
Open WKO-systemen B: Thermisch gedrag

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 B gaat over het thermische gedrag. De lezer wordt bekend verondersteld met de inhoud van artikel A.

Modelopbouw 3D

Het inleidende artikel A eindigde met een evaluatie van berekeningen met een aquifer-

¹ Grondwaterhydroloog te Rotterdam (brambot@xs4all.nl)

² KWA Bedrijfsadviseurs (mhz@kwa.nl)

dikte van 25 m en een afdekking van 15 m. De resultaten mogen worden gebruikt per m¹ aquiferdikte, mits is voldaan aan:

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

Omdat de warmteverliezen door geleiding en dispersie evenredig zijn met T_i [°C] kunnen de resultaten ook worden uitgedrukt per °C injectietemperatuur T_i .

De 3D-berekeningen zijn uitgevoerd voor een aquiferdikte van 25 m, een afdekking van 15 m en met een $T_i = 4^\circ\text{C}$ (koude injectie bij 8°C en warme injectie bij 16°C , de achtergrondtemperatuur is immers op 12°C aangenomen, zie artikel A).

De gehanteerde bodemparameters zijn vermeld in artikel A. Deze zijn ook voor de 3D-berekeningen gebruikt, behalve voor wat betreft parameters voor de doorlaatfactor, de dispersie en voor heterogeniteit. Voor de 3D-berekeningen is gebruikt:

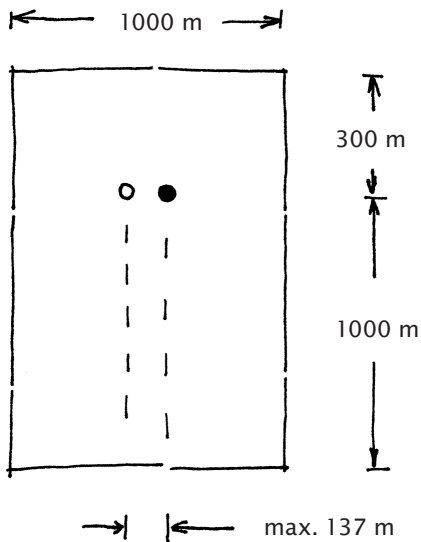
1. Voor de berekeningen is een doorlaatfactor van de aquifer van 35 m/dag gebruikt, als een soort 'mediane waarde'. Voor het thermische gedrag is de doorlaatfactor van de aquifer niet van belang, behalve indirect via de dispersie die vaak aan de doorlaatfactor wordt gekoppeld.
2. Bij berekeningen met een achtergrondstroming wordt deze uitgedrukt in meters hydraulische frontverplaatsing. Daardoor is ook de achtergrondstroming onafhankelijk van de doorlaatfactor van de aquifer.
3. Een longitudinale dispersielengte van 1 m; een transversale dispersielengte van 0,2 m.
4. Heterogeniteit van de aquifer wordt slechts gedeeltelijk beschreven met de dispersiviteit. Daarom is gekozen voor een heterogene opbouw van de aquifer, als aangegeven in afbeelding 5. Hiermee wordt een heterogeniteit gemodelleerd van een aquifer die 'door de boommeester' als homogeen is beschreven. Verder in de artikelen wordt steeds over een homogene aquifer gesproken.

Dikte [m]	Doorlaatfactor [m/dag]
Ondoorlatende, maar thermisch geleidende bovenliggende lagen	
3,125 m	35
3,125 m	21
3,125 m	35
3,125 m	49
Ondoorlatende en thermisch niet geleidende ondergrens, waarover is gespiegeld	

Afbeelding 5: Bodemschematisering van gebruikt model.

Omdat is aangenomen dat zowel op 15 m boven de aquifer als op 15 m beneden de aquifer de temperatuur constant blijft op de achtergrondtemperatuur, is de berekening slechts voor de halve aquiferdikte uitgevoerd, gespiegeld om een geïsoleerde ondergrond, zie ook afbeelding 5.

Het gebruikte model heeft horizontale afmetingen van 1300 bij 1000 m, waarbij de bronnen uit het midden van het model zijn gelegen om te kunnen rekenen met een achtergrondstroming, zie afbeelding 6. In een oneindig domein zou de afpomping bij de aangenomen rand bij de grootste bronafstand van 137 m ongeveer 4,5% van de afpomping bij de bronnen bedragen. De knooppuntafstand bij de bronnen is plaatselijk verdicht tