
Hydrologische effectenberekening bij thermische energieopslagsystemen

Kwantificeren van de fout bij verwaarlozing temperatuurveranderingen

Marte Peeters

Thermische energieopslag in watervoerende pakketten is sinds 1985 een veelvuldig toegepaste techniek om gebouwen of processen van een duurzame manier van koeling en/of verwarming te voorzien. In Nederland zijn inmiddels vele tientallen projecten met succes gerealiseerd. Geohydrologen die in de praktijk betrokken zijn bij het bepalen van de hydrologische effecten op de omgeving van dergelijke projecten – bijvoorbeeld voor effectenstudies in het kader van vergunningsaanvragen – staan voor de keuze de invloed van de temperatuur bij het energieopslagsysteem al dan niet mee te nemen in de modelberekeningen. Dit artikel gaat in op de vraag of de dichtheidseffecten en viscositeitsveranderingen ten gevolge van temperatuurverschillen van belang zijn. Het presenteert een analytisch model dat inzicht geeft in de afwijkingen van de uitkomsten wanneer de optredende temperatuurverschillen niet mee worden genomen in de berekeningen.

1 Inleiding

In de praktijk kan er voor worden gekozen om de optredende temperatuurverschillen niet mee te nemen in hydrologische effecten berekeningen. Dit levert een fout op ten aanzien van de gebruikte parameters, aangezien deze in meerdere of mindere mate afhankelijk zijn van de temperatuur. Zo wordt bijvoorbeeld de optredende dichtheidsstroming ten gevolge van temperatuurverschillen niet meegenomen.

Allereerst wordt een theoretische inleiding gegeven over de optredende processen in de ondergrond bij thermische energieopslagsystemen (in het vervolg aangeduid als EO-systemen), de belangrijkste parameters van deze processen en de invloed van deze parameters en processen op de hydrologische effecten. Hierbij wordt opgemerkt dat in dit artikel is uitgegaan van een EO-systeem waarbij gebruik gemaakt wordt van een zogenaamd warmte-/koude bronsysteem: 2 putten waarmee (grond)water zowel geïnjecteerd als onttrokken kan worden. Vervolgens wordt er een eenvoudig analytisch model gepresenteerd dat gebruikt is om de fout te kwantificeren, die wordt gemaakt wanneer de invloed van de

Ir. M.J.J. Peeters is als milieukundig adviseur werkzaam bij Royal Haskoning, Divisie Milieu, Adviesgroep Bodem, Postbus 8520, 3009 AM Rotterdam, telefoon: (010) 286 55 87, fax: (010) 220 00 25, e-mail: m.peeters@royalhaskoning.com.

temperatuur op de grondwaterstroming buiten beschouwing blijft bij een hydrologische effectenstudie.

2 Achterliggende theorie

Het principe van een warmte/koudebronsysteem berust op het injecteren in een watervoerend pakket en het in een later stadium onttrekken van water met een temperatuur die hoger of lager is dan de achtergrondtemperatuur van het aanwezige grondwater. De volgende 3 basisprocessen treden in de ondergrond op ten gevolge van het toepassen van een dergelijk EO-systeem:

- 1 Stroming ten gevolge van het opgelegde drukverschil in de injectie- en onttrekkingsputten en ten gevolge van de voorkomende temperatuurverschillen (dichtheidsstroming).
- 2 Warmtetransport, te onderscheiden in:
 - Advectie; 'meevoering' van thermische energie met de grondwaterstroming.
 - conductie; geleiding van thermische energie, gedreven door aanwezige temperatuurgradiënten.
 - dispersie; verspreiding van thermische energie door onregelmatigheden in het stromingspatroon die optreden als gevolg van heterogeniteiten in het medium.
- 3 Verandering van de waterkwaliteit omdat er een ruimtelijke variatie van de temperatuur ontstaat in de bodem welke van invloed is op de chemische reacties en op de aanwezigheid en groei van micro-organismen.

Ad 1: Stromingsprocessen bij variabele temperatuur

De meeste grondwatermodelleercodes zijn gebaseerd op de Wet van Darcy. Een belangrijke parameter in deze stromingsvergelijking is de doorlatendheid k , welke recht evenredig is met de vloeistofdichtheid van het grondwater ρ_f , de zwaartekracht g en de intrinsieke doorlatendheid κ en omgekeerd evenredig met de dynamische viscositeit van het grondwater μ . Uit een parameterstudie blijkt de intrinsieke doorlatendheid niet en de dichtheid slechts in zeer geringe mate te variëren in de temperatuursrange van EO-systemen en derhalve is de invloed hiervan op de doorlatendheid te verwaarlozen. De viscositeit daarentegen verandert aanzienlijk in de temperatuursrange van EO-systemen waardoor bij een warmwaterinjectie (25 °C) k circa 43% groter wordt, en bij een koudwaterinjectie (5 °C) k circa 14% kleiner wordt bij een uitgangstemperatuur van 10 °C (Peeters, 2001), afgeleid uit (Green, Maloney en Perry, 1998).

