
Open WKO-systemen A: Inleiding

Bram Bot¹ en Murette Zwamborn²

Aan de hand van een systematische serie modelberekeningen zijn vuistregels afgeleid voor het gedrag van een enkele doublet en van uitgestrekte patronen van bronnen voor open WKO-systemen. Binnen ruime grenzen blijkt het thermische en hydraulische gedrag weinig afhankelijk van de dikte van de laag waarin wordt opgeslagen. Dat geeft de plezierige mogelijkheid het gedrag per m¹ dikte te beschrijven. De regel dat de bronafstand van een enkel doublet tenminste 3 keer de thermische straal dient te bedragen is wel erg voorzichtig. Vooral bij grotere systemen (thermische straal groter dan ongeveer 40 m) voldoet ook een bronafstand van 2 keer de thermische straal nog goed in een homogene aquifer. Handige vuistregels voor bronafstand, benodigde boordiameter en de resulterende afpompings bij de bronnen zijn opgesteld als functie van de bodemopbouw. Ook zijn globale regels gepresenteerd voor de maximaal haalbare capaciteit van een enkel doublet gegeven de bodemopbouw en beperkingen ten aanzien van boordiameter en afpompings. Voor een uitgestrekt patroon van bronnen (schaakbord of rijen) blijkt de maximale thermische capaciteit per hectare vrijwel onafhankelijk van de bodemopbouw (maar natuurlijk wel van de beschikbare dikte, zie hierboven). Bij een slecht doorlatend opslagpakket kan dit echter alleen worden behaald met zeer veel bronnen en dus tegen hoge kosten van bronnen en leidingwerk. Vooral bij een relatief hoge piekvraag (thermisch en daardoor hydraulisch) loopt het aantal bronnen en/of de boordiameter op.

Vanwege de omvang is het verhaal in 3 artikelen geknipt:

- A. Een algemene introductie met de bedoeling van de exercitie en met uitleg van de opzet.*
- B. Een verhandeling over het thermische gedrag van open WKO-systemen.*
- C. Een verhandeling over het hydraulische gedrag, gevolgd door onderzoeken naar optimale configuraties*

De afbeeldingen, tabellen en formules zijn in de 3 artikelen doorlopend genummerd. Het voorliggende artikel A is de algemene introductie.

Systematische serie modelberekeningen

De hydraulische en thermische processen van een open WKO-systeem zijn complex en onderling verweven, waardoor een analytische beschrijving van het gedrag alleen

¹ Grondwaterhydroloog te Rotterdam (brambot@xs4all.nl)

² KWA Bedrijfsadviseurs (mhz@kwa.nl)

voor de allereenvoudigste configuraties beschikbaar is. Het gedrag van WKO-systemen moet in de praktijk met integrale numerieke modellering worden onderzocht. Dat onderzoek heeft het karakter van een controle achteraf van een ontwerp dat tevoren met eenvoudige regels is opgesteld. Het arsenaal van ontwerpregels is naar de mening van de auteurs te beperkt en verdient aanvulling. Een verbeterd inzicht in het gedrag van WKO-systemen moet natuurlijk uit de resultaten van de numerieke modellen komen, maar omdat deze steeds voor andere specifieke situaties worden opgesteld, is een algemene les moeilijk te trekken.

Hier is de aanpak gekozen van integrale modellering van een systematisch opgezette serie WKO-configuraties. Daardoor wordt onderlinge vergelijking mogelijk en kunnen de resultaten in grafieken en nomogrammen worden weergegeven.

Verwarming en koeling voor hydrologen

Voor lezers die weinig bekend zijn met WKO-systemen volgt hier een zeer beknopte uitleg. De achtergrondtemperatuur van grondwater ligt in Nederland globaal tussen 10 en 13°C. Een open WKO-systeem bestaat steeds uit één of meer warme en één of meer koude bronnen. Uit de koude bron wordt 's zomers 'koud' grondwater onttrokken voor koelingsdoeleinden. Bij die koeling wordt het water opgewarmd en vervolgens in de warme bron geïnjecteerd. De temperatuur van het geïnjecteerd water verandert in de grond maar weinig door de isolatie van de omringende grond. Daarom kan het warme water in de warme bron 's winters worden opgepompt voor verwarmingsdoeleinden en (daardoor afgekoeld) weer in de koude bron worden geïnjecteerd. Het grondwater wordt dus heen en weer gepompt tussen de warme en koude bel rond de desbetreffende bronnen. Die belen komen pas na een aanloopperiode van enkele jaren goed tot stand. Heel in het kort komt het er op neer dat een warmteoverschot in de zomer wordt gebruikt in de winter, en andersom.

De temperatuur van het opgeslagen water verschilt over het algemeen maar weinig van de achtergrondtemperatuur - van de warme bel globaal 2 tot 4°C hoger en van de koude 2 tot 4°C lager, maar vanwege de enorme warmtecapaciteit van water gaat het toch om een interessante hoeveelheid energie. De toegestane temperatuur is beperkt in verband met geochemische overwegingen en onvoldoende bekende microbiologische consequenties. De mogelijkheden van (aanmerkelijk) hogere opslagtemperaturen worden thans onderzocht.

Grondwater, van achtergrondtemperatuur of uit de koude bel, kan direct voor gebouwkoeling worden gebruikt. Bij gebouwverwarming ligt dat anders, omdat de benodigde temperatuur veel hoger ligt dan de temperatuur in de warme bel. Door toepassing van een warmtepomp kan de temperatuur worden verhoogd tot 40 à 50°C, wat voldoende is voor verwarming met grote elementen zoals bij vloer- of wandverwarming (maar onvoldoende voor conventionele radiatoren). Bovendien wordt de energie waarmee de warmtepomp wordt aangedreven ook in warmte omgezet, waardoor de verwarmings-energie globaal 4/3 keer de energie uit het opgepompte water bedraagt.

Vaak (maar zeker niet altijd) wordt een WKO-systeem gebruikt als basisvoorziening voor

verwarming, met een groot aantal draaiuren op een matig debiet, waarbij in koudere perioden wordt bijgestookt met conventionele verwarming. Het systeem levert in de zomer vaak de enige mogelijkheid voor koeling, met weinig draaiuren op een hoog debiet in warmere perioden.

De verhouding van totale koudelevering gedeeld door de ingebrachte elektrische energie is bijzonder hoog (20 à 40) door de directe koeling. Voor verwarming ligt de verhouding veel lager (3 à 3,8) vanwege de tussenschakeling van de warmtepomp, maar is desondanks interessant.

De vergunningverlener vraagt over het algemeen om een evenwichtige energiebalans van het ondergrondse systeem: over een langere periode evenveel onttrokken als ingebrachte warmte. De laatste tijd wordt een koudeoverschot toegestaan.

Onttrekkingregime

Wanneer de energiebalans in evenwicht moet zijn en de warme en koude injectie-temperatuur symmetrisch zijn t.o.v. de achtergrondtemperatuur, moeten de hoeveelheden geïnjecteerd water in de zomer en in de winter aan elkaar gelijk zijn. Voor de berekeningen is hier aangenomen dat dat steeds het geval is. Het geïnjecteerde water kan echter gelijkmatig over het seizoen in de grond worden gebracht, of juist met korte intensieve injectieperiodes. Voor het thermisch gedrag maakt dat niet veel verschil, maar voor de belasting van de bronnen en de maximale veranderingen in stijghoogte is het pompregime juist cruciaal.

Het pompregime wordt in de artikelen gekarakteriseerd door het aantal vollast-uren u_{eq} . Het is het aantal uren in een seizoen waarmee de pomp op volle capaciteit water onttrekt en injecteert. Vollast-dagen zou hier een logischer parameter zijn, maar het gebruik van vollast-uren is standaard in WKO-kringen. De hoeveelheid verpompt water in een seizoen W bedraagt dus:

$$W = \frac{Qu_{eq}}{24} \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

Waarbij:

W : Hoeveelheid onttrokken en geïnjecteerd water per seizoen [m³].

Q : Capaciteit van de pomp [m³/dag].

u_{eq} : Het aantal vollast-uren per seizoen [uur].

Voor de thermische berekeningen is als pompregime een constant debiet gedurende 3 maanden in zomer en winter aangehouden ($u_{eq} = 2.190$ uur), gescheiden door periodes van stilstand van ook 3 maanden.

Thermisch rendement

De resultaten van de berekeningen zullen in eerste instantie worden uitgedrukt in de vorm van het 'thermische bronrendement' η dat hier als volgt is gedefinieerd:

$$\eta = \frac{E_{\text{uit}}}{E_{\text{in}}} \quad (2)$$

Waarbij:

E_{in} : Geïnjecteerde thermische energie in een bron t.o.v. de achtergrondtemperatuur, in kWh/seizoen.

E_{ui} : Onttrokken thermische energie uit dezelfde bron in het volgende onttrekkingseizoen, nadat het systeem tot evenwicht is gekomen en opvolgende jaren een identiek temperatuurverloop te zien geven; in de praktijk blijkt dat na ongeveer 4 tot 10 jaar het geval te zijn.

In het geval van een grote 'bel' geïnjecteerde water, een grote bronafstand en geen achtergrondstroming zal het thermische rendement groot zijn, bijvoorbeeld 80%. Bij een zeer hoge achtergrondstroming zal het rendement tot nul naderen, nooit helemaal nul vanwege dispersie.

Wanneer het warmtefront uit bijvoorbeeld de warme bron de koude bron bereikt, is sprake van thermische vervuiling. Dat kan gebeuren wanneer de bronnen te dicht bij elkaar staan. In extreme gevallen is het mogelijk dat het rendement negatief wordt. Eenvoudig is dat voor te stellen met de situatie van bronnen vlak naast elkaar, waarbij het geïnjecteerde water grotendeels direct weer in de andere bron wordt onttrokken.

Met het thermische bronrendement zoals hierboven gedefinieerd wordt niet direct de opbrengst van het WKO-systeem aangegeven. Daarvoor wordt hier de 'bruikbare energie' E_b geïntroduceerd, bijvoorbeeld voor de winter:

$$E_b = E_{\text{warm,uit}} - E_{\text{koud,in}} \quad [\text{kWh/seizoen}] \quad (3)$$

Waarbij:

$E_{\text{warm,uit}}$: Energie die uit de warme bel wordt onttrokken [kWh/seizoen].

E_b is de energiehoeveelheid die door de 2 bronnen wordt geleverd bij het onttrekken uit de ene en weer injecteren in de andere met de opgegeven injectietemperatuur. Bij gelijke injectiehoeveelheden in zomer en winter, gelijke bronrendementen en symmetrische injectietemperaturen ten opzichte van de achtergrondtemperatuur, zal de bruikbare energie per seizoen zijn:

$$E_b = E_{\text{in}} (1 + \eta) \quad [\text{kWh/seizoen}] \quad (4)$$

Het thermisch rendement is niet de enige factor die de performance van het systeem bepaalt. Het verpompte debiet is minstens zo belangrijk.

Temperatuur van het onttrokken water

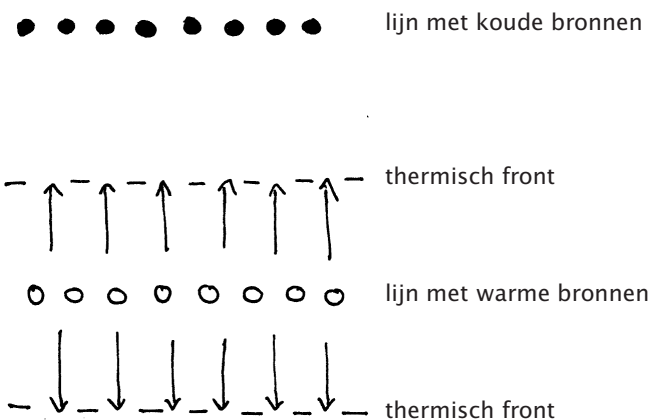
Behalve het rendement en de verpompte hoeveelheid water is ook het verloop van de temperatuur van het onttrokken water van belang. Met de opslag wordt beoogd dat de warmte maximaal wordt geconserveerd en dat dus de onttrekkingtemperatuur nagenoeg gelijk is aan de injectietemperatuur. In de praktijk wordt dat door allerlei verliezen niet

gehaald. De bovengrondse installatie blijkt nog steeds goed te functioneren bij een onttrekkingstemperatuur die aan het einde van het seizoen (laatste terugwintemperatuur) daalt tot nabij 11 à 12°C voor koeling of tot nabij 12°C voor verwarming via een warmtepomp. Een verdere daling (resp. verhoging voor koelen), bijvoorbeeld door aanmerkelijke thermische kortsluiting, veroorzaakt een lager rendement van de bovengrondse installatie. Vanwege onzekerheid in de opbouw en eigenschappen van de ondergrond moet bij het ontwerp enige veiligheid in acht worden genomen. In artikel B wordt daar op teruggekomen.

