

Koude-opslag voor de koeling van industriële processen: hydrothermische achtergronden

1. Inleiding

Het verbruik van grondwater voor het koelen van processen of gebouwen (laagwaardig) wordt door de overheid, in het streven naar duurzame ontwikkeling, teruggedrongen. Dit gebeurt enerzijds door in het kader van de Wet Verbruiksbelasting op milieugrondslag op grondwater een milieubelasting te gaan heffen (vermoedelijk in 1994) en anderzijds door in het kader van de Grondwaterwet geen vergunningen meer te verlenen voor laagwaardig gebruik of deze niet te verlengen.



I.R. G. BAKEMA
IF Technology bv

Bedrijven die nu gebruik maken van doorstroomkoeling zullen hierdoor in de toekomst op basis van juridische of economische gronden naar alternatieve koelingsmethoden moeten overstappen. Het toepassen van koude-opslag kan het netto verbruik van grondwater tot nul reduceren. Voor enkele bedrijven zijn haalbaarheidstudies naar koude-opslag uitgevoerd [IF Technology 1992, NIZO Milieudienst *et al.*, 1992]. Resultaat van deze studies is dat koude-opslag met een nakoeling (recirculatie) voor deze bedrijven in de toekomst economisch en milieutechnisch het meest perspectiefvolle alternatief is voor het koelen van de productieprocessen. De verwachting is dat dit systeem ook bij andere typen bedrijven perspectiefvol zal zijn [Bakema *et al.*, 1992].

Een koude-opslag met een nakoeling bestaat uit een onttrekkings-infiltratiesysteem (afb. 1), waarbij het grondwater na gebruik, bij voldoende lage buitentemperatuur, wordt afgekoeld alvorens het wordt geïnfiltréerd, terwijl bij hoge buitentemperaturen het grondwater na gebruik ongekoeld wordt geïnfiltréerd. De gedachte hierachter is dat het grondwater over langere tijd met een temperatuur geïnfiltréerd wordt die gemiddeld gelijk is aan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Gedurende de zomerperiode zal de temperatuur bij infiltratie enige graden boven de natuurlijke grondwatertemperatuur liggen, terwijl in de winterperiode infiltratie met enige graden beneden de natuurlijke grondwatertemperatuur wordt nagestreefd. Bij een juiste positionering van de infiltratiebronnen ten opzichte van de productiebronnen zullen de temperatuurvariaties ter plaatse van de productie-

Samenvatting

Koudeopslag is een systeem waarmee op economisch en milieutechnisch verantwoorde wijze het grondwaterverbruik voor koeling van industriële processen tot nul kan worden gereduceerd. Zoals gebleken uit diverse haalbaarheidsonderzoeken is koudeopslag met een nakoeling het meest perspectiefvol. Deze vorm van koudeopslag bestaat uit een onttrekking-infiltratiesysteem, waarbij het grondwater na gebruik, bij voldoende lage buitentemperatuur, wordt afgekoeld alvorens het wordt geïnfiltréerd, terwijl bij hoge buitentemperaturen het grondwater na gebruik ongekoeld wordt geïnfiltréerd. Bij een juiste positionering van de infiltratiebronnen ten opzichte van de productiebronnen zullen de temperatuurvariaties ter plaatse van de productiebronnen zijn uitgebufferd en zal de onttrekkingstemperatuur nagenoeg constant zijn.

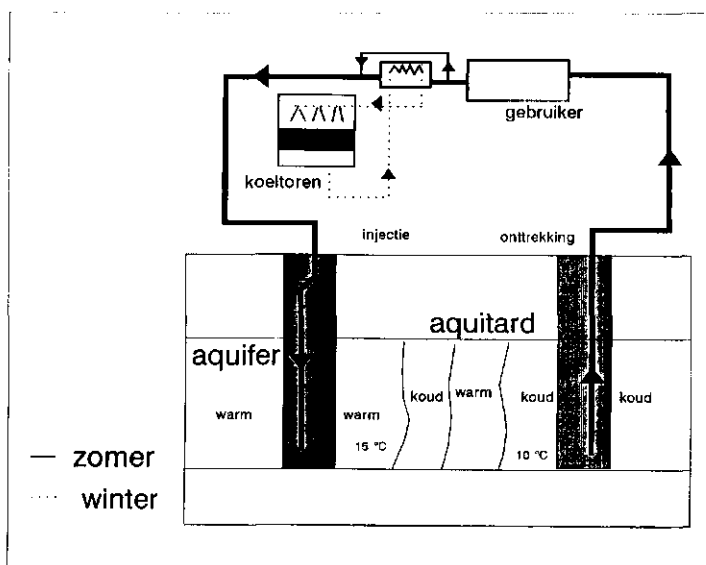
Ter bestudering van de afzonderlijke temperatuurbufferende mechanismen is een Dempingsmodel ontwikkeld. Het model is gebaseerd op het principe van de responsfunctie. Voor een tweetal haalbaarheidsonderzoeken is het Dempingsmodel vergeleken met het numerieke warmtetransport model HST2D. Uit analyses met het Dempingsmodel blijkt dat de spreiding in verblijftijd de grootste bijdrage levert aan de temperatuurbuffering.

Het modelconcept van het Dempingsmodel is ook toepasbaar voor het analyseren van het gedrag van stoffen in het grondwater die tijdens het transport uitwisseling hebben met het korrelskelet.

bronnen zijn uitgebufferd en zal de onttrekkingstemperatuur nagenoeg constant zijn.

De proces technische, economische en milieutechnische aspecten van koude-opslag met nakoeling zijn beschreven door Bakema *et al.* [1992] en Van Loon *et al.* [1992]. De hydrothermische aspecten zijn daarbij slechts zijdelings betrokken. Voor met name vergunningverlenende instanties en potentiële gebruikers is het belangrijk inzicht te hebben in de hydrothermische aspecten van het ondergrondse systeem, om koude-opslag op een gefundeerde wijze te kunnen beoordelen. Verder is een nadere analyse van de werking van het ondergrondse systeem nodig om te komen tot een optimalisatie van het ontwerp. Deze studie is hiertoe een aanzet.

Bij de hydrothermische aspecten gaat het vooral om de temperatuurbufferende mechanismen van een onttrekkings-infiltratiesysteem. Kwaliteitsbufferende mechanismen staan al geruime tijd in de belangstelling van drinkwaterbedrijven die infiltratie toepassen. De kwaliteitsparameter temperatuur is daarbij nooit volledig onderzocht. De onderzoeken in het kader van de kwaliteitsbuffering hebben echter wel als basis gediend bij het ontwikkelen van een begripsmodel voor de temperatuurbuffering. Met behulp van dit begripsmodel is een nadere analyse van de temperatuurbuffering van onttrekkings-infiltratiesystemen uitgevoerd. Deze analyse is gebruikt voor het ontwikkelen van eenvoudige methoden om tot een ontwerp voor een onttrekkings-infiltratiesysteem te komen, waarbij



Afb. 1 - Schematische weergave koude-opslag nakoeling.

een zo volledig mogelijke demping wordt bereikt.

2. Theoretische achtergronden

De kwaliteitsbufferende werking van verblijftijdspreiding in een onttrekkings-infiltratiesysteem is voor de Nederlandse situatie beschreven door onder andere Peters [1982], Peters *et al.* [1983], Haitjema [1977] en Maas [1977]. De daarbij ontwikkelde methoden gaan uit van convectief transport waarop eventueel een afbraakfunctie wordt gesuperponeerd. De buffering van temperatuurgolven kan hiermee, door warmte-uitwisseling met het korrelskelet en met aangrenzende lagen, niet voldoende nauwkeurig worden weergegeven.

De demping van temperatuurgolven door verticale uitwisseling van warmte met de boven- en onderliggende lagen is beschreven door Uffink [1981]. De Jong *et al.* [1983] geven een methode om de demping van temperatuurgolven door geleiding en macrodispersie te berekenen. Deze methodieken hebben echter als nadeel dat slechts het temperatuurverloop van afzonderlijke stroombanen wordt bepaald.

Het combineren van bovengenoemde methoden maakt het mogelijk om de temperatuurbufferende mechanismen voor een onttrekkings-infiltratiesysteem volledig te beschrijven. In eerste instantie wordt hiertoe een nadere beschrijving van de theoretische achtergronden van warmtetransport en verblijftijdspreiding gegeven.

Transport van warmte

Het transport van warmte in aquifers (2-dimensionaal) wordt bepaald door een aantal mechanismen. Het belangrijkste mechanisme is het convectief transport via de grondwaterstroming. Het convectief transport wordt vertraagd door warmte-adsorptie van het korrelskelet. Het warmtefront wordt verder versmeerd door dispersie ten gevolge van inhomogeniteiten in het watervoerend pakket en door warmtegeleiding in het watervoerend pakket. Daarnaast zal door geleiding warmte in verticale richting naar de boven- en onderliggende pakketten stromen. Verticale stroming door dichtheidsverschillen wordt hier buiten beschouwing gelaten.

De balansvergelijking van warmte in een aquifer wordt weergegeven door (1) [Kipp, 1987].

$$\frac{\delta T}{\delta t} = - \frac{v_x}{R_d} \frac{\delta T}{\delta x} - \frac{v_y}{R_d} \frac{\delta T}{\delta y} + \left(\frac{D_x}{R_d} + \alpha_x \right) \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \left(\frac{D_y}{R_d} + \alpha_y \right) \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + q_s / \rho_o c_o \quad (1)$$

waarin:

- T = temperatuur (°C)
- v_x = effectieve grondwaterstromingsnelheid in de x-richting (m/s)
- R_d = retardatiefactor = ρ_oc_o/ερ_wc_w (-)
- D = macro-dispersiecoëfficiënt (m²/s)
- α_x = temperatuurvereffeningscoëfficiënt in de x-richting = λ_x/ρ_oc_o (m²/s)
- λ = warmtegeleidingscoëfficiënt aquifer in de x-richting (J/ms °C)
- ε = porositeit (-)
- ρ_o = dichtheid aquifer (kg/m³)
- c_o = soortelijke warmte aquifer (J/kg °C)
- ρ_w = dichtheid water (kg/m³)
- c_w = soortelijke warmte water (J/kg °C)
- q_s = warmtebron (J/m³s)

De macro-dispersiecoëfficiënt en de temperatuurvereffeningscoëfficiënt worden veelal gecombineerd tot een hydrothermische dispersiecoëfficiënt. Analytische oplossingen voor vergelijking (1) zijn ontwikkeld voor sterk vereenvoudigde situaties. Zo komt Uffink [1981], met behulp van formules die ontwikkeld zijn door Carslaw en Jaeger en aangepast door Gringarten, tot een analytische oplossing voor de temperatuurverandering in een willekeurig 2-dimensionaal grondwaterstromingsstelsel bij warmte-uitwisseling met boven- en onderliggende lagen (2).

$$T(\tau, t) = T_o U(t-\tau) \operatorname{erfc} \left(\frac{\tau/\beta}{2\sqrt{(t-\tau)/\beta}} \right) \quad (2)$$

waarin:

- τ = tijdstip waarop een warmtefront in een bepaald punt arriveert (s)
- U(t) = eenheidsstapfunctie
U(t) = 0 voor t < 0
U(t) = 1 voor t ≥ 0
- β = tijdconstante, gedefinieerd door: (s)
- β = (ρ_oc_o)² (D/2)² / (ρ₁c₁ a₁) (2a)

waarin:

- a₁ = temperatuurvereffeningscoëfficiënt van de aangrenzende lagen (m²/s)
- ρ₁c₁ = warmtecapaciteit van de aangrenzende lagen (J/m³ °C)
- D = dikte van het watervoerend pakket (m)

De voorwaarden die bij (2) zijn gesteld, zijn:

- geen hydrothermische dispersie, waardoor de richting van het warmte-transport altijd samenvalt met de richting van de grondwaterstroming;

- oneindig dikke aangrenzende lagen. Voor een niet-stationaire warmte-transport-berekening is dit een redelijke aanname [Uffink, 1981];
- relatief dunne aquifer waarin de temperatuur in verticale zin constant wordt verondersteld. Een aquifer mag als dun gezien worden als [Verruyt, 1969]:

$$\frac{4\pi D \lambda_1}{\rho_1 c_1 Q} < 0,1 \quad (3)$$

waarin:

- Q = debiet (m³/s)

Verblijftijdspreiding

Een infiltratie- en onttrekkingsstelsel kan 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 [Haitjema, 1977].

