

Kwaliteitsverbetering in doorstroombekkens

Grondslagen Basisplannen 3

1. Inleiding

Wanneer voor een drinkwatervoorziening gebruik wordt gemaakt van rivierwater, dat slechts gedurende een deel van het jaar in voldoende mate ter beschikking staat, dan zijn voorraadbekkens nodig om droge perioden te overbruggen.

Uit het werk van Houston [1, 2] *) voor de Metropolitan Water Board in Londen is gebleken, dat ten gevolge van zelfreiniging de kwaliteit van het door zulke bekkens stromende water aanzienlijk verbetert. Over deze kwaliteitsverbetering zijn ook in Nederland verschillende onderzoeken verricht. In het bijzonder mag hierbij genoemd worden het werk van Schaeffer [3] en dat van Leeflang en Edelman [4]. In dit artikel zal op het werk van laatstgenoemden worden voortgebouwd.

De bovengenoemde kwaliteitsverbetering had in het bijzonder betrekking op de vermindering van het aantal pathogene bacteriën. Wordt verondersteld, dat op elk tijdstip t deze vermindering evenredig is met het dan nog aanwezige aantal bacteriën n (Wet van Chick), dan geldt

$$-\frac{dn}{dt} = \alpha \cdot n,$$

waarin α een evenredigheidsconstante is. Integratie van deze vergelijking tussen de grenzen, $t = 0$, $n = n_0$ en $t = t$, $n = n_t$ geeft

$$n_t = n_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

d.w.z. dat het aantal bacteriën logaritmisch met de tijd afneemt. Uit proeven omtrent de afsterving van coli-bacteriën in Rijnwater vond Leeflang [4] deze formule bevestigd met de meest ongunstige (kleinste) waarde van de evenredigheidsconstante α gelijk 0,3, wanneer de verblijftijd t in dagen werd gemeten.

Van deze waarde van α uitgaande, bedraagt de kwaliteitsverbetering als functie van de verblijftijd:

$$R = \frac{n_0}{n_t} = e^{0,3 \cdot t}$$

d.w.z. dat voor elke 7,7 dagen verblijftijd het gehalte

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

SUMMARY

Improvement of water quality in impounding reservoirs with constant water circulation.

In impounding reservoirs short-circuiting of water currents has to be avoided if the improvement of bacteriological and organic quality is aimed at.

If it is desired to lower the salt content of surface water, however, the only way to do so is, apart from desalination, to mix water of a relatively high salt content with a less salt containing water by short-circuiting of water currents.

Two types of reservoirs can be used. Reservoirs with constant water circulation (constant water level) and standing reservoirs (variable water level).

In this paper the authors describe their studies in view of improving the anorganic conditions of water from the Rhine by means of reservoirs with constant water circulation.

aan coli-bacteriën in Rijnwater met (tenminste) een factor 10 daalt.

R =	100	1.000	10.000	100.000
t =	15	23	31	38 (dagen)

Deze kwaliteitsverbetering is zo groot, dat thans wel uitsluitend voor dit doel bij het zuiveringsproces van drinkwater doorstroombekkens worden ingeschakeld. Onder een doorstroombekken wordt verstaan, een bekken waarvan het waterpeil aan geen enkele variatie onderhevig is, hetgeen inhoudt dat de toevoer van water naar het bekken gelijk is aan de afvoer. Als voorbeeld in Nederland kan worden genoemd de Loenerveense plas van de Gemeentewaterleidingen te Amsterdam. Om hydrologische redenen mag de waterstand van deze plas maar weinig variëren, waardoor hij niet voor waterberging kan worden gebruikt.

2. Kortsluiting

De boven berekende kwaliteitsverbetering geldt intussen alleen, wanneer alle waterdeeltjes even lang in het bassin verblijven, wanneer van alle waterdeeltjes de verblijftijd t dezelfde is. In de praktijk wordt dit nimmer bereikt en treedt steeds een spreiding van de verblijftijden op. Ten gevolge van de wrijving is immers langs de bodem en wanden de stroomsnelheid van het water geringer dan in het midden van het bassin, terwijl door secundaire stromingen als gevolg van wind, dichtheidsverschillen (temperatuur), een geconcentreerde instroming e.d. deze snelheidsverschillen nog groter kunnen worden. Hierdoor zal een deel van het water de uitlaat binnen de gemiddelde verblijftijd bereiken en een ander deel van het water daar veel langer over doen. Dit verschijnsel wordt kortsluiting genoemd en heeft als gevolg van het exponentieel met de tijd afnemende effect van de zelfreiniging een aanzienlijke vermindering van de gemiddelde kwaliteitsverbetering tot resultaat.

In de praktijk — en vooral bij modelproeven in het laboratorium — kan deze kortsluiting worden gemeten door van een bepaald tijdstip af een tracer, bijvoorbeeld een kleurstof, in een constante hoeveelheid aan het water bij de bekkeninlaat toe te voegen en het gehalte

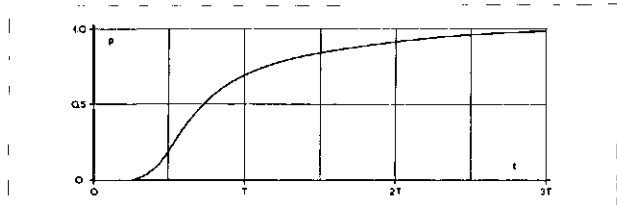


Fig. 1 - Cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden in een doorstroombekken.

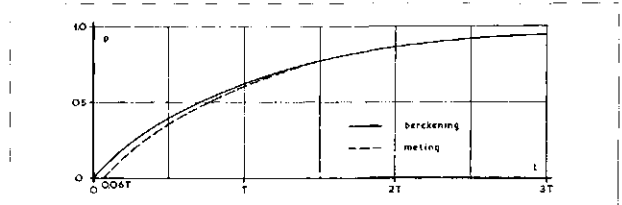


Fig. 3 - Cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden in het doorstroombekken met volledige menging volgens fig. 2.

aan deze tracer in het afstromende water continu of althans met korte intervallen te meten. Direct na begin van toevoeging, is het gehalte aan deze tracer in het water bij de bekkenuitlaat nog nul om na verloop van tijd eerst langzaam, daarna sneller en vervolgens weer langzamer te stijgen tot uiteindelijk het gehalte aan de bekkeninlaat wordt bereikt. Wanneer nu op een tijd t van begin van toevoeging af gemeten, het gehalte aan de uitlaat van het bekken is gestegen tot c_e bij een (constante) concentratie aan de inlaat gelijk c_0 , dan heeft

een deel $p = \frac{c_e}{c_0}$ van het water een verblijftijd kleiner dan t en een deel $1-p$ een verblijftijd groter dan t . Grafisch is een voorbeeld van zulk een kortsluitkromme weergegeven in fig. 1, waarin T nog de gemiddelde

verblijftijd voorstelt, d.w.z. $T = \frac{V}{Q}$, waarin V de bekkeninhoud en Q de stroomsterkte is. Om de kortsluitkromme, d.w.z. de frequentieverdeling van de verblijftijden, voor een mathematische berekening toegankelijk te maken, zal eerst worden verondersteld dat de lengte van het bassin niet groter is dan enkele malen de breedte. In dit geval mag namelijk worden verondersteld dat in het bekken volkomen menging optreedt en de concentratie aan bovengenoemde tracer over de gehele bekkeninhoud dezelfde is, gelijk aan die

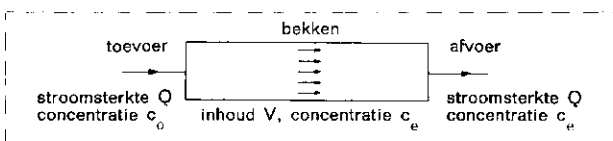


Fig. 2 - Doorstroombekken met volledige menging.

in het uitstromende water. Schematisch is deze situatie weergegeven in fig. 2. Toepassing van de continuïteitsvergelijking op de hoeveelheid tracer geeft nu:

$$\text{toevoer} = \text{afvoer} + \text{berging}$$

$$Q \cdot dt \cdot c_0 = Q \cdot dt \cdot c_e + V \cdot dc_e$$

Deze vergelijking kan worden vereenvoudigd tot

$$\frac{dt}{T} = \frac{dc_e}{c_0 - c_e}, \text{ geïntegreerd}$$

$$\frac{t}{T} = -\ln(c_0 - c_e) + A \text{ met de integratieconstante}$$

A bepaald uit de randvoorwaarde $t = 0, c_e = 0 \therefore A = \ln c_0$.

Substitutie van deze waarde geeft na omwerken

$$c_e = c_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \text{ of } p = \frac{c_e}{c_0} = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$$

Deze frequentieverdeling van de verblijftijden is grafisch weergegeven in fig. 3, waarin tevens zijn vermeld de resultaten van de modelproeven welke door het Water-

loopkundig Laboratorium te Delft in opdracht van de Gemeentewaterleidingen te Amsterdam zijn verricht [4]. Het model had een verhouding tussen lengte en breedte van 2,5 en tussen lengte en diepte van 40. Zelfs voor zulk een langgerekt bassin blijkt de aanname van volledige menging reeds na korte tijd in overeenstemming met de werkelijkheid!

Treedt in het geheel geen kortsluiting op, is van alle waterdeeltjes de verblijftijd gelijk aan T , dan wordt volgens § 1 de kwaliteitsverbetering tengevolge van zelf-

reiniging gegeven door: $R = e^{\alpha \cdot T}$

Treedt kortsluiting op zoals in fig. 3 voor volledige menging is aangegeven en is T nu de gemiddelde verblijftijd, dan bedraagt deze kwaliteitsverbetering

$$R' = \frac{\int_0^1 n_0 \cdot dp}{\int_0^1 n_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot dp} = \frac{1}{\int_0^1 e^{-\alpha \cdot t} \cdot dp}$$

$$\text{met } p = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \text{ en } dp = \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot dt$$

kan deze betrekking worden herleid tot

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{T} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\alpha \cdot t} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot dt} = 1 + \alpha \cdot T$$

Voor $\alpha = 0,3$ volgt hieruit:

$T =$	15	30	45	60	dagen
$R =$	100	8100	730.000	65.000.000	
$R' =$	5,5	10	14,5	19	

d.w.z. een enorme achteruitgang in de mate van zelfreiniging.

Uit bovenstaande tabel blijkt wel duidelijk, dat de vermindering in kwaliteitsverbetering nimmer kan worden gecompenseerd door de doorstroombekkens grotere afmetingen te geven. Dit kan alleen geschieden door de kortsluiting te beperken en gebruikelijk is dit te doen door de totale bekkeninhoud over een aantal in serie geschakelde bassins te verdelen op de wijze als in fig. 4 schematisch is weergegeven. In elk bassin treedt welis-

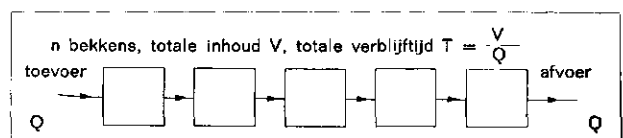


Fig. 4 - Doorstroombekken, in n bassins onderverdeeld.

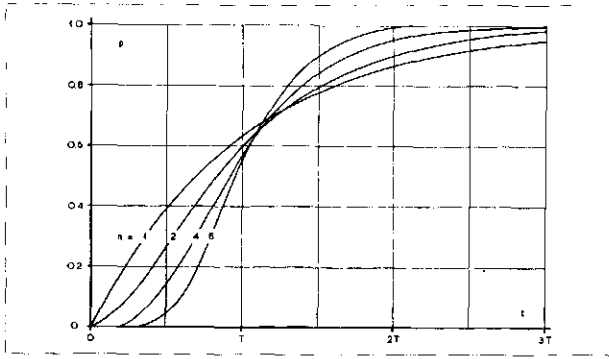


Fig. 5 - Cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijd voor een doorstroombekken in n bassins onderverdeeld.

waar weer volledige menging op, doch het water dat het tweede bassin binnenstroomt heeft nu niet meer de oorspronkelijke samenstelling, doch die van het water uit het eerste bassin afkomstig. Uitgaande van deze gedachtengang kunnen ook de kortsluitkrommen worden berekend (vergelijk § 3); het resultaat van deze berekeningen is grafisch in fig. 5 weergegeven.

