

Temperatuurveranderingen in het grondwater bij kunstmatige infiltratie bij de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage

1. Inleiding

Vanaf het begin van de waterwinning in 1874 tot 1955 werd door de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (DWL) alleen door neerslag aangevuld grondwater uit het duingebied onttrokken. Door de toenemende onttrekking trad verzilting van het gewonnen water op, die voor het eerst kort na de eeuwwisseling werd geconstateerd [Pareau, $\pm$ 1917]. Sedert 1955 wordt er oppervlaktewater kunstmatig geïnfilteerd. In het duingebied zijn de onttrokken hoeveelheid grondwater en de hoeveelheid geïnfilteerd



DRS. S. J. DE JONG
Adviesbureau voor Water-
voorziening IWACO BV,
Rotterdam



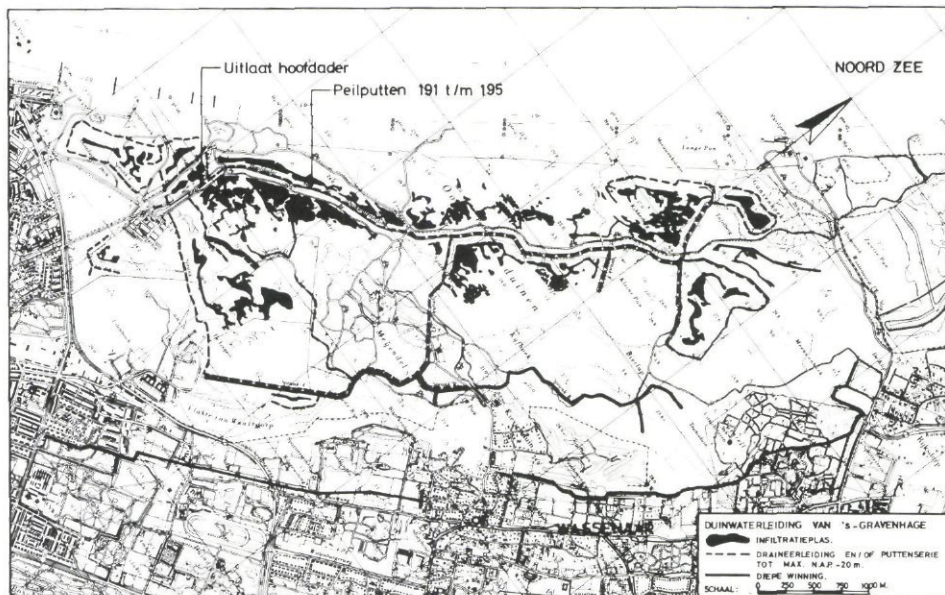
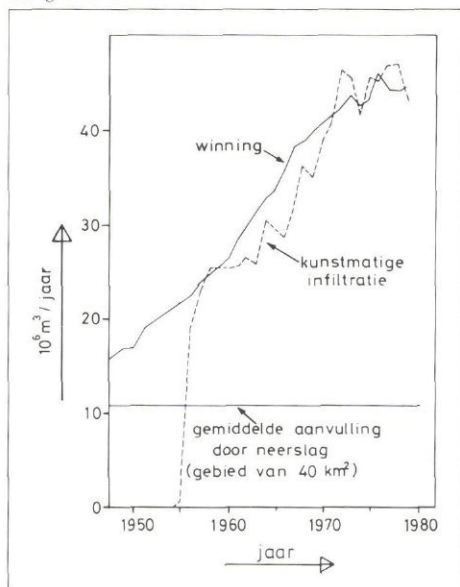
IR. R. SPEETS
Adviesbureau voor Water-
voorziening IWACO BV,
Rotterdam



IR. H. TUINZAAD
Duinwaterleiding van
's-Gravenhage

oppervlaktewater min of meer aan elkaar gelijk (zie afb. 1); sinds 1955 komt een ongeveer met het neerslagoverschot overeenkomende hoeveelheid water voor een belangrijk deel ten goede aan de vergroting van de voorraad zoet grondwater of stroomt af als grondwater.

Afb. 1 - Aanvulling en winning van grondwater in het duingebied van de DWL.



Afb. 2 - Win- en infiltratiemiddelen.

In afb. 2 zijn de win- en infiltratiemiddelen aangegeven. Het belangrijkste winmiddel is de evenwijdig aan de kust lopende hoofdader. Het oppervlaktewater wordt door middel van infiltratiepannen in de grond gebracht. De minimum afstand van de pannen tot de winmiddelen bedraagt ongeveer 50 meter. In afb. 3 is de hydrogeologische opbouw van de ondiepe ondergrond in een profiel over de hoofdader en infiltratieplan 13 schematisch weergegeven; het ondiepe en het diepe watervoerende pakket worden gescheiden door een uit fijn slibhoudend zand en kleilaagjes opgebouwd slecht doorlatend pakket. In de hoofdader wordt het grondwater aan het ondiepe watervoerende pakket met pompputten en een drainerleiding onttrokken en aan het diepe watervoerende pakket alleen met pompputten (afb. 3). Het is algemeen bekend dat de fysisch-chemische samenstelling van water bij verblijf in de grond verandert. Vooral de verandering van de chemische kwaliteit van het geïnfilteerde oppervlaktewater is door de DWL uitvoerig bestudeerd [zie onder meer Van Puffelen, 1979].

In dit artikel worden de resultaten van een onderzoek naar de verandering van de temperatuur in de grond van het kunstmatig geïnfilteerde oppervlaktewater beschreven. Doel van het onderzoek is om voor het ondiepe watervoerende pakket meer inzicht te krijgen in de stroming en verblijftijd van het kunstmatig geïnfilteerde water. Dit onderzoek is een onderdeel van een hydrogeologisch onderzoek dat door IWACO BV in opdracht van de DWL wordt uitgevoerd [IWACO, 1982]. Tevens wordt in dit artikel een beschouwing gegeven van de verandering van de temperatuur in de grond bij infiltratie van water in het diepe water-

voerende pakket; sedert 1973 worden op het terrein van de DWL proeven gedaan met infiltratie van voorgezuiverd oppervlaktewater door middel van putten. Bij toepassing van een dergelijk systeem van kunstmatige infiltratie wordt, in vergelijking tot infiltratie met behulp van pannen, de aantasting van het duin in milieukundig opzicht in belangrijke mate beperkt.

Voor Nederlandse situaties is de verandering van de temperatuur in de grond bij kunstmatige infiltratie onderzocht door Verruyt [1966] en Huisman [1973]. Bij deze studies is uitgegaan van infiltratiewater met een sinusvormig verloop van de temperatuur met de seizoenen en is de verandering van de temperatuur van het water in de grond beschreven als een demping en vertraging van dat sinusvormige verloop. In de publikatie van Huisman, evenals in een recent rapport van Uffink [1981], wordt de demping van de temperatuur golf voor een aanzienlijk deel verklaard als gevolg van verticale uitwisseling van warmte met de boven en onder het watervoerende pakket gelegen grondlagen. Tevens wordt het horizontale transport van warmte door geleiding verwaarloosbaar klein verondersteld. In het volgende wordt het horizontale transport van warmte aan een nadere analyse onderworpen. In het bijzonder wordt aandacht besteed aan warmteoverdracht door geleiding en aan het effect van dispersie. Een aantal resultaten wordt getoetst aan veldwaarnemingen.

2. Theorie

In met water verzadigde grond vindt warmteoverdracht plaats door geleiding en convectie; warmteoverdracht door straling mag in het algemeen worden verwaarloosd.

Bij de theorie zijn de volgende veronderstellingen gemaakt:

- adsorptie van warmte aan de korrels treedt ogenblikkelijk op;
- dichtheid, soortelijke warmte en warmtegeleidingscoëfficiënt van water en korrelmateriaal zijn constant;
- de temperatuurfluctuatie met de seizoenen vertoont een zuiver harmonisch karakter.

De continuïteitsvergelijking voor overdracht van warmte kan geschreven worden als:

$$\frac{\delta \vec{q}}{\delta s} = -\rho_g c_g \frac{\delta T}{\delta t} \quad (1)$$

waarin $\frac{\delta \vec{q}}{\delta s}$ de gradiënt van de warmteoverdrachtsvector in de richting s voorstelt, ρ_g en c_g respectievelijk de dichtheid in kg/m^3 en de soortelijke warmte in $\text{J/kg, } ^\circ\text{C}$ van de met water verzadigde grond, t de tijd in dagen en T de temperatuur in $^\circ\text{C}$ van de met water verzadigde grond. De warmteoverdracht door geleiding kan

volgens de wet van Fourier worden uitgedrukt als:

$$\vec{q}_g = -\lambda \frac{\delta T}{\delta s} \quad (2)$$

waarin $\vec{q}_g$ de warmteoverdrachtsvector door geleiding voorstelt, λ de warmtegeleidingscoëfficiënt in $\text{J/m, dag, } ^\circ\text{C}$ van de verzadigde grond en $\delta T / \delta s$ de temperatuurgradiënt. Warmteoverdracht door convectie vindt plaats bij stroming van grondwater. Als het grondwater onsamendrukbaar en de dichtheid constant wordt verondersteld, kan warmteoverdracht door convectie worden beschreven als:

$$\vec{q}_k = \rho_w c_w T \vec{v} \quad (3)$$

waarin $\vec{q}_k$ de convectieve warmteoverdrachtsvector voorstelt, ρ_w en c_w respectievelijk de dichtheid en de soortelijke warmte van het grondwater en $\vec{v}$ het specifiek debiet van de grondwaterstroming in m/dag . Door inhomogeniteiten in een watervoerend pakket varieert de snelheid van de waterdeeltjes in richting en grootte. Het effect van inhomogeniteiten op de schaal van

de korrelgrootte wordt microdispersie genoemd, terwijl het effect van inhomogeniteiten op veel grotere schaal macrodispersie genoemd wordt (bijvoorbeeld een uit lagen opgebouwd watervoerend pakket). Bij warmteoverdracht is het effect van microdispersie verwaarloosbaar klein. Macrodispersie kan bij warmteoverdracht wel een rol spelen. Hierop wordt later in dit artikel nog ingegaan.

2.1. Warmteoverdracht door convectie in een homogeen pakket

Uit vergelijking (3) en (1) volgt de differentiaalvergelijking voor warmteoverdracht door convectie in een homogeen watervoerend pakket bij uniforme grondwaterstroming. Hierbij wordt overgegaan op overdracht in een ééndimensionaal vlak, waarbij z de coördinaat in de richting van de grondwaterstroming en v de grootte van het specifieke debiet in de z -richting voorstellen.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = -\frac{\rho_w c_w}{\rho_g c_g} v \frac{\delta T}{\delta z} \quad (4)$$

De oplossing van deze differentiaalvergelijking luidt [Huisman, 1973]:

$$T(z, t) = T_a + A_0 \sin(\omega t - bz + \psi_0) \quad (5)$$

waarin T_a de gemiddelde temperatuur van het geïnfilterde oppervlaktewater, A_0 de temperatuuramplitude voor $z=0$, ω de hoeksnelheid en ψ_0 de fase voor $t=0$ en $z=0$ voorstelt. b is de vertragsfactor in m^{-1} , die kan worden bepaald uit:

$$b = \frac{1}{|v|} \frac{\rho_g c_g}{\rho_w c_w} \omega \quad (6)$$

Volgens deze oplossing planten temperatuurfluctuaties zich ongedempt voort in de grond. Er treedt wel vertraging op; voor een stroombaan met lengte L zal deze vertraging $t_d = bL/\omega$ bedragen. De verblijftijd van het grondwater over het traject L kan worden bepaald uit:

$$t_v = \frac{\mu L}{v} = \frac{\rho_w c_w}{\rho_g c_g} \mu t_d \quad (7)$$

waarin μ het doorstroomd poriënvolume voorstelt.

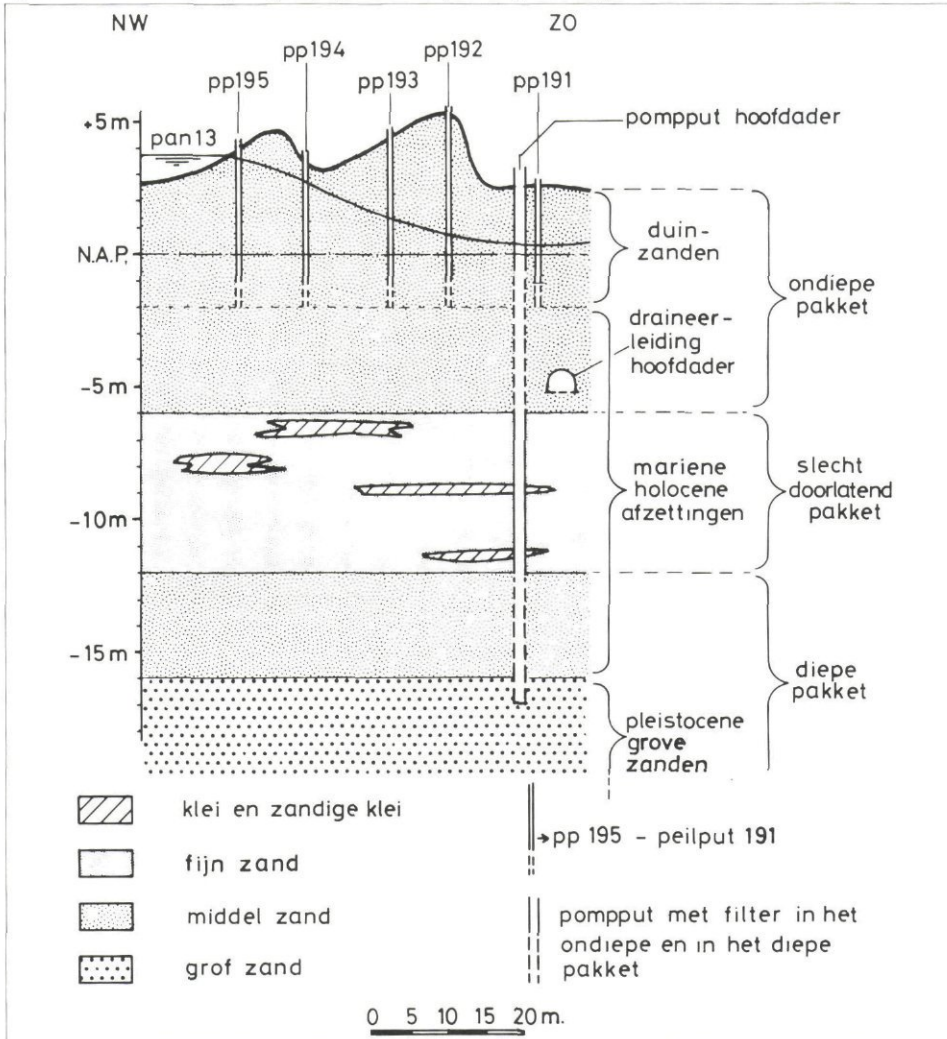
2.2. Warmteoverdracht door geleiding en convectie in een homogeen pakket

Door substitutie van (2) en (3) in (1) wordt de differentiaalvergelijking voor warmteoverdracht door geleiding en convectie gevonden:

$$\lambda \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} - \rho_w c_w v \frac{\delta T}{\delta z} = \rho_g c_g \frac{\delta T}{\delta t} \quad (8)$$

Stallman [1965] heeft voor het geval van

Afb. 3 - Schematisch hydrogeologisch profiel van ondiepe ondergrond raai pp 195/191.



uniforme ééndimensionale grondwaterstroming in een half-oneindig homogeen pakket met een sinusvormig temperatuurverloop aan het oppervlak de volgende analytische oplossing gevonden:

$$T = T_a + A_0 e^{-az} \sin(\omega t - bz) \quad (9)$$

waarin T_a de gemiddelde temperatuur van het grondwater voorstelt, A_0 de temperatuuramplitude voor $z = 0$ en ω de hoeksnelheid. Voor a (dempingsfactor) en b (vertragsfactor), beide uitgedrukt in m^{-1} , gelden de volgende uitdrukkingen:

$$a = \left[\left(\frac{v^2 (\rho_w c_w)^2}{8 \lambda^2} + \left(\frac{\omega \rho_g c_g}{2 \lambda} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{v \rho_w c_w}{2 \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{v \rho_w c_w}{2 \lambda} \right] \quad (10)$$

$$b = \left[\left(\frac{v^2 (\rho_w c_w)^2}{8 \lambda^2} + \left(\frac{\omega \rho_g c_g}{2 \lambda} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{v \rho_w c_w}{2 \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (11)$$

Verdere uitwerking geeft:

$$\frac{v \rho_w c_w}{\lambda} = \frac{b^2 - a^2}{a} \quad (12)$$

2.3. Warmteoverdracht door geleiding en convectie in een gelaagd pakket

In het voorgaande is warmteoverdracht in een homogeen pakket onderzocht, waarbij de invloed van dispersie op de warmteoverdracht verwaarloosbaar klein was. In het volgende wordt een gelaagd medium beschouwd, waarvan de gelaagdheid evenwijdig aan de richting van de stroming van grondwater is en waarbij macrodispersie de warmteoverdracht beïnvloedt. Voor een dergelijke situatie is voor transport van opgeloste stof door Gelhar een differentiaalvergelijking afgeleid [Gelhar et al., 1979]. Het transport van opgeloste stof en van warmte vertoont overeenkomsten. In de volgende afleiding van een oplossing voor het transport van warmte door convectie en geleiding in een gelaagd pakket wordt gebruikgemaakt van de door Gelhar ontwikkelde theorie. Het verschil tussen het transport van opgeloste stof en warmteoverdracht komt tot uitdrukking in de definiëring van de macrodispersiecoëfficiënt (D) en in de vertraging, die bij warmteoverdracht plaatsvindt door absorptie van warmte aan het poreuze medium.