De spreiding in verblijftijd wordt veelal weergegeven als een cumulatieve frequentieverdeling van de verblijftijden (verblijftijdspreiding). Deze wordt gevonden door de relatieve frequentieverdeling van de verblijftijden (aankomstdichtheidfunctie) te integreren (4).

$$F(\tau) = \int_{\tau_{\min}}^{\tau} F'(\tau) d\tau \quad (4)$$

De aankomstdichtheidfunctie is gedefinieerd als de fractie van de totale infiltratie Q_{tot} op het tijdstip t = 0, die per tijdseenheid bij de onttrekkingsput arriveert ten tijde τ [Peters, 1982], zie (5). Hierbij is τ de verblijftijd van het water.

$$F'(\tau) = \frac{d(Q/Q_{\text{tot}})}{d\tau} \quad (5)$$

De spreiding in verblijftijden ontstaat doordat de potentiaalverdeling rond een onttrekkingsinfiltratiesysteem niet uniform is. Hierdoor krijgt het water dat uit de infiltratieput stroomt een verschillende stijghoogtegradiënt opgelegd, waardoor de richting en snelheid van de stroombanen zal variëren. Inhomogeniteit in het doorstroomde medium (macrodispersie) versterkt het verschil in verblijftijd. Zoals al vermeld hebben een aantal auteurs het kwaliteitsbufferende effect van een verblijftijdspreiding aangetoond. Het daarbij gehanteerde model bestaat uit een infiltratie-onttrekkingsstelsel dat stationair doorstroomd wordt met een vaste volumestroom, echter met een wisselende temperatuur-input. De output wordt bepaald door de input en door de eigenschappen van het systeem. Deze

zogenaamde responsfunctie, gerelateerd aan de kwaliteitsparameter temperatuur, wordt beschreven met een convolutie-integraal (6).

$$T(t) = \int_0^{\infty} T_i(t-\tau) F'(\tau) d\tau \quad (6)$$

waarin:

$$\begin{aligned} T(t) &= \text{temperatuur in de onttrek-} \\ &\quad \text{kingsput op tijdstip } t \quad (^\circ\text{C}) \\ \tau &= \text{verblijftijd} \quad (\text{s}) \\ T_i(t-\tau) &= \text{input-temperatuur} \\ &\quad \text{op tijdstip } (t-\tau) \quad (^\circ\text{C}) \\ F'(\tau) &= \text{aankomst-dichtheid-functie} \end{aligned}$$

Haitjema [1977] komt aan de hand van een mathematische analyse tot de conclusie dat met een lineaire verblijftijdspreiding (constante aankomst-dichtheid) bij een periodieke infiltratie-temperatuur volledige demping wordt bereikt, als de periode van de fluctuatie in de infiltratietemperatuur een geheel aantal malen $\Delta\tau$ (verschil tussen minimale en maximale verblijftijd) is. Verder wordt gesteld dat bij stochastische kwaliteits-functies ook een lineaire verblijftijd-spreiding de voorkeur verdient. Maas [1977] stelt dat er naast de lineaire verblijftijdspreiding andere verdelingen zijn die volledige demping bij periodieke kwaliteitsfuncties bewerkstelligen.

3. Warmtetransportmodellen

Oplossingen van de warmtetransport-vergelijking (1) zijn veelal niet met analytische methoden te verkrijgen. Derhalve wordt in de meeste situaties gebruik gemaakt van een numeriek model, zoals bijvoorbeeld HST2D (zie box).

Numerieke modellen hebben als nadeel dat ze ondoorzichtig zijn. Voordeel van numerieke modellen is echter dat er in

vergelijking met analytische oplossingen complexe situaties mee kunnen worden doorgerekend.

In het kader van dit onderzoek is naar methoden gezocht waarbij de afzonderlijke processen van het warmtetransport in een onttrekkingsinfiltratiesysteem kunnen worden bestudeerd. Dit heeft uiteindelijk geresulteerd in het zogenaamde Dempingsmodel. De resultaten van dit model zijn vergeleken met HST2D-berekeningen.

Dempingsmodel

Het Dempingsmodel is gebaseerd op het principe van de responsfunctie (6). Door het inbrengen van warmte-uitwisseling met boven- en onderliggende lagen en dispersie is getracht het model geschikt te maken voor het berekenen van het temperatuurverloop in het onttrokken water.

Het temperatuurverloop in een aquifer bij een plotselinge temperatuurverandering op tijdstip $t = 0$, is beschreven met (2). Als de injectietemperatuur op meerdere tijdstippen verandert, kan het temperatuurverloop langs een stroombaan worden berekend door gebruik te maken van een convolutie-integraal (7) [Uffink, 1981].

$$T(t_0, \tau) = \int_0^{t_0} T_i(t_0-\tau) T'(\tau, t) dt \quad (7)$$

De temperatuur in de injectieput is daarbij voorgesteld door T_i , terwijl $T'(\tau, t)$ de afgeleide van $T(\tau, t)$ naar de tijd is (8) [Uffink, 1981].

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\tau}{2\sqrt{\pi\beta(t-\tau)^3}} e^{-\frac{\tau^2}{4\beta(t-\tau)}} \quad (8)$$

Door het invoeren van (7) in de convo-

lutie-integraal van (6) ontstaat een vergelijking waarmee de temperatuur van het onttrokken water kan worden bepaald (9).

$$T(t_0) = \int_0^{\infty} \int_0^{t_0} T_i(t_0-\tau) T'(\tau, t) dt F'_w(\tau) d\tau \quad (9)$$

Analytische oplossingen voor (9) zijn niet bekend. Derhalve is (9) numeriek opgelost door middel van een discretisatie in de tijd (10). De afzonderlijke onderdelen (6) en (7) van het ontstane Dempingsmodel zijn geverifieerd met behulp van analytische oplossingen.

$$\begin{aligned} T(t_0) &= \sum_n \sum_{n=0}^{\infty} \left[\sum_{\tau=0}^t T_i(t_0-n\Delta\tau) \right. \\ &\quad \left. \frac{T(n+1)\Delta t - T(n-1)\Delta t}{2} \right] \\ &\quad \left[\frac{F_w(n+1)\Delta\tau - F_w(n-1)\Delta\tau}{2} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

waarin:

F_w = warmteverblijftijdspreiding.

De spreiding in verblijftijden zal worden vergroot door inhomogeniteiten in het doorstroomde medium (macro-dispersie). Deze door dispersie veroorzaakte spreiding is berekend met behulp van een analytische oplossing van een 1-dimensionale warmtetransportvergelijking (11).

$$\frac{\delta T}{\delta t} = -\frac{V_x}{R_d} \left(\frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{D_x}{R_d} \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \right) \quad (11)$$

De oplossing van (11) wordt door Bear [1979] gegeven onder de voorwaarden dat:

$$\begin{aligned} T &= T_i & x > 0, & t = 0 \\ T &= T_0 & x = 0, & t > 0 \\ T &= T_i & x = \infty, & t > 0 \end{aligned}$$

Uitgaande van $T_i = 0$ en $T_0 = 1$ wordt de oplossing:

$$\frac{T(x, t)}{T_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt/R_d}{\sqrt{4\alpha vt/R_d}} \right) \quad (12)$$

waarin:

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{dispersielengte} \quad (\text{m}) \\ \frac{T(x, t)}{T_0} &= \text{relatieve hoeveelheid water die} \\ &\quad \text{op tijdstip } t \text{ het punt } x \text{ is} \\ &\quad \text{gepasseerd.} \end{aligned}$$

Gelhar *et al.* [1985] hebben met behulp van veldexperimenten aangetoond dat de longitudinale dispersielengte ongeveer 10% van de afgelegde weg bedraagt ($0,1 * x$). Als deze trend wordt ingevoerd in (12) wordt een oplossing (13) gevonden, die alleen afhankelijk is van de warmteverblijftijd van de stroombaan.

$$\frac{T(\tau, t)}{T_0} = 1/2 \operatorname{erfc} \left(\frac{\tau - t}{\sqrt{0,4 \tau t}} \right) \quad (13)$$

HST2D

HST2D (Heat and Solute Transport in 2-Dimensional groundwater flow systems) is in 1989 ontwikkeld uit het model HST3D door de U.S. Geological Survey in samenwerking met Hagoort & Associates.

HST2D simuleert warmte- en stoftransport in een verzadigd 2-dimensionaal grondwater-stromingssysteem.

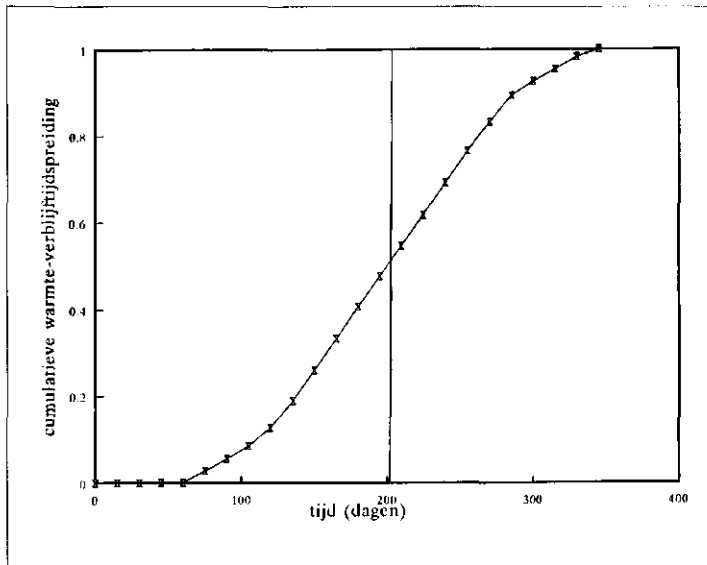
De vergelijkingen die numeriek worden opgelost zijn:

- de stromingsvergelijking van het grondwater in een verzadigd medium;
- de warmtetransportvergelijking;
- de stoftransportvergelijking.

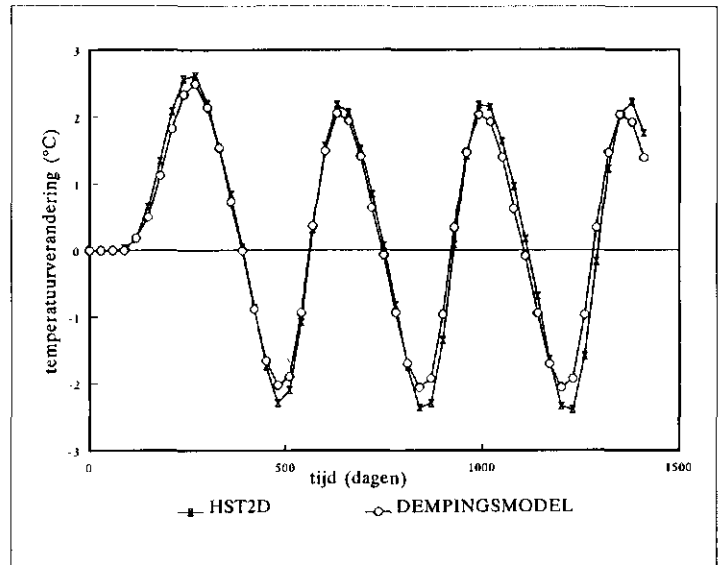
Deze drie vergelijkingen worden gekoppeld door de afhankelijkheid van het convectief transport van de effectieve stroomsnelheid, de afhankelijkheid van de vloeistofviscositeit van de temperatuur en de stofconcentratie, en de afhankelijkheid van de vloeistofdichtheid van de druk, de temperatuur en de stofconcentratie [Kipp, 1987].

HST2D kan onder andere gebruikt worden voor het oplossen van problemen die gerelateerd zijn aan:

- energie-opslag;
- verzilting van watervoerende pakketten;
- verspreiding van verontreinigingen;
- sanering van verontreinigingen.



Afb. 2 - Cumulatieve warmteverblijftijdspreiding voor een stroombaan met gemiddelde warmteverblijftijd τ (200 dagen).



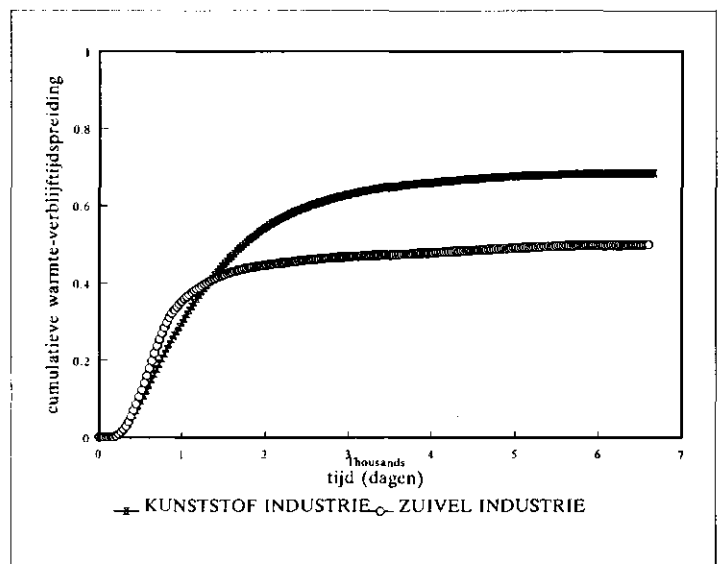
Afb. 3 - Temperatuurverandering in het onttrokken water voor een 1-dimensionale stromingssituatie berekend met HST2D en het Dempingsmodel.

Voor elke stroombaan met een gemiddelde warmteverblijftijd τ wordt met behulp van (13) een warmteverblijftijdspreiding berekend (afb. 2). De relatieve hoeveelheid water die via één stroombaan wordt aangevoerd is omgekeerd evenredig met het aantal stroombanen waarmee wordt gerekend. Door superpositie van de afzonderlijke warmteverblijftijdspreiding rond de stroombanen, wordt de warmteverblijftijdspreiding (F_w) van het gehele systeem verkregen.

De uiteindelijke invoer van het Dempingsmodel bestaat derhalve uit het temperatuurverloop van het geïnjecteerde water T_i (t_0-t), een tijdconstante β om het bufferend vermogen van de afsluitende lagen aan te geven en de verblijftijden van de afzonderlijke stroombanen (te bepalen met een stroombanenprogramma).

Verificatie

In eerste instantie is het Dempingsmodel voor een 1-dimensionale stromingssituatie vergeleken met HST2D (afb. 3). De uitkomsten uit de modellen zijn vrijwel identiek. Een nadere verificatie heeft plaatsgevonden aan de hand van twee 2-dimensionale stromingssituaties, die in het



Afb. 4 - Warmteverblijftijdspreiding inclusief dispersie voor de voorbeeldsituaties.

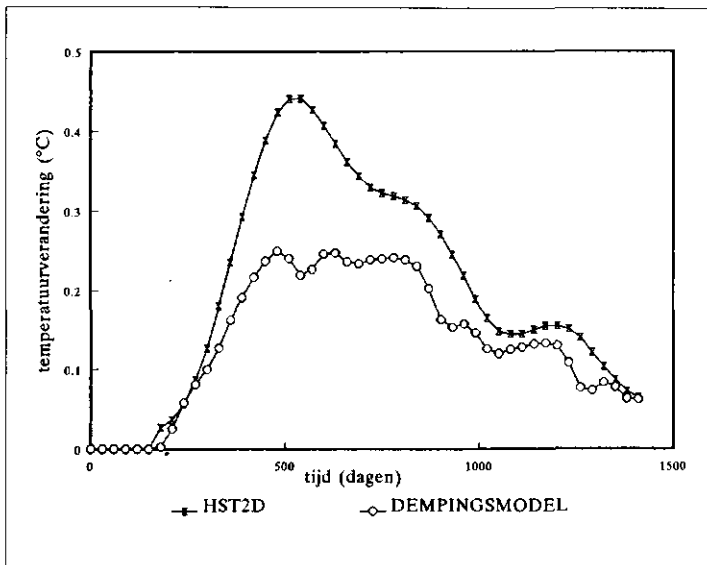
kader van haalbaarheidsstudies naar koude-opslag zijn onderzocht [IF Technology, 1992 en NIZO Milieudienst *et al.*, 1992] (tabel I).

De warmteverblijftijdspreiding voor beide situaties is weergegeven in afbeelding 4. Met uitzondering van de eerste temperatuurverhoging van het voorbeeld uit de

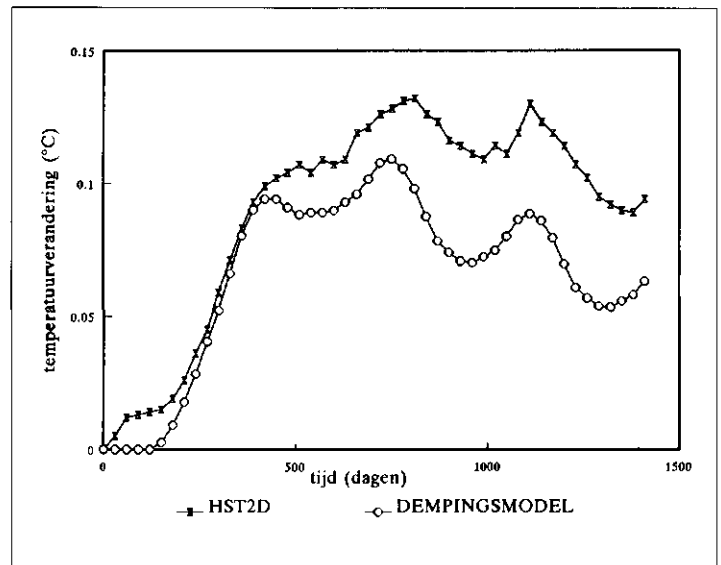
zuivelindustrie bedraagt het verschil in berekende temperatuurverandering maximaal 0,1 °C (afb. 5 en 6). Dit verschil wordt vooral veroorzaakt door het verschil in berekening van de uitwisseling met boven- en onderliggende lagen. De pieken in de berekening met HST2D door het optreden van transversale dispersie meer versmeerd dan in de berekening met het Dempingsmodel waarin deze dispersie ontbreekt. De berekeningen met HST2D geven vooral voor het voorbeeld uit de kunststofverwerkende industrie een te vroege temperatuurverandering. Gesteld kan worden dat de met behulp van HST2D berekende temperatuurverlopen van het onttrokken water goed overeen komen met de resultaten van het Dempingsmodel. De temperatuur in de onttrekkings-

TABEL I - Parameters voorbeeldsituaties

Parameter	Zuivelindustrie	Kunststofverwerkende industrie
aantal bronnen	2 onttrekking 1 infiltratie	7 onttrekking 7 infiltratie
minimale bronafstand (m)	70	200
debiet (m ³ /d)	200	10.000
grondwatertemperatuur (°C)	12	11
injectietemperatuurcyclus (°C)	24-15-9-3 (periodes van 3 maanden)	15-11-7 (periodes van 4 maanden)
bodemopbouw	semi-gespannen watervoerend pakket	semi-gespannen watervoerend pakket
tijdconstante (d)	2.000	5.200



Afb. 5 - Temperatuurverandering in het onttrokken water van een zuivelindustrie gedurende 4 cycli berekend met HST2D en het Dempingsmodel.



Afb. 6 - Temperatuurverandering in het onttrokken water van een kunststofverwerkende industrie gedurende 4 cycli berekend met HST2D en het Dempingsmodel.

put(ten) blijft gedurende de niet-stationaire fase boven de natuurlijke grondwatertemperatuur. Dit wordt verklaard doordat de eerste temperatuurverhoging, door een onvoldoende verblijftijdspreading, nog niet in voldoende mate wordt gebufferd. De volgende temperatuurveranderingen worden in grotere mate gebufferd door een voorafgaande temperatuurpiek c.q. dal. Bovenstaande maakt duidelijk dat in sommige situaties het starten van de recirculatie met het injecteren van gekoeld water de voorkeur zal verdienen.

De temperatuurbuffering in beide voorbeelden is na vier jaar bijna volledig. De uiteindelijk stationaire temperatuurverandering is ook afhankelijk van de temperatuur van het water dat via de

stroombanen met de langste verblijftijden wordt aangevoerd. De niet-stationaire fase eindigt op het moment dat alle stroombanen in het onttrekkingspunt(en) zijn aangekomen. Gezien het feit dat recirculatie al vanaf het eerste jaar een volledige garantie voor grondwater met een constante lage temperatuur moet geven, zal de aandacht zich richten op het niet-stationaire temperatuurverloop.

