
Open WKO-systemen C: Hydraulisch gedrag en optimale configuraties

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 C gaat over het hydraulisch gedrag en over optimale configuraties. De lezer wordt bekend verondersteld met de inhoud van artikelen A en B.

¹ Grondwaterhydroloog te Rotterdam (brambot@xs4all.nl)

² KWA Bedrijfsadviseurs (mhz@kwa.nl)

Optimale configuraties

In artikel B zijn de grenzen aangegeven waarbinnen een open WKO-systeem nog een aanvaardbare terugwinttemperatuur geeft:

- Voor een enkel doublet moet de bronafstand L niet kleiner dan $2 \text{ à } 3 * r_{th}$ worden gekozen.
- Voor een uitgestrekt patroon is een voorlopige grens aangehouden van een vullingsgraad van 0,4.

Voor het uitgestrekte patroon is het waarschijnlijk dat deze grenzen wat scherper kunnen worden gekozen, maar niet zonder verder onderzoek, bij voorkeur met hulp van meetgegevens uit het veld.

Hier zijn de genoemde grenzen aangehouden om te komen tot vuistregels voor een globaal ontwerp. Het beginpunt van het ontwerp is steeds:

- Een gewenste hoeveelheid bruikbare energie, voor een enkel doublet.
- De maximale bruikbare energie per hectare, voor een uitgestrekt patroon.

De vuistregels zijn opgesteld met het doel alternatieve configuraties in de vorm van globale ontwerpen met elkaar te vergelijken. In de vuistregels zijn thermische en hydraulische overwegingen gecombineerd. De relaties zijn vereenvoudigd en waar mogelijk gelinealiseerd, om de vuistregels redelijk eenvoudig te houden. Om die reden zijn ze niet universeel bruikbaar, maar gelden onder de voorwaarden die achterin dit artikel, bij de conclusies, zijn vermeld.

Basisformules

Bronnen hebben een beperkte capaciteit en het toelaatbare debiet is verschillend voor onttrekking en injectie. Omdat de bronnen van een WKO-systeem afwisselend voor onttrekking en injectie worden gebruikt, is de laagste waarde maatgevend: die voor injectie. Globaal geldt voor een volkomen bron, voor een injectieduur van 2000 uur/jaar en bij een doorlaatfactor tussen 20 en 40 m/dag, zoals is af te leiden uit NVOE (2006):

$$Q \approx 7kDr_{min} \quad (12)$$

Waarbij:

Q : Het pompdebiet [m^3/dag].

k : Doorlaatfactor van de aquifer [m/dag].

D : Dikte van de aquifer = filterlengte [m].

r_{min} : De minimaal benodigde straal van het boorgat van de bron voor het benodigde pompdebiet bij de gegeven doorlaatfactor van de aquifer [m].

Een injectieduur van 2000 uur is relatief hoog en voor lagere waarden zou een wat hoger debiet toelaatbaar zijn. Omdat de toelaatbare snelheid op de boorgatwand omgekeerd evenredig is met $\sqrt{u_{eq}}$ is de winst echter beperkt en hier verwaarloosd.

Het pompdebiet is hiermee dus gekoppeld aan de benodigde boorstraal. In de volgende formules wordt vaak de boorstraal r_{min} gebruikt, maar daarbij moet steeds in gedachten

worden gehouden dat deze in wezen een maat is voor het pompdebiet. Q is het pompdebiet van een volledig benutte bron met boorstraal r_{\min} .

De hoeveelheid geïnjecteerd water per seizoen W per m aquiferdikte D wordt dan, samen met (1):

$$\frac{W}{D} = 0,29ku_{\text{eq}}r_{\min}$$

Waarbij:

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

De geïnjecteerde hoeveelheid water per m^1 aquiferdikte bepaalt grotendeels het thermische gedrag van een open WKO-systeem. Het is gebruikelijk W/D te beschrijven met de thermische straal r_{th} . Het hydraulische gedrag van een bronnenpaar of bronnenpatroon wordt echter niet bepaald door de thermische straal, maar door het pompdebiet Q . Om die reden hebben de auteurs er voor gekozen het gedrag te beschrijven met hulp van de samengestelde parameter G^2 , die is gedefinieerd als:

$$G^2 = ku_{\text{eq}}r_{\min}^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (13)$$

G^2 komt overeen met W/D op een constante factor na:

$$\frac{W}{D} = 0,29G^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (14)$$

Uit de combinatie van (6) en (14) blijkt dat G op een factor na overeenkomt met de thermische straal:

$$r_{\text{th}} = 0,37G \text{ [m]} \quad \text{of} \quad r_{\text{th}}^2 = 0,137G^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (15)$$

Omdat een temperatuurverhoging van 1°C van 1 m^3 water overeenkomt met een energie van 1164 Watt, volgt voor de bruikbare energie van een bronnenpaar uit (4) en (14):

$$E_b = 1,164W(1+\eta)T_i = 0,34G^2(1+\eta)DT_i \text{ [kWh/seizoen]}$$

De bruikbare energie kan per $^\circ\text{C}$ injectietemperatuur T_i en per m^1 aquiferdikte als E_b^* worden uitgedrukt:

$$E_b^* = 0,34G^2(1+\eta) \text{ [kWh/seizoen.m. }^\circ\text{C]} \quad (16)$$

Waarbij:

W : De geïnjecteerde hoeveelheid water per seizoen [m^3 /seizoen].