Bij de hydrologische effectenberekening wordt over het algemeen een EO-systeem gesimuleerd met een constant debiet gedurende de halfjaarlijkse cyclus van injectie en onttrekking. Hierdoor leidt een temperatuursverandering alleen tot een verandering in het benodigde drukverschil ter injectie/onttrekking van het opgelegde debiet, omdat koud water bij hetzelfde debiet 'moeizamer' wegstroomt dan warm water. Gezien de mate waarin k van de temperatuur afhankelijk is, wordt verwacht dat dit effect niet zondermeer verwaarloosbaar is voor de hydrologische effectenberekening. Een goede inschatting van de ruimtelijke variatie van de temperatuur in de ondergrond is daarom van belang voor de resultaten van de hydrologische effectenberekening.

De temperatuursafhankelijkheid van ρ_f leidt bij EO-systemen tot het ontstaan van dichtheidsstroming in de ondergrond; het koudere water zal uitzakken en het warmere water zal opstijgen. De optredende drukverschillen behorende bij deze voorkomende dichtheidsstroming worden verwaarloosbaar klein geacht, vergeleken met de kunstmatig opgelegde drukverschillen door de onttrekking en injectie. Derhalve is het voor de *hydrologische* effectenberekening niet noodzakelijk rekening te houden met dichtheidsstroming (Peeters, 2001).

Ad 2: Warmtetransportprocessen bij variabele temperatuur¹

De grootte van de advectieve warmteflux f_a wordt bepaald door de warmtecapaciteit van het grondwater C_f , de temperatuur T en de effectieve grondwaterstromingsnelheid v_{eff} : $f_a = C_f T v_{eff}$. Hoe groter T , C_f en v_{eff} hoe groter het warmtetransport ten gevolge van deze warmteflux. De warmtecapaciteit C_f is temperatuurafhankelijk, maar dit effect is zo gering dat het bij het temperatuurstraject van een ondergronds EO-systeem als een constante beschouwd mag worden. Indien het EO-systeem bij een hydrologische effectenberekening debiet-gestuurd (constant debiet) wordt gesimuleerd, verandert de v_{eff} niet ten gevolge van de temperatuurgradiënt in de ondergrond. Dit betekent dat de mate van warmtetransport ten gevolge van advectie dan alleen verandert ten gevolge van de temperatuur T .

De grootte van de conductieve warmteflux f_c wordt bepaald door de warmtegeleidingcoëfficiënt en de temperatuurgradiënt: $f_c = -\lambda \Delta T$. De flux heeft een negatief teken omdat de warmtegeleiding altijd de tegengestelde richting heeft van de temperatuurgradiënt. De gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem λ_m is opgebouwd uit de λ_f voor het grondwater (vloeibare fase) en de λ_s voor de korreldeeltjes (vaste fase). De warmtegeleidingcoëfficiënt voor de vaste fase λ_s is onafhankelijk van de temperatuur, terwijl λ_f toeneemt naarmate de temperatuur hoger wordt. De temperatuursafhankelijkheid van de warmtegeleidingcoëfficiënt van bodem λ_m is echter verwaarloosbaar bij een EO-systeem en kan als een constante beschouwd worden (Peeters, 2001). Dit betekent dat de grootte van de conductieve warmtestroom alleen afhankelijk is van voorkomende temperatuurverschillen.

Uitwisseling van thermische energie tussen de vaste en de vloeibare fase kan instantaan worden verondersteld (Uffink, 1981). Als gevolg van warmteopname door de korreldeeltjes wordt verspreiding van warmte via het grondwater vertraagd. De mate van warmteoverdracht kan beschreven worden middels een thermische retardatiefactor, welke in analytische zin te vergelijken is met de retardatiefactor die gebruikt wordt bij de modellering van stoftransport waarbij adsorptie een rol speelt. Door het conductieproces in de vaste of vloeibare fase is er bovendien sprake van thermische diffusie in de ondergrond; deze diffusie levert ten aanzien van de verspreiding van thermische energie een verwaarloosbaar klein aandeel in vergelijking met het advectieproces.

