trekking $T = 0,5 + 6(n + 1) \cdot \left[\frac{p}{100} \right]^n$ met $T_i = 0,5$ maand en $T_a = 6,5$ maand.



Afb. 15 - Verloop van het chloridegehalte van het rivierwater te Lobith na infiltratie volgens afb. 14 met $n = 2$ en $n = 3$. Op-eenvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar.



Afb. 16 - Verloop van het chloridegehalte van het rivierwater te Lobith na infiltratie volgens afb. 14 met $n = 2$ en $n = 3$. Op-eenvolging van normale jaren onderbroken door een zeer droog jaar.

berekend welke invloed deze frequentieverdeling op het chloridegehalte van het afgeleverde water zal hebben. Het fysische verschijnsel van de afvoer van de rivier met de daarbij terugkerende perioden van hoog en laag chloridegehalte zoals weergegeven in afb. 10, werd buiten beschouwing gelaten. Er kan ook juist van de karakteristiek van het chloridegehalte worden uitgegaan en

aan de hand daarvan naar de meest gunstige verblijftijdsverdeling worden gezocht. Zoals reeds vermeld zal de keuze van een verblijftijdsverdeling anders dan de lineaire gepaard gaan met een overheersend percentage

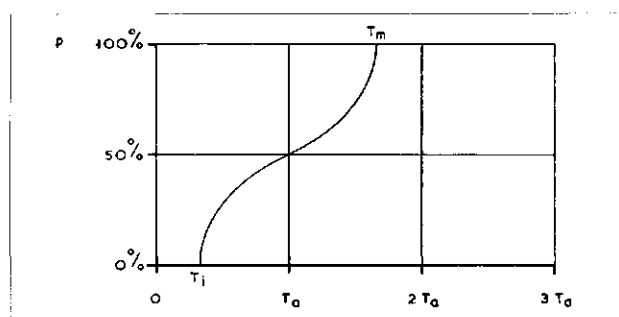
$$P_{\max} > \frac{100\%}{\Delta T}$$

Het ligt nu voor de hand de invloed van p_{\max} te compenseren door de verblijftijdsverdeling en ΔT zo te kiezen, dat op het ogenblik dat de hoogste maandwaarde met p_{\max} moet worden vermenigvuldigd tegelijk een lage maandwaarde met dezelfde waarde van p_{\max} wordt vermenigvuldigd. Dit leidt tot een frequentieverdeling der verblijftijden als aangegeven in afb. 17.

Uit afb. 10 blijkt dat de opeenvolgende perioden van hoog en laag chloridegehalte zowel ca. 9 als ca. 3 maanden uiteen liggen.

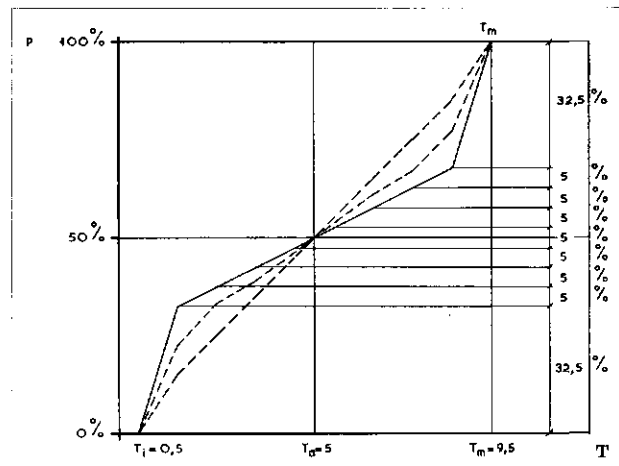
$\Delta T = 9$ maanden verlaagt het maximum;
 $\Delta T = 3$ maanden verhoogt het minimum.

Een combinatie van de verblijftijdsverdeling van afb. 17 met $\Delta T = 9$ maanden ligt in de rede. Voor $\Delta T = 9$ maanden zal worden nagegaan welk resultaat kan worden bereikt. Het is uiteraard noodzakelijk dat p steeds $> 0\%$ wordt gekozen. Als rekenvoorbeeld is p op minimaal 5% aangenomen. Voor het concrete geval dat $T_i = 0,5$, $\Delta T = 9$ en $p_{\min.} = 5\%$, is het mogelijk een groot aantal verblijftijdsverdelingen van het type van afb. 17 te kiezen. Uitgezet als gebroken lijnen geeft afb. 18 een aantal van de vele mogelijkheden. Proberender-



Afb. 17 - Cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden bij aanpassing aan de chloridekarakteristiek van de rivier.

Afb. 18 - Frequentieverdeling van de verblijftijden aangepast aan de chloridekarakteristiek van de rivier. $T_i = 0,5$; $\Delta T = 9$.



wijze kan nu worden bepaald met welke verblijftijdsverdeling het beste resultaat kan worden bereikt. Een berekening heeft aangetoond dat dit het geval is bij de volgetrokken verblijftijdverdeling van afb. 18. Het maximale chloridegehalte bedraagt in de cyclus met het droge jaar 213 mg/l. De winst t.o.v. de lineaire verblijftijdsverdeling is in dit geval echter slechts $222 - 213 = 9$ mg/l.

In werkelijkheid zal het aan deze berekeningen ten grondslag gelegde statistisch vastgestelde patroon van het verloop van de chloridegehalten afwijkingen vertonen, waardoor de nu berekende winst geen argument vormt om aan de verblijftijdsverdeling van afb. 17 vast te houden. Daarom mag worden aangenomen dat het in afb. 13 voor een lineaire spreiding der verblijftijden aangegeven resultaat althans niet wezenlijk kan worden verbeterd. In het volgende zal dan ook waar nodig van een lineaire verdeling der verblijftijden worden uitgegaan.

6. Verandering van het verloop van het chloridegehalte bij infiltratie met constante capaciteit en tijdelijke opslag van water

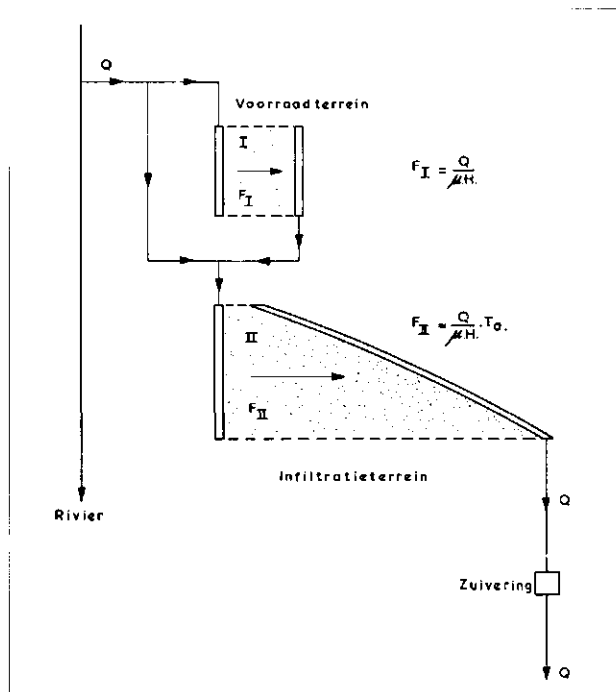
In de voorgaande paragraaf werd de menging van het rivierwater in een infiltratieterein bepaald door de grootte van het infiltratieterein en de verdeling van de verblijftijden. Indien beide zijn vastgesteld, kan bij infiltratie met constante capaciteit geen invloed meer op de menging worden uitgeoefend. Voor die gevallen waarbij $\Delta T \geq 12$ maanden doen steeds alle lage maandwaarden mee om het maximale chloridegehalte zo laag mogelijk te maken. Wanneer $\Delta T < 12$ maanden, bv. bij $\Delta T = 6$ maanden, spelen de lage maandwaarden echter geen rol bij de vaststelling van het maximum chloridegehalte van het afgeleverde water. Deze situatie kan worden verbeterd indien los van het infiltratieterein een voorraadterrein wordt geëxploiteerd waar in perioden van laag chloridegehalte van het rivierwater een voorraad wordt aangelegd, die in perioden van hoog chloridegehalte van het rivierwater in de infiltratieleiding van het infiltratieterein wordt gebracht. Tezelfder tijd wordt het rivierwater met hoog chloridegehalte naar het voorraadterrein gevoerd en daaruit weer afgevoerd naar het infiltratieterein in perioden van aanbod van water met laag chloridegehalte, enz. Hiermede wordt een infiltratie met constante capaciteit gehandhaafd en worden grondwaterstandsfluctuaties in het infiltratieterein vermeden. Aangezien het infiltratieterein zo wordt ingericht dat een minimale verblijftijd T_1 van het water wordt gegarandeerd en al het aangevoerde water dit terrein passeert, behoeft bij de dimensionering van het voorraadterrein met een minimale verblijftijd geen rekening te worden gehouden.

In afb. 19 is de situatie weergegeven in het geval dat wordt beschikt over één voorraadterrein (I met oppervlakte F_1 en chloridegehalte c_1) en een infiltratieterein (II met oppervlakte F_{11}). Bij een productiecapaciteit van Q m³/maand en een voorraadterrein voor n maanden is voor dit voorraadterrein een oppervlakte nodig gelijk:

$$F_1 = \frac{Q}{\mu \cdot H} \cdot n$$

De oppervlakte van het infiltratieterein bedraagt:

$$F_{11} = \frac{Q}{\mu \cdot H} \cdot T_a$$



Afb. 19 - Serieschakeling van een voorraadterrein met een infiltratieterein.

Indien wordt beschikt over één voorraadterrein, dat voldoende groot is om er de aanvoer van één maand in op te slaan, dan kan bijvoorbeeld in het droge jaar het water van de maand februari met een chloridegehalte van 110 mg/l in dit voorraadterrein worden opgeslagen. In de maand oktober van hetzelfde jaar wordt door de rivier water met een chloridegehalte van gemiddeld 295 mg/l aangeboden. Het is nu mogelijk om in deze maand het water met laag chloridegehalte (110 mg Cl'/l) uit het voorraadterrein af te voeren naar het infiltratieterein met gelijktijdige toevoer van het rivierwater (295 mg Cl'/l) naar het voorraadterrein. In de maand februari van het opvolgende normale jaar wordt het water met hoog chloridegehalte in het voorraadterrein vervangen

TABEL I - Chloridegehalte van het aangevoerde water naar het infiltratieterein, bij exploitatie van één voorraadterrein volgens afb. 19.

Jaartype	Maand	Cl'-gehalte rivierwater	Cl'-gehalte van het aangevoerde water naar infiltratieterein
Normaal	O	221	80
	N	194	194
	D	158	158
Droog	J	115	115
	F	110	221
	M	137	137
	A	152	152
	M	167	167
	J	182	182
	J	197	197
	A	212	212
	S	245	245
	O	295	110
Normaal	N	295	295
	D	245	245
	J	155	155
	F	95	295
	M	104	104

door water met een laag chloridegehalte, terwijl het water uit het voorraadterrein tot infiltratie wordt gebracht. In tabel I is deze gang van zaken nader aangegeven, waarbij die maanden vet gedrukt zijn waarin bovenomschreven actie plaatsvindt.

Voor $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 3$ maanden wordt het maximale chloridegehalte in de cyclus met het droge jaar nu berekend op 232 mg/l. De nodige terreinoppervlakte bedraagt in dit geval:

$$F = F_I + F_{II} = \frac{Q}{\mu \cdot H} \cdot 1 + \frac{Q}{\mu \cdot H} \cdot 2 = 3 \cdot \frac{Q}{\mu \cdot H}$$

Indien uitsluitend wordt beschikt over een infiltratieterein volgt uit afb. 13 dat eenzelfde resultaat kan worden bereikt in het geval $\Delta T = 7$ of $T_a = 4$ maanden. Hiervoor is een infiltratieterein nodig met een oppervlakte

$$F = 4 \cdot \frac{Q}{\mu \cdot H}$$

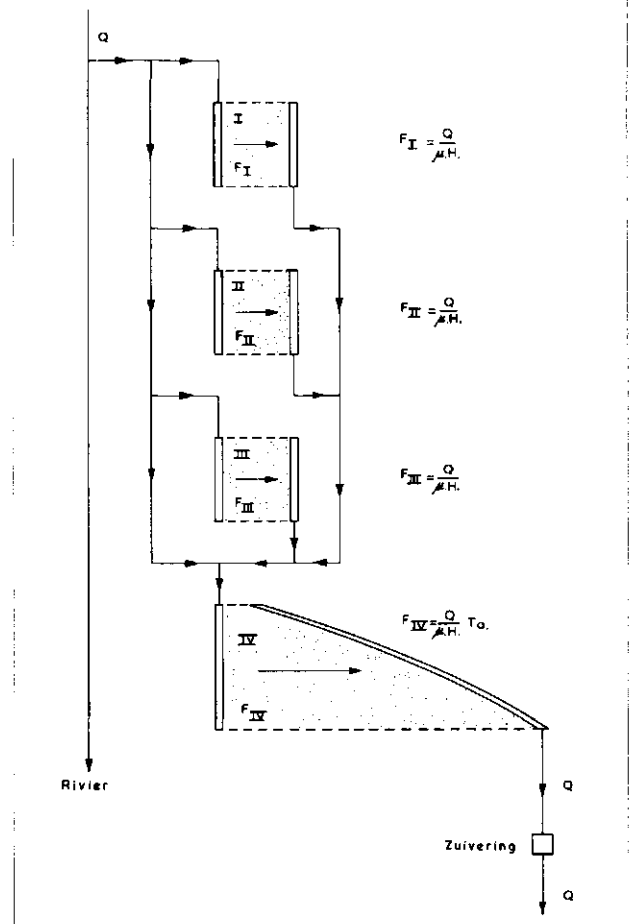
Het is dus in dit geval mogelijk om met een terreinoppervlakte welke 25% kleiner is, doch verdeeld over één voorraadterrein en één infiltratieterein, een gelijkwaardig resultaat te bereiken.

Bij de opstelling van tabel I en het geval dat naast het voorraadterrein wordt beschikt over een infiltratieterein met $\Delta T = 4$ maanden, zou in maart van het normale jaar dat volgt op het droge jaar water worden afgeleverd met een chloridegehalte van 248 mg/l. Vergroting van het infiltratieterein leidt dus in dit geval tot een verhoging van het maximale chloridegehalte van het afgeleverde water. Dit verschijnsel wordt veroorzaakt door een voor dit geval onjuist gekozen tijdstip, waarop het water met hoog chloridegehalte uit het voorraadterrein naar het infiltratieterein is gevoerd. Indien deze actie in maart zou hebben plaatsgevonden, dan zou in deze maand een chloridegehalte in het afgeleverde water van 198 mg/l zijn opgetreden. Echter nu wordt het chloridegehalte van het afgeleverde water in de maand januari van het op het droge jaar volgende normale jaar maatgevend; dit kan immers worden berekend op 224 mg/l.

Er kan ook worden besloten naast het infiltratieterein niet één maar bijvoorbeeld drie voorraadterreinen aan te leggen zoals aangegeven in afb. 20. In afb. 21 is het resultaat van de bedrijfsvoering met dit systeem aangegeven indien wordt beschikt over drie voorraadterreinen die ieder de productie van één maand kunnen bergen en één infiltratieterein met $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 3$ maanden en $T_a = 2$ maanden. In afb. 21 A is het verloop van het chloridegehalte in de voorraadterreinen aangegeven. Duidelijk zijn de tijdstippen waarneembaar waar de voorraad wordt benut. In afb. 21 B is het chloridegehalte weergegeven van het afgeleverde water afkomstig uit het infiltratieterein. Het blijkt dat in de opvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar een maximaal chloridegehalte in het afgeleverde water van 199 mg/l moet worden verwacht. De nodige infiltratie-oppervlakte van dit systeem wordt berekend op

$$F = 5 \cdot \frac{Q}{\mu \cdot H}$$

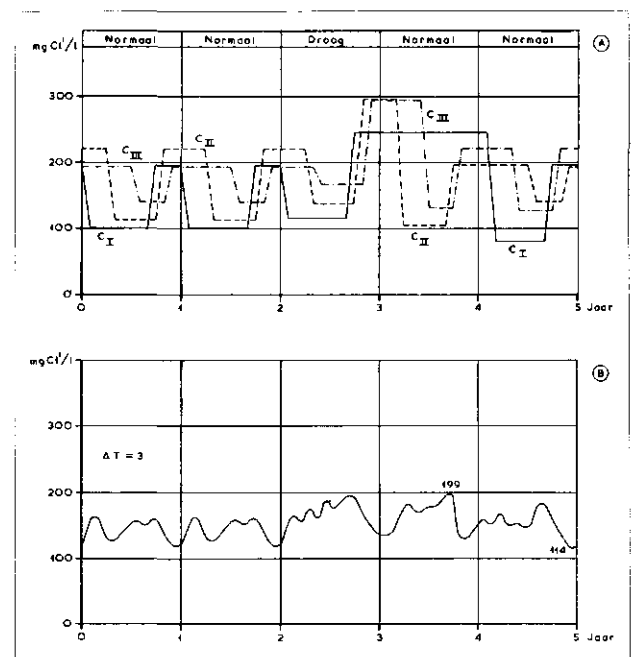
Vergelijking van het gevonden resultaat met afb. 13 wijst uit, dat eenzelfde resultaat kan worden bereikt met een bedrijfsvoering met één infiltratieterein waarbij $T_i =$



Afb. 20 - Serieschakeling van drie voorraadterreinen met een infiltratieterein.