4. Ontwerp van systemen met koude-opslag-nakoeling

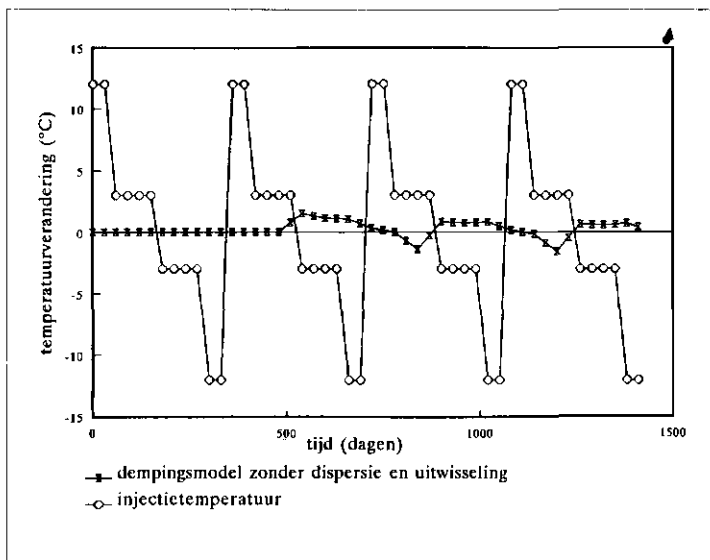
Een nadere analyse van het temperatuurbufferend vermogen van het onttrekkingsinfiltratiesysteem maakt duidelijk waar de aandacht tijdens het ontwerp op gericht moet zijn. Hiertoe zijn in eerste instantie met het Dempingsmodel enkele aanvul-

lende berekeningen gemaakt voor het voorbeeld uit de zuivelindustrie.

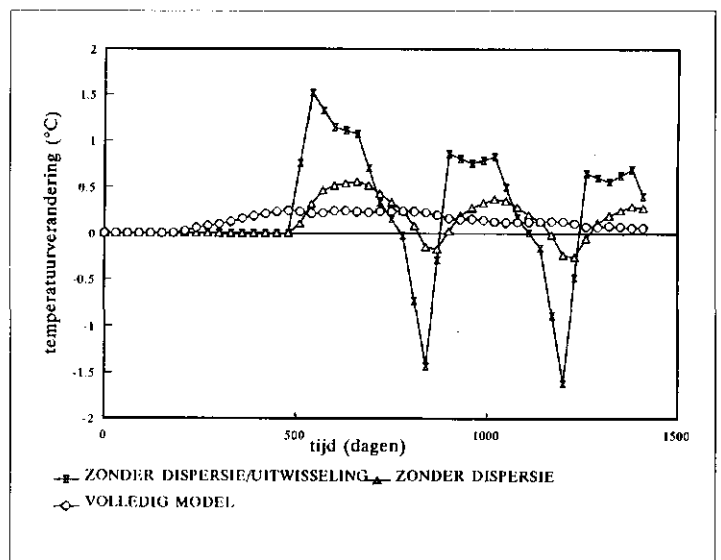
Om een duidelijk beeld te krijgen van de mate waarin temperatuurgolven worden gebufferd, is in afbeelding 7 de injectie-temperatuur vergeleken met de onttrekkings-temperatuur, waarbij alleen het temperatuurbufferende mechanisme van de verblijftijdspreading is meegenomen. Alleen al door de spreading in verblijftijd wordt in deze situatie een temperatuurbuffering van circa 90% verkregen. Uitwisseling van warmte met boven- en onderliggende lagen en dispersie bufferen de temperatuur tot uiteindelijk circa 3% van de maximale fluctuatie in de injectie-temperatuur (afb. 8).

De spreading in verblijftijd is het voorname temperatuurbufferend mechanisme

Afb. 7 - Temperatuurverandering in het geïnjecteerde water en in het door verblijftijdspreading gedempte onttrokken water.



Afb. 8 - De invloed van de afzonderlijke temperatuurbufferende mechanismen berekend met het Dempingsmodel.



me. De invloed van de overige mechanismen is afhankelijk van de verblijftijd en de stroomsnelheid van het gerecirculeerde water en van de eigenschappen van het doorstroomde pakket en de aangrenzende pakketten. Het is duidelijk dat bij een grotere afstand tussen de infiltratie- en onttrekkingsputten de invloed van dispersie en warmte-uitwisseling toeneemt.

Verblijftijdspreiding

Het ontwerp zal zich in eerste instantie gaan richten op het verkrijgen van een optimale spreiding in verblijftijden. Als dispersie en warmte-uitwisseling met onder- en bovenliggende lagen buiten beschouwing worden gelaten, zal een lineaire verblijftijdspreiding de meest optimale zijn. Hierbij treedt, wanneer de periode van fluctuaties in de injectie-temperatuur een geheel aantal malen Δt is, volledige buffering op vanaf het tijdstip waarop de maximale verblijftijd wordt bereikt (afb. 9).

Warmte-uitwisseling veroorzaakt een onvolledige demping bij een lineaire verblijftijdspreiding (afb. 9). Dit is te verklaren door het feit dat de demping door warmte-uitwisseling toeneemt met de verblijftijd. Hierdoor wordt de temperatuur van het water, dat via de kortste stroombanen wordt aangevoerd, niet meer voldoende gebufferd door de temperatuur van het water van de stroombanen met een langere verblijftijd. De invloed van de vorm van de verblijftijdspreiding is nader geanalyseerd door enkele fictieve stromingsituaties door te rekenen. Een licht concave vorm veroorzaakt de grootste demping (afb. 10). De reden hiervoor is dat de bijdrage van de

kortste stroombanen wordt verminderd in verhouding tot die van langere stroombanen. De meest optimale concave vorm wordt bepaald door de mate waarin warmte-uitwisseling met boven- en onderliggende lagen plaatsvindt. De convexe verblijftijdspreiding heeft de minste temperatuurbufferende capaciteit, door de overheersing van de fractie stroombanen met relatief korte verblijftijden.

Naast de vorm van de verblijftijdspreiding hebben de minimale verblijftijd en de hoeveelheid gerecirculeerd water invloed op de temperatuurbuffering.

Een vergroting van de minimale verblijftijd, door het verder uit elkaar plaatsen van de putten, veroorzaakt een extra temperatuurbuffering door een vergroting van de temperatuuruitwisseling en de dispersie. Een deel van die extra buffering kan worden toegeschreven aan de minder convexe vorm van de verblijftijdspreiding. Een verlaging van de verhouding tussen de fractie van het geïnjecteerde water dat uiteindelijk de onttrekkingsput bereikt en de fractie van het onttrokken water dat van elders komt, heeft een extra temperatuurbufferende werking. Het niet-gerecirculeerde water zal zich met de natuurlijke grondwaterstroming verplaatsen. De temperatuurveranderingen die hierdoor buiten het infiltratie-onttrekkingssysteem ontstaan, worden door de vergunningverlenende instanties in bepaalde gevallen als ongewenst beschouwd.

Een vergelijking van genoemde methodieken maakt duidelijk dat de meest effectieve manier om de temperatuurbuffering te vergroten het verkleinen van de bolling van de verblijftijdspreiding is.