Door onregelmatigheden in het stromingspatroon is er sprake van thermische dispersie, welke leidt tot een diffuse verspreiding van de thermische energie. In de praktijk van EO-systemen kan aangenomen worden dat de thermische *micro*dispersie te verwaarlozen is

¹ Tekst is grotendeels afgeleid uit Peeters (2001), Nield en Bejan (1999) en De Marsily (1981).

ten opzichte van de thermische diffusie (reken maar eens het getal van Peclet uit). De thermische *macrodispersie* daarentegen is niet zondermeer te verwaarlozen wanneer sprake is van een heterogene bodemopbouw. In deze studie wordt echter uitgegaan van een homogeen watervoerend pakket en wordt *macrodispersie* verwaarloosbaar geacht ten opzichte van de thermische energieverbreiding door het advectieproces.

Ad 3: Grondwaterkwaliteit bij variabele temperatuur

Doordat ten gevolge van een EO-systeem de temperatuur verandert in de bodem, zal er een verandering optreden in de chemisch/microbiologische samenstelling van het grondwater. Deze verandering zal niet van invloed zijn op de hydrologische effecten (tenzij 'clogging' optreedt).

Voor de hydrologische effectenberekening werd reeds gesteld dat een goede inschatting van de ruimtelijke variatie van T in de ondergrond van belang is voor de resultaten in verband met de verwachte significante temperatuursafhankelijkheid van k . Uit het bovenstaande valt te concluderen dat de ruimtelijke variatie in de temperatuur, en dus ook de ruimtelijke variatie van k , voornamelijk afhankelijk is van de thermisch bufferende werking van de korreldeeltjes en van de voortplanting van de thermische energie door het advectieve warmtetransport. De overige warmtetransportprocessen en de verandering in de waterkwaliteit hebben naar verwachting een verwaarloosbare invloed op de resultaten van een hydrologische effectenberekening.

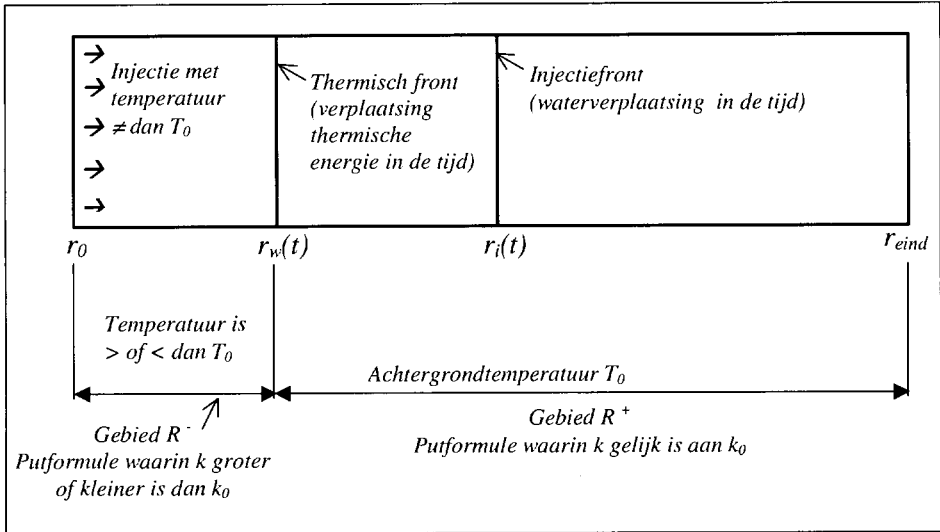
3 Analytisch model

Er is een analytisch model opgesteld waarmee de fout die gemaakt wordt bij verwaarlozing van de temperatuursafhankelijkheid van de doorlatendheid k in hydrologische effectenstudies eenvoudig kan worden gekwantificeerd. Het model rekent het effect van de temperatuur uit op het stijghoogteverloop aan de rand van de infiltratieput, aangezien daar de maximale stijghoogteveranderingen plaatsvinden. Bij de totstandkoming van het model zijn de volgende aannamen gedaan:

- Het watervoerend pakket is homogeen, isotroop en aan de boven- en onderzijde horizontaal afgesloten door een niet-doorlatend pakket;
- Initieel is de temperatuur overal in het model constant;
- Er is sprake van een volkomen put-situatie waarbij 1 put gesimuleerd wordt die water aan het injecteren is;
- Het debiet en de temperatuur van het geïnjecteerde water zijn constant in de tijd;
- De dichtheid is constant en komt overeen met de dichtheid van zoet grondwater;
- k verandert alleen ten gevolge van de temperatuursafhankelijke viscositeit;
- Er is sprake van een scherp, verticaal thermisch front (alleen advectief warmtetransport, geen thermische diffusie en – dispersie, geen dichtheidsstroming);
- Er zijn geen thermische energieverliezen naar onder- en bovenliggende lagen;
- De thermische retardatiefactor verdisconteert de opname van warmte door het korrelskelet, waarbij is aangenomen dat de warmteoverdracht tussen de vloeibare en vaste fase instantaan plaatsvindt.

Opzet en afleiding analytisch model

Het analytische model gaat uit van een semi-stationaire toestand; er wordt als basisformule (1) gebruik gemaakt van de stationaire volkomen putformule voor de situaties vóór en achter het thermische front, waarbij de verplaatsing van dit front in de tijd gevolgd wordt langs een radiale as (1D). Zie figuur 1.



Figuur 1: Opzet van het analytische model met radiaal assenstelsel.

$$h(r) = -\frac{Q}{2\pi Hk} \ln \frac{r}{r_0} + h_0$$

Het beginpunt (r_0 , aan de rand van de put) en het eindpunt (r_{eind} , geen invloed van het EO-systeem merkbaar) van het model worden vastgehouden in de tijd, terwijl de grens van het *thermische front* $r_w(t)$ zich verplaatst in de tijd ten gevolge van het injecteren van warm of koud water met een debiet Q . Deze injectie levert een volume water op dat zich rondom de put (met filterlengte H) cilindervormig verspreidt. Het volume van de watercilinder in een watervoerend pakket met een effectieve porositeit n_{eff} , kan weergegeven worden als $\pi r(t)^2 H n_{eff}$, en moet op ieder tijdstip t gelijk zijn aan het geïnjecteerde volume water Qt . De straal van de cilinder, het *injectiefront* $r_i(t)$, geeft hierbij de grens aan tussen het geïnjecteerde water en het oorspronkelijke grondwater en verplaatst zich in de tijd als volgt:

$$r_i(t) = \sqrt{Qt / \pi H n_{eff}}$$

Door de thermische retardatiefactor R_{th} is de voortplantingssnelheid van het thermische front $r_w(t)$ kleiner dan die van het injectiefront $r_i(t)$. De toegevoerde hoeveelheid thermische energie in een bepaalde periode van injectie verandert de temperatuur van een bepaald cilindrisch volume grond met een straal $r_w(t)$. Wanneer de hoeveelheid toegevoerde energie

gelijk gesteld wordt aan de hoeveelheid energie die door dit volume grond wordt opgenomen, (3), wordt via onderstaande afleiding de vergelijking voor de voortplanting van het thermische front verkregen (4):

$$QtC_f(T - T_0) = \pi r_w(t)^2 HC_m(T - T_0) \Rightarrow$$

$$QtC_f = \pi r_w(t)^2 H[n_{\text{eff}}C_f + (1 - n_{\text{eff}})C_s] \Rightarrow$$

$$r_w(t) = \sqrt{\frac{Qt}{\pi H n_{\text{eff}}}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{(1 - n_{\text{eff}})C_s}{nC_f}}} = \sqrt{\frac{Qt}{\pi H n_{\text{eff}}}} \frac{1}{\sqrt{R_{th}}}$$

waarbij:

$$\begin{aligned} C &= \rho c \\ C_m &= n_{\text{eff}}C_f + (1 - n_{\text{eff}})C_s \end{aligned}$$

In het model wordt gewerkt met 2 deelgebieden met ieder een andere doorlatendheidscoëfficiënt k . In het deelgebied R^- , vanaf het beginpunt r_0 tot het thermische front $r_w(t)$, is k hoger of lager ten gevolge van de temperatuursverandering, hetgeen aangegeven wordt met k_I . In het deelgebied R^+ , vanaf het thermische front $r_w(t)$ tot het eindpunt r_{eind} , heeft k nog geen verandering ondergaan en wordt deze aangeduid met k_0 .

Teneinde het model te completeren, zijn 2 randvoorwaarden en 1 beginvoorwaarde nodig:

- 1 Beginvoorwaarde; op $t = 0$ is $r_w(0)$ gelijk aan $r = r_0$;
- 2 Randvoorwaarde op $r = r_w(t)$: de stijghoogte (h) is op dit punt gelijk voor de deelgebieden R^- en R^+ ;
- 3 Randvoorwaarde op $r = r_{\text{eind}}$: de stijghoogte is op dit punt gelijk aan de oorspronkelijke stijghoogte.

In het deelgebied R^- is de doorlatendheid k gelijk aan k_I en in het deelgebied R^+ is deze gelijk aan k_0 .