Afb. 21 - Te berekenen resultaten indien drie voorraadterreinen worden gecombineerd met één infiltratieterein ($\Delta T = 3$). Opvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar.

- Verloop van het chloridegehalte van het water in de voorraadterreinen I, II en III.
- Verloop van het chloridegehalte van het water uit het infiltratieterein, $T_i = 0,5$ en $T_a = 2$ maanden.



0,5 en $\Delta T = 12$ maanden. Hiervoor is echter een terreinoppervlakte nodig van

$$F = 6,5 \cdot \frac{Q}{\mu \cdot H}$$

Het is dus in dit geval mogelijk om met een terreinoppervlakte welke 23 % kleiner is, doch verdeeld over drie voorraadterreinen en één infiltratieterein een gelijk-luidend resultaat te bereiken.

Ter illustratie van de grote mogelijkheden van het in deze paragraaf beschreven systeem, is in afb. 22 het resultaat weergegeven indien een opeenvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar, wordt verwerkt met zes voorraadterreinen welke ieder een voorraad van één maand kunnen bergen en één infiltratieterein met $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 6$ maanden ($T_a = 3,5$ maand), dus met een gezamenlijke oppervlakte van

$$F = 9,5 \cdot \frac{Q}{\mu \cdot H}$$

Het chloridegehalte van het afgeleverde water kan nu worden beperkt tot maar liefst 165 mg/l. Een resultaat dat volgens afb. 13 met één infiltratieterein kan worden bereikt indien $\Delta T = 33$ maanden, waarvoor een oppervlakte nodig is van

$$F = 17 \cdot \frac{Q}{\mu \cdot H}$$

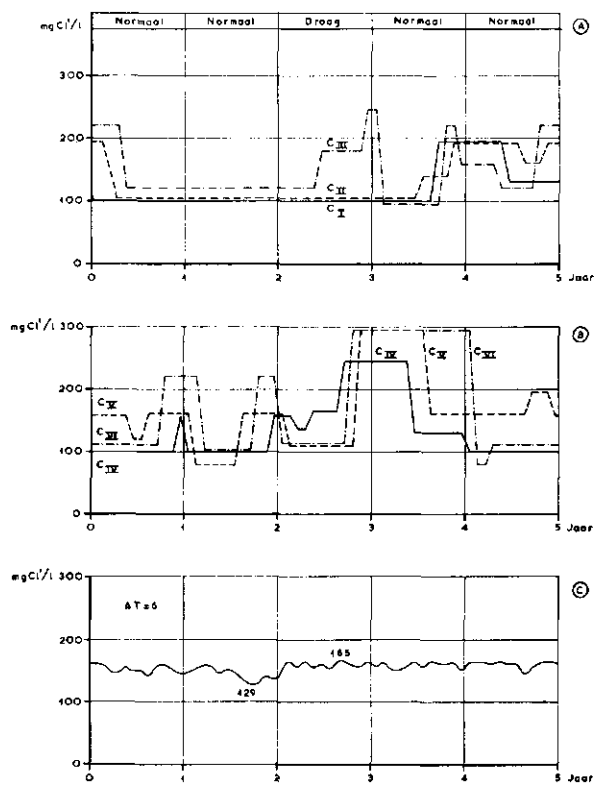
hetgeen gelijk is aan 179 % van het in voorraadterreinen en infiltratieterein versneden oppervlak.

Tenslotte is in afb. 23 het resultaat vermeld voor het geval de opeenvolging van normale jaren wordt onderbroken door een zeer droog jaar; afb. 23 A voor drie voorraadterreinen en één infiltratieterein met $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 3$ maanden en afb. 23 B voor zes voorraadterreinen en één infiltratieterein met $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 6$ maanden.

Het zal duidelijk zijn dat de aanleg- en exploitatiekosten in het in deze paragraaf besproken geval van het in voorraadterreinen en infiltratieterein versneden oppervlak groter zijn dan in het geval over één groot infiltratieterein wordt beschikt. Indien bijvoorbeeld de beschikbare terreinruimte beperkt is kan het toch aanbeveling verdienen over te gaan op het in deze paragraaf ontwikkelde systeem van infiltratie met constante capaciteit en tijdelijke opslag van water, waarbij nog moet worden bedacht dat het in de voorraadterreinen opgeslagen water zich voor een deel zal mengen met het omringende grondwater; een strakke afzondering van het water in de voorraadterreinen is immers tijdens de opslag en ook bij de winning onmogelijk te verwezenlijken. In het algemeen betekent deze menging een kwaliteitsverbetering ten gunste.

Er moet nog worden opgemerkt dat het beschreven systeem, met overeenkomstig resultaat, kan worden geëffectueerd door meerdere draineerleidingen op wisselende afstand van het infiltratiekanaal te situeren, waardoor een keuze in onttrekking mogelijk wordt.

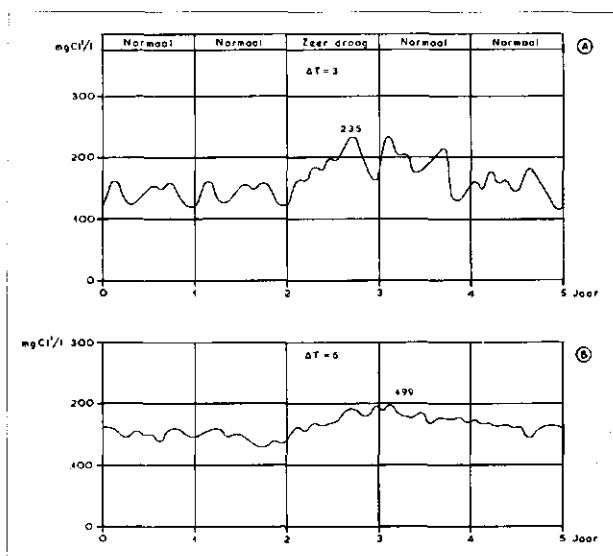
Tenslotte moet worden gesteld dat het geenszins noodzakelijk is dat de tijdelijke wateropslag in voorraadterreinen plaatsvindt. Dit kan ook zeer goed gebeuren in een open bekken in de nabijheid van de rivier zoals aangegeven in afb. 24. Met deze werkwijze kan de nodige terreinoppervlakte nog verder worden beperkt.

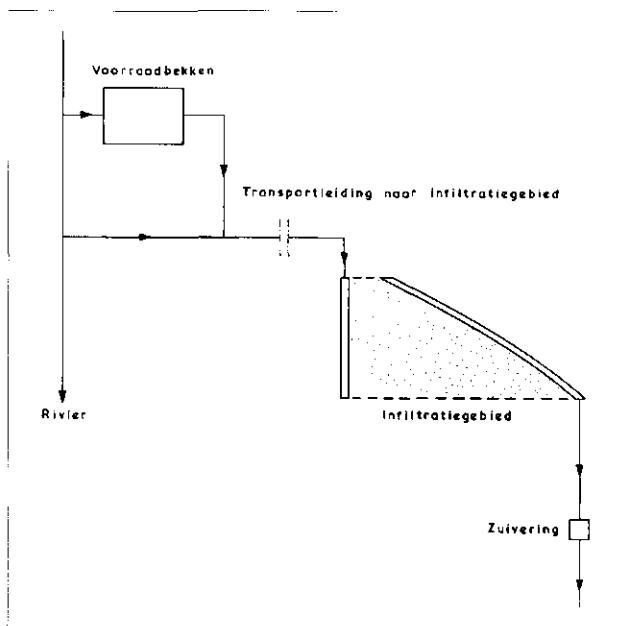


Afb. 22 - Te bereiken resultaten indien zes voorraadterreinen worden gecombineerd met één infiltratieterein ($\Delta T = 6$). Opeenvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar.