De balansvergelijking voor warmte wordt gegeven door [zie Uffink, 1981]:

$$\rho_g c_g \frac{\delta T}{\delta t} = -\rho_w c_w \operatorname{div}(\vec{v}T - D \mu \operatorname{grad} T - \frac{\lambda}{\rho_w c_w} \operatorname{grad} T) \quad (13)$$

Uit deze vergelijking volgt de differentiaalvergelijking in een ééndimensionaal vlak:

$$(\lambda + \mu \rho_w c_w D) \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} - \rho_w c_w v \frac{\delta T}{\delta z} = \rho_g c_g \frac{\delta T}{\delta t} \quad (14)$$

Hierin is D de macrodispersiecoëfficiënt, uitgedrukt in m^2/dag . Deze differentiaalvergelijking is analoog aan de differentiaalvergelijking voor warmteoverdracht door geleiding en convectie. De oplossing voor het temperatuurverloop in het grondwater is:

$$T = T_a + A_0 e^{-az} \sin(\omega t - bz) \quad (15)$$

waarin:

$$a = \left[\left(\frac{(v \rho_w c_w)^2}{8 (\mu \rho_w c_w D + \lambda)^2} + \left(\frac{\omega \rho_g c_g}{2 (\mu \rho_w c_w D + \lambda)} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{v \rho_w c_w}{2 (\mu \rho_w c_w D + \lambda)} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{v \rho_w c_w}{2 (\mu \rho_w c_w D + \lambda)} \right] \quad (16)$$

$$b = \left[\left(\frac{(v \rho_w c_w)^2}{8 (\mu \rho_w c_w D + \lambda)^2} + \left(\frac{\omega \rho_g c_g}{2 (\mu \rho_w c_w D + \lambda)} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{v \rho_w c_w}{2 (\mu \rho_w c_w D + \lambda)} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (17)$$

D kan bij het transport van opgeloste stof in het algemeen worden bepaald uit het produkt van een snelheid en een dispersiviteit. In het geval van warmteoverdracht wordt D tevens beïnvloed door de temperatuureffeningcoëfficiënt. D is bij warmteoverdracht bepaald volgens:

$$D = a_L u + \alpha + \beta \cdot A \sim \frac{u^2 a_T}{(a_T u + \alpha)} \quad (18)$$

waarin:

a_L = gemiddelde longitudinale dispersiviteit in m .
 a_T = gemiddelde transversale dispersiviteit in m .
 u = voortplantingssnelheid van de sinusvormige temperatuursgolf in m/dag .
 $A \sim$ = lange termijn dispersiviteit in m volgens Gelhar.
 β = correctiecoëfficiënt.
 α = temperatuureffeningcoëfficiënt

van de met water verzadigde grond in m^2/dag .

Voor $\alpha = 0$ is D in vergelijking (18) de macrodispersiecoëfficiënt voor opgeloste stof. De dispersiviteit $A \sim$ is afhankelijk van de statistische eigenschappen van het medium [zie Gelhar et al., 1979] en kan worden bepaald uit:

$$A \sim 1/3 \frac{\sigma_k^2}{k^2} \frac{L^2}{a_T} \quad (19)$$

waarin:

σ_k^2 = variantie van de doorlatendheid van de grond.

k = doorlatendheid in m/dag .

L = parameter voor de lengteschaal van de inhomogeniteit van het medium in m .

Het tijdsafhankelijk karakter van de dispersiviteit is in de macrodispersiecoëfficiënt verwerkt met behulp van de correctiecoëfficiënt β ; deze wordt zodanig bepaald dat voor een vaste stroombaanlengte en een vast specifiek debiet een constante gecorrigeerde macrodispersiecoëfficiënt wordt gevonden. Uit vergelijkingen (15), (16) en (17) volgt dat de temperatuurfluctuaties zich gedempt voortplanten; de dempingsfactor is sterk afhankelijk van het specifiek debiet van de grondwaterstroming.

2.4. Relatie tussen specifiek debiet en demping en vertraging van temperatuurfluctuaties

De door wind in het Holoceen langs de Nederlandse kust afgezette duinen zijn vrij homogeen van opbouw. Derhalve mag verwacht worden dat warmteoverdracht slechts door geleiding en convectie plaatsvindt en dat de invloed van macrodispersie op de warmteoverdracht verwaarloosd mag worden. Voor deze duinzanden zijn de volgende bodemconstanten aangenomen:

$\varepsilon = 0,40$; $\mu = 0,30$; $\rho_g = 1.990 \text{ kg/m}^3$;
 $c_g = 1.465 \text{ J/kg, } ^\circ\text{C}$;

$\rho_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$; $c_w = 4.190 \text{ J/kg, } ^\circ\text{C}$;
 $\lambda = 2,5 \text{ J/m, sec, } ^\circ\text{C}$.

waarin ε de porositeit van de grond voorstelt. In afb. 4 is voor enkele stroombaanlengtes de relatie tussen het specifiek debiet en de demping van een jaarlijkse temperatuursgolf met een amplitude van 10°C weergegeven. Uit afb. 4 blijkt dat voor stroombaanlengtes tot 1.000 m en voor specifieke debieten groter dan 1 m/dag vrijwel geen demping optreedt. Bij specifieke debieten welke belangrijk kleiner zijn dan 1 m/dag treedt in minder of meerdere mate demping op. Zo wordt bijvoorbeeld bij een

specifiek debiet van 0,1 m/dag en een stroombaanlengte van 50 m de amplitude van een temperatuurf fluctuatie gedempt van 10° tot 7°C . Bij specifieke debieten in de orde van grootte van enige centimeters per dag en kleiner blijkt voor stroombaanlengtes groter dan enige tientallen meters vrijwel volledige damping op te treden.

De invloed van macrodispersie op warmte-overdracht is onder meer van belang in fluviatiele afzettingen, waarin de korrel-grootteverdeling in de verticaal, vaak laagsgewijs, sterk varieert. Voor de bepaling van de dispersiecoëfficiënt D van deze afzettingen worden in dit artikel de volgende, door Gelhar gebruikte, waarden aan-gehouden:

$$\frac{\sigma k^2}{k^2} = 0,25; L = 1,5 \text{ m}; a_L = 0,1 \text{ m};$$

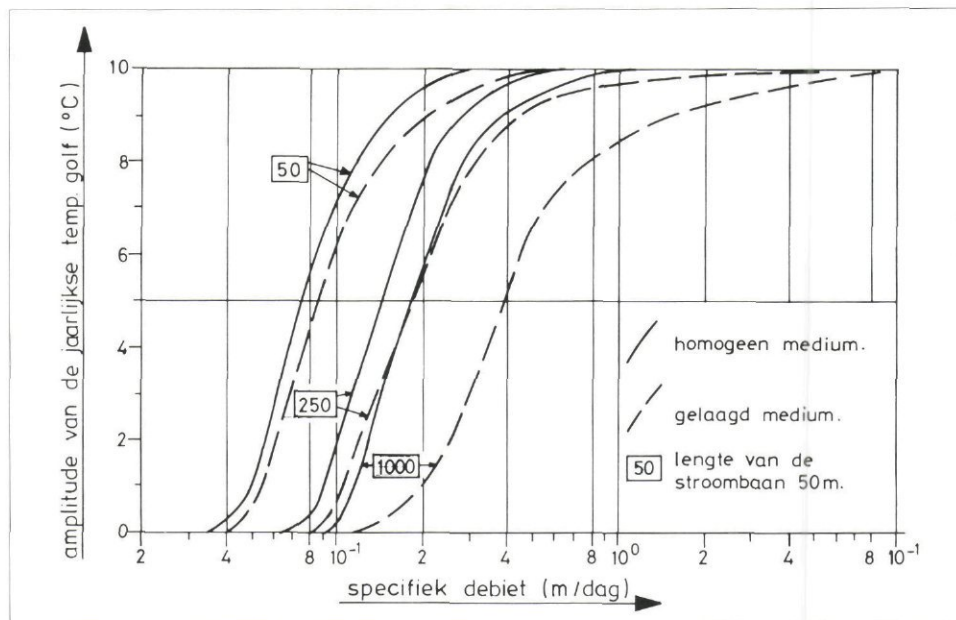
$$a_T = 0,01 \text{ m}.$$

[zie Gelhar et al, 1979]. Voor de andere eigenschappen van het watervoerende pakket zijn dezelfde waarden als voor duinzanden aangehouden. Uit afb. 4 blijkt dat temperatuurgolven in een gelaagd pakket sterker gedempt worden dan in een homogeen pakket; de verschillen in de damping worden groter bij toenemende stroombaanlengte. Tevens blijkt uit afb. 4 dat alleen voor stroombaanlengtes tot ongeveer 100 m en voor specifieke debieten groter dan 1 m/dag vrijwel geen damping optreedt. In het bovenstaande is een beschouwing gegeven van de damping van temperatuurgolven. De relatie tussen het specifieke debiet en de vertragsingsfactor van een jaarlijkse temperatuurgolf is in tabel I weergegeven.

TABEL I – Verband tussen specifiek debiet en vertragsingsfactor.

Specifiek debiet v (m/dag)	Vertragsingsfactor b (m^{-1})		
	Homogeen medium		Gelaagd medium
	oplossing Huisman	oplossing Stallman	oplossing dit artikel
5	0,00240	0,00239	0,00239
1	0,0120	0,0120	0,0119
0,5	0,0240	0,0239	0,0239
0,1	0,120	0,119	0,117
0,05	0,240	0,218	0,202
0,01	1,20	0,338	0,283

Uit tabel I blijkt dat voor een specifiek debiet groter dan 0,1 m/dag het verschil tussen de vertragsingsfactor berekend met enerzijds de oplossing van Huisman en anderzijds met de oplossing van Stallman en de oplossing voor een gelaagd medium, maximaal enige procenten bedraagt. Het specifiek debiet bij kunstmatige infiltratie van oppervlaktewater bij de DWL ligt in de orde van grootte van



Afb. 4 - Damping van een temperatuurgolf bij warmtetransport door convectie en geleiding.

enige decimeters per dag; derhalve kunnen bij de DWL verblijftijden van kunstmatig geïnfiltrerd oppervlaktewater met de eenvoudige formule van Huisman berekend worden (vergelijking 6). Opgemerkt wordt dat bij een specifiek debiet met een orde van grootte van enkele decimeters per dag een aanzienlijke damping van de temperatuurgolf kan optreden (afb. 4).

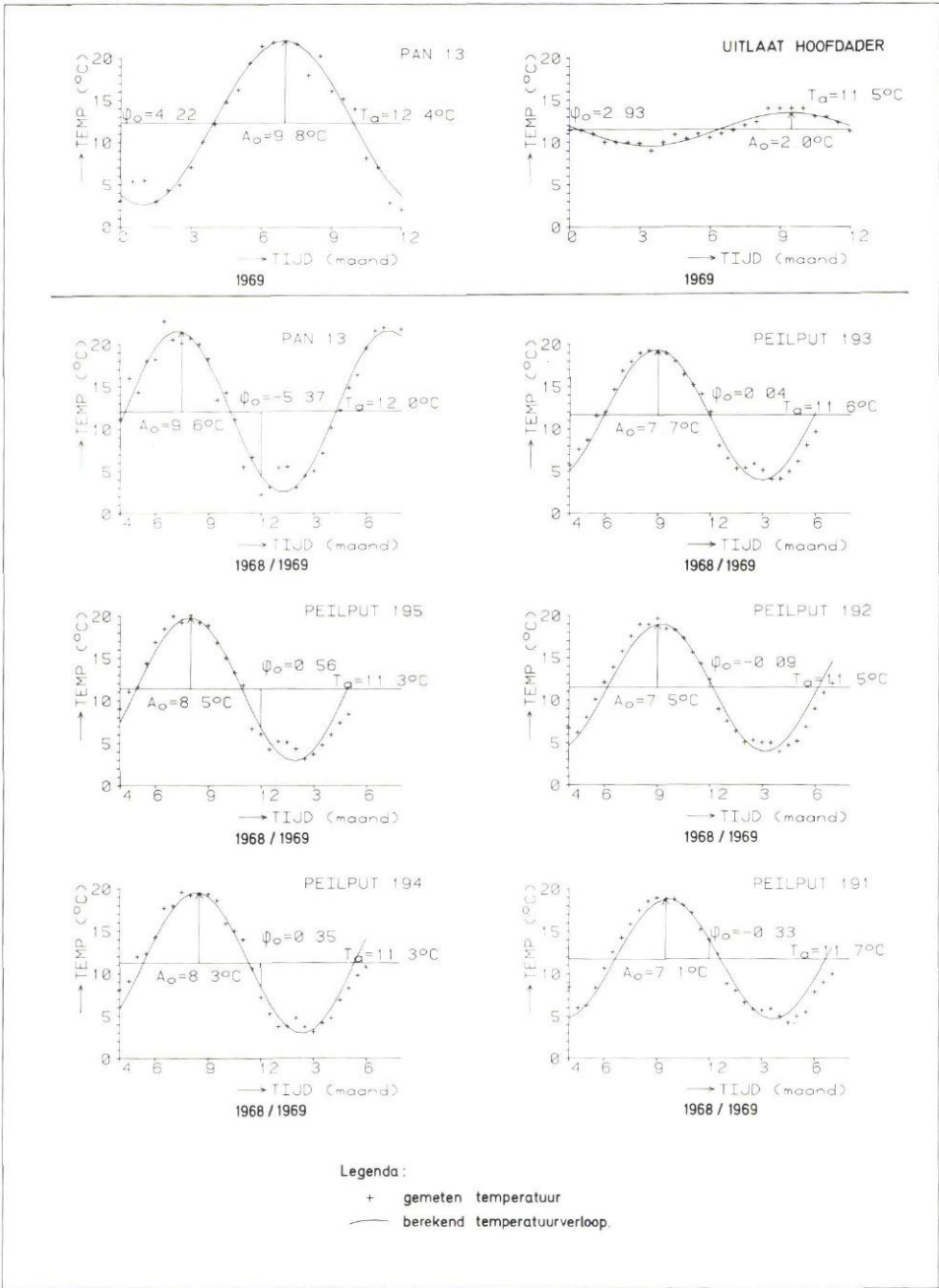
3. Verblijftijden in het ondiepe watervoerende pakket

In 1968 en 1969 is door de DWL een onderzoek verricht naar de produktiviteit van de duininfiltratie in samenhang met de temperatuurverandering en de kwaliteit van het bevoeiingswater [Tuinzaad, 1975]. In het kader van dit onderzoek is onder meer tweemaal per maand de temperatuur bepaald van het water van infiltratieplan 13, van de filters van de raai peilputten 195 tot en met 191 (pp 195/191) en van het gewonnen water bij de uitlaat van de hoofdader. De temperatuur in de filters is bepaald door de filters af te pompen en de temperatuur van het opgepompte water met een thermometer te bepalen. De gemeten temperaturen zijn weergegeven in afb. 5. Met de methode van de kleinste kwadraten zijn de amplitude (A_0), de fase voor $t = 0$ (ψ_0) en de gemiddelde temperatuur (T_a) van het sinusvormige temperatuurverloop met de tijd bepaald. Het berekende temperatuurverloop is eveneens weergegeven in afb. 5.

Uit afb. 5 blijkt dat het oppervlaktewater (pan 13) in 1969 een amplitude van $9,8^\circ\text{C}$ heeft. De temperatuur van het water van deze pan wordt representatief verondersteld voor de temperatuur van het infiltratiewater. De amplitude van het gewonnen water bij de uitlaat van de hoofdader bedraagt in 1969

$2,0^\circ\text{C}$ (voor locatie uitlaat, zie afb. 2). Deze damping van de amplitude kan grotendeels verklaard worden door menging van water met een sinusvormig verloop van de temperatuur met de tijd met water met een constante temperatuur, welke voornamelijk afkomstig blijkt te zijn uit het diepe watervoerende pakket. Wanneer aangenomen wordt dat de damping van het geïnfiltrerde water in het ondiepe pakket gering is dan kan voor de hoofdader de gemiddelde verblijftijd van het in het ondiepe watervoerende pakket geïnfiltrerde water geschat worden met het faseverschil tussen pan 13 en de uitlaat bij de hoofdader. Met vergelijking (7) wordt een gemiddelde verblijftijd van 29 dagen gevonden. Opgemerkt wordt dat bij kunstmatige infiltratie van oppervlaktewater te Castricum op dezelfde wijze de gemiddelde verblijftijd berekend is; deze berekeningsmethode gaf een bevredigend resultaat [Verruyt, 1966]. De op afb. 5 aangegeven berekende waarden van A_0 en ψ_2 van raai pp 195/191 zijn gebruikt voor de bepaling van de damping en vertraging van de sinusvormige temperatuurgolf (afb. 6). Met vergelijking (7) wordt voor het traject pp 195 – pp 191 een verblijftijd van 23 dagen gevonden. Deze waarde komt goed overeen met de verblijftijd welke in deze raai is gemeten bij het volgen van een zoutpiek [Tuinzaad, 1975].