De injectietemperatuur wordt hier steeds uitgedrukt als T_i in °C, die is gedefinieerd als de injectietemperatuur *ten opzichte van de achtergrondtemperatuur*. T_i wordt steeds als positief getal gebruikt en is gelijk voor warme en koude injectie vanwege de genoemde symmetrie. De laatste (in het onttrekkingseizoen) temperatuur van het teruggewonnen water wordt beschreven als T_{min} , die wordt uitgedrukt als fractie van T_i . Als de laatste terugwintemperatuur terugvalt tot de achtergrondtemperatuur geldt $T_{min} = 0$. T_{min} kan negatief zijn in het geval van ernstige thermische kortsluiting; de terugwintemperatuur uit bijvoorbeeld de warm bel valt dan terug tot beneden de achtergrondtemperatuur.

Aftasting thermisch gedrag

Het opbouwen van integrale numerieke 3D-modellen is tijdrovend wanneer de afmetingen van het model en bronafstanden verschillen. In eerste instantie is het thermisch gedrag van open WKO-systemen daarom afgetast met hulp van een 1D-benadering met een spreadsheet berekening. Doel van deze berekeningen was nagaan in hoeverre de aquiferdikte en de dikte van de afdekkende laag invloed hebben op het thermisch gedrag - naast een aftasting van het thermische gedrag in het algemeen. De berekeningen zijn gemaakt voor een grondwaterstroom tussen bronnenrijen, waarbij de bronnen dermate dicht bij elkaar staan dat een vlak vertikaal water- en warmtefront ontstaat bij injectie en onttrekking in afwisselende rijen, zie afbeelding 1.

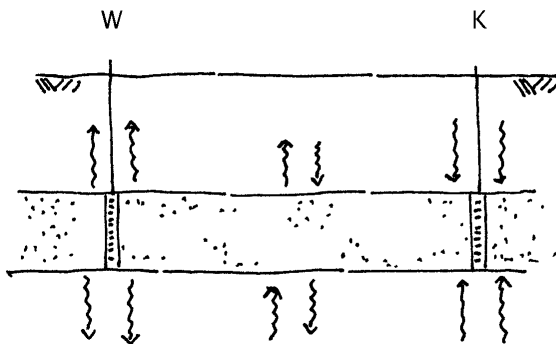


Afbeelding 1: Vlak thermisch front bij korte bronafstand.

Bij de thermische berekening in de aquifer is dispersie, warmte­diffusie door geleiding en warmte-uitwisseling tussen korrels en poriënwater meegenomen. Voor het warmte-

verlies naar onder- en bovenliggende lagen is onderscheid gemaakt naar de situatie bij bronnenrijen en tussen de rijen:

1. Bij de bronnenrijen zal de temperatuur redelijk constant zijn, dat is immers juist het doel van de thermische opslag. Het warmteverlies zal dus een vrijwel permanent karakter hebben en is eenvoudig te berekenen. Het warmteverlies door geleiding in de aanliggende lagen blijkt bovendien gering. De afname van het thermisch bronrendement bij een dikte van de afdekkende laag van 15 m ten opzichte van een dikte van 50 m bedraagt hooguit 4%. Voor de verdere berekeningen is de afstand tot een constante temperatuur op 15 m gesteld, zowel naar onderen als naar boven. Het warmteverlies ter plaatse van de bronnenrijen zal naar maaiveld afvloeien.
2. Tussen de bronnen zal het temperatuurverloop een periodiek verloop hebben met een periode van 1 jaar. Daarvoor is een analytische oplossing bekend, mits het verloop als sinusvormig wordt aangenomen. Het blijkt dat het warmteverlies evenredig is met de temperatuur in de aquifer op $7/8$ periode tevoren, dus op 319 dagen eerder. Ook deze relatie is eenvoudig in de berekening te brengen. Het warmteverlies tussen de bronnenrijen wordt tijdelijk opgeslagen direct boven en onder de aquifer. In het volgende seizoen stroomt de energie weer terug en frustreert de warmteopslag, zie afbeelding 2. Dit 'interne' verlies, dat niet leidt tot afstroming naar de omgeving, zal betrekkelijk gering zijn wanneer de warme en koude bel ver uit elkaar liggen. Het zal echter aanmerkelijk zijn wanneer de belen tegen elkaar aan liggen of elkaar afwisselend verdringen.