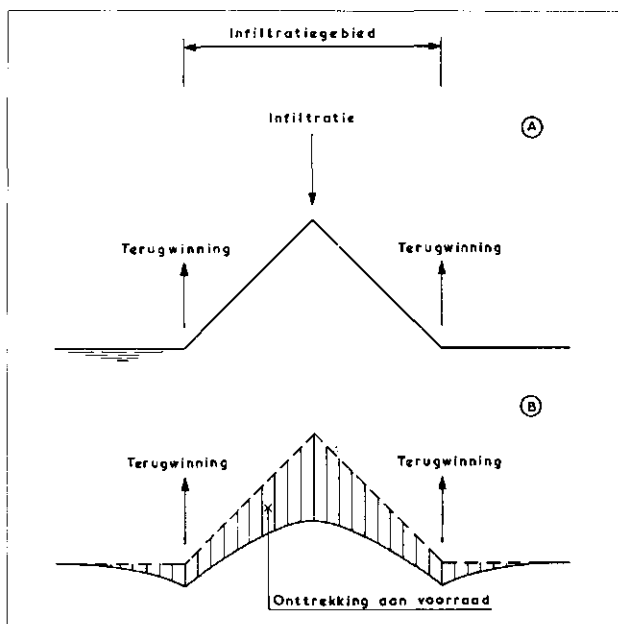
- A. Verloop van het chloridegehalte van het water in de voorraadterreinen I, II en III.
 B. Verloop van het chloridegehalte van het water in de voorraadterreinen IV, V en VI.
 C. Verloop van het chloridegehalte van het water uit het infiltratieterein, $T_i = 0,5$ en $T_a = 3,5$ maand.

Afb. 23 - Te bereiken resultaten in de opeenvolging van normale jaren onderbroken door een zeer droog jaar bij combinatie van drie voorraadterreinen en één infiltratieterein met $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 2$ (A) en bij combinatie van zes voorraadterreinen en één infiltratieterein met $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 6$ (B).





Afb. 24 - Serieschakeling van een voorraadbekken met een infiltratieterrein.



Afb. 25 - Waterstanden in het infiltratiegebied bij normaal bedrijf (A) en aan het einde van een periode van onderbroken aanvoer (B).

7. Verandering van het verloop van het chloridegehalte bij infiltratie met variabele capaciteit

In de voorgaande paragrafen is steeds van de veronderstelling uitgegaan dat constant water aan de rivier wordt onttrokken en tot infiltratie gebracht. Deze wijze van bedrijfsvoering heeft een constante belasting van de winnings- en zuiveringsmiddelen aan de rivier, alsmede een constante belasting van de transportleiding naar het infiltratiegebied tot gevolg. Afgezien van eventuele reservecapaciteit, waarop in deze paragraaf nog wordt teruggekomen, impliceert deze methode de meest economische exploitatie van genoemde middelen. Het gevolg is echter dat ook in perioden van slechte waterkwaliteit

water aan de rivier wordt onttrokken, met een relatief hoog chloridegehalte in het afgeleverde water als uitkomst. Om het chloridegehalte in het afgeleverde water te verlagen zal het infiltratieterrein groot moeten worden gekozen of een combinatie met voorraadterreinen moeten worden toegepast.

Er kan ook worden besloten in perioden van aanvoer van rivierwater met hoog chloridegehalte de onttrekking aan de rivier alsmede de infiltratie te onderbreken. In deze perioden gaat de onttrekking aan het infiltratiegebied uiteraard normaal verder en er treedt dan ook een grondwaterstandsverlaging op, die zich volgens afb. 25 ook buiten het eigenlijke infiltratiegebied zal doen gevoelen.

Wanneer eerst met de infiltratie wordt gestopt indien een chloridegehalte van het rivierwater gelijk 230 mg/l wordt overschreden, dan wordt volgens afb. 10 in het normale jaar de infiltratie niet onderbroken, terwijl in het droge jaar 4 maanden (september t/m december) en in het zeer droge jaar 6 maanden (juli t/m december), geen water tot infiltratie wordt gebracht. In afb. 26 is het resultaat van de geschetste bedrijfsvoering aangegeven, indien een reeks van normale jaren wordt onderbroken door respectievelijk een droog en een zeer droog jaar. Bij de berekening is ervan uitgegaan dat wordt beschikt over een infiltratieterrein met $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 12$ maanden en voorts dat de hoeveelheid water, die in de onderbrekingsperiode t_0 te weinig werd aangevoerd, in het opvolgende normale jaar extra wordt aangevoerd. Voor het droge jaar geldt $t_0 = 4$ maanden, hetgeen betekent dat in het opvolgende normale jaar

$$Q + \frac{4}{12} \cdot Q = \frac{4}{3} \cdot Q \text{ m}^3/\text{maand}$$

aanvoerd, om aan het einde van dit jaar de oorspronkelijke grondwaterstand weer te bereiken. Voor het zeer droge jaar geldt $t_0 = 6$ maanden en wordt de aanvoer in het opvolgende normale jaar berekend op

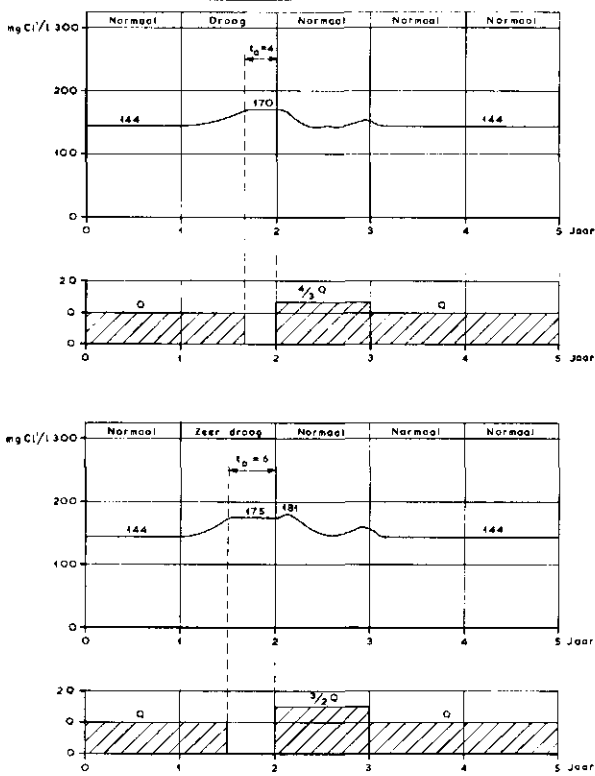
$$\frac{6}{3} \cdot Q \text{ m}^3/\text{maand}$$

Uit afb. 26 blijkt dat een aantrekkelijke verbetering wordt verkregen, wanneer de resultaten worden vergeleken met die, welke werden behaald met één infiltratieterrein met $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 12$ maanden ($T_a = 6,5$ maand) volgens afb. 13. Het chloridegehalte daalt van 199 naar 170 mg/l in een droog jaar en van 235 naar 181 mg/l in een zeer droog jaar.