De kwaliteitsverbetering tengevolge van zelfreiniging kan nog eenvoudiger worden bepaald. Elk bassin geeft immers dezelfde kwaliteitsverbetering

$$R' = 1 + \alpha \cdot \frac{T}{n}$$

Zodat voor n in serie geschakelde reservoirs wordt verkregen

$$R'' = \left(1 + \alpha \cdot \frac{T}{n}\right)^n$$

Voor $\alpha = 0,3$ en $T = 30$ dagen volgt hieruit

n =	1	2	3	4	5	6	∞
R'' =	10	30	64	112	172	244		8100

Het is nu wel degelijk mogelijk om de kwaliteitsvermindering tengevolge van kortsluiting door een grotere bekkeninhoud te compenseren. Wordt b.v. een 10.000-voudige verbetering gewenst, dan is met α gelijk 0,3 zonder kortsluiting een bekken nodig van 31 dagen inhoud en bij 6 bekkens in serie met in elk bekken volledige menging een totale inhoud van 73 dagen. Het is intussen beslist niet nodig de bassins achter elkaar te plaatsen in een lange keten, zij kunnen ook naast elkaar worden gelegd, b.v. op de wijze als in fig. 6 is weergegeven.

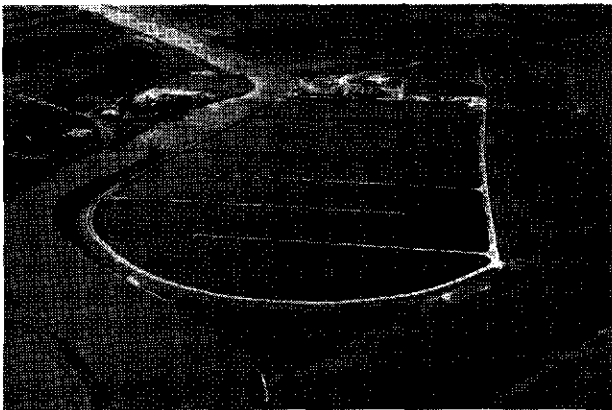


Fig. 6 - Waterwerk de Berenplaat, Drinkwaterleiding van Rotterdam.

3. Menging

In doorstroombekkens treedt intussen niet alleen zelfreiniging op, waardoor pathogene kiemen afsterven, ammoniak en organische stof wordt geoxideerd, zwevende deeltjes tot bezinking komen enz., maar vindt ook menging plaats met een gelijkmatiger samenstelling van het water als gevolg. Voor de toekomstige drinkwatervoorziening van Nederland is deze menging zelfs van essentiële betekenis. Hiervoor zal immers in belangrijke mate gebruik moeten worden gemaakt van het water van de Rijn. Op deze rivier worden grote hoeveelheden keukenzout (NaCl) kunstmatig geloosd. Hierdoor stijgt het

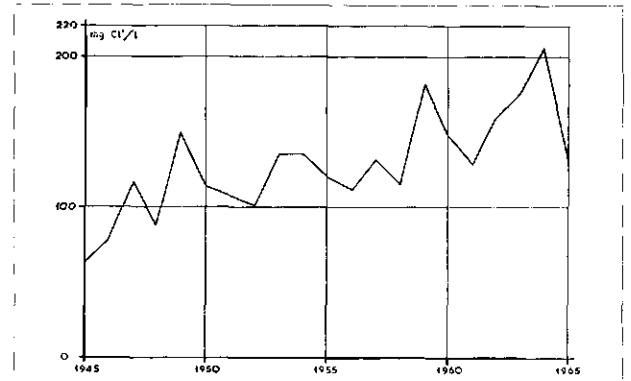


Fig. 7 - Jaargemiddelde van het Cl-gehalte in het Rijnwater te Vreeswijk.

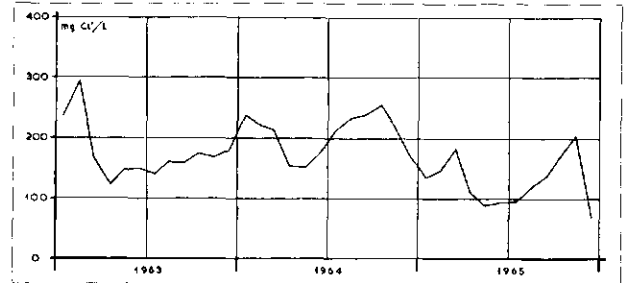


Fig. 8 - Maandgemiddelden van het Cl-gehalte in het Rijnwater te Vreeswijk.

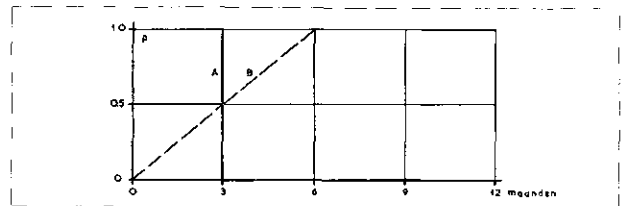


Fig. 9 - Cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijd in een doorstroombekken zonder (A) en met ideale kortsluiting (B).

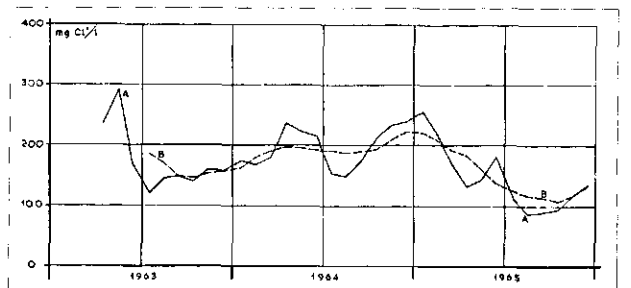


Fig. 10 - Cl-gehalte van het Rijnwater aan de uitlaat van doorstroombekken A en B volgens fig. 9.