In praktijk is het veranderen van de bolling bij systemen waarbij slechts enkele putten worden gebruikt niet voldoende mogelijk. In deze gevallen zal, om voldoende buffering te krijgen, de onderlinge putafstand moeten worden vergroot, of zullen de infiltratieputten stroomafwaarts van de onttrekkingsputten geplaatst moeten worden.

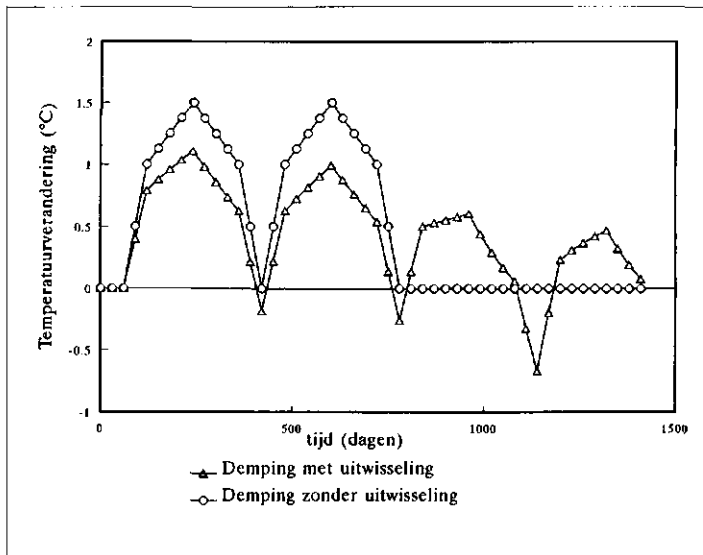
De uiteindelijke keuze van de putconfiguratie zal naast het bereiken van een zo optimaal mogelijke temperatuurbuffering ook worden bepaald door lokatiegebonden factoren en eisen die de vergunningverlenende instanties aan het systeem stellen.

Energiebalans

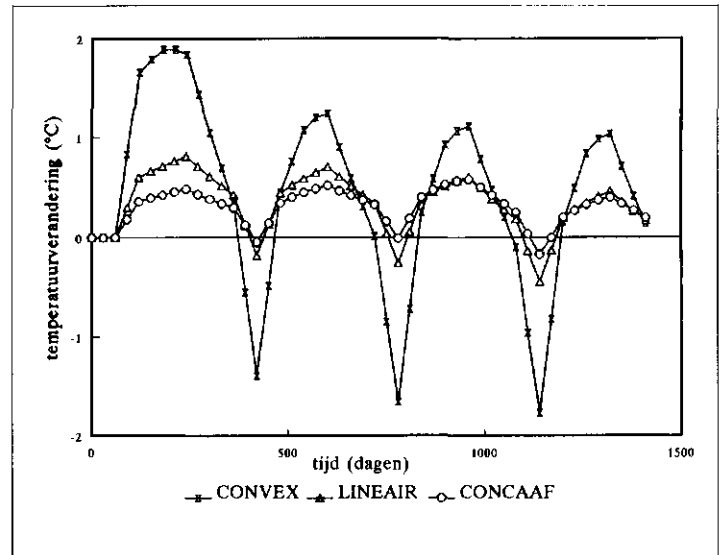
Als op een gegeven lokatie geen putconfiguratie kan worden gerealiseerd die voldoende temperatuurbufferende eigenschappen bezit, dan zal de energiebalans voor een jaarcyclus gewijzigd moeten worden. Globaal zijn hiervoor twee methoden denkbaar: het verlagen van de temperatuur van het geïnjecteerde water in de zomer, of het infiltreren van een grotere hoeveelheid gekoeld water in de winter. Een verlaging van de injectie-temperatuur met 30% (4 °C) gedurende de twee warmste maanden, levert voor een fictief systeem met 2 putten (onderlinge afstand 50 m) een verlaging van 0,5 °C in het onttrokken water (afb. 11). De effectiviteit van deze maatregel is vergelijkbaar met het circa 25 m verder uit elkaar plaatsen van de putten. De laatste optie is veelal te verkiezen boven de eerste, omdat deze geen invloed heeft op de bedrijfsvoering.

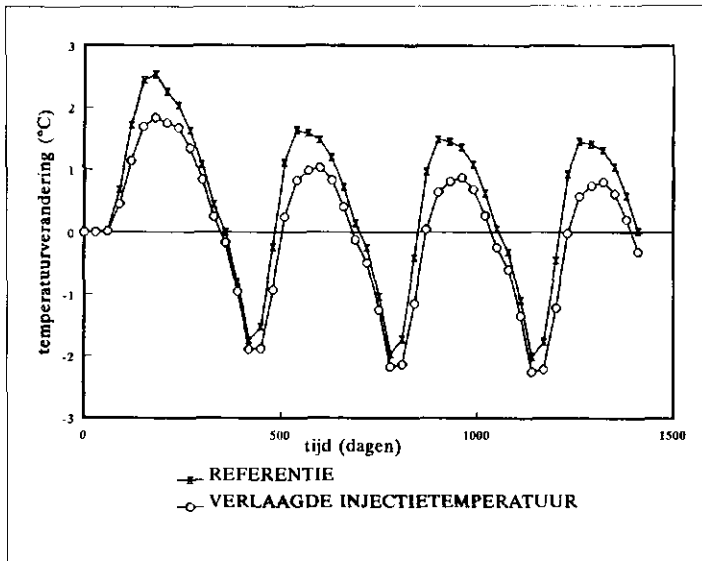
De geringe toename van het temperatuurbufferend vermogen door verandering in

Afb. 9 - Temperatuurverandering van een systeem met een lineaire verblijftijdspreiding berekend met en zonder warmte-uitwisseling.

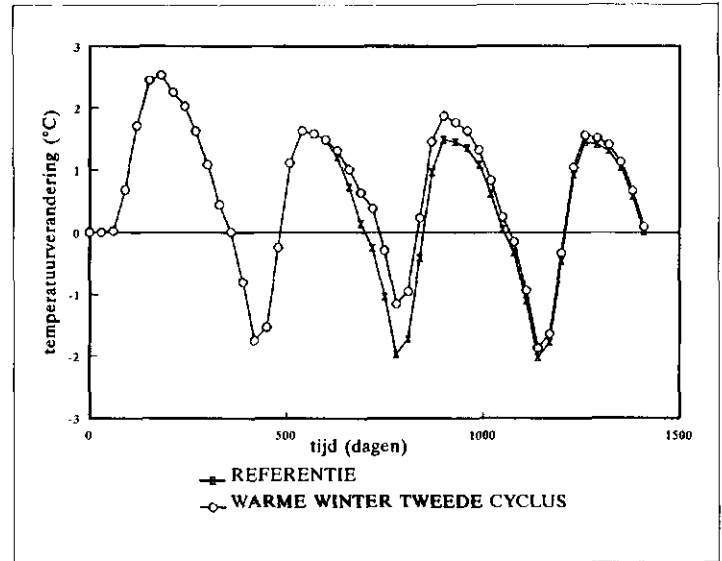


Afb. 10 - De invloed van de vorm van de verblijftijdspreidingscurve op de temperatuur in het onttrokken water.