In oktober 1981 zijn in een aantal peilputten van raai pp 195/191 temperatuur-diepte-profielen opgenomen. Deze profielen werden verkregen door op een aantal diepten in het met water gevulde gedeelte van een peilbuis de weerstand van een temperatuurgevoelige weerstand te bepalen; vervolgens werd de temperatuur bepaald met een ijk-kromme. Aangezien de warmte-eigenschappen van



Afb. 5 - Gemeten temperaturen en berekend temperatuurverloop raai pp 195/191.

pvc, water en met water verzadigde grond dezelfde orde van grootte hebben, mag verondersteld worden dat de temperatuur van water in een stijgbuis van pvc representatief is voor de temperatuur van de met water verzadigde grond rondom de peilbuis.

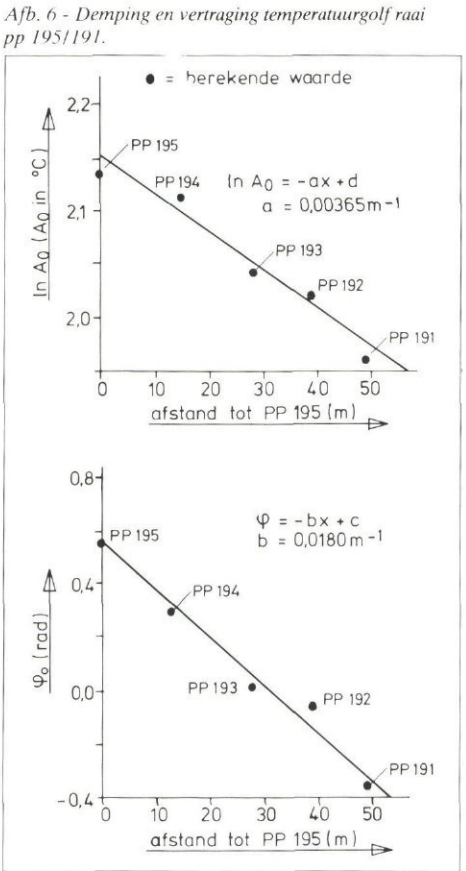
In afb. 7 zijn de temperatuur-diepteprofielen van peilputten 193 en 194 weergegeven; in de langs pan 13 gelegen peilput 195 konden vanwege verstopping van de stijgbuis helaas geen metingen verricht worden. Uit afb. 7 blijkt dat in het ondiepe watervoerend pakket de temperatuur in de verticaal aanzienlijk varieert; in peilbuis 194 werd op een diepte van NAP + 2 m een

temperatuur van 10,2 °C gevonden en op NAP – 2 m een temperatuur van 11,8 °C. Dit verschil in temperatuur wordt verklaard door een verschil in verblijftijd. Uit afb. 5 blijkt dat het afgepompte water van peilput 194 in de periode eind oktober begin november ongeveer 1,0 °C per week afkoelt; een temperatuurverschil in de verticaal van 1,6 °C duidt derhalve op een verschil in verblijftijd van ongeveer anderhalve week. De hoge temperatuur op een diepte van NAP – 2 m geeft een lange verblijftijd aan; het water op deze diepte is waarschijnlijk in het meer centrale gedeelte van de infiltratiepan in de grond gezegen, terwijl het water aan de grondwaterspiegel aan de rand en van de infiltratiepan geïnfiltreerd is. Vrijwel

TABEL II – Karakteristieken van sinusvormig verloop van temperatuur met de seizoenen (1969).

locatie	T _a (°C)	A ₀ (°C)	ψ ₀
Pan 13	12,4	9,8	4,22
Toegangsput 4b	12,0	4,6	3,48
Uitlaat hoofdader	11,5	2,0	2,93

hetzelfde verschil in verblijftijd (8 dagen) volgt uit het faseverschil tussen pan 13 en van het filter van peilput 195. Voor het jaar 1969 zijn temperatuurgegevens van toegangsput 4b beschikbaar. Deze put geeft toegang tot een draineerleiding, die op NAP – 5 m ligt (zie afb. 3). Met deze leiding wordt water uit het ondiepe watervoerende pakket gewonnen; tevens lozen op deze leiding een aantal pompputten met filters in het diepe watervoerende pakket. De temperatuurgegevens van toegangsput 4b zijn representatief voor het in de omgeving van raai pp 195/191 gewonnen water. In tabel II zijn de karakteristieken weergegeven van het sinusvormige verloop van de temperatuur met de seizoenen van pan 13, van toegangsput 4b en van de uitlaat van de hoofdader. Uit het faseverschil tussen pan 13 en toegangsput 4b volgt een verblijftijd van 19 dagen, hetgeen enigszins kleiner is dan de voor het traject pp 195/191 gevonden verblijftijd (23 dagen). Het bij toegangsput 4b gewonnen ondiepe grondwater is zowel afkomstig van de ten noordwesten als van de



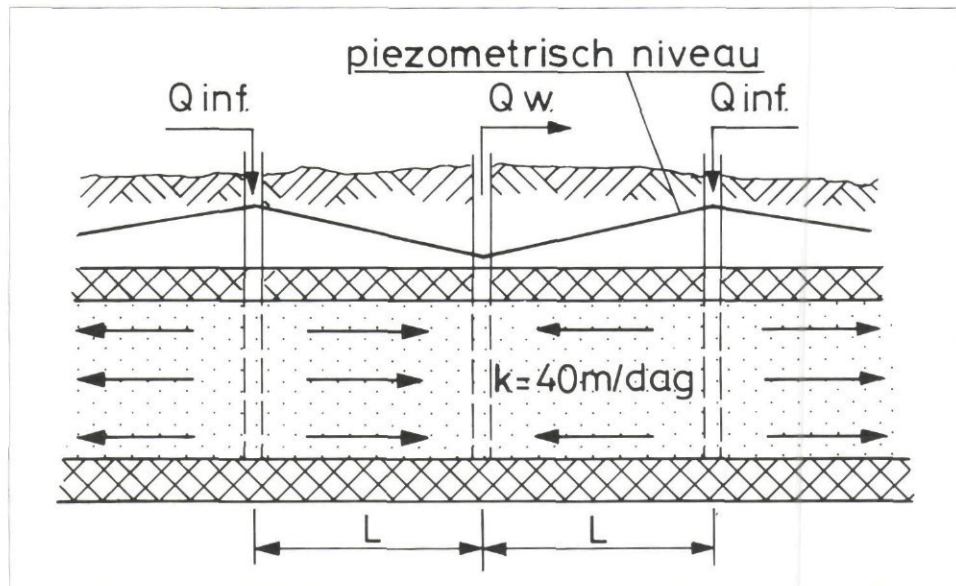
Afb. 6 - Damping en vertraging temperatuurgolf raai pp 195/191.