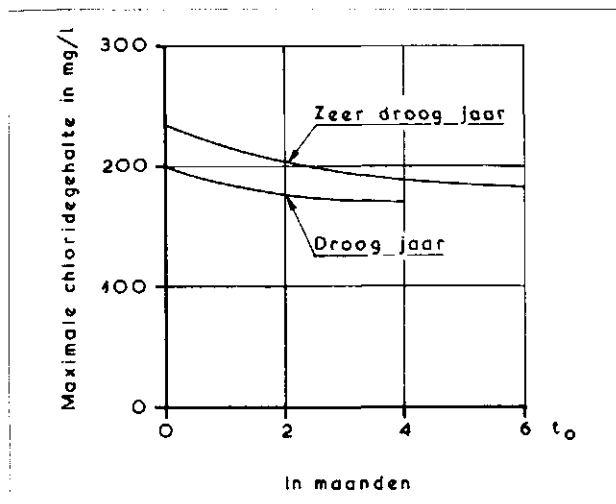
Voor een infiltratiecapaciteit van bijvoorbeeld 100 miljoen m³/jaar en een effectief poriënvolume van 30% is in dit geval een volume van het infiltratiegebied gelijk 180 miljoen m³ noodzakelijk. Bij een gemiddelde dikte H van het watervoerende pakket van 50 m, komt dit overeen met een nodige oppervlakte F van 3,6 km². Hierbij moet intussen nog een zekere oppervlakte, welke onder meer afhankelijk is van de mogelijke infiltratiesnelheid, worden opgeteld voor aanleg van de infiltratie- en onttrekkingsmiddelen. De werkelijke nodige oppervlakte F_w kan op 4 km² worden gesteld. De gemiddelde grondwaterstandsvaling ΔH over de onderbrekingsperiode t_0 kan nu worden berekend met de formule:

$$\Delta H = \frac{t_0}{T_a} \cdot \frac{F}{F_w} \cdot H$$

Voor het geval $t_0 = 4$ maanden in het droge jaar wordt de gemiddelde grondwaterstandsvaling ΔH berekend op



Afb. 26 - Verloop van het chloridegehalte van het rivierwater te Lobith na infiltratie volgens afb. 6 alsmede de aanvoer van rivierwater naar het infiltratieterrein bij $t_0 = 4$ maanden in het droge jaar en $t_0 = 6$ maanden in het zeer droge jaar.
 $T_i = 0,5$ en $\Delta T = 12$ maanden.



Afb. 27 - Te verwachten maximale chloridegehalte bij verschillende waarden van t_0 in het geval van infiltratie volgens afb. 26.

28 m, terwijl in het zeer droge jaar, waarvoor geldt $t_0 = 6$ maanden, rekening moet worden gehouden met een waarde van ΔH van maar liefst 42 m. Het behoeft geen betoog dat dergelijke grondwaterstandsdalingen onmogelijk in overweging kunnen worden genomen. Wordt bijvoorbeeld ca. 1/3 van het watervoerende pakket voor de overbrugging gebruikt, dan volgt hieruit dat bij de hier aangehouden waarde van T_a , t_0 ten hoogste 2 à 3 maanden mag bedragen. Ook uit andere over-

wegingen zal een dergelijke waarde van de overbruggingsperiode naar voren komen.

Voor het droge jaar van afb. 26 is een onderbrekingsperiode t_0 van 4 maanden in ogenschouw genomen. De vraag is echter of deze keuze van t_0 uit overwegingen van kwaliteitsverbetering gerechtvaardigd is. Hiertoe is nagegaan welke resultaten kunnen worden geboekt, indien voor het droge jaar t_0 wordt gekozen op respectievelijk 0, 1, 2, 3 en 4 maanden. De uitkomsten van deze berekening zijn aangegeven in afb. 27 en tabel II. In dezelfde afb. en tabel III is het resultaat vermeld in het geval dat de opeenvolging van normale jaren wordt onderbroken door een zeer droog jaar en t_0 eveneens wordt gekozen variërend van 0 tot 6 maanden.

Uit afb. 27 en de genoemde tabellen blijkt dat de relatieve winst daalt naarmate t_0 groter wordt gekozen. Gesteld kan worden dat uit overwegingen van kwaliteitsverbetering een keuze van t_0 groter dan 2 à 3 maanden niet bijzonder zinvol is.

Het rivierwater dat in het droge jaar te weinig werd gefiltreerd zal, zoals reeds werd vermeld, in de maanden daarna extra moeten worden aangevoerd. In verband met de zeer grote waterstandsverlagingen bij onderbreking van de toevoer, is bij de berekeningen voor afb. 26 aangenomen, dat deze extra toevoer in het op het droge jaar volgende normale jaar is voltooid. Dit betekent echter dat bij een keuze van t_0 van 2 à 3 maanden de aanvoercapaciteit tot 117 à 125 % van de gemiddelde hoeveelheid moet worden vergroot, waardoor extra kapitaals- en exploitatielasten ontstaan. De kapitaalslasten behoeven hierbij intussen niet in rekening te worden gebracht. Bij gebruik van Rijnwater moet er immers rekening mee worden gehouden dat zich op deze druk bevaren rivier met grote lozingen van industrieel afvalwater een calamiteit voordoet, waardoor dit water gedurende enkele maanden voor kunstmatige infiltratie ongeschikt kan zijn. Ten aanzien van de exploitatielasten geldt dat bij een jaarproductie van Q m³ en een opvoerhoogte voor de te overwinnen wrijvingsweerstand in de transportleiding naar het infiltratiegebied h , in een jaar

TABEL II - Te verwachten maximale chloridegehalte in het afgeleverde water bij een opeenvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar en variabele t_0 ($T = 12$ maanden).

t_0 in maanden	maximaal chloridegehalte in mg/l	winst ten opzichte van $t_0 = 0$	
		in mg/l	in %
0	199	—	—
1	184	15	8
2	176	23	12
3	173	26	13
4	170	29	15

TABEL III - Te verwachten maximale chloridegehalte in het afgeleverde water bij een opeenvolging van normale jaren onderbroken door een zeer droog jaar en variabele t_0 .

t_0 in maanden	maximaal chloridegehalte in mg/l	winst ten opzichte van $t_0 = 0$	
		in mg/l	in %
0	235	—	—
1	218	17	7
2	204	31	13
3	197	38	16
4	191	44	19
5	187	48	20
6	181	54	23

waarin de infiltratie niet wordt onderbroken gerekend moet worden op een exploitatielast $E = Q \times h$. De opvoerhoogte kan hierbij nog worden voorgesteld als een functie van Q volgens de betrekking $h = \alpha \cdot Q^2$, waarin α een evenredigheidsfactor voorstelt, zodat de exploitatielast in genoemd jaar kan worden uitgedrukt met de formule $E = \alpha \cdot Q^3$.

Indien als rekenvoorbeeld wordt aangenomen dat over een periode van 10 jaar 1 droog jaar en 9 normale jaren voorkomen, dan wordt bij een aangenomen waarde van $t_0 = 2$ maanden in het droge jaar $\frac{10}{12} \cdot Q \text{ m}^3$ naar het

infiltratiegebied gevoerd. Wordt in het opvolgende normale jaar het tekort extra aangevoerd, dan moet in dit jaar $\frac{14}{12} \cdot Q \text{ m}^3$ worden getransporteerd, terwijl deze hoeveelheid in de overige 8 jaar $Q \text{ m}^3$ bedraagt.

In dit geval kunnen de exploitatiekosten worden berekend op:

$$E = \frac{10}{12} \cdot \alpha \cdot Q^3 + \alpha \cdot \left[\frac{14}{12} \cdot Q \right]^3 + 8 \cdot \alpha \cdot Q^3 = 10,42 \cdot \alpha \cdot Q^3,$$

zodat de extra exploitatielasten vergeleken met niet onderbroken aanvoer over de periode van 10 jaar op gemiddeld 4,2% per jaar kunnen worden gesteld. Voor verschillende waarden van t_0 kan worden berekend hoe groot de extra exploitatielasten zullen zijn, met het volgende resultaat:

t_0 in maanden	gemiddelde extra exploitatielasten per jaar in %
1	1,8
2	4,2
3	7,0
4	10,4
5	14,2
6	18,8

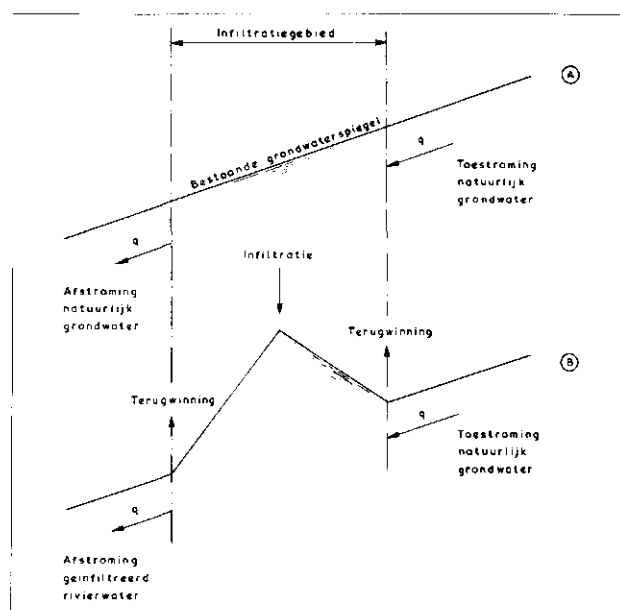
Gerekend over de aangehouden periode van 10 jaar bedragen, bij een t_0 van 2 à 3 maanden, de extra exploitatielasten dus rond 6% van de kosten van watertransport. Is voor het overwinnen van de wrijvingsweerstand in de transportleiding gemiddeld een opvoerhoogte van 50 m nodig, dan bedragen deze kosten slechts 0,07 ct/m³, hetgeen voor een capaciteit van 100 miljoen m³/jaar intussen toch nog een bedrag van f 70.000,— per jaar betekent. Dit bedrag kan nog tot f 50.000,— worden teruggebracht, wanneer het in een droog jaar te weinig aangevoerde water niet in één, doch in twee of drie daarop volgende normale jaren wordt aangevuld.