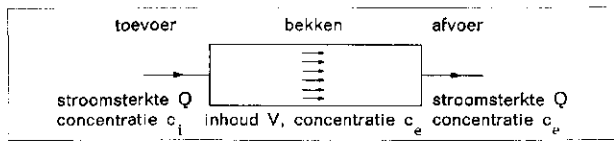


Fig. 11 - Doorstroombekken met volledige menging.

gemiddelde Cl'-gehalte van het rivierwater (fig. 7). Door wisselingen in de waterafvoer vertoont het Cl'-gehalte grote variaties (fig. 8). Verlaging van het gemiddelde Cl'-gehalte zal moeten geschieden door in Frankrijk en Duitsland de lozing van keuzenzout te beperken. De hoge Cl'-gehalten tijdens droge perioden kunnen echter ook worden verminderd door in de bovengenoemde doorstroombekkens dit water te mengen met rivierwater dat enige maanden tevoren, tijdens een hoge waterafvoer met lagere Cl'-gehalten, was ingenomen. Evenals de zelfreiniging, hangt ook deze menging van de mate van kortsluiting af. De gevolgen zijn nu echter precies omgekeerd: zonder kortsluiting treedt in het geheel geen menging op en planten de wisselingen in watersamenstelling zich onverzwakt voort, de kwaliteitsafvlakking is des te sterker naarmate de kortsluitkromme flauwer verloopt. Voor de vorm van deze kortsluitkrommen zijn in fig. 9 bij een gemiddelde verblijftijd van 3 maanden twee gevallen getekend. In fig. 10 is aangegeven hoe de in fig. 8 weergegeven samenstelling van het rivierwater hierdoor verandert. Voorwaar een belangrijk verschil!

Voor de berekening van de wijze waarop in een doorstroombekken de concentratie van overigens onveranderlijke bestanddelen (als b.v. het Cl') wordt afgevlakt, zal volledige menging worden ondersteld. De situatie is schematisch weergegeven in fig. 11. Toepassing van de continuïteitsvergelijking op de hoeveelheid van de beschouwde stof geeft:

$$\begin{aligned} \text{toevoer} &= \text{afvoer} + \text{berging} \\ Q \cdot dt \cdot c_i &= Q \cdot dt \cdot c_e + V \cdot dc_e \end{aligned}$$

of met als gemiddelde verblijftijd $T = \frac{V}{Q}$

$$\frac{dc_e}{dt} + \frac{1}{T} \cdot c_e = \frac{1}{T} \cdot c_i$$

Dit is een lineaire differentiaalvergelijking van de eerste orde met als oplossing

$$c_e = \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \int e^{\frac{t}{T}} \cdot c_i \cdot dt + A \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

waarin de integratieconstante A uit de randvoorwaarde moet worden bepaald.

Met behulp van deze vergelijking kunnen de reeds in fig. 5 weergegeven kortsluitkrommen gemakkelijk worden berekend. Hier werd immers van het tijdstip $t = 0$ af de concentratie aan de inlaat van het eerste bassin sprongsgewijze verhoogd van 0 op c_0 , d.w.z.

$$\begin{aligned} t < 0, & c_i = 0 \\ t \geq 0, & c_i = c_0 \end{aligned}$$

Voor het water aan de uitlaat van het eerste bassin volgt nu

$$\begin{aligned} c_e &= \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \int e^{\frac{t}{T}} \cdot c_0 \cdot dt + A \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad \text{of} \\ c_e &= c_0 + A \cdot e^{-\frac{t}{T}} \end{aligned}$$

met A bepaald uit de randvoorwaarde $t = 0, c_e = 0 \therefore A = -c_0$, dus

$$c_e = c_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

Wordt nu dit water aan een tweede bassin van dezelfde afmetingen toegevoegd, dan geldt hiervoor:

$$\begin{aligned} c_i &= c_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \\ c_e &= \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \int e^{\frac{t}{T}} \cdot c_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \cdot dt + A \cdot e^{-\frac{t}{T}} \end{aligned}$$

of

$$c_e = c_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}}\right) + A \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

met de integratieconstante A bepaald uit de randvoorwaarde $t = 0, c_e = 0, A = -c_0$, dus

$$c_e = c_0 \cdot \left\{1 - \left(1 + \frac{t}{T}\right) \cdot e^{-\frac{t}{T}}\right\}$$

Wordt dit water vervolgens gebracht in een derde reservoir, dan wordt voor de uitlaat gevonden

$$c_e = c_0 \cdot \left\{1 - \left(1 + \frac{t}{T} + \frac{t^2}{2T^2}\right) \cdot e^{-\frac{t}{T}}\right\}$$

en na n reservoirs ieder met een verblijftijd T

$$c_e = c_0 \cdot \left\{1 - \left(1 + \frac{t}{T} + \frac{t^2}{2!T^2} + \frac{t^3}{3!T^3} + \dots + \frac{t^{n-1}}{(n-1)!T^{n-1}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{T}}\right\}$$

Voor de cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden geldt

$$p = \frac{c_e}{c_0} \quad \text{en dus}$$

$$\begin{aligned} 1 - p &= \left\{1 + \left(\frac{t}{T}\right) + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^2 + \frac{1}{3!} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^3 \right. \\ &\quad \left. + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{n-1}\right\} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \end{aligned}$$

Dit achter elkaar schakelen van bekken had intussen tot doel om de vermindering van de zelfreiniging tengevolge van kortsluiting zoveel mogelijk te beperken. Hiermede neemt echter ook de menging af en zal de kwaliteitsafvlakking geringer zijn. Is deze kwaliteitsafvlakking het voornaamste doel van het doorstroombekken, dan kunnen de beste resultaten worden verkregen door de totale beschikbare inhoud tot één groot reservoir te verenigen.

Om over de kwaliteitsafvlakking in een enkel doorstroombekken met volledige menging een indruk te krijgen, zal worden aangenomen dat de concentratie aan de inlaat sinusvormig verloopt:

$$c_i = c_0 + B \cdot \sin \omega t$$

Hiermede volgt voor de concentratie aan de uitlaat

$$c_e = \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \int_0^t e^{\frac{t}{T}} (c_0 + B \cdot \sin \omega t) \cdot dt + A \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

$$c_e = c_0 + \frac{B}{1 + \omega^2 \cdot T^2} \cdot (\sin \omega t - \omega T \cdot \cos \omega t) + A \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

Met de gemiddelde concentratie aan de inlaat gelijk aan die bij de uitlaat volgt $A = 0$ en kan de oplossing worden vereenvoudigd tot

$$c_e = c_0 + \frac{B}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot T^2}} \cdot \sin(\omega t - \text{bgtg } \omega T) \text{ of}$$

$c_e = c_0 + \alpha \cdot B \cdot \sin \omega(t - t_0)$.
d.w.z. wederom een sinusvormige verandering met een tot αB gereduceerde amplitudo en een vertraging t_0 . Heeft de sinusvormige verandering een periode van 1 jaar ($\omega = 2\pi/\text{jaar}$) dan worden voor gemiddelde verblijftijden T van 2, 4 en 6 maanden de onderstaande resultaten verkregen:

verblijftijd T	reductie α	vertraging t_0
2 maanden	0,69	1,54 maanden
4 maanden	0,43	2,15 maanden
6 maanden	0,30	2,41 maanden