T_i : De injectietemperatuur t.o.v de achtergrondtemperatuur, zowel warm als koud [$^\circ\text{C}$] (steeds is aangenomen dat de warme en koude injectietemperatuur symmetrisch zijn t.o.v. de achtergrondtemperatuur).

η : Het thermisch rendement van het bronnenpaar, zie (2) in artikel A.

Het grote voordeel van het gebruik van G^2 is gelegen in het feit dat W er mee wordt uitgedrukt als product van de variabelen die hem bepalen:

- u_{eq} als het aantal uren waarmee het pompdebiet wordt verpompt per seizoen.
- Het pompdebiet Q , dat hier echter is vertegenwoordigd door het product van k en r_{min} , zodat de invloed van deze beide afzonderlijk zichtbaar kan worden gemaakt.
- Door k en r_{min} wordt tevens het hydraulische gedrag van het bronnenpaar of patroon bepaald.

Hieronder zal blijken dat de bronafstand van een doublet resp. het stramien van een patroon wordt bepaald door G^2 . Situaties met eenzelfde G^2 leiden tot identieke patronen. Of andersom: bij gelijkblijvend patroon blijken de boorstraal (pompdebiet), het doorlaatvermogen en het aantal vollast-uren onderling uitwisselbaar te zijn. Het gebruik van G^2 zal aan de hand van formules en voorbeelden hierna verder verduidelijkt worden.

De vuistregels die hierna voor het enkele doublet en voor uitgestrekte patronen zullen worden afgeleid leiden niet direct tot een optimaal ontwerp, maar zijn eerder te gebruiken voor de aftasting van mogelijkheden. Veelbelovende alternatieven moeten verder worden uitgewerkt en geverifieerd met volledige (model)berekeningen.

Het enkele doublet

Thermische straal, bronafstand en bruikbare energie

In artikel B is een relatie voor de minimale bronafstand L van een doublet afgeleid:

$$L = 5,4 r_{th}^{0,75} \quad (9)$$

Tabel 10 uit artikel B met thermische straal en bronafstand kan nu met hulp van (15) en (16) worden uitgebreid tot tabel 20 met de bruikbare energie E_b^* .

r_{th} [m]	L [m]	L/r_{th} [1]	rendement η [1]	E_b^*	$E_b^* = 4,3 r_{th}^2$
10	30	3,0	0,47	364	430
15	41	2,7	0,63	909	968
20	51	2,6	0,68	1666	1720
25	60	2,4	0,72	2665	2688
30	69	2,3	0,75	3904	3870
35	78	2,2	0,76	5345	5268
40	86	2,1	0,76	6981	6880
45	94	2,1	0,76	8835	8708
50	102	2,0	0,76	10908	10750
55	109	2,0	0,76	13198	13008
60	116	1,9	0,76	15707	15480

Tabel 20: Aanbevolen bronafstand en bruikbare energie.

Wanneer $r_{th} > 20$ m blijkt voor E_b^* een goede benaderende relatie af te leiden, die ook in tabel 20 is aangegeven:

$$E_b^* \approx 4,3 r_{th}^2 \text{ kWh/seizoen} \quad (17)$$

De benadering komt neer op een vast thermisch rendement van 0,73. De mate van overeenkomst tussen deze benadering en de resultaten van (16) is in tabel 20 te zien.

Afpomping bij de bronnen

De afpomping s bij de bronnen bedraagt:

$$s = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \frac{L}{r} \quad (18)$$

Voor de afpomping bij de bronnen kan een globale relatie worden opgesteld, analoog aan de formule van Logan (1964) voor de afpomping van een enkele onttrekkingbron. Daarbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat het quotiënt L/r onder het \ln -teken staat. Wanneer L resp. r variëren tussen 50 en 150 m resp. 0,15 en 0,4 m zal $\ln L/r$ variëren tussen 4,8 en 6,9, met een gemiddelde waarde van 5,8. Een globale relatie voor de afpomping van een doublet wordt dan:

$$s = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \frac{L}{r} \approx 0,9 \frac{Q}{kD} \quad (19)$$

Als de bron optimaal benut wordt (ontwerpsnelheid = toelaatbare snelheid op de boorgatwand) ontstaat dan samen met de relatie $Q = 7kDr_{\min}$ globaal een vaste verhouding tussen de boorstraal en de afpomping:

$$\frac{s}{r_{\min}} \approx 6,5 \quad (20)$$

Deze relatie biedt de mogelijkheid in een oogwenk na te gaan of de afpomping geen onacceptabele waarde aanneemt bij een gekozen boorstraal. Verder in het ontwerp-proces moet de afpomping natuurlijk 'echt' worden berekend.