Met behulp van de putformule (1) voor de beide deelgebieden en de 3 gestelde voorwaarden kan vervolgens de vergelijking (4) afgeleid worden, welke het stijghoogteverloop aan de rand van de injectieput in de tijd beschrijft:

$$h_0(t) = h_{\text{eind}(R^+)} + \frac{Q}{2\pi H k_0} \ln \frac{r_{\text{eind}}}{r_w(t)} + \frac{Q}{2\pi H k_I} \ln \frac{r_w(t)}{r_0}$$

Voorbeelden

Er worden met behulp van vergelijking (4) een tweetal kenmerkende situaties doorgerekend:

- 1 Injectie van een debiet Q met een temperatuur van 25 °C; warmwaterinjectie.
- 2 Injectie van een debiet Q met een temperatuur van 5 °C; koudwaterinjectie.

Het debiet Q wordt een halfjaar lang gelijkmatig geïnjecteerd. Aan het eind van deze periode is de procentuele beïnvloeding van de temperatuur op de stijghoogte maximaal: immers het gebied dat thermisch beïnvloed wordt door de injectie is dan het grootst.

Voor beide kenmerkende situaties zijn berekeningen uitgevoerd voor verschillende combinaties van filterlengte H en gemiddeld debiet Q teneinde de procentuele beïnvloeding van de temperatuur op de stijghoogte aan de rand van de put te bepalen in de tijd. Na een eenvoudige aanpassing van het analytische model zijn vervolgens berekeningen uitgevoerd om een ruimtelijk beeld te vormen van de invloed van de temperatuurverschillen op de stijghoogte. Deze aangepaste versie van het model berekent op één vast tijdstip het stijghoogteverloop over de radiaal.

In tabel 1 zijn de invoerwaarden van een aantal parameters weergegeven die bij de berekeningen gebruikt zijn.

Tabel 1: Invoerwaarden per EO-situatie.

| Parameter | Warmwaterinjectie | Koudwaterinjectie |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Achtergrondtemperatuur, T_0 | 10 °C | 10 °C |
| Injectietemperatuur, T_1 | 25 °C | 5 °C |
| Gemiddeld injectiedebiet Q | 10 tot 80 m ³ /uur | 10 tot 80 m ³ /uur |
| Filterlengte H | 10 tot 60 m | 10 tot 60 m |
| Effectieve porositeit n_{eff} | 0,3 (-) | 0,3 (-) |
| Intrinsieke doorlatendheid κ | $4,0 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ | $4,0 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ |
| Dichtheid ρ (bij T_0 en T_1) | 1000 Kg/m ³ | 1000 Kg/m ³ |
| Dynamische viscositeit μ bij T_0 | $1,30 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/ms}$ | $1,30 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/ms}$ |
| Dynamische viscositeit μ bij T_1 | $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/ms}$ | $1,52 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/ms}$ |
| ¹ Thermische retardatiefactor R_{th} | 2 (-) | 2 (-) |
| ² Beginpunt, r_0 | 0,1 m | 0,1 m |
| ² Eindpunt, r_{eind} | 1000 m | 1000 m |
| Referentie stijghoogte, $h_{r,eind}$ | 0 m | 0 m |

Toelichting:

- ¹ Het thermisch front loopt bij een R_{th} van 2 circa 30% ($1/R_{th} \cong 0,7$) achter op het injectiefront ten opzichte van de rand van de put r_0 .
- ² Begin- en eindpunt uitgedrukt ten opzichte van het centrum van de put.

4 Resultaten berekeningen

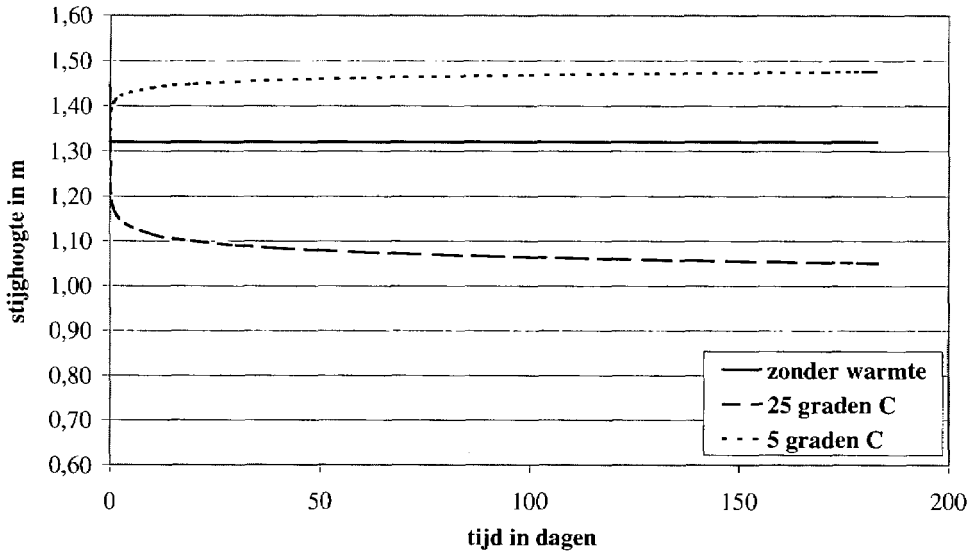
Voor een aantal verschillende combinaties van filterlengte en injectiedebiet is de procentuele beïnvloeding berekend voor de twee situaties (zie tabel 2 voor de resultaten). De percentages zijn afgeleid door de benodigde drukhoogte aan de rand van de put na een half jaar injecteren bij een situatie mét en een situatie zónder thermische beïnvloeding te vergelijken. De beïnvloeding van de temperatuur op de stijghoogte is duidelijk waarneembaar (negatief % is een stijghoogtedaling, positief % is een verhoging van de stijghoogte):

