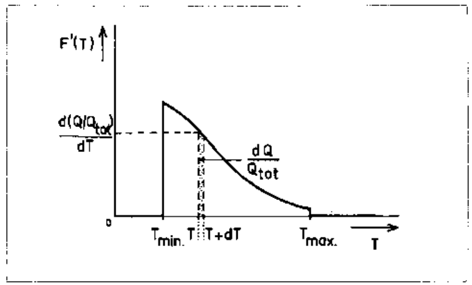
Optimale verblijftijdsverdeling van een infiltratie-onttrekkingssysteem voor demping van kwaliteitsfluctuaties

1. Inleiding

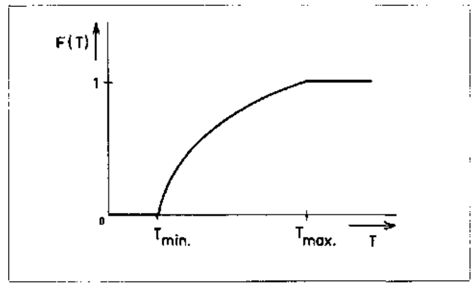
Voor de bereiding van drinkwater is men, met name in Nederland, in toenemende mate aangewezen op de verwerking van oppervlaktewater. De vaak slechte kwaliteit van dit oppervlaktewater, maar ook de variatie van die kwaliteit, vormt een probleem. In verband hiermee wordt al enige tientallen jaren kunstmatige infiltratie van (voorgezuiverd) oppervlaktewater in doorlatende grondmassieven toegepast. Een bekend voorbeeld hiervan is de infiltratie van Rijnwater in de Noordhollandse

IR. H. M. HAITJEMA
Vakgroep Geotechniek
TH Delft

duinen. Tijdens het verblijf in de grond zorgen een aantal chemische en biologische processen voor een kwaliteitsverbetering in absolute zin. Een ander doel van kunstmatige infiltratie en onttrekking kan demping van kwaliteitsfluctuaties zijn.
Een infiltratie- en onttrekkingssysteem kan namelijk zo worden ingericht, dat bij onttrekking, water met verschillende verblijftijden wordt gemengd. Die menging van verschillende verblijftijden, en daarmee in het algemeen ook verschillende kwaliteiten, betekent een demping van de kwaliteitsvariaties (Huisman, Martijn, 1969). De waarde van bepaalde kwaliteitsparameters, zoals bijv. temperatuur en zoutgehalte, kunnen niet op eenvoudige wijze worden verbeterd. Omdat van genoemde parameters de gemiddelde waarde vaak wel acceptabel is, kan demping van de variatie van deze parameters bijdragen tot een goede drinkwaterkwaliteit. Ter verkrijging van deze demping moet het stationaire infiltratie-onttrekkingssysteem tot een 'geschikte' verdeling van de verblijftijden leiden.
Zo is gebleken, dat voor de min of meer periodieke zoutgehaltefluctuaties van de Rijn een infiltratie-onttrekkingssysteem met een zgn. lineaire cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden zeer goed voldoet (Huisman, Martijn, 1969). Ten behoeve van een eventuele infiltratie in de Veluwe van dit Rijnwater, zijn infiltratie-onttrekkingssystemen ontworpen met zo'n 'lineaire verblijftijdsverdeling' (Vermeer, 1973).
In dit artikel zal nader worden ingegaan op de voorwaarden waaraan een verblijftijdsverdeling moet voldoen om een optimale demping te bewerkstelligen. Hierbij zal onderscheid worden gemaakt tussen periodieke- en stochastische kwaliteitsfluctuaties.



Afb. 1 - Relatieve frequentieverdeling van de verblijftijden.



Afb. 2 - Relatieve cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden.