Afb. 11 - De invloed van een verlaagde injectietemperatuur in de zomer op de temperatuurverandering in het onttrokken water.



Afb. 12 - De invloed van een verhoogde injectietemperatuur in een winter op de temperatuurverandering in het onttrokken water.

de injectietemperatuur betekent ook dat de invloed van klimaatschommelingen klein zal zijn. Een eenmalige verhoging van de injectietemperatuur van 2,0 °C gedurende een winterhalfjaar veroorzaakt voor het fictieve 2-puttensysteem een verhoging van de onttrekkingstemperatuur met enkele tienden van graden gedurende de daaropvolgende 2 jaar (afb. 12).

Conclusie

Een eenvoudig ontwerpcriterium voor het ontwerpen van een onttrekkingsinfiltratiesysteem waarbij een voldoende temperatuurbuffering wordt verkregen is door de diversiteit in stromingssituaties en eisen aan temperatuurniveaus niet te geven. Dit impliceert niet dat er geen eenvoudige methoden zijn om de temperatuurbufferende eigenschappen van een hydrothermisch systeem te analyseren. Uit het voorgaande is duidelijk geworden dat de verblijftijdspreading het belangrijkste temperatuurbufferende mechanisme is. Met behulp van een eenvoudig stroombaanprogramma kan deze snel worden vervaardigd en is het mogelijk de meest optimale putconfiguratie voor de gegeven omstandigheden te bepalen. Vanzelfsprekend zal gestreefd moeten worden naar een sluitende energiebalans voor een klimatologisch gemiddeld jaar, zodat de temperatuur in het onttrokken water geen trendmatige verandering zal ondergaan.

5. Evaluatie

Koudeopslag met nakoeling is een systeem dat de bestaande doorstroomkoeling bij bedrijven op een economisch en milieutechnisch verantwoorde wijze kan vervangen. De temperatuurbufferende mechanismen garanderen bij de juiste

putconfiguratie en energiebalans een onttrekkingstemperatuur die weinig fluctueert rond de natuurlijke grondwaterstemperatuur. Haalbaarheidsonderzoeken naar koude-opslag met nakoeling tonen aan dat hiervoor een relatief korte afstand tussen onttrekkings- en infiltratieputten voldoende is, zodat eigendoms grenzen veelal niet overschreden hoeven te worden. Het ontwikkelde Dampingsmodel heeft in tegenstelling tot het numerieke model HST2D de mogelijkheid op eenvoudige wijze de afzonderlijke temperatuurbufferende mechanismen te kwantificeren. Ondanks een andere benaderingswijze vertonen de resultaten van het Dampingsmodel en HST2D grote overeenkomst. Het modelconcept van het Dampingsmodel is ook toepasbaar voor het analyseren van het gedrag van andere stoffen in het grondwater die tijdens het transport uitwisseling hebben met het korrelskelet.

De vorm van de cumulatieve verblijftijdspreadingscurve heeft de grootste invloed op de temperatuur van het onttrokken water. In tegenstelling tot wat er in de literatuur vermeld is over andere kwaliteitsparameters van het grondwater, is voor warmte niet een lineaire verblijftijdspreading maar een licht concaaf verloop de optimale vorm voor temperatuurbuffering. Door de minimale verblijftijd te vergroten, of door de fractie gecirculeerd water te verkleinen, wordt het temperatuurbufferend vermogen vergroot. Wijzigingen in de injectietemperatuur hebben een geringe invloed op de uiteindelijke onttrekkingstemperatuur. Dit verklaart ook de ongevoeligheid van dit koude-opslag-systeem voor klimaatschommelingen.

Literatuur

- Bakema, G., Snijders, A. L. en Loon, L. J. M. van (1992). *Koude-opslag reëel alternatief voor industriële koelwateronttrekking*. *PT processtechniek* (47) 1992, nr. 11, p. 60-63.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, New York.
- Gelhar, L. W., Mantoglou, A., Welty C. and Rehfeldt, K. R. (1985). *A review of field scale physical solute transport processes in saturated and unsaturated porous media*. EPRI, Palo Alto, CA 94303.
- Haitjema, H. M. (1977). *Optimale verblijftijdverdeling van een infiltratie-onttrekkingsysteem voor demping van kwaliteitsfuncties*. *H₂O* (10) 1977, nr. 6, p. 145-147.
- IF Technology (1992). *Knelpuntenstudie koeling W/AVIN Hardenberg*. Rapportnr. 1/9116/AS, Arnhem.
- Jong, S. J. de, Speets, R. en Tuinzaad, H. (1983). *Temperatuurverandering in het grondwater bij kunstmatige infiltratie bij de duinwaterleiding van 's-Gravenhage*. *H₂O* (16) 1983, nr. 20, p. 455-464.
- Kipp, K. L. (1987). *HST3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in a three-dimensional ground water flow system*. U.S. Geological Survey, Water Resource Investigation Report 86-4095, Denver, Colorado.
- Loon, L. J. M. van, Palstra, A. P. M. en Snijders, A. L. (1993). *Koude-opslag als alternatief voor industriële grondwateronttrekking*. *H₂O* (26) 1993, nr. 18, p. 527-532.
- Maas, K. (1977). *Lineaire verblijftijdspreading niet als ontwerpnorm hanteren voor infiltratie-onttrekkingsystemen*. *H₂O* (10) 1977, nr. 13, p. 302-303.
- NIZO milieudienst, IF Technology, CTAD Coberco en Heidemij Adviesbureau (1992). *Haalbaarheidsstudie koudeopslag Coberco-vestiging Vollenhove*. NIZO, Ede.
- Peters, J. H. (1982). *Afolakking van kwaliteitsfluctuaties door spreading van verblijftijden bij kunstmatige infiltraties*. KIWA SWE-403. KIWA, Nieuwegein.
- Peters, J. H., Akker, C. van den en Gan, J. B. S. (1983). *Afolakking van waterkwaliteit bij persput-infiltratie*. KIWA SWE-83.017. KIWA, Nieuwegein.
- Uffink, G. J. M. (1981). *De afolakking van temperatuurvariëaties in het grondwater door warmte-uitwisseling tussen het watervoerend pakket en de boven- en onderliggende pakketten*. RID-mededeling '81-4. RID, Voorburg.
- Verruyt, A. (1969). *Stationary heat transport by plane groundwater movement in a thin or a thick aquifer*. *Fundamentals of transport phenomena in porous media*, Elsevier.