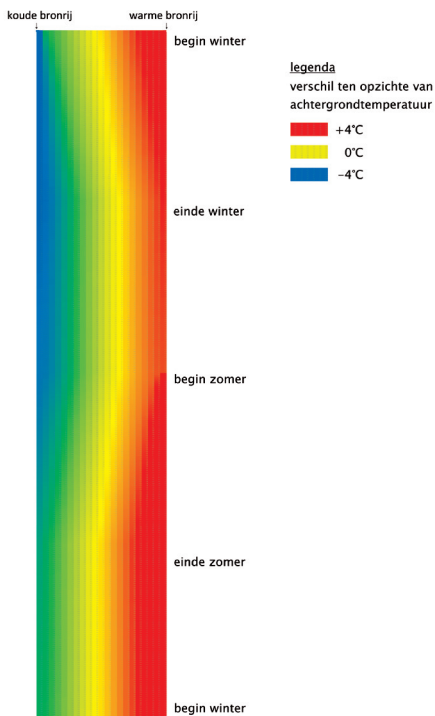
Afbeelding 2: Warmteverlies bij en tussen de bronnen.

Met de 1D-berekening is alleen gekeken naar thermisch gedrag. Net als elders in deze artikelen zijn volkomen bronnen in een aquifer beschouwd. De doorlaatfactor van het bodemmateriaal is niet van belang voor het thermische gedrag, maar vanwege het heen en weer verplaatsen van grondwater zal de doorlaatfactor voor een open WKO-systeem meestal boven 15 m/dag zijn. Het gaat dus om niet te fijn, zandig materiaal dat vrijwel constante thermische parameters blijkt te hebben. De thermische parameters voor zeer fijn zand tot zandige klei verschillen maar weinig van de waarden van het aquifer-materiaal, zodat voor de onder- en bovenliggende lagen dezelfde parameters zijn aangehouden. Voor de berekeningen is aangenomen:

1. De onder- en bovenliggende lagen zijn hydraulisch ondoorlatend, maar wel warmtegeleidend.
2. De effectieve porositeit van alle lagen bedraagt 0,322. Deze waarde lijkt een vreemd precieze aanname, maar komt voort uit de waarden voor de soortelijke warmte van

korrelmateriaal en van de grond/water-matrix van de aquifer en aanliggende lagen van resp. 2,2 en 2,84 MJ/m³.K (zie hieronder), die zo goed mogelijk in overeenstemming zijn gebracht met waarden uit de literatuur, zie Brandes e.a. (1977), Tysma e.a. (1993), NVOE (2006) en Bodifée (1983).

3. De warmtecapaciteit van alle korrelmateriaal bedraagt 2,2 MJ/m³.K. Het gaat om alleen het vaste materiaal van de korrels, niet om het korrelskelet (korrels inclusief lege poriën). Daarover bestaat nogal wat verwarring in de literatuur en in handleidingen van modelcodes.
4. De soortelijke warmte van alle grond (korrelskelet plus poriënwater) bedraagt dan dus 2,84 MJ/m³.K.
5. Door bovengenoemde waarden van porositeit en soortelijke warmte blijft een vlak warmtefront met een factor 0,475 achter bij een grondwaterverplaatsing. Dit getal komt overeen met de verhouding van de warmtecapaciteit van het water in de poriën en die van de volledige aquifer (korrelskelet plus poriënwater).
6. Voor het thermisch geleidingsvermogen van alle grond is een waarde van 2,23 W/m.K, aangehouden wat overeen komt met 192.000 J/dag.m.K, zie Tysma e.a. (1993), NVOE (2006) en Bodifée (1983).
7. Een longitudinale dispersielengte van 2 m; vanwege het vlakke front speelt de transversale dispersielengte niet mee.
8. De achtergrondtemperatuur is gelijk aan 12°C, evenals de constant veronderstelde temperatuur aan maaiveld.
9. De injectietemperatuur in zomer resp. winter zijn op 16 resp. 8°C gesteld.
10. De berekeningen zijn over 20 jaar voortgezet, waarbij steeds de gemiddelde thermische resultaten over het 19de en het 20ste jaar zijn gebruikt.