Resumerend kan worden gesteld dat het weinig lonend is een overbruggingsperiode te kiezen die groter is dan 2 à 3 maanden. Indien wordt vastgesteld dat de kwaliteitsafvlakking welke hiermede kan worden bereikt onvoldoende is, dan dient te worden overwogen de gemiddelde verblijftijd van het water in de bodem te verlengen, i.c. de oppervlakte van het infiltratieterrein te vergroten.

8. Verandering van het verloop van het chloridegehalte bij infiltratie met constante capaciteit en menging met natuurlijk grondwater van laag chloridegehalte

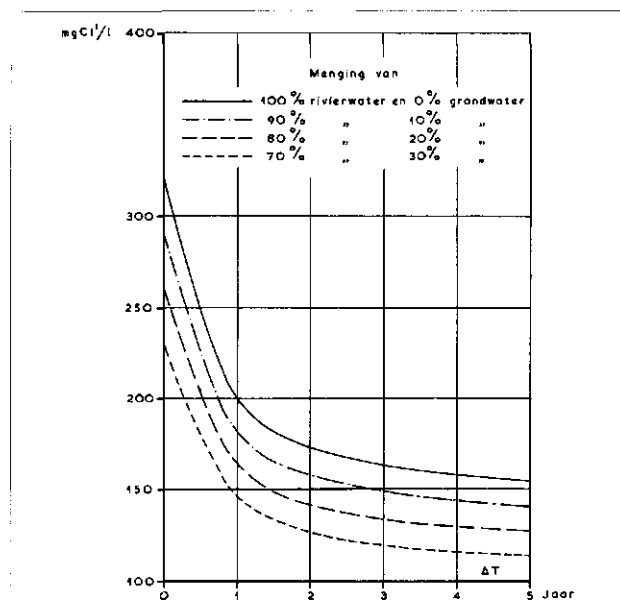
Wanneer infiltratie geschiedt in een terrein, waarvan de oorspronkelijke grondwaterspiegel onder een helling is gelegen, dan stroomt natuurlijk grondwater op het beschouwde gebied toe. Dit grondwater met een laag

chloridegehalte van bijvoorbeeld 20 mg/l mengt zich met het kunstmatig geïnfilterde rivierwater, waardoor het Cl⁻-gehalte van het teruggewonnen water aanzienlijk kan dalen. Schematisch is deze situatie weergegeven in afb. 28, waarbij de werken nog zodanig zijn geprojecteerd dat buiten het infiltratiegebied de hydrologische toestand in kwantitatief opzicht niet verandert. In kwalitatief opzicht is er wel een wijziging, daar de toestroming van natuurlijk grondwater van rechts door een afstroming van geïnfilterd rivierwater naar links is vervangen. Juist door deze vervanging is het chloridegehalte van het onttrokken water lager dan dat van het geïnfilterde rivierwater. Wederom uitgaande van een lineaire spreiding der verblijftijden is in afb. 29 voor verschillende



Afb. 28 - Kunstmatige infiltratie in een gebied met reeds aanwezige grondwaterstroming q . Oorspronkelijke toestand (A) en situatie tijdens infiltratie (B).

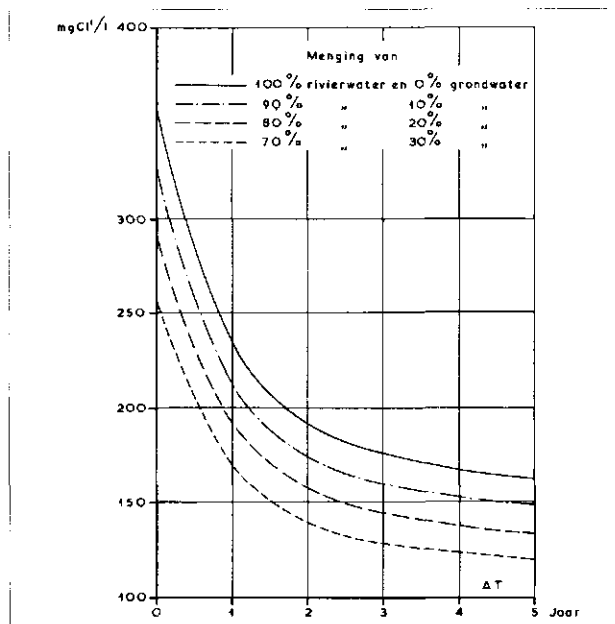
Afb. 29 - Maximum chloridegehalte van het rivierwater te Lobith in een reeks normale jaren onderbroken door een droog jaar, na infiltratie volgens afb. 6 en menging met natuurlijk grondwater (20 mg Cl⁻/l), als functie van $T_m - T_i = \Delta T$.



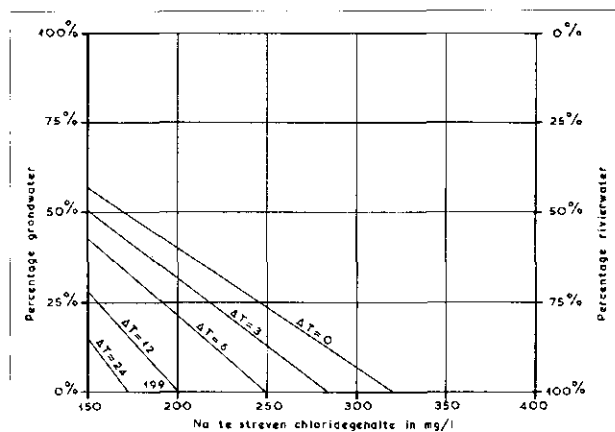
mengverhoudingen het maximale chloridegehalte na een droog jaar als functie van het verschil ΔT in verblijftijd, aangegeven. In afb. 30 is voor verschillende mengverhoudingen het maximale chloridegehalte na een zeer droog jaar weergegeven. Uit de afb. 29 en 30 blijkt, dat naarmate ΔT kleiner wordt gekozen, steeds meer grondwater nodig is om een zeker na te streven chloridegehalte als maximum in het afgeleverde water te handhaven. Indien bijvoorbeeld in de cyclus met het droge jaar naar een maximaal chloridegehalte van 150 mg/l wordt gestreefd dan is bij $\Delta T = 12$ maanden ten hoogste 28 % grondwater nodig, terwijl bij $\Delta T = 6$ maanden kan worden berekend dat deze hoeveelheid stijgt tot 43 %. Het verband tussen het percentage grondwater en het na te streven maximaal chloridegehalte in de opeenvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar is, bij variabele ΔT , weergegeven in afb. 31. In afb. 32 is deze relatie weergegeven indien een reeks van normale jaren wordt onderbroken door een zeer droog jaar. Uit afb. 31 blijkt bijvoorbeeld dat voor het geval $\Delta T = 12$ maanden zonder menging met grondwater, in de cyclus met het droge jaar een chloridegehalte van 199 mg/l moet worden verwacht. De nodige terreinoppervlakte bedraagt in dit geval $6,5 \cdot \frac{Q}{\mu \cdot H}$. Wordt nu beschikt over een terrein met $\Delta T = 6$ maanden en dus een oppervlakte gelijk $3,5 \cdot \frac{Q}{\mu \cdot H}$ dan kan hetzelfde resultaat worden bereikt door bijmenging met 21 % grondwater met een chloridegehalte van 20 mg/l. Uit dit voorbeeld spreekt duidelijk de grote terreinwinst die kan worden verkregen indien menging met van nature afstromend grondwater mogelijk is.