ten zuidoosten van de hoofdader gelegen infiltratiepan. Waarschijnlijk is de verblijftijd van het grondwater van de ten zuidoosten van de hoofdader gelegen infiltratiepannen afkomstige grondwater relatief klein als gevolg van de hogere peilen welke in deze pannen gehandhaafd worden.

4. Damping van temperatuurgolven in het diepe watervoerende pakket

Op het DWL terrein worden sedert 1973 proeven gedaan met het infiltreren van voorgezuiverd rivierwater in het diepe watervoerende pakket door middel van infiltratieputten. In het volgende wordt een korte beschouwing gegeven van de temperatuurverandering welke bij infiltratie in het diepe watervoerende pakket verwacht wordt. Het beschouwde infiltratie- en winningssysteem bestaat uit twee rijen infiltratieputten op een onderlinge afstand $2L$ met een rij winningsputten tussen de rijen infiltratieputten (zie afb. 8). De stroming tussen de puttenrijen wordt beschouwd als éédimensionale stroming in een watervoerend pakket met volkomen spanningswater. Aangezien het diepe watervoerende pakket bestaat uit door rivieren afgezette sedimenten wordt gerekend met warmte-transport in een gelaagd watervoerend pakket.

Wanneer uitgegaan wordt van een stijghoogteverschil tussen infiltratie- en winputten van 5 m en van een gemiddelde doorlatendheid (k) van het watervoerende pakket van 40 m/dag dan is voor een specifiek debiet van 0,4 m/dag de stroombaanlengte 500 m en voor een specifiek debiet van 0,2



Afb. 8 - Beschouwde infiltratie- en winningssysteem in het diepe watervoerende pakket.

m/dag 1.000 m. Bij deze waarden is de damping van een jaarlijkse temperatuurgolf met een amplitude van 10°C respectievelijk ongeveer 20 en 90 procent. Een verdere damping zal ontstaan door uitwisseling met de boven en onder gelegen pakketten. Geconcludeerd wordt dat bij berekeningen van de damping van temperatuurgolven bij een infiltratie-winningssysteem rekening gehouden moet worden met warmteoverdracht in de richting van de stroming van grondwater (inclusief geleiding) en met warmteoverdracht met de boven en onder het watervoerende pakket gelegen pakketten.

5. Samenvatting en conclusies

In het kader van een door IWACO in samenwerking met de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage (DWL) uitgevoerd hydrogeologisch onderzoek, is een studie gemaakt van de verandering van de temperatuur in de grond bij kunstmatige infiltratie. Bij deze studie is uitgegaan van infiltratiewater met een sinusvormig verloop van de temperatuur met de seizoenen en is de verandering van de temperatuur van het water in de grond beschreven als een damping en vertraging van dat sinusvormige verloop. In homogene grond, zoals bijvoorbeeld holocene duinzanden, vindt warmteoverdracht plaats door convectie en geleiding, terwijl in niet-homogene grond, zoals bijvoorbeeld in fluviale afzettingen, ook rekening gehouden moet worden met de invloed van macrodispersie op de warmteoverdracht. Bij de infiltratie van oppervlaktewater bij de DWL wordt de vertraging van de jaarlijkse temperatuurgolf in het ondiepe pakket voor een specifiek debiet groter dan 0,1 m/dag slechts bepaald door warmteoverdracht door convectie en kan de verblijftijd op een

eenvoudige wijze uit de vertraging van de temperatuurgolf berekend worden. Voor het ondiep gewonnen water bedraagt de gemiddelde verblijftijd van het geïnfilterde water ongeveer 4 weken; deze verblijftijd is bepaald met de vertraging van de jaarlijkse temperatuurgolf tussen het water in de infiltratiepannen en het gewonnen water bij de uitlaat van de hoofdader.

Bij toegangspunt 4b, welke ongeveer halverwege de hoofdader gelegen is, is een gemiddelde verblijftijd van het van de infiltratiepannen naar de hoofdader stromende grondwater van ongeveer 3 weken gevonden. De verblijftijden konden nauwkeurig bepaald worden met de vertraging van de jaarlijkse temperatuurgolf in een raai peilputten, welke ten noordwesten van toegangspunt 4b gelegen is. Voor de verblijftijd in deze raai is 23 dagen gevonden. In de peilput 194, welke langs de infiltratiepan ligt, is tussen het water nabij de grondwaterspiegel en dat op een diepte van NAP - 2 m een verschil in verblijftijd van anderhalve week gevonden; dit verschil wordt verklaard doordat het grondwater op NAP - 2 m afkomstig is van infiltratie in het meer centrale gedeelte van de infiltratiepan, terwijl het grondwater nabij de grondwaterspiegel aan de randen van de infiltratiepan geïnfilterd is.

Uit eigen onderzoek van de DWL, dat is verricht naar aanleiding van de verandering in chloridegehalte bij de overgang van Lek naar Maaswater als bron voor het te infiltreren oppervlaktewater in 1976, is komen vast te staan dat de gemiddelde verblijftijd van het uit het totale wingebied gewonnen water wel 1 à 1,5 jaar bedraagt. In het diepe watervoerende pakket worden

Afb. 7 - Temperatuur-diepte profielen pp 194 en pp 193.