4. Prioriteiten

Zoals in de vorige paragrafen werd uiteengezet, moet de constructie van een doorstroombekken voor kwaliteitsverbetering aan twee tegenstrijdige eisen voldoen. Voor een zo groot mogelijke verbetering van de bacteriologische kwaliteit, als ook voor de verwijdering van organische stof, moet een zodanige constructie worden gekozen, dat kortsluiting zoveel mogelijk wordt vermeden; d.w.z. de verblijftijden van de verschillende waterdeeltjes moeten onderling zo weinig mogelijk verschillen. Afvlakking van het gehalte aan anorganische zouten daarentegen vergt een constructie waarbij zoveel mogelijk menging optreedt, waarbij dus de verblijftijden zoveel mogelijk uiteenlopen.

Vroeger werd terecht aan een verbetering van de bacteriologische kwaliteit de voorkeur gegeven. Voor het verkrijgen van een hygiënisch betrouwbaar water stonden immers slechts biologische methoden ter beschikking, terwijl industriële lozingen van afvalzouten nog geen vormen van betekenis hadden aangenomen. Die betrouwbaarheid kan thans echter eenvoudig, goedkoop en zeker ook op andere wijze worden verkregen, bijvoorbeeld met chloor of ozon, waarmee ook een belangrijk deel van de organische belasting kan worden weggenomen. Afgezien van ontzouting, waarvan de kosten vooralsnog te hoog zijn, kunnen de hoge zoutgehalten van het Rijnwater in droge perioden alleen door menging worden verlaagd. Dit is de reden dat in het navolgende de betekenis van doorstroombekkens voor de verbetering van de anorganische kwaliteit zal worden onderzocht.

Nog beter dan met doorstroombekkens met constant peil kan de bovengenoemde kwaliteitsverbetering worden verkregen met spaarbekkens, dat zijn reservoirs met een variabel waterpeil. Aan deze spaarbekkens zijn echter ook grote nadelen verbonden, waaronder als belangrijkste

kunnen worden genoemd de beïnvloeding van de grondwaterstand in de omgeving en de grote taludbreedte die tegen golfslag dient te worden beschermd. Ook met het oog op het behoud van natuurschoon dient aan het constante peil van doorstroombekkens de voorkeur te worden gegeven.

In dit artikel zal alleen het gebruik van doorstroombekkens worden behandeld. De kwaliteitsverbetering die met spaarbekkens valt te bereiken, zal in één der volgende Grondslagen basisplannen aan de orde komen.

5. De berekening van doorstroombekkens gevoed met Rijnwater

Uitgaande van een natuurlijk Cl^- -gehalte van 20 mg/l en een kunstmatige Cl^- -afvoer van 230 kg/sec, werd door Martijn [5] het chronologische verloop van het chloridegehalte van het Rijnwater te Lobith in een normaal, een droog en een zeer droog jaar berekend. In de figuren 12 tot en met 14 zijn de verkregen resultaten grafisch met een stippelijijn weergegeven. Om de mathematische

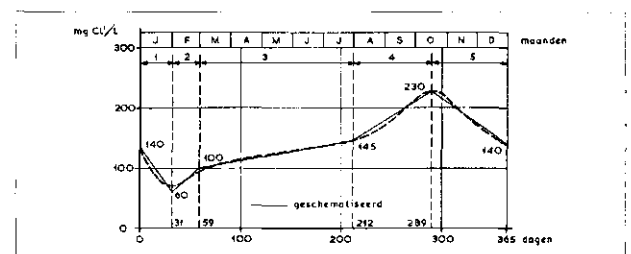


Fig. 12 - Chloridegehalte van het Rijnwater te Lobith in een normaal jaar.

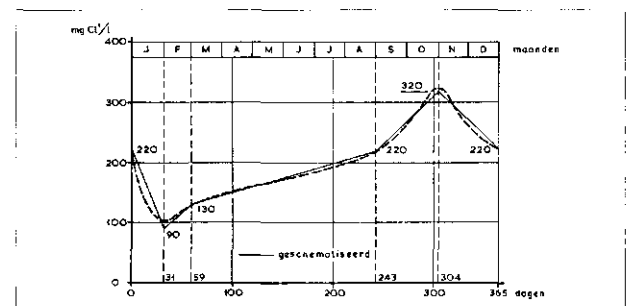


Fig. 13 - Chloridegehalte van het Rijnwater te Lobith in een droog jaar.

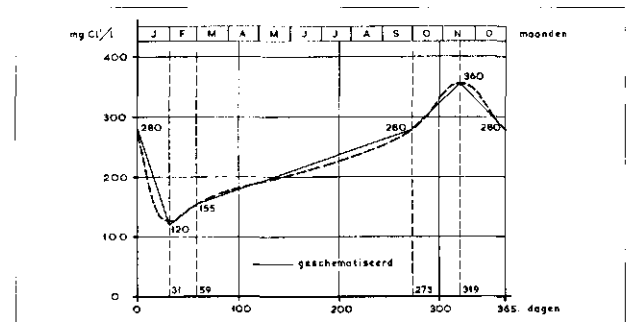


Fig. 14 - Chloridegehalte van het Rijnwater te Lobith in een zeer droog jaar.

berekening van doorstroombekkens gevoed met Rijnwater te vereenvoudigen, is het gewenst dit chronologische verloop van het Cl'-gehalte door een aaneenschakeling van rechte lijnen te vervangen. Het zo verkregen geschematiseerde verloop is eveneens in de figuren 12 tot en met 14 weergegeven en zal aan de volgende berekeningen ten grondslag worden gelegd.

Het afgeleide chronologische verloop van het chloridegehalte van het Rijnwater in een normaal, een droog en een zeer droog jaar is uiterst geschikt om verschillende methoden van bedrijfsvoering met doorstroombekkens onderling te vergelijken. Het verdient echter aanbeveling in een concreet geval de bereikte resultaten te toetsen aan het werkelijke afvoerterloop en het daarmee samenhangende chlorideverloop, zoals dit in het verleden is voorgekomen.

Om misverstanden te voorkomen, zij nog opgemerkt dat de in de aanhef van deze paragraaf genoemde kunstmatige zoutbelasting van de Rijn gold voor het jaar 1963. Nadien is een aanzienlijke stijging opgetreden, tot 270 kg/sec als gemiddelde van 1966, doch de werkzaamheden van de Internationale Rijncommissie zullen er waarschijnlijk toe leiden, dat in de toekomst een daling optreedt, hopelijk tot ver beneden de hier aangenomen waarde. Bij aanleg van bekkens benedenstrooms van Lobith zal voorts met de invloeden van het benedenstroomse gebied op kwantiteit en kwaliteit van het Rijnwater rekening moeten worden gehouden.

De lineair met de tijd verloopende concentratie van het chloridegehalte van het Rijnwater aan de inlaat van het bekken kan worden voorgesteld door middel van de formule:

$$c_i = c_0 + \Theta \cdot t,$$

waaruit voor de concentratie bij de uitlaat volgt:

$$c_e = \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \left\{ e^{\frac{t}{T}} \cdot (c_0 + \Theta \cdot t) \cdot dt + A \cdot e^{-\frac{t}{T}} \right\}, \text{ of}$$

$$c_e = \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \left\{ c_0 \cdot T \cdot e^{\frac{t}{T}} + \Theta \cdot e^{\frac{t}{T}} \cdot (t \cdot T - T^2) \right\} + A \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \text{ vereenvoudigd:}$$

$$c_e = c_0 + \Theta \cdot (t - T) + A \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

in welke formule A kan worden bepaald uit de waarde van c_e ten tijde $t = 0$.

Doorstroombekkens ten behoeve van kwaliteitsafvlakking kunnen op verschillende manieren worden gesitueerd, als één groot bekken, dan wel als een aantal kleine bekkens, in serie of parallel geschakeld. In het volgende zullen verschillende mogelijkheden worden onderzocht, waarbij intussen nog van een gemiddelde verblijftijd van minstens 1/10 jaar of 36,5 dag, zal worden uitgegaan om in geval van calamiteiten op de rivier voldoende gelegenheid tot het treffen van maatregelen te hebben.

6. Kwaliteitsafvlakking in doorstroombekkens bij gebruikmaking van één reservoir

Gesteld een waterleidingbedrijf met een jaarproductie van 100 miljoen m^3 of gemiddeld $0,274 \times 10^6 m^3/dag$, dat is aangewezen op het gebruik van water van de Rijn en daarom wil overgaan tot het stichten van één doorstroombekken ter verbetering en afvlakking van de kwaliteit van het water. Voorlopig zal worden aangenomen dat dit bekken een inhoud heeft van $50 \times 10^6 m^3$, dus een gemiddelde verblijftijd T van 183 dagen.

Voor een aaneenschakeling van normale jaren geldt nu, dat het Cl'-gehalte aan de bekkenuitlaat aan begin en einde van het jaar dezelfde waarde moet hebben, d.w.z.

$$t = 0, c_e = X \text{ en } t = 365, c_e = X,$$

terwijl overeenkomstig fig. 12 het Cl'-gehalte aan de inlaat kan worden weergegeven door:

$$c_i = c_0 + \Theta \cdot t,$$

met als waarden van Θ :

$$\text{Traject 1: } 0-31 \text{ dagen: } \Theta_1 = -\frac{140-60}{31} = -2,581$$

$$\text{Traject 2: } 32-59 \text{ dagen: } \Theta_2 = -\frac{60-100}{28} = +1,429$$

$$\text{Traject 3: } 60-212 \text{ dagen: } \Theta_3 = -\frac{100-145}{153} = +0,294$$

$$\text{Traject 4: } 213-289 \text{ dagen: } \Theta_4 = -\frac{145-230}{77} = +1,103$$

$$\text{Traject 5: } 290-365 \text{ dagen: } \Theta_5 = -\frac{230-140}{76} = -1,184$$

Voor de verschillende trajecten geldt de algemene formule:

$$c_e = c_0 + \Theta \cdot (t - T) + A \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

Voor de trajecten 1, 2, 3, 4 en 5 wordt de tijd aangeduid met respectievelijk de symbolen t_1, t_2, t_3, t_4 en t_5 , waarbij

$$\begin{aligned} t_1 &= t, \\ t_2 &= t - 31, \\ t_3 &= t - 59, \\ t_4 &= t - 212, \\ t_5 &= t - 289. \end{aligned}$$

Bij invoering van t in een traject, dient dus de tijdsduur van voorgaande trajecten van $t = 0$ af, in mindering te worden gebracht.

Voor het traject 1, van $t = 0$ tot en met $t = 31$, geldt nu:

$$c_e = c_0 + \Theta \cdot (t - T) + A \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

met $c_0 = 140, \Theta = -2,581, T = 183$

en als randvoorwaarde $t = 0, c_e = X$.

Hieruit volgt $A = X - 612$ en voor $t = 31$

$$c_e = 140 - 2,581 \cdot (31 - 183) + (X - 612) \cdot e^{-\frac{31}{183}} = 15 + 0,845 \cdot X$$

Voor traject 2 geldt dezelfde formule met $c_0 = 60, \Theta = +1,429, T = 183$

en als randvoorwaarde $t_2 = 0, c_e = 15 + 0,845 \cdot X$, waaruit volgt

$$A = 0,845 \cdot X + 217 \text{ en voor } t = 59 (t_2 = 28):$$

$$c_e = 60 + 1,429 \cdot [(59 - 31) - 183]$$

$$+ (0,845 \cdot X + 217) \cdot e^{-\frac{28}{183}} = 25 + 0,725 \cdot X$$

Op gelijke wijze kunnen nu de chloridegehalten aan het einde van de trajecten 3, 4 en 5 worden berekend.

traject 3 (60—212 dagen): $c_{e, t=212} = 82 + 0,314 \cdot X$
 traject 4 (213—289 dagen): $c_{e, t=289} = 119 + 0,206 \cdot X$
 traject 5 (290—365 dagen): $c_{e, t=365} = 141 + 0,136 \cdot X$