2. Definitie van de verblijftijdsverdeling

Indien in een doorlatend grondmassief water wordt geïnfiltreerd en op enige afstand weer onttrokken, zullen niet alle waterdeeltjes gelijktijdig op het onttrekkingspunt aankomen. Derhalve zal de onttrokken hoeveelheid water zijn samengesteld uit waterdeeltjes van verschillende ouderdom. De preciese samenstelling van het mengsel is afhankelijk van de geometrie van het infiltratie-onttrekkingssysteem. Bij ieder stationair infiltratie-onttrekkingssysteem behoort een zgn. frequentieverdeling van de verblijftijden, die bepalend is voor de menging. Het begrip frequentieverdeling zal daarom worden toegelicht.
In principe kan het debiet van een infiltratie-onttrekkingssysteem over alle verblijftijden tussen nul en oneindig zijn verdeeld.
Bij het oneindig kleine verblijftijdsgebiedje dT, tussen T en T + dT hoort dan een oneindig kleine debietsfractie dQ. Indien we nu $\frac{dQ}{dT}$ uitzetten tegen T verkrijgen we de frequentieverdeling van de verblijftijden.
We definiëren nu de funktie F' (T) als

$$F'(T) = \frac{d(Q/Q_{tot})}{dT} \qquad (2.1)$$

De funktie F' (T) wordt de *relatieve* frequentieverdeling van de verblijftijden genoemd. Een voorbeeld hiervan is gegeven in afb. 1.
In het geval van afb. 1 heeft de funktie F' (T) alleen waarden groter dan nul voor verblijftijden tussen de minimum verblijftijd (T_{min}) en de maximum verblijftijd (T_{max}).
Veelal geeft men voor een systeem de zgn. (relatieve) *cumulatieve* frequentieverdeling van de verblijftijden, welke niets anders is dan:

$$F(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} F'(T)\, dT\,. \qquad (2.2)$$

Voor iedere waarde T geeft de funktie F(T) een waarde F juist gelijk aan de debietsfractie met verblijftijden kleiner of gelijk aan T (zie afb. 2). Terwille van eenvoudige wiskundige bewerkingen wordt de funktie F' (T) ook gedefinieerd voor negatieve waarden van T, om fysische redenen is de funktie hier gelijk aan nul.

3. Het effluent van een infiltratie-onttrekkingssysteem

Veronderstel dat in een infiltratie-onttrekkingssysteem water wordt geïnfiltreerd met een zekere merkstof, waarvan de concentratie c varieert in de tijd volgens een of andere funktie

$$c = c(t)\,. \qquad (3.1)$$

Dit concentratieverloop wordt bekend verondersteld. Ook zal van een stationair infiltratie-onttrekkingssysteem de funktie F (T) bekend worden verondersteld.
Uit de vergelijkingen (2.1) en (2.2) volgt dan dat

$$Q = F(T)\,.\,Q_{tot}\,. \qquad (3.2)$$

De merkstofconcentratie C_e van het effluent wordt nu gegeven door de integraal

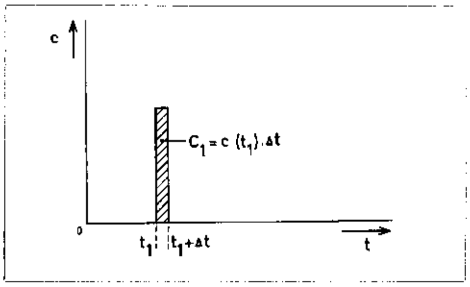
$$C_e(t) = \frac{1}{Q_{tot}} \int_{0}^{Q_{tot}} c(t - T)\,.\,dQ\,. \qquad (3.3)$$

Vergelijking (3.3) geeft weer, dat de merkstofconcentratie van een oneindig klein deeldebietje dQ, dat wordt onttrokken op tijdstip t, wordt bepaald door de merkstofconcentratie, die op het tijdstip (t — T) in het systeem is geïnfiltreerd. Hierbij is T de verblijftijd van dQ. Integratie van de merkstofconcentratie van dQ over het gehele debiet Q_{tot} geeft dan de concentratie C_e van het effluent op tijdstip t.
Differentiatie van vergelijking (3.2) en substitutie hiervan in vergelijking (3.3) geeft:

$$C_e(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} c(t - T)\, F'(T)\,.\, dT\,. \qquad (3.4)$$

4. Optimale verblijftijdsverdeling voor één enkele stootbelasting

Beschouw een variatie in de merkstofconcentratie volgens afb. 3. Gedurende de periode tussen t_1 en $t_1 + \Delta t$ wordt een hoeveelheid merkstof $C_1 \,.\, Q_{tot}$ geïnfiltreerd. De effluentconcentratie op tijdstip t volgt



Afb. 3 - Het verloop in de tijd van de merkstofconcentratie van het infiltraat.

dan uit vergelijking (3.4) die kan worden geschreven als

$$C_e(t) = \int_{-\infty}^{t-t_1-\Delta t} c\,(t-T)\,F'(T)\,.\,dT + \int_{t-t_1-\Delta t}^{t-t_1} c\,(t-T)\,F'(T)\,.\,dT + \int_{t-t_1}^{+\infty} c\,(t-T)\,F'(T)\,.\,dT\,.$$

De eerste en laatste term van C_e is nul, omdat dit de integralen zijn over gebieden waar $c\,(t-T)$ gelijk is aan nul. Dit betekent dat voor de uitdrukking van $C_e\,(t)$ overblijft:

$$C_e(t) = \frac{C_1}{\Delta t}\,.\int_{t-t_1-\Delta t}^{t-t_1} c\,(t-T)\,.F'(T)\,.\,dT$$

$$\int_{t-t-\Delta t}^{t-t_1} F'(T)\,.\,dT,$$

ofwel

$$C_e(t) = \frac{C_1}{\Delta t}\,\{F\,(t-t_1) - F\,(t-t_1-\Delta t)\}\,. \tag{4.1}$$

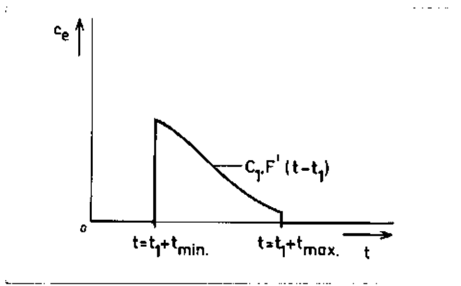
Voor een stootbelasting met $\Delta t \rightarrow 0$ gaat vergelijking (4.1) over in:

$$C_e(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} C_1 \left\{\frac{F\,(t-t_1) - F\,(t-t_1-\Delta t)}{\Delta t}\right\}$$

$$= C_1\,.\,F'\,(t-t_1)\,. \tag{4.2}$$

Uit vergelijking (4.2) blijkt dat de functie $F'\,(t-t_1)$ kan worden opgevat als de responsiecurve van de stootbelasting C_1, die op t_1 werd geïnfiltreerd (zie afb. 4).

Met het oog op de drinkwaterbereiding betekent een optimale demping van C_1, dat op ieder willekeurig gekozen tijdstip t de response van C_1 minimaal is. In het geval van een systeem met verblijftijden tussen T_{max} en T_{min} is de *gemiddelde* response van C_1:



Afb. 4 - De responsieucurve voor de stootbelasting C.

$$\bar{C}_e = \frac{C_1}{\Delta T}\int_{t=t_1+T_{min}}^{t=t_1+T_{max}} F'\,(t-t_1)\,.\,dt \tag{4.3}$$

waarin

$\Delta T = T_{max} - T_{min}$.

Nu is $F\,(T_{min}) = 0$ en $F\,(T_{max}) = 1$ (zie afb. 2), zodat vergelijking (4.3) kan worden geschreven als

$$\bar{C}_e = \frac{C_1}{\Delta T}\,.\,\{F\,(T_{max}) - F\,(T_{min})\} = \frac{C_1}{\Delta T}\,. \tag{4.4}$$

Deze gemiddelde response is ook de gunstigste response voor dit systeem. Immers, indien er een tijdstip t_1 bestaat met een response kleiner dan deze gemiddelde response, dan bestaat er ook een tijdstip t_2 met een grotere response dan de gemiddelde. Optimale demping wordt dus verkregen indien geldt:

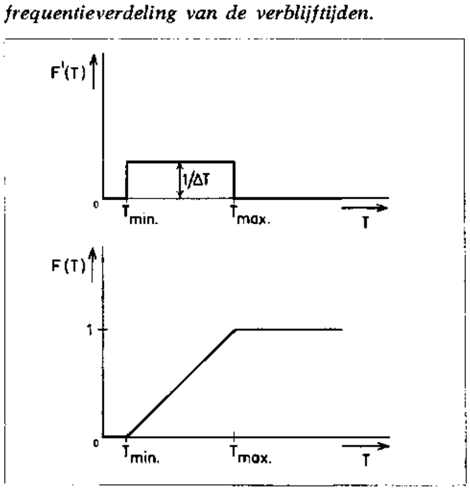
$$F'\,(T) = \frac{1}{\Delta T} \text{ voor } T_{min} < T < T_{max}\,. \tag{4.5}$$

Hierbij hoort de (relatieve) cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden

$$Q = \frac{\Delta T}{Q_{tot}}\,.\,(T - T_{min})\,,\ T_{min} < T < T_{max}\,. \tag{4.6}$$

(zie afb. 5).

Afb. 5 - Constante relatieve frequentieverdeling en de bijbehorende relatieve lineaire cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden.



5. Stochastische kwaliteitsfluctuaties

In het geval van één enkele stootbelasting is een systeem met een constante $F'(T)$ optimaal gebleken. De vraag is nu of dit ook geldt voor meerdere stootbelastingen. Er kan worden aangetoond dat het mogelijk is een zodanige combinatie te kiezen van stootbelastingen en verblijftijdverdeling, dat C_e, voor iedere t, lager is dan voor het geval $F'\,(T)$ constant is.

Beschouw bijv. de stootbelastingen C_1 die op t_1 en C_2 die op t_2 worden geïnfiltreerd in een systeem met

$$F'\,(T) = \frac{2\,(T - T_{min})}{\Delta T^2}\,,\ T_{min} < T < T_{max}\,. \tag{5.1}$$

Voor de response kan worden geschreven (zie vergelijking (4.2))

$$C_e\,(t) = C_1\,.\,F'\,(t-t_1) + C_2\,.\,F'\,(t-t_2)\,. \tag{5.2}$$

Ter verkrijging van eenvoudige vergelijkingen is het nu zinvol om t_1 gelijk aan nul te nemen. Na substitutie van vergelijking (5.1) in vergelijking (5.2) volgt dan

$$C_e\,(t) = \frac{2\,(C_1+C_2)}{\Delta T^2}\,(t - T_{min}) - \frac{2\,C_2\,t_2}{\Delta T^2}\,. \tag{5.3}$$

C_e bereikt een maximum voor het geval $t = T_{max}$;

$$C_{e_{max}} = \frac{2\,(C_1+C_2)}{\Delta T} - \frac{2\,C_2\,t_2}{\Delta T^2}\,. \tag{5.4}$$

Voor een systeem met $F'\,(T)$ is constant, geldt voor de maximum effluentconcentratie (= gemiddelde concentratie):

$$C_{e_{max}} = \frac{C_1+C_2}{\Delta T}\,. \tag{5.5}$$

De $C_{e_{max}}$ uit vergelijking (5.4) is kleiner dan de $C_{e_{max}}$ uit vergelijking (5.5) indien

$$\frac{C_1}{C_2} < \frac{2\,t_2}{\Delta T} - 1\,. \tag{5.6}$$

Uitsluitend en alleen onder deze voorwaarde is de frequentieverdeling volgens vergelijking (5.1) gunstiger dan in het geval $F'\,(T)$ een constante is. In het geval van een stochastische merkstofbelasting zal slechts voor deelperioden aan een bijzondere voorwaarde worden voldaan. Met andere woorden er zijn ook perioden waarvoor $C_{e_{max}}$ groter is dan in het geval $F'\,(T)$ een constante is.