Afbeelding 3: Spreadsheet 1D-berekening, met temperatuurweergave in kleur.

In het spreadsheet zijn de verschillende thermische processen gemodelleerd met een differentievergelijking. Als discretisering in de lengterichting (tussen de bronnenrijen) is 2,5 m aangehouden, voor de tijd 1 dag. In de cellen van het spreadsheet is de temperatuur op de knooppunten te zien, waarbij de plaats tussen de bronnenrijen in de kolommen wordt weergegeven, en het moment in de rijen. In afbeelding 3 is een deel van het spreadsheet getoond, waarbij de kleur van de celinhoud wordt bepaald door de waarde van de celinhoud (=temperatuur). Het heen en weer trekkend thermisch front en de tussenliggende pauzes zijn in de afbeelding duidelijk te zien.

Het rendement van de 1-D berekeningen wordt hier alleen gebruikt om de gevoeligheid van het rendement voor de dikte van de aquifer en de afdekkende laag te onderzoeken. De resultaten van berekeningen bij verschillende aquiferdikte en dikte van de afdekkende laag zijn in tabel 4 gepresenteerd. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een afstand tussen de rijen van 50 m en met een hoeveelheid geïnjecteerd water die overeenkomt met een thermisch front dat tot 40% van de afstand tussen de rijen is voortgeschreden. De absolute resultaten geven een soortgelijk beeld als die van de 3D-berekeningen, zie daarvoor artikel B.

De conclusie is dat het rendement hooguit 6% afwijkt van het rendement bij een aquiferdikte van 25 m en een afdekking van 15 m als:

- De aquiferdikte tenminste 15 m bedraagt.
- De dikte van de afdekking tenminste 15 m bedraagt.

Aquiferdikte D [m]	15	20	25	40	100
Dikte afdekking H [m]					
10	0,729	0,763	0,784	0,818	0,850
15	0,759	0,785	0,802	0,827	0,852
20	0,778	0,799	0,813	0,838	0,853
30	0,800	0,815	0,825	0,840	0,855
50	0,820	0,831	0,837	0,847	0,857

Tabel 4: Rendement bij verschillende aquiferdikte en dikte van de afdekkende laag.

Uiteraard zullen een dikkere aquifer en een dikkere afdekkende laag een hoger thermisch rendement opleveren. De winst is echter maar gering en valt binnen de nauwkeurigheid van de aannamen en berekeningen. Bovendien zal later blijken dat het thermisch rendement niet een sterk onderscheidende parameter is tussen alternatieve configuraties.

Om die reden mogen de resultaten van berekeningen met een aquiferdikte van 25 m en een afdekking van 15 m worden gebruikt per strekkende meter aquiferdikte, mits aan de volgende voorwaarden is voldaan:

1. Dikte van de aquifer tenminste 15 m.
2. Afdekkende pakket tenminste 15 m dik.

De invloed van temperatuurverschillen op de dichtheid zijn hier verwaarloosd, zodat de thermische verliezen recht evenredig zijn met de injectietemperaturen ten opzichte van de achtergrondtemperatuur. De rendementen kunnen dus worden uitgedrukt per

streckende meter aquiferdikte en per °C injectietemperatuur T_i . Daarmee zijn de 3-D thermische berekeningen opgezet , waarover artikel B verder gaat.

Literatuur

Brandes, J. en Uffink, G.J.M. (1977) De berekeningen van de temperatuursverhoging in het grondwater ten gevolge van een koelwaterinjectie; R.I.D. mededeling 77-6, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening

NVOE (2006) NVOE-richtlijnen Ondergrondse Energieopslag; NVOE/SenterNovem

Tysma, S., Herwijnen, F. van en Leijendeckers, P.H.H. (1993) Polytechnisch Zakboekje 45ste druk; PBNA

Bodifée, G. (1983) Natuurwetenschappelijk Zakboekje 1983-1984; Kluwer/Bohn, Scheltema & Holkema