- 1 Warm water (25 °C) geeft na een halfjaar injecteren een beïnvloeding in grootteorde van -20%.
- 2 Koud water (5 °C) geeft na een halfjaar injecteren een beïnvloeding in grootteorde van +11%.

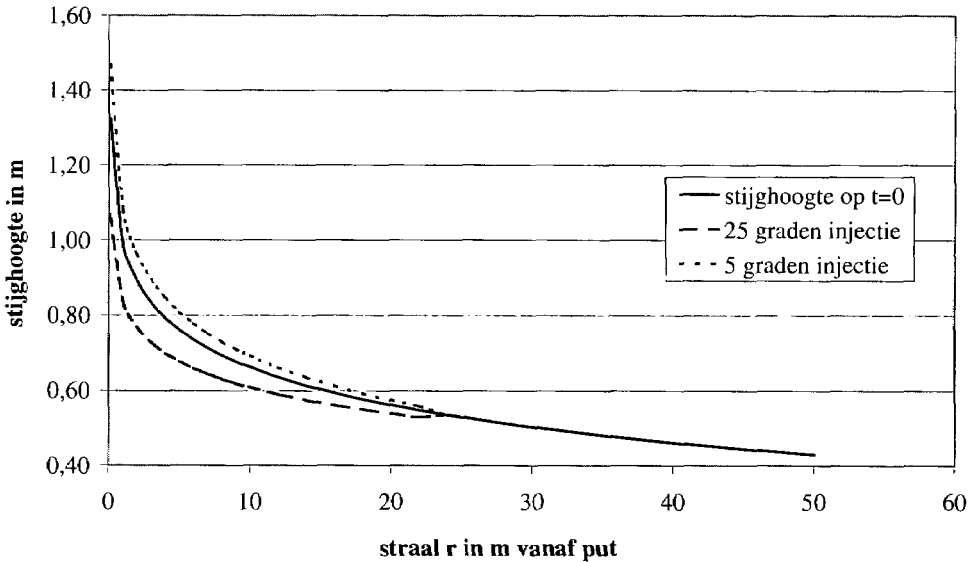
Tabel 2: Resultaten berekeningen: procentuele toename van de benodigde drukhoogte per EO-situatie ná een half jaar injectie.

| Warmwaterinjectie (25 °C) | Geïnjecteerd debiet Q (m^3/h) gedurende een half jaar | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| Filterlengte injectieput: H (m) | 10 | -20,5 | -21,9 | -22,4 | -22,9 | -23,3 | -23,6 | -23,9 | -24,1 |
| | 20 | -19,7 | -20,5 | -21,1 | -21,9 | -22,1 | -22,4 | -22,7 | -22,9 |
| | 30 | -18,2 | -20,5 | -20,5 | -21,0 | -21,3 | -21,9 | -22,0 | -22,4 |
| | 40 | -18,2 | -19,7 | -20,2 | -20,5 | -21,2 | -21,1 | -21,6 | -21,9 |
| | 50 | -19,2 | -18,9 | -20,3 | -19,8 | -20,5 | -20,8 | -21,1 | -21,2 |
| | 60 | -18,2 | -18,2 | -19,7 | -20,5 | -19,1 | -20,5 | -20,8 | -21,0 |
| Koudwaterinjectie (5 °C) | Geïnjecteerd debiet Q (m^3/h) gedurende een half jaar | | | | | | | | |
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| Filterlengte injectieput: H (m) | 10 | 11,4 | 12,1 | 12,6 | 12,9 | 13,0 | 13,2 | 13,4 | 13,5 |
| | 20 | 10,6 | 11,4 | 12,1 | 12,1 | 12,4 | 12,6 | 12,7 | 12,9 |
| | 30 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,9 | 12,2 | 12,1 | 12,3 | 12,5 |
| | 40 | 9,1 | 10,6 | 11,1 | 11,4 | 11,5 | 12,1 | 12,1 | 12,1 |
| | 50 | 11,5 | 11,3 | 11,4 | 11,3 | 11,4 | 11,9 | 11,9 | 11,8 |
| | 60 | 9,1 | 11,4 | 10,6 | 11,4 | 11,8 | 11,4 | 11,7 | 11,9 |

Een voorbeeld van de resultaten aan de rand van de put in de tijd voor de twee situaties is weergegeven in figuur 2. Na een eenvoudige aanpassing van het analytische model zijn tevens berekeningen uitgevoerd om een ruimtelijk beeld te vormen van de invloed van de temperatuurverschillen op de stijghoogte. Een voorbeeld van de resultaten op één vast tijdstip ($t = 90$ dagen) langs de radiaal voor de twee situaties is weergegeven in figuur 3. In beide figuren is uitgegaan van een injectiedebiet Q van $50 m^3/h$ en een filterlengte H van 50 m.



Figuur 2: Stijghoogteverloop in de tijd op $r = r_0$ met een injectie $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ en een filterlengte $H = 50 \text{ m}$.



Figuur 3: Stijghoogteverloop langs de radiaal op $t = 90$ dagen bij injectie met $Q = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ en filterlengte $H = 50 \text{ m}$.

Hyperbolisch karakter toegepaste putformule

Opvallend aan de berekende resultaten is dat de procentuele beïnvloeding nauwelijks toeneemt naarmate het injectiedebiet groter wordt bij een constante filterlengte (zie tabel 2). Dit is te verklaren door het hyperbolische karakter van de toegepaste putformule (kegelvorming stijghoogteverloop met als centrum de injectieput), waardoor de grootste beïnvloeding plaatsvindt vlakbij de put. Na een half jaar injecteren met een gemiddeld debiet is voor alle doorgerekende situaties het gebied vlakbij de put thermisch beïnvloed waardoor het overgrote deel van de maximale procentuele beïnvloeding reeds behaald is.

Het analytische model kan eenvoudig omschreven worden naar een situatie van onttrekking in plaats van injectie. Wanneer een onttrekking wordt gesimuleerd, wordt er een omgekeerde beïnvloeding waargenomen. De berekeningen laten zien dat de sterkste stijghoogtebeïnvloeding in het geval van injectie plaatsvindt aan het begin van de injectieperiode, en in het geval van onttrekking aan het eind van de onttrekkingperiode. Dit is wederom het gevolg van het hyperbolische karakter van de toegepaste putformule.

Praktijkwaarde

Het analytisch model laat zien dat de thermische beïnvloeding op het stijghoogteverloop in de tijd aanwezig is. De berekende procentuele beïnvloeding geeft een indicatie van de fout die gemaakt wordt door het verwaarlozen van de temperatuursafhankelijkheid van de viscositeit bij hydrologische effectenberekeningen van EO-systemen. De absolute beïnvloeding aan het eind van de injectieperiode (grootste procentuele beïnvloeding) is zodanig groot dat het voor de hydrologische effecten bij een maximaal debiet een duidelijk waarneembaar verschil oplevert.

De gepresenteerde procentuele beïnvloedingscijfers kunnen in de praktijk gehanteerd worden als handige vuistregel. De aanname van een volkomen putsituatie lijkt reëel omdat verwacht wordt dat de *procentuele* thermische invloed op de hydrologische effecten van een onvolkomen situatie naar verwachting even groot zal zijn als bij een volkomen putsituatie. Door de onvolkomenheid zal enerzijds een grotere thermische beïnvloeding optreden (namelijk ook onder de put is er sprake van een temperatuurverandering) en anderzijds zal het benodigde drukverschil bij gelijkblijvend debiet toenemen. Aangenomen wordt dat deze effecten elkaar in grote mate opheffen (Peeters, 2001).

Eventueel optredende energieverliezen naar onder- en bovenliggende lagen of het hantieren van een andere intrinsieke doorlatendheid, porositeit of retardatiefactor zullen naar verwachting niet van grote invloed zijn op de gepresenteerde procentuele beïnvloedingscijfers die gelden bij injectie, ook al zijn deze parameters medeverantwoordelijk voor de ruimtelijke temperatuurvariatie. Dit komt omdat de beïnvloedingscijfers (afgeleid voor de situatie na een halfjaar injecteren) met name afhangen van de thermische situatie vlakbij de put in verband met het hyperbolische karakter van de toegepaste putformule. Er kan aangenomen worden dat vlakbij de put de temperatuur na een halfjaar injecteren reeds is beïnvloed en het overgrote deel van de maximale procentuele beïnvloeding dan al behaald is.