Slechts indien $F'\,(T)$ constant is, is de response onafhankelijk van de verhouding van de stootbelastingen C_1 en C_2.

De response voor M stootbelastingen volgt dan door superpositie van vergelijking (4.2)

$$C_e(t) = \sum_{i=1}^{M} C_i \cdot F'(t-t_i) = \frac{1}{\Delta T}\sum_{j=1}^{N} C_j ,$$

waarin N het aantal stootbelastingen is waarvoor geldt:

$$t_i + T_{min} \leqq t \leqq t_i + T_{max} .$$

Bij deze $F'(T) = \frac{1}{\Delta T}$ hoort de relatieve lineaire cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden van vergelijking (4.6).

6. **Periodieke kwaliteitsfluctuaties**

De kwaliteitsvariaties van het infiltraat zijn in de praktijk niet altijd stochastisch verdeeld. Zo wordt bijv. de temperatuur van oppervlaktewater en ten dele ook het zoutgehalte van de Rijn, bepaald door seizoeninvloeden. Dit betekent dat deze variaties een periodiek karakter hebben (zie afb. 6).

Ter bestudering van de response van zo'n periodieke functie wordt voor de eenvoud een merkstofconcentratie gekozen met een verloop in de tijd volgens:

$$c = \bar{c} + A \sin(\omega t), \qquad (6.1)$$

waarin

$$\omega = \frac{2\pi}{T_p} .$$

T_p is de periode van de merkstoffluctuatie. De concentratie in het effluent is dan

$$C_e(t) = \bar{c} + \int_{-\infty}^{+\infty} A \cdot \sin\{\omega(t - T)\}\, F'(T)\, dT . \qquad (6.2)$$

Daar de functie F' (T) alleen ongelijk is aan nul op het interval tussen T_{min} en T_{max} en dan bovendien constant is $(= \frac{1}{\Delta T})$ kan men schrijven:

$$C_e(t) = \bar{c} + \frac{A}{\Delta T}\int_{T_{min}}^{T_{max}} \sin\{\omega(t - T)\}\, dT . \qquad (6.3)$$

Integratie van vergelijking 6.3 geeft na enige uitwerking:

$$C_e(t) = \bar{c} + \frac{A \cdot T_p}{\pi \cdot \Delta T} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta T}{T_p}\right) \cdot \sin\{\omega(t - T_{gem})\} , \qquad (6.4)$$

hierin is $T_{gem} = \frac{1}{2}(T_{min} + T_{max})$.

De demping is volledig indien

$$C_e(t) = \bar{c} . \qquad (6.5)$$

Dit is o.a. het geval indien

$$\Delta T \rightarrow \infty . \qquad (6.6)$$

Deze voorwaarde leidt echter tot zeer (oneindig) grote infiltratie-onttrekkingssystemen, want een grote verblijftijdsspreiding impliceert een geometrisch groot systeem. Aan vergelijking (6.5) wordt echter ook voldaan indien

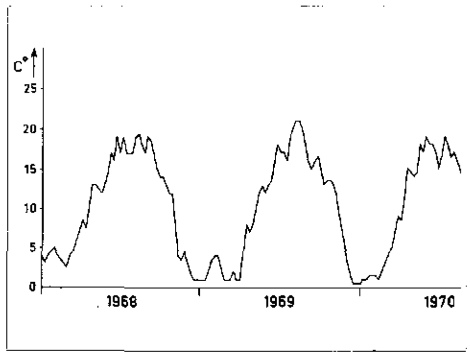
$$\sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta T}{T_p}\right) = 0 ,$$

ofwel

$$\Delta T = k \cdot T_p \quad (k = 1, 2, 3 \ldots .) \qquad (6.7)$$

Voor het geval k = 1, dat wil zeggen $T_p = \Delta T$, wordt dus al een volledige demping bereikt, terwijl de afmetingen van het bijbehorende infiltratie-onttrekkingssysteem beperkt kunnen blijven. In het geval van seizoeninvloeden is de periode T_p gelijk aan 1 jaar.