Vuistregels voor aftasting van globale ontwerpen

Als eerste de uitdrukking voor de thermische straal:

$$r_{\text{th}}^2 = 0,137G^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (15)$$

De minimale bronafstand L is af te leiden uit (9) en (15):

$$L = 2,5G^{0,75} \quad (21)$$

(maar L kan ook eenvoudig met tabel 20 worden geschat uit de thermische straal)

$$\text{Voor kleine systemen } (r_{\text{th}} < 10 \text{ m}) \text{ geldt } L/r_{\text{th}} = 3, \text{ of: } L = 1,1G \quad (22)$$

$$\text{en voor grote } (r_{\text{th}} > 50 \text{ m}) \text{ } L/r_{\text{th}} = 2, \text{ of: } L = 0,74G \quad (23)$$

Tenslotte volgt uit de combinatie van (15) en (17) de bruikbare energie:

$$E_b \approx 0,6G^2 \quad (24)$$

Configuraties met eenzelfde G^2 leiden tot eenzelfde bronafstand en bruikbare energie.

Vanuit een gewenste bruikbare energie kan de parameter G^2 worden vastgesteld, waardoor tevens de bronafstand is bepaald. Binnen G^2 zal de doorlaatfactor een vast gegeven zijn, maar voor het aantal vollast-uren en de boorstraal (= pompdebiet) zijn misschien nog alternatieven mogelijk. Eisen aan de maximale afpomping kunnen direct

in termen van een maximale boorstraal worden uitgedrukt. Wanneer de vereiste G^2 niet kan worden gehaald, is ook de gewenste bruikbare energie niet haalbaar.

Voorbeeld 1

Stel dat een aquifer beschikbaar is met $k = 25$ m/dag en $D = 17$ m. Bij een $T_i = 3^\circ\text{C}$ en aantal vollast-uren van 1500 uur wordt een bruikbare energie van 250 MWh/seizoen gevraagd. Dan is eenvoudig te berekenen:

$$E_b^* = \frac{250.000}{17 \cdot 3} = 4.902 \text{ [kWh/m.}^\circ\text{C.seizoen]}$$

$$\text{met (24): } G^2 = \frac{4.902}{0,6} = 8.170 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{met (15): } r_{th} = \sqrt{0,137 \cdot 8.170} = 33,5 \text{ [m]}$$

$$\text{met (21): } L = 2,5 \cdot 8.170^{0,375} = 73,3 \text{ [m]} \text{ (of met hulp van tabel 20: } L = 2,2 \cdot 33,5 = 73,7\text{)}$$

$$\text{met (13): } r_{min} = \frac{8.170}{1500 \cdot 25} = 0,22 \text{ [m]}$$

$$\text{met (12): } Q_{bron} = 7 \cdot 25 \cdot 17 \cdot 0,22 = 654 \text{ [m}^3\text{/dag]}$$

$$\text{met (20): } s \approx 6,5 \cdot 0,22 \approx 1,4 \text{ [m]}$$

Stel nu dat een afstand tussen de bronnen van 73,3 m om praktische redenen moeilijk te realiseren is, maar dat 60 m haalbaar is. Dan wordt:

$$\text{met (24): } G = \left(\frac{60}{2,5}\right)^{1,333} = 69,2 \text{ [m]} \text{ of } G^2 = 4.792 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{met (13): } r_{min} = \frac{4.792}{1500 \cdot 25} = 0,13 \text{ [m]}$$

$$\text{en met (12): } Q_{bron} = 7 \cdot 25 \cdot 17 \cdot 0,13 = 380 \text{ [m}^3\text{/dag]}$$

Bij de kleinere bronafstand moet de boorstraal (en dus het pompdebiet) aanmerkelijk kleiner worden gekozen om niet in de buurt van kortsluiting te geraken, namelijk 0,13 m. De afpomping bedraagt dan rond 0,85 m en de bruikbare energie valt terug tot 147 [MWh/seizoen].

Voorbeeld 2

Aanvankelijk dezelfde als in voorbeeld 1. De installatie moet echter bij het pompdebiet van 654 m³/dag (en een boorstraal van 0,22 m) een hogere piekbelasting aan kunnen, overeenkomend met het geringer aantal vollast-uren van 1000 uur. Dan geldt:

$$\text{met (13): } G^2 = 5.500 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{met (24): } E_b^* \approx 3.300 \text{ [kWh/m.}^\circ\text{C.seizoen]} \text{ of } 168 \text{ [MWh/seizoen]}$$

$$\text{met (21): } L = 2,5 \cdot 5.500^{0,375} = 63,2 \text{ [m]}$$

De afpomping bedraagt natuurlijk weer rond 1,4 m.

Vanwege het geringere aantal vollast-uren is de hoeveelheid geïnjecteerd water in een seizoen kleiner, waardoor de bronafstand kleiner kan blijven.

Stel dat bij die hogere piekbelasting toch een E_b^* van 4.902 gewenst is. Dan is weer een G^2 van 8.170 nodig, die bij een $u_{eq} = 1000$ uur alleen gehaald kan worden met een boorstraal van 0,33 m. De afstand tussen de bronnen is weer 73,3 m en de afpompingsafstand wordt ruim 2 m.