Slot

Met een analytische benadering is het goed mogelijk gebleken om de invloed van een temperatuursafhankelijke doorlatendheid op het stijghoogteverloop te kwantificeren in het invloedsgebied van een EO-systeem. Samenvattend wordt hydrologen die in de praktijk werken aan studies voor energie opslag systemen het volgende geadviseerd:

- Hydrologische effectenstudies: temperatuurveranderingen niet meenemen in berekeningen; deze beïnvloeden niet significant de berekende stijghoogten.
- Thermische effectenstudies: temperatuurveranderingen wel meenemen in berekeningen wanneer een duidelijk 3D beeld van de ruimtelijke variatie van de temperatuur gewenst is (bijvoorbeeld bij relatieve korte filters in een dik watervoerend pakket of bij berekeningen om het thermisch rendement van het systeem te voorspellen). De berekeningen kunnen dan uitgevoerd worden met behulp van de modelleercode HST3D. Zie ook het artikel over simulatie van gekoppelde grondwaterstroming en warmtetransport in Stromingen 4, nummer 1 (Bakema, Jellema en Willemsen, 1998).
- Ontwerpstudies (haalbaarheid, voorontwerp, definitief ontwerp): gepresenteerde percentages gebruiken als vuistregel: gehanteerde maximale drukverschillen, berekend in de hydrologische effectenstudie, aanpassen met behulp van de beïnvloedingspercentages.

Lijst van symbolen

| | | | |
|------------|---|--------------------------------------------|-----------------------|
| κ | = | intrinsieke doorlatendheid | [m ²] |
| λ | = | warmtegeleidingscoëfficiënt | [J/ms°C] |
| μ | = | dynamische viscositeit | [Kg/ms] |
| ρ | = | dichtheid of soortelijke massa | [Kg/m ³] |
| c | = | soortelijke warmte | [J/Kg°C] |
| C | = | warmtecapaciteit (= ρc) | [J/m ³ °C] |
| f_a | = | warmteflux ten gevolge van advectie | [J/m ² °C] |
| f_c | = | warmteflux ten gevolge van conductie | [J/m ² °C] |
| f | = | vloeibare fase (grondwater) | [-] |
| g | = | zwaartekrachtsversnelling | [m/s ²] |
| h | = | stijghoogte | [m] |
| H | = | filterlengte | [m] |
| k | = | doorlatendheid | [m/s] |
| m | = | poreuze medium (grond- + grondwater) | [-] |
| n_{eff} | = | effectieve porositeit | [-] |
| Q | = | debiet | [m ³ /h] |
| r | = | straal in het analytische model | [m] |
| r_0 | = | straal van de put | [m] |
| r_{eind} | = | straal van het totale modelgebied | [m] |
| $r_i(t)$ | = | injectiefront op tijdstip t | [m] |
| $r_w(t)$ | = | thermisch front op tijdstip t | [m] |
| R_{th} | = | thermische retardatiefactor | [-] |
| R^+ | = | deelgebied tussen $r_{w(t)}$ en r_{eind} | [-] |
| R^- | = | deelgebied tussen r_0 en $r_{w(t)}$ | [-] |

| | | | |
|-----------|---|-------------------------------|-------|
| s | = | vaste fase (grond) | [-] |
| t | = | tijd | [s] |
| T | = | temperatuur | [°C] |
| v_{eff} | = | effectieve grondwatersnelheid | [m/s] |

Literatuur

- Bakema, G., I. Jellema en G. Willemsen (1998)** Berekening van door dichtheidsstroming beïnvloed stof- en of warmtetransport met HST2D en HST3D; in: *Stromingen*, jrg 4, nr 1, pag 35-44.
- Green, D.W., J.O. Maloney en R.H. Perry (1998)** Perry's chemical engineers' handbook – 7th edition; McGraw-Hill, Singapore.
- Marsily, C. de (1981)** Quantitative Hydrogeology, groundwater hydrology for engineers; Masson, Parijs.
- Nield, D.A. en A. Bejan (1999)** Convection in porous media, 2nd edition; Springer-Verlag, New York.
- Peeters, M.J.J. (2001)** Studie naar de rol van de temperatuur in de ondergrond bij warmte koude opslag systemen; afstudeerrapport Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft.
- Uffink, G.J.M. (1981)** De afvlakking van temperatuursvariaties in het grondwater door warmteuitwisseling tussen het watervoerende pakket en de boven- en ondergelegen pakketten; mededeling 81-4, Rijksinstituut voor drinkwatervoorziening, Voorburg.