Voor het normale jaar moet nu gelden:

$$c_{e, t=0} = c_{e, t=365}$$

$$\text{of } X = 141 + 0,136 \cdot X \therefore X = 163 \text{ mg/l}$$

Bij een aanvangsgehalte van 163 mg Cl/l volgt dus dat aan het einde van de trajecten in het normale jaar, het chloridegehalte van het reservoirwater en van het afgeleverde water de volgende waarden zal bereiken:

t	=	0	31	59	212	289	365
c_e	=	163	153	143	133	153	163

Het maximale chloridegehalte in het reservoir zal voorkomen tijdens het verloop van het buitenwater volgens traject 5, doch behoeft geenszins het aan het einde van dit traject ($t = 365$) bereikte gehalte van 163 mg/l te zijn. Door een eenvoudige differentiatie van de formule welke geldt over traject 5 kan het maximale chloridegehalte worden berekend. Over traject 5 geldt:

$$c_e = 230 - 1,184 \cdot (t_5 - 183) + A \cdot e^{-\frac{t_5}{183}} \text{ met } A = -293$$

Het chloridegehalte in het reservoir zal maximaal zijn op het tijdstip t_5 waarvoor geldt:

$$\frac{dc_e}{dt_5} = 0$$

Differentiatie van de formule van traject 5 geeft:

$$\frac{dc_e}{dt_5} = -1,184 - 293 \cdot e^{-\frac{t_5}{183}} \cdot \frac{1}{183} = 0 \therefore t_5 = 55$$

Het maximale chloridegehalte wordt dus bereikt na $t = 289 + 55 = 344$ dagen, waarbij 289 het aantal dagen is van $t = 0$ tot aan het begin van traject 5.

$$c_{e, t=344} = 230 - 1,184 \cdot (55 - 183) - 293 \cdot e^{-\frac{55}{183}}$$

$$= 165 \text{ mg/l}$$

Het verloop van het chloridegehalte van het rivierwater en van het water in het reservoir in het normale jaar is aangegeven in fig. 15.

In een normaal jaar moet erop worden gerekend, dat het chloridegehalte van het Rijnwater kan stijgen tot ca. 230 mg/l. Uit figuur 15 blijkt nu duidelijk de afvlakkende werking ten gevolge van de doorstroming van het bekken. In het bekken stijgt het chloridegehalte in het normale jaar tot maximaal 165 mg/l. De reductie op het maximale chloridegehalte van de Rijn bedraagt derhalve

$$\frac{230 - 165}{230} \times 100\% = 28\%$$

Op soortgelijke wijze kan worden berekend wat het effect van het doorstroombekken (met een inhoud van 50% van de jaarproductie) kan zijn als het normale jaar wordt gevolgd door een droog jaar en dit droge jaar weer wordt gevolgd door een normaal jaar. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in figuur 16, terwijl figuur 17 de situatie weergeeft wanneer het droge jaar door het zeer droge jaar wordt vervangen.

In tabel 1 zijn de resultaten die kunnen worden bereikt met een reservoir met een inhoud van 50% van de jaarproductie samengevat.

Zowel uit figuur 16 als figuur 17 blijkt, dat het verloop van het chloridegehalte in het doorstroombekken in het normale jaar, dat volgt op het droge of zeer droge jaar, aanzienlijk ongunstiger is dan het verloop van het chloridegehalte in het normale jaar dat voorafging aan het droge of zeer droge jaar. Het chloridegehalte van het Rijnwater in de droge jaren werkt na in de opvolgende normale jaren.

Er wordt naar een afvlakking en een zo laag mogelijke waarde van het hoogste chloridegehalte van het afge-

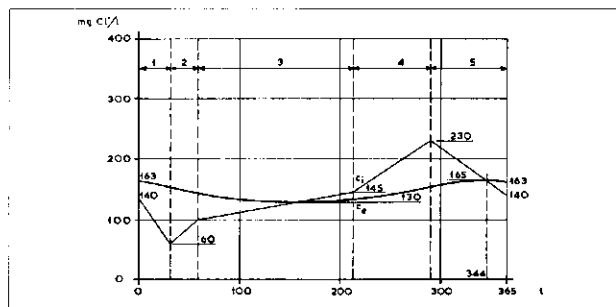


Fig. 15 - Chloridegehalte van het Rijnwater (c_i) en van het water in het doorstroombekken (c_e) in een normaal jaar. Reservoirinhoud 50% van de jaarproductie.

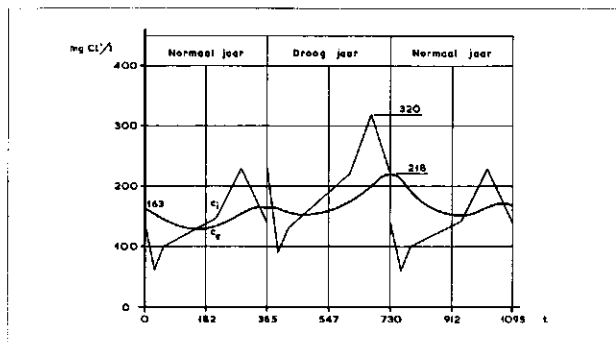


Fig. 16 - Chloridegehalte van het Rijnwater (c_i) en van het water in het doorstroombekken (c_e) in opeenvolgend een normaal, een droog en een normaal jaar. Reservoirinhoud 50% van de jaarproductie.

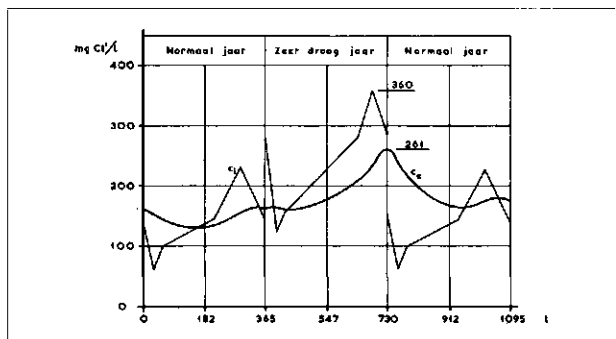


Fig. 17 - Chloridegehalte van het Rijnwater (c_i) en van het water in het doorstroombekken (c_e) in opeenvolgend een normaal, een zeer droog en een normaal jaar. Reservoirinhoud 50% van de jaarproductie.