Conclusie

- Het thermisch rendement is niet de kritieke parameter bij het ontwerp, behalve voor kleine systemen ($r_{th} < 20$ m).
- De bruikbare energie is vrijwel recht evenredig met r_{th}^2 , mits $r_{th} > 20$ m.
- Bij gelijke bruikbare energie vraagt een klein aantal vollast-uren om een grote boorstraal (= groot pompdebiet), en andersom.
- Voor een gegeven boorstraal en bronafstand is de bruikbare energie omgekeerd evenredig met het aantal vollast-uren.
- De afpompingsafstand is maar weinig afhankelijk van de bronafstand, maar recht evenredig met boorstraal (= pompdebiet).

Bovenstaande conclusies zijn al langer bekend. De kwantificering met de vermelde formules onder voorwaarde van de gedane aannames is echter nieuw.

Uitgestrekt patroon bestaande uit 'dozen'

Voor het uitgestrekte patroon is het zinvol de waterhoeveelheden en bruikbare energie niet per doos te benoemen, maar per hectare. Een groter gebied bestaat immers uit een groot aantal identieke dozen. Een andere vorm voor formule (10) is:

$$W_{doos} = \frac{0,322\beta}{0,475} DBL = 0,678\beta DBL \quad [m^3/seizoen] \quad (25)$$

$$\text{en per hectare } W_{ha} = 6.779\beta D \quad [m^3/ha.seizoen] \quad (26)$$

De bruikbare energie is:

$$E_{bha}^* = 1,164 * \frac{W_{ha}}{D} (1 + \eta) = 7.890\beta (1 + \eta) \quad [kWh/ha.^{\circ}C.m.seizoen] \quad (27)$$

Omdat $W_{bron} = 4 * W_{doos}$ volgt uit (14) en (25):

$$\beta A = 0,108 G^2 \quad [m^2] \quad (28)$$

Waarbij:

W : De geïnjecteerde waterhoeveelheid $m^3/seizoen$.

D : Dikte van de aquifer = filterlengte [m].

L : Grootste afmeting van de doos [m].

B : Kleinste afmeting van de doos [m].

A : Het oppervlak van de 'doos' = $L * B$ [m^2].

β : Vullinggraad van de doos [1].

E_{bha}^* : De bruikbare energie [$kWh/ha.^{\circ}C.m.seizoen$].

G^2 : Samengestelde parameter = $k.u_{eq}.r_{min}$, zie ook (13).

Bij gelijke vullinggraad resulteert een gelijke G^2 steeds in hetzelfde oppervlak van de doos en dus in een gelijk aantal bronnen per hectare. Immers:

$$n = \frac{10.000}{2A} = \frac{46.300\beta}{G^2} \quad (29)$$

Waarbij:

n : Aantal bronnen (warme plus koude) per hectare [1].

In artikel B is uitgelegd dat bij uitgestrekte patronen voorlopig een maximale vullinggraad $\beta = 0,4$ wordt aangehouden. Voor de maximale vullinggraad van 0,4 geldt:

$$\text{met (26)} \quad W_{ha} = 2.700D \quad (30)$$

$$\text{met (28)} \quad A = 0,27G^2 \quad (31)$$

$$\text{met (27)} \quad E_{bha}^* = 3.156(1+\eta) \quad (32)$$

$$\text{met (29)} \quad n = \frac{18.500}{G^2} \quad (33)$$

Schaakbord met bronafstand L_s

Een schaakbordpatroon geeft de kleinste verlagingen bij de bronnen en daardoor de grootst mogelijke pompdebiet en boorstraal. In situaties met achtergrondstroming is het schaakbord minder gunstig. Alleen het geval van een enkele bron per schaakbordveld is hier bekeken, terwijl ook clusters van gelijksoortige bronnen per veld zouden kunnen worden geplaatst.

Thermisch rendement en bruikbare energie

Volgens (11) kan het thermisch rendement η van een doos worden uitgedrukt als:

$$\eta = L^{0,16}(0,42 - 0,18\beta), \text{ waarbij } \beta \text{ de vullinggraad van de doos is } (0,4 < \beta < 1,0).$$

De bruikbare energie is:

$$E_{bha}^* = 7.890\beta(1+\eta) \text{ [kWh/ha.}^\circ\text{C.m.seizoen]} \quad (27)$$

De lengte van de doos L is echter een ongebruikelijke maat voor het schaakbordpatroon; meestal wordt de bronafstand L_s gebruikt, zie ook afbeelding 13 in artikel B:

$$L_s = L\sqrt{2} \quad (34)$$

[m]

In tabel 21 is E_{bha}^* aangegeven (het sterretje betekent: per m^1 aquiferdikte en $^\circ\text{C } T_i$):

Het blijkt dat E_{bha}^* duidelijk afhankelijk is van de vullinggraad β , maar dat de bronafstand L_s niet heel veel uitmaakt. E_{bha}^* voor het schaakbordpatroon is niet uitgewerkt in de vorm van een benaderende formule: voor E_{bha}^* moet tabel 21 worden geraadpleegd.

	Vullinggraad							
	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
L_s								
50	5116	5697	6266	6822	7365	7896	8413	8918
60	5173	5760	6334	6895	7442	7977	8498	9006
70	5223	5815	6393	6958	7509	8047	8571	9082
80	5267	5863	6445	7014	7569	8109	8636	9150
90	5307	5907	6492	7064	7622	8166	8695	9210
100	5343	5946	6535	7110	7671	8217	8748	9266
120	5407	6016	6611	7191	7756	8307	8843	9364
140	5462	6077	6677	7262	7831	8386	8925	9449
160	5512	6131	6735	7324	7897	8455	8997	9524
180	5556	6180	6788	7380	7957	8518	9063	9592
200	5596	6224	6836	7431	8011	8575	9122	9654

Tabel 21: E_{bha}^* in kWh/m.^oC.ha.seizoen als functie van vullinggraad en L_s , voor schaaqbord.

Afpomping bij de bronnen

De afpomping bij de bronnen in een schaaqbordpatroon is gelijk aan die van een bron in het midden van een vierkant eiland met ribbe L_s :

$$s = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \frac{2,5^2 L_s}{\sqrt{128} r} = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \frac{0,5524 L_s}{r} \quad (35)$$

Ook voor de afpomping bij een vierkante doos kan een benaderende formule worden opgesteld, ook hier omdat L_s/r onder het ln-teken staat. Wanneer L_s resp. r kunnen variëren tussen 50 en 150 m resp. 0,15 en 0,4 m zal $\ln(0,5524 L_s/r)$ variëren tussen 4,2 en 6,3, met een gemiddelde waarde van 5,2. Een globale relatie voor de afpomping van een doublet wordt dan:

$$s = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \frac{0,5524 L_s}{r} \approx 0,8 \frac{Q}{kD} \quad (36)$$

Daarmee ontstaat globaal een relatie tussen de benodigde boorstraal en de afpomping bij de bronnen:

$$\frac{s}{r_{\min}} \approx 5,8 \quad (37)$$

Deze relatie biedt de mogelijkheid in een oogwenk na te gaan of de afpomping geen onacceptabele waarde aanneemt bij een gekozen bronstraal. Verder in het ontwerp-proces moet de afpomping natuurlijk 'echt' worden berekend.

Vuistregels voor aftasting van globale ontwerpen

Voor het schaaqbordpatroon met vullinggraad 0,4 geldt:

$$W_{ha} = 2.700D \quad (30) \quad L_s^2 = 0,54G^2 \quad (38) \quad n = \frac{18.500}{G^2} \quad (33)$$

Voorbeeld 1

Stel dat een aquifer beschikbaar is met $k = 25$ m/dag en $D = 20$ m. Bij een $T_i = 3^\circ\text{C}$, een bronstraal van 0,3 m en aantal vollast-uren van 1500 uur wordt berekend:

met (13): $G^2 = 11.250 \text{ [m}^2\text{]}$

met (38): $L_s = \sqrt{0,54 * 11.250} = 77,9 \text{ [m]}$

uit tabel 21: $E_{bha}^* \approx 5.250 \text{ [kWh/m.}^\circ\text{C.ha]}$ (overeenkomend met 315 MWh/ha)

met (12): $Q = 7kDr = 1.050 \text{ [m}^3\text{/dag]}$

met (33): $n = \frac{18.500}{11.250} = 1,64$ bronnen per hectare

met (37): $s \approx 1,7 \text{ [m]}$

De afpompings van 1,7 m is misschien nog ruim beneden de toelaatbare waarde van 5 m (als voorbeeld; de toelaatbare afpompings moet per geval worden vastgesteld). Een debiet overeenkomend met een boorstraal van 0,85 m zou dan ook nog mogen, maar dat is wel een uitzonderlijk grote constructie. Een diameter van 1000 mm is misschien nog te doen, dus $r = 0,5$ m. Dan wordt:

met (13): $G^2 = 18.750 \text{ [m}^2\text{]}$

waardoor met (38): $L_s = 100,6 \text{ [m]}$

uit tabel 21: $E_{bha}^* = 5.340 \text{ [kWh/m.}^\circ\text{C.ha]}$ (overeenkomend met 320 MWh/ha)

met (12): $Q = 1.750 \text{ [m}^3\text{/dag]}$

met (33): $n = 1,0$ bronnen per hectare

met (37): $s \approx 2,9 \text{ [m]}$

Als alternatief zou met die grotere bronnen van 1000 mm de bronafstand op 77,9 m gehouden kunnen worden (bij weer een G^2 van 11.250 en $n = 1,64$) maar met een grotere piekbelasting behorend bij $u_{eq} = 900$ uur.

Voorbeeld 2

Stel dat een aquifer beschikbaar is met $k = 35$ m/dag en $D = 25$ m. Geinjecteerd zal worden met $T_i = 3^\circ\text{C}$ en als bronafstand L_s is (om praktische redenen, laten we aannemen) gekozen voor 85 m. Dan geldt:

met (38): $G^2 = \frac{82^2}{0,54} = 12.452 \text{ [m}^2\text{]}$

Bij de gegeven doorlaatfactor blijken verschillende combinaties mogelijk, zoals in tabel 22.