9. **Verandering van het verloop van het chloridegehalte bij infiltratie met variabele capaciteit en menging met natuurlijk grondwater van laag chloridegehalte**

De menging met natuurlijk grondwater behoeft geenszins te geschieden op de wijze zoals in paragraaf 8 en afb. 28 werd voorgesteld. In dat geval werd de menging bepaald door de natuurlijke toestroming van grondwater en is zij, afgezien van klimatologische invloeden, constant en afhankelijk van de grootte van deze toestroming. Het grondwater kan ook apart van het infiltratieterrein worden gewonnen en slechts dan met het geïnfiltreerde rivierwater worden gemengd, indien het chloridegehalte in het afgeleverde water dreigt te stijgen boven een aanvaardbaar geachte grens. In afb. 33 is deze werkwijze aangegeven voor het geval dat wordt beschikt over een infiltratieterrein met lineair gespreide verblijftijden en $T = 12$ maanden. De toe- en afvoer respectievelijk naar en uit het infiltratieterrein is nu variabel en wordt bepaald door de vereiste mengverhouding. Zonder menging zou het chloridegehalte in de beschouwde opeenvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar stijgen tot 199 mg/l. Indien een maximaal chloridegehalte van 150 mg/l wordt gewenst, dan moet geleidelijk steeds meer van elders aangevoerd grondwater worden bijgemengd. In dit geval blijkt met een maximale aanvoer van grondwater (20 mg Cl/l) van 28 % van de maandproductie aan genoemde wens te kunnen worden voldaan. De gemiddelde aan te voeren hoeveelheid grondwater bedraagt over de mengperiode van 21 maanden 16 % van de maandproductie. Bij een jaarproductie van

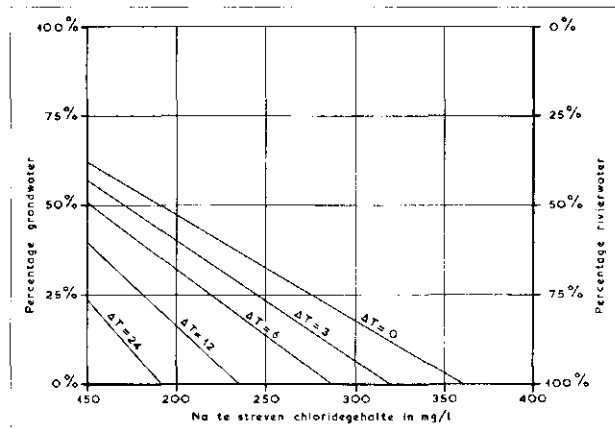


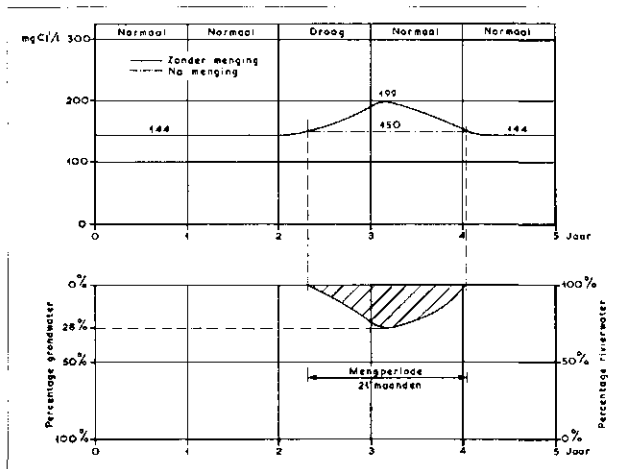
Afb. 30 - Maximum chloridegehalte van het rivierwater te Lobith in een reeks normale jaren onderbroken door een zeer droog jaar, na infiltratie volgens afb. 6 en menging met natuurlijk grondwater (20 mg Cl/l), als functie van $T_m - T_i = \Delta T$.



Afb. 31 - Verband tussen het percentage grondwater en het percentage rivierwater bij zeker na te streven maximaal chloridegehalte in de opeenvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar. $T_i = 0,5$ maand en ΔT in maanden is variabel.

Afb. 32 - Verband tussen het percentage grondwater en het percentage rivierwater bij zeker na te streven maximaal chloridegehalte in de opeenvolging van normale jaren onderbroken door een zeer droog jaar. $T_i = 0,5$ maand en ΔT in maanden is variabel.





Afb. 33 - Menging van geïnfiltrerd rivierwater en natuurlijk grondwater (Cl' -gehalte = 20 mg/l) in de opeenvolging van normale jaren onderbroken door een droog jaar tot een maximum gehalte van 150 mg/l. $T_i = 0,5$, $\Delta T = 12$ maanden.

$Q \text{ m}^3$ is een voorraad van $16\% \times \frac{Q}{12} \times 21 = 0,28 Q \text{ m}^3$

vereist om de serie van 4 normale jaren onderbroken door 1 droog jaar te verwerken met een maximaal chloridegehalte van 150 mg/l in het afgeleverde water.

Het is ook mogelijk om het chloridegehalte van het rivierwater geheel door bijmenging met grondwater te beheersen en uit dien hoofde slechts infiltratie toe te passen om de organische kwaliteit van het water te verbeteren, waarbij volstaan kan worden met de minimale verblijftijd $T_i = T_a$ en $T = 0$.

Nu moet worden nagegaan hoeveel grondwater dan voor menging nodig is om een zekere waarde van het chloridegehalte in het afgeleverde water (c_a) niet te overschrijden. Bij een jaarproductie van $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ moet in de serie van 4 normale jaren onderbroken door een droog jaar in totaal $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ water worden afgeleverd. Met behulp van de afb. 10 en 11 kan nu voor verschillende waarden van ΔT worden berekend hoeveel grondwater, berekend over voornoemde serie van 4 normale jaren onderbroken door een droog jaar, bij verschillende waarden van c_a nodig zal zijn. Voor c_a gelijk 100, 150 en 200 mg Cl'/l en waarden van ΔT van respectievelijk 0, 3, 6, 12 en 24 maanden is de hoeveelheid grondwater berekend. De resultaten van deze berekening zijn aangegeven in tabel IV.

TABEL IV - Noodzakelijke produktie aan grondwater voor c_a gelijk 100, 150 en 200 mg Cl'/l bij ΔT gelijk 0, 3, 6, 12 en 24 maanden bij de opeenvolging van vier normale jaren onderbroken door een droog jaar en een totale produktie van $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ over deze jaren.

ΔT in maanden	$c_a = 100 \text{ mg } Cl'/l$			$c_a = 150 \text{ mg } Cl'/l$			$c_a = 200 \text{ mg } Cl'/l$		
	Produktie aan grondwater in 10^6 m^3	Produktie aan grondwater in %	Maximale produktie aan grondwater in $10^6 \text{ m}^3/\text{mnd.}$	Produktie aan grondwater in 10^6 m^3	Produktie aan grondwater in %	Maximale produktie aan grondwater in $10^6 \text{ m}^3/\text{mnd.}$	Produktie aan grondwater in 10^6 m^3	Produktie aan grondwater in %	Maximale produktie aan grondwater in $10^6 \text{ m}^3/\text{mnd.}$
0	170	34,0	5,9	58	11,6	4,4	13	2,6	2,8
3	174	34,8	5,7	54	10,8	4,1	10	2,0	2,5
6	187	37,4	5,4	45	9,0	3,6	6	1,2	1,8
12	200	40,0	4,6	28	5,6	2,3	—	—	—
24	202	40,4	4,0	27	5,4	1,3	—	—	—

Naast de totale hoeveelheid nodig grondwater is in de tabel ook het betreffende percentage van de waterproduktie over 5 jaar vermeld. Tenslotte is een belangrijke gegeven de maximale produktie aan grondwater per maand bij verschillende waarden van c_a en ΔT . Deze maximale produktie bepaalt immers de maximale pompcapaciteit en daarmee het aantal putten dat is vereist. Uit de gegevens van tabel IV kunnen enkele belangwekkende conclusies worden getrokken.

Indien wordt gestreefd naar een maximaal chloridegehalte van 100 mg/l in het afgeleverde water ($c_a = 100$) dan blijkt dat meer grondwater nodig is naarmate ΔT groter wordt gekozen. In dit geval is afvlakking van het chloridegehalte vóór de menging niet zinvol.

Voor het geval c_a wordt vastgesteld op 150 mg/l lijkt voorafgaande afvlakking door kunstmatige infiltratie op het eerste gezicht wel zinvol.