Omdat iedere periodieke functie kan worden geschreven als een reeks van sinussen, geldt voor al deze functies dat volledige demping wordt bereikt indien F' (T) constant is en aan de voorwaarden (6.6) of (6.7) is voldaan.



Afb. 6 - De temperatuur van het IJsselmeer gemeten bij het pompstation Andijk (PWN).

7. **Conclusie**

Resumerend kan ten aanzien van het dempen van kwaliteitsfluctuaties door middel van kunstmatige infiltratie en onttrekking het volgende worden gesteld:

a. In het geval van hoofdzakelijk stochastische kwaliteitsfluctuaties verdient een infiltratie-onttrekkingssysteem met een lineaire cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden de voorkeur. De omvang van de verblijftijdsspreiding ΔT (het verschil tussen de maximale en minimale verblijftijd) is dan recht evenredig met het effect van de demping.

b. In het geval van periodieke kwaliteitsfluctuaties kan met een lineaire verblijftijdsverdeling volledige demping worden bereikt, indien de periode T_p van de fluctuaties een geheel aantal malen ΔT omvat. Voor het geval $T_p = \Delta T$ kunnen de afmetingen van het systeem wellicht beperkt blijven.

Literatuur

Huisman, L. en Martijn, Th. G., *'Kwaliteitsverbetering bij kunstmatige infiltratie'*. Grondslagen basisplannen 6, bijlage 11 van 'De toekomstige Drinkwatervoorziening van Nederland', Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1969.

Vermeer, P. A., *'De situering van infiltratie- en onttrekkingsmiddelen bij kunstmatige infiltratie'*. H_2O (6) 1973, nr. 3.

● ● ●

● *vervolg van pag. 132*

Grondwaterwet

moet ik hierbij aantekenen, dan toch ten dele teweeggebracht hetgeen ik vorig jaar in de voordracht voor de Vakantiecursus in drinkwatervoorziening over grondwaterbeheer (gepubliceerd in het vorige nummer van H_2O) als een theoretische mogelijkheid veronderstelde.
De Minister heeft vóór de stemming over het amendement in de Kamer te kennen gegeven, dat hij bij aanneming daarvan zich het recht voorbehield aan de Kroon voor te stellen de inwerkingtreding daarvan overeenkomstig de in het laatste artikel van het wetsontwerp gegeven bevoegdheid op te schorten, totdat over voldoende gegevens wordt beschikt om dit te kunnen uitvoeren. Deze gegevens ontbreken thans geheel, en het lijkt te voorzien dat het verkrijgen daarvan vrij wat inspanning zal kosten.
Tenslotte merk ik op, dat het wetsontwerp geen regeling bevat omtrent de bestemming van de uit deze heffing aan het Rijk toevloeiende gelden.

mr. J. J. van Soest

Tijdens Wasser Berlin 77: Symposium Ozon en Water

Op 16 en 17 mei a.s. wordt in Berlijn in het kader van Wasser Berlin een tweedaags symposium gehouden 'Ozon en Water'. Tot de organisatoren behoren waterleidingorganisaties en -instituten uit Zwitserland, Frankrijk, Oostenrijk, Duitsland, België, Luxemburg en Nederland. Voor ons land werkt het KIWA aan het symposium mee. Het programma met aanmeldingsformulier is te verkrijgen bij de afdeling voorlichting van het KIWA, Postbus 70, Rijswijk, telefoon 070 - 90 27 20 toestel 140.