TABEL 1 - De reductie van het chloridegehalte van het afgeleverde water t.o.v. het chloridegehalte van het rivierwater bij gebruikmaking van een doorstroombekken met een inhoud van 50 % van de jaarproductie.

periode	max. Cl'-geh. v. h. rivierwater over beschouwde periode in mg/l	max. Cl'-geh. v. h. reservoirwater over beschouwde periode in mg/l	reductie t.o.v. het maximale gehalte v. h. rivierwater in mg/l	in %
norm. - norm. - norm.	230	165	65	28
norm. - droog - norm.	320	218	102	32
norm. - zeer dr. - norm.	360	261	99	27

leverde water gestreefd. Dit kan worden bevorderd door de inhoud van het bekken groot te maken, terwijl het resultaat mede afhangt van het chloridegehalte van het water in het bekken ten tijde $t = 0$.

Voor bekkeninhouden van 0 t/m 100 % van de jaarproductie is nagegaan welk chloridegehalte in het droge jaar volgende op het normale jaar, maximaal in het bekken zal voorkomen. Gerekend werd met aanvangsgehalten van respectievelijk 100, 150 en 200 mg Cl'/l. Het resultaat van deze berekeningen is weergegeven in fig. 18.

Uit deze figuur blijkt dat een vergroting van de bekkeninhoud in het traject 0 - 50 % van de jaarproductie een vrij sterke daling van het maximaal te verwachten chloridegehalte oplevert. Bij vergroting van een bekkeninhoud in het traject 50 - 70 % van de jaarproductie wordt de winst steeds geringer. Het is niet zinvol de bekkeninhoud groter dan 70 % van de jaarproductie te kiezen. Vandaar ook dat in het voorgaande een bekkeninhoud van 50 % van de jaarproductie is aangehouden. Uit fig. 18 blijkt echter ook dat eerst bij een bekkeninhoud groter dan 50 % van de jaarproductie het maximaal te verwachten chloridegehalte van het afgeleverde water, zij het in geringe mate, mede wordt bepaald door het aanvangschloridegehalte. Deze invloed is als volgt berekend:

Stel het aanvangschloridegehalte van het reservoir is X mg/l, dus $t = 0$, $c_e = X$.

Gesubstitueerd in de algemene formule

$$c_e = c_0 + \theta(t - T) + A \cdot e^{-\frac{t}{T}} \text{ geeft dit:}$$

$$X = c_0 - \theta \cdot T + A, \text{ of } A = X - c_0 + \theta \cdot T$$

ingevuld:

$$c_e = c_0 + \theta \cdot (t - T) + (X - c_0 + \theta \cdot T) \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

Het aandeel van het aanvangschloridegehalte X in het chloridegehalte ten tijde $t = t$, wordt dus gegeven door de term

$$X \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \text{ waarin de factor } e^{-\frac{t}{T}}$$

met toenemende waarde van $\frac{t}{T}$ sterk afneemt.

In fig. 19 is voor bekkeninhoud oplopend van 10 - 100 %

van de jaarproductie deze factor $e^{-\frac{t}{T}}$ tegen de tijd t uitgezet. Uit deze figuur blijkt, dat hoe groter de inhoud van het bekken is des te belangrijker de invloed van het aanvangschloridegehalte wordt.

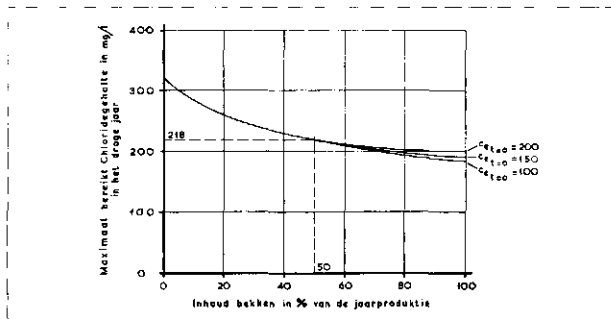


Fig. 18 - Verband tussen bekkeninhoud en maximaal te verwachten chloridegehalte in het droge jaar, dat werd voorafgegaan door een normaal jaar.

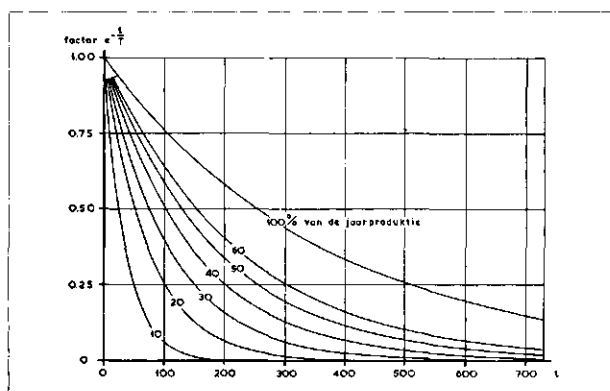


Fig. 19 - Verband tussen de factor $e^{-\frac{t}{T}}$ en het aantal dagen t, bij verschillende inhouden van het bekken.

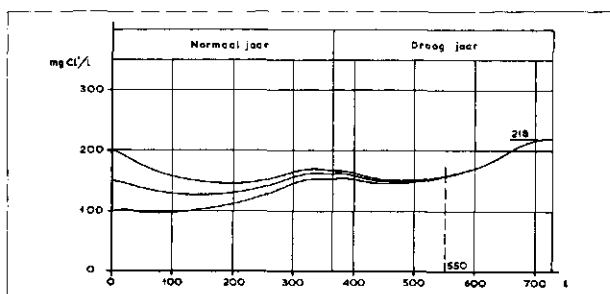


Fig. 20 - Verloop van het chloridegehalte in een doorstroombekken met een inhoud van 50 % van de jaarproductie bij verschillende waarden van c_e ten tijde $t = 0$.

In concreto is in figuur 20 nagegaan wat de invloed van het aanvangschloridegehalte van het doorstroombekken is op het chloridegehalte van het afgeleverde water, indien achtereenvolgens een normaal en een droog jaar worden verwerkt. De bekkeninhoud bedraagt 50 % van de jaarproductie. Er werd uitgegaan van aanvangschloridegehalten van respectievelijk 100, 150 en 200 mg/l. Alhoewel theoretisch het aanvangschloridegehalte steeds van invloed blijft, blijkt praktisch dat na ca. 550 dagen de invloed van de gekozen aanvangsgehalten voor de verdere bedrijfsvoering is te verwaarlozen. Het maximaal te verwachten Cl'-gehalte van 218 mg/l is hier niet afhankelijk van de gekozen aanvangsgehalten.

(slot volgt)