De bruikbare energie is steeds gelijk aan 5.275 kWh/m. $^\circ\text{C}$.ha, evenals het aantal bronnen per hectare ($n = 1,5$, niet aangegeven in tabel 22).

Een groter pompdebiet (waarvoor een grotere boorstraal nodig is) gaat samen met een lager aantal vollast-uren om de vullinggraad op 0,4 te houden. Met grotere bronnen kan aan een hogere piekvrage worden voldaan. De afpompings neemt bij grotere bronnen toe.

Boorstraal r_{\min} [m]	Pompdebiet Q [m ³ /dag]	Afpomping s [m]	Vollast-uren u_{eq} [uur]	E_{bha}^* kWh/m. ^o C.ha
0,2	1.225	1,2	1.779	5.275
0,25	1.531	1,5	1.423	5.275
0,3	1.837	1,7	1.186	5.275
0,4	2.450	2,3	889	5.275

Tabel 22:

Ook met de relatie $nku_{eq} r = 18.500$ (39)

die voor alle 'doospatronen' geldig is, kunnen de consequenties van alternatieve configuraties handig worden afgetast.

Doos met slankheid $L/B = 4$

Het rijen-patroon van dozen met hogere slankheid van bijvoorbeeld 4 wordt aanbevolen voor situaties waarin de achtergrondstroming niet te verwaarlozen is. De afpomping bij de bronnen is wel wat hoger dan voor het schaakbordpatroon. De aanpak voor het rijen-patroon verloopt identiek aan die voor het schaakbordpatroon. De lengtemaat is echter de afstand tussen de rijen L. De afstand 2B tussen de bronnen in een rij is gelijk aan L/2.

Thermisch rendement en bruikbare energie

Uit (11) blijkt dat het thermisch rendement η van een doos kan worden uitgedrukt als:

$\eta = L^{0,16}(0,42 - 0,18\beta)$, waarbij β de vullinggraad van de doos is ($0,4 < \beta < 1,0$).

De bruikbare energie is weer: $E_{bha}^* = 7.890\beta(1+\eta)$ [kWh/ha.^oC.m.seizoen] (27)

	Vullinggraad							
	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
L								
50	5226	5818	6397	6962	7514	8052	8576	9087
60	5287	5885	6469	7039	7595	8137	8666	9180
70	5339	5942	6531	7106	7666	8212	8743	9261
80	5386	5994	6586	7165	7728	8278	8812	9332
90	5428	6039	6636	7218	7785	8337	8874	9396
100	5466	6081	6681	7266	7836	8391	8930	9455
120	5534	6155	6761	7352	7927	8486	9030	9558
140	5593	6220	6831	7426	8006	8569	9117	9648
160	5645	6277	6893	7492	8076	8643	9193	9728
180	5691	6328	6948	7552	8139	8709	9262	9800
200	5734	6375	6999	7606	8196	8769	9325	9865

Tabel 23: E_{bha}^* in kWh/m.^oC.ha.seizoen als functie van vullinggraad en L, voor $L/B = 4$.

In tabel 23 is E_{bha}^* aangegeven (het sterretje betekent: per m¹ aquiferdikte en °C T_i).

Het blijkt dat E_{bha}^* duidelijk afhankelijk is van de vullinggraad β , maar dat de rijenafstand L niet heel veel uitmaakt. E_{bha}^* voor het rijenpatroon is niet uitgewerkt in de vorm van een benaderende formule: voor E_{bha}^* moet tabel 23 worden geraadpleegd.

Afpomping bij de bronnen

Voor de afpomping bij de bronnen voor een niet-vierkante doos is bij de auteurs geen analytische formule bekend. Met behulp van numerieke modellen en uit de vergelijking met de formule voor een vierkante doos is de volgende benadering opgesteld:

$$s = \frac{Q}{4kD} \left(\frac{L}{2B} + \frac{2}{\pi} \ln \frac{B}{2,8r} \right) \text{ [m]} \quad (40)$$

Ook voor de afpomping bij een ($\alpha=4$)-doos kan een benaderende formule worden opgesteld, ook hier omdat $B/2,8 r$ onder het \ln -teken staat. Wanneer B resp. r kunnen variëren tussen 50 en 25 m resp. 0,15 en 0,4 m zal $\ln(B/2,8r)$ variëren tussen 3,1 en 4,8, met een gemiddelde waarde van 3,9. Daarmee ontstaat globaal een relatie tussen de benodigde boorstraal en de afpomping bij de bronnen:

$$\frac{s}{r_{\min}} \approx 7,8 \quad (41)$$

Vuistregels voor een globaal ontwerp

Voor het rijenpatroon met $L/B = 4$ en vullinggraad 0,4 geldt:

$$W_{ha} = 2.700D \quad (30) \quad L^2 = 1,08G^2 \quad (42) \quad \text{bronafs tan } d = 2B = 0,26G \quad (43) \quad n = \frac{18.500}{G^2} \quad (33)$$

Met deze formules kan op dezelfde manier worden gewerkt als met de formules voor het schaakbord; voorbeelden zijn daarom achterwege gelaten.