Immers in het geval $\Delta T = 0$ maanden is $58 \times 10^6 \text{ m}^3$ grondwater nodig en in het geval $\Delta T = 12$ bedraagt deze hoeveelheid $28 \times 10^6 \text{ m}^3$. Om in het geval $\Delta T = 0$ maanden een viertal normale jaren onderbroken door een droog jaar te kunnen verwerken, is een grondwaterwinplaats nodig met een capaciteit van gemiddeld $58 \times 10^6 : 5 = 11,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar, terwijl deze jaarproductie bij voorafgaande afvlakking met $\Delta T = 12$ maanden tot gemiddeld $28 \times 10^6 : 5 = 5,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar kan worden beperkt. Voor het geval voorafgaande afvlakking met $\Delta T = 24$ maanden wordt overwogen is een grondwaterwinplaats met een gemiddelde jaarproductie van $5,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ nodig.

Het behoeft geen betoog dat met name een vergroting van $\Delta T = 12$ naar $\Delta T = 24$ maanden niet zinvol is. Ook een voorafgaande afvlakking met $\Delta T = 12$ maanden moet discutabel worden gesteld. Hierbij moet worden overwogen of de kosten van de inrichting van een infiltratieterrain van deze omvang voor de afvlakking van het zoutgehalte opwegen tegen de inrichting van een grondwaterwinplaats met een gemiddelde capaciteit van $11,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar in plaats van $5,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar, dus $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar meer. De inrichting van het infiltratieterrain vergt een oppervlakte van

$$F = \frac{Q}{\mu \cdot H} \cdot \frac{1}{12} \cdot \frac{\Delta T}{2} = \frac{100 \times 10^6}{0,3 \cdot 50} \cdot \frac{1}{12} \cdot \frac{12}{2} = 3,4 \times 10^6 \text{ m}^2 = 3,4 \text{ km}^2$$

bij een effectief poriënvolume van 30 % en een hoogte van het watervoerende pakket van 50 m.

Het zal duidelijk zijn dat het in vele gevallen de voorkeur verdient een grondwaterwinplaats in te richten met een gemiddelde capaciteit van $11,6 \times 10^6$ m³/jaar in plaats van de stichting van een grondwaterwinplaats met een gemiddelde capaciteit van $5,6 \times 10^6$ m³/jaar en daarnaast een uitbreiding van het infiltratieterrein met 3,4 km².

Voor het geval $c_u = 200$ mg Cl'/l wordt gekozen, verschillen de hoeveelheden voor de menging nodig grondwater zo weinig dat het zonder meer duidelijk is dat het geen zin heeft voorafgaande afvlakking van het chloridegehalte door kunstmatige infiltratie toe te passen.

Het is mogelijk dat in de nabijheid van het infiltratieterrein geen terrein kan worden gevonden waaraan grondwater voor de menging kan worden onttrokken. Deze menging is echter zo effectief dat naar andere methoden van menging met water met een laag chloridegehalte zal worden gezocht.

Eén van deze methoden betreft de menging met ontzout water. In principe behoeft dan geen voorraad te worden gevormd indien de ontzoutingsinstallatie op maximale mengcapaciteit wordt gedimensioneerd. Deze capaciteit zal dan echter hoog moeten zijn en een combinatie van een lagere capaciteit met een voorraadreservoir ligt in de rede.

Als bron van voeding van de ontzoutingsinstallatie behoeft niet noodzakelijkerwijze dezelfde bron te worden gekozen waaraan het infiltratiewater wordt onttrokken. Brak grondwater kan bijvoorbeeld ook dienst doen. Menging met ontzout water (Cl' = 0 mg/l) vereist in een normaal jaar $0,07.Q$ en in een droog jaar $0,20.Q$ m³ aan ontzout water. Indien de ontzoutingsinstallatie een produktiecapaciteit van bijvoorbeeld $0,1.Q$ bezit dan draagt de nodige voorraad $0,1.Q$ welke in ca. 3 opeenvolgende normale jaren kan worden gevormd.

Het ligt in de bedoeling van de auteurs van dit artikel om in een volgende publikatie op het gecombineerd gebruik van gesloten en open voorraadvorming met inschakeling van menging met ontzout water nader in te gaan.

Resumerend kan dus worden gesteld dat het mogelijk is om met een minimum aan terrein vergende wijze van infiltratie en een mengsysteem met van elders aangevoerd grondwater of ontzout water een optimale kwaliteit water uit organisch en anorganisch oogpunt te bereiden.

10. Samenvatting

In dit artikel wordt nagegaan op welke wijze met behulp van kunstmatige infiltratie de kwaliteit van water uit de Rijn kan worden verbeterd.

Hierbij kunnen vier aspecten worden onderscheiden:

- vermindering van de aantallen bacteriën, virussen en andere pathogene organismen door zelfreiniging;
- vermindering van de organische verontreiniging, inclusief reuk- en smaakstoffen door oxydatieve afbraak;
- verandering van de gehalten aan ijzer, mangaan, koolzuur, kalk- en magnesiumverbindingen (hardheid) en dergelijke door chemische reacties in de infiltratiebekkens en de ondergrond;
- afvlakking van de variaties in zoutgehalte en temperatuur door menging.

In hoofdzaak komt alleen de verbetering van de anorga-

nische kwaliteit gemeten aan het Cl'-gehalte van het rivierwater met behulp van kunstmatige infiltratie aan de orde in dit artikel. De volgende systemen werden onderzocht.

Infiltratie met:

- constante capaciteit;
- constante capaciteit en tijdelijke opslag van water;
- variabele capaciteit;
- constante capaciteit en menging met natuurlijk grondwater;
- variabele capaciteit en menging met natuurlijk grondwater;

De onderzochte systemen kenmerken zich van elkaar door een meer of minder uitgesproken verbetering van de anorganische kwaliteit van het rivierwater, waarbij met toepassing van enkele systemen opvallend goede resultaten kunnen worden bereikt.

Welk systeem voor verwezenlijking het meest in aanmerking komt is onmogelijk eenduidig aan te geven. Dit zal in de praktijk van plaats tot plaats kunnen verschillen. Bij de keuze van de toe te passen methoden zijn onder meer de volgende factoren van belang:

- de beschikbare terreinoppervlakte;
- de geo-hydrologische gesteldheid van het infiltratiepakket;
- de afstand van het infiltratieterrein tot de bron waaraan het ruwe water moet worden onttrokken;
- de mate waarin voorzuivering van het te infiltreren water moet plaatsvinden;
- de aanwezigheid van terreinen of andere bronnen waaraan water met een laag zoutgehalte kan worden onttrokken voor menging.

Indien voor een bepaald geval bovenstaande factoren bekend zijn, dan is het mogelijk met behulp van de in dit artikel ontwikkelde methoden van infiltratie de meest geëigende oplossing van afvlakking van het Cl'-gehalte te kiezen, waarbij misschien met andere methoden nog betere resultaten zijn te bereiken. In de praktijk zal daarnaast nog rekening moeten worden gehouden met de eisen welke hygiënische betrouwbaarheid en organische verontreiniging aan het water stellen.

Literatuur

- Huisman, L., *De toekomstige drinkwatervoorziening van Nederland*, KNAG Geografisch Tijdschrift, 1967, no. 4.
- Haaren, F. W. J. van, *The river Rhine as a source of drinking water*, Proc. of the Society for Water Treatment and Examination, 1963, p. 177-194.
- Huisman, L. en Martijn, Th. G., *Kwaliteitsverbetering in doorstroombekkens*, H₂O, 1968, no. 3 en 4.
- Martijn, Th. G., *Kwaliteitsverbetering in spaarbekkens*, H₂O, 1968, no. 21 en 25.
- Huisman, L., *Artificial recharge for public water supplies in urbanized regions*, publication no. 72 of the IASH, Symposium of Haifa, 1967.
- Huisman, L. en Haaren, F. W. J. van, *Treatment of water before infiltration and modification of its quality during its passage underground*, IWSA, Congres Barcelona, 1966.
- Baars, J. K., *Travel of pollution and purification en route in sandy soils*, Bulletin World Health Organization 16.727 (1957).
- Leeftang, K. W. H., *Kwaliteitsverandering door infiltratie*, Zeventiende Vacantiecursus in drinkwatervoorziening, 1965.
- Martijn, Th. G., *Afvoer- en chloridekarakteristieken van de Rijn in verband met voorraadvorming*, Water, 1967, no. 4.