Conclusies

Ten aanzien van een 2D-schematisering

1. Het is goed mogelijk de resultaten van thermische berekeningen met volkomen bronnen weer te geven per m¹ aquiferdikte. Bij een aquiferdikte van tenminste 15 m en een afdekking van tenminste 15 m wijkt het berekende thermische rendement hooguit 6% af van de berekening bij een aquiferdikte van 25 m en een afdekking van 15 m.
2. De thermische resultaten zijn (binnen grenzen) recht evenredig met de injectietemperatuur, zodat de resultaten kunnen worden uitgedrukt per °C injectietemperatuur t.o.v. de achtergrondtemperatuur T_i .

Ten aanzien van ontwerpcriteria

1. Het thermisch rendement is een weinig onderscheidend criterium voor de performance van een WKO-systeem. Om te beginnen is de bruikbare energie evenredig met $(1+\text{rendement})$. De bruikbare energie is ook recht evenredig met de hoeveelheid geïnjecteerd water per seizoen W . Bijna altijd gaat een verhoging van W gepaard met

een daling van het rendement, maar per saldo is het resultaat in veel gevallen een hogere bruikbare energie.

2. De laatste (in het onttrekkingseizoen) terugwintemperatuur lijkt een belangrijk criterium omdat de bovengrondse installatie bij een te lage waarde niet goed meer functioneert. Verder onderzoek naar toelaatbare terugwintemperaturen en mogelijkheden om die te verruimen is aan te bevelen.

Ten aanzien van de relatie tussen pompdebiet, boorstraal, aantal vollast-uren en doorlaatfactor

1. Voor een doorlaatfactor tussen 20 en 40 m/dag kan een benaderende lineaire relatie tussen het pompdebiet en de benodigde boorstraal worden opgesteld: $Q \approx 7kDr_{\min}$, op basis van de toelaatbare snelheid op de boorgatwand. Dat maakt eenvoudige vuistregels mogelijk.
2. Het blijkt dat het gedrag van open WKO-systemen in grote lijnen wordt beschreven door het product van de doorlaatfactor van de aquifer, het aantal vollast-uren en het pompdebiet. Door het pompdebiet te vertegenwoordigen door de minimaal benodigde boorstraal van de bron (via de toelaatbare snelheid op de boorgatwand) ontstaat een bijzonder handige samengestelde parameter $G^2 = k \cdot u_{\text{eq}} \cdot r_{\min}$. Uit G^2 kunnen direct de afmetingen van een configuratie worden bepaald. Andersom voldoet eenzelfde configuratie zolang G^2 onveranderd blijft, waarmee alternatieven snel kunnen worden geëvalueerd.

Ten aanzien van de afpompings bij de bronnen

1. De afpompings bij de bronnen is relatief weinig afhankelijk van de bronafstand. Bij benadering kan daarom een lineair verband tussen het pompdebiet en de afpompings worden opgesteld, analoog aan de formule van Logan voor een enkele onttrekking.

Ten aanzien van het enkele doublet

1. De bestaande vuistregel van $L = 3 * r_{\text{th}}$ lijkt voor wat grotere systemen ($r_{\text{th}} > 20$ m) aan de voorzichtige kant. Zonder groot verlies aan bruikbare energie en laatste terugwintemperatuur blijkt een bronafstand van $2 * r_{\text{th}}$ nog bruikbaar voor grotere systemen ($r_{\text{th}} > 50$ m).
2. Voor grotere systemen ($r_{\text{th}} > 20$ m) bedraagt het thermisch rendement ongeveer 0,75.
3. De invloed van een achtergrondstroming loodrecht op de lijn door de bronnen op de bruikbare energie van een doublet is beperkt tot een afname van hooguit 10% als de jaarlijkse autonome verplaatsing beneden 30 m blijft en de thermische straal van het systeem niet beneden 25 m.

Ten aanzien van uitgestrekte patronen

1. Regelmatige patronen zijn voor de hand liggende configuraties wanneer de (theoretisch) maximale bruikbare energie per hectare wordt gezocht.
2. Voorlopig lijkt een maximale vullinggraad voor 'doospatronen' van 0,4 acceptabel. De daarbij horende terugwintemperatuur blijft dan met voldoende marge uit de buurt van de achtergrondtemperatuur. De vullinggraad van 0,4 is waarschijnlijk aan de

- voorzichtige kant. Met nader onderzoek zal misschien tot een hogere maximale vullinggraad kunnen worden geconcludeerd.
3. Het thermisch rendement bij een vullinggraad van 0,4 bedraagt ongeveer 0,75 voor patronen met $L > 75$ m.
 4. Met de maximale vullinggraad van 0,4 is een bruikbare energie van globaal 5.100 tot 5.700 kWh/m.^{°C}.ha.seizoen te bereiken. De bruikbare energie is sterk afhankelijk van de vullinggraad; verder onderzoek naar een hogere toelaatbare vullinggraad is dus zeer gewenst.
 5. De bruikbare energie hangt maar weinig af van de configuratie van het bronnenpatroon. De vereiste configuratie, het aantal bronnen en de grootte van de bronnen hangen echter sterk af van de doorlaatfactor van de aquifer en van de benodigde piekbelasting. De optimale configuratie is daarom ook een economische kwestie.
 6. Een schaakbordpatroon geeft de kleinste verlagingen bij de bronnen en daardoor de grootst mogelijke boorstraal en pompdebiet. In situaties met achtergrondstroming is het schaakbord minder gunstig.
 7. Wanneer een niet te verwaarlozen achtergrondstroming aanwezig is, lijkt een patroon van gelijksoortige (warm resp. koud) bronnen afwisselende rijen het meest geëigend. Als grootste bronafstand binnen de rijen lijkt 1/2 van de rij-afstand goed te voldoen. De rijen moeten uiteraard zo goed mogelijk in de richting van de achtergrondstroming worden gepositioneerd. Een component van de achtergrondstroming loodrecht op de rijen overeenkomend met een verplaatsing van minder dan 20 m/jaar heeft over het algemeen geen grote negatieve invloed wanneer de rijen-afstand tenminste 75 m bedraagt.
 8. De afpompings bij de bronnen bij een patroon met 'slanke' dozen is groter dan bij een schaakbordpatroon. Bij zeer slanke dozen (korte bronafstand binnen de rijen) zou deze afpompings wel eens de kritieke factor kunnen zijn.

Overzicht van vuistregels

De vuistregels zijn afgeleid uit berekeningen die zijn opgesteld met grondeigenschappen die voor zeer veel situaties een redelijke benadering van de werkelijkheid vormen. De belangrijkste aannamen zijn:

- Volkomen bronnen in de aquifer.
- Porositeit 0,322.
- Vertraging van het warmtefront t.o.v. het hydraulische front met een factor 0,475.
- Thermische eigenschappen van onder- en bovenliggende lagen zijn identiek aan die van de aquifer; onder- en bovenliggende lagen zijn ondoorlatend voor water.
- De aquifer is tenminste 15 m dik.
- De afdekkende laag is tenminste 15 m dik.
- Doorlaatfactor van de aquifer tussen 20 en 40 m/dag.
- Vullinggraad voor patronen gelijk aan 0,4.
- Bronafstand resp. afstand tussen rijen tussen 50 en 150 m.
- Boorstraal tussen 0,15 en 0,4 m.
- Geen duidelijke lagen met afwijkende doorlaatfactor.
- Bellen ongeveer even groot.

De hier ontwikkelde vuistregels zijn samengevat in tabel 24.

	Enkel doublet	Schaakbord patroon	Rijen-patroon met L/B = 4
Thermische straal	$r_{th}^2 = 0,137 G^2$ (15)		
Bronafstand	$L = 2,5G^{0,75}$ (21) $L = 1,1G$ ($r_{th} < 10$ m) (22) $L = 0,74 G$ ($r_{th} > 50$ m) (23)	$L_s^2 = 0,54 G^2$ (38)	
Rijen-afstand			$L^2 = 1,08 G^2$ (42)
Bronafstand binnen rij			$B = 0,26 G$ (43)
Afpomping/boorstraal	6,5 (20)	5,8 (37)	7,8 (41)
W/D		2.700 (30)	2.700 (30)
Thermisch rendement	ca. 0,75 (voor $r_{th} > 20$ m)	ca. 0,75	ca. 0,75
Laatste terugwintemperatuur	0,4 T_i	0,4 T_i	0,4 T_i
E_b^*	0,6 G^2 (24)		
E_{bha}^*		5.100 - 5.600 (tabel 21)	5.200 - 5.700 (tabel 23)
Aantal bronnen/ha		18.500/ G^2 (33)	18.500/ G^2 (33)

Tabel 24: Samenvatting van vuistregels.

Dankwoord

Het concept van een theoretisch maximale opslagcapaciteit in een aquifer bij een vertikaal vlak warmtefront tussen twee bronnenrijen en een thermische vulling van 1,0 is ons aangedragen door Theo Olsthoorn (TUDelft) en Martin Bloemendal (toen Tauw, nu KWR), bij de aanvang van ons werk. Het heeft ons gebracht tot het opzetten van het 1-D spreadsheet model dat belangrijk is geweest voor de planning van de 3-D berekeningen.

Zonder de hulp van Ed Veling zouden we ons minder zeker hebben gevoeld over de wiskunde van een sinusvormig variërende temperatuur in de aquifer en de warmteverliezen daardoor naar boven- en onderliggende grond.

Op twee momenten gedurende het schrijven van de 3 artikelen hebben Benno Drijver (IF Technology) en Wjib Sommer (Wageningen UR) belangrijk commentaar op concepten geleverd, waar wij dankbaar gebruik van hebben gemaakt.

Wil van den Heuvel en Ronald Smit (Installect) hebben vanuit de installatiepraktijk onze bevindingen over thermische rendementen, minimale bronafstand en laatste terugwintemperatuur gesteund.

Literatuur

Logan, J. (1964) Estimating transmissibility from routine production tests of waterwells; Groundwater, vol. 2, nr. 1 pag. 35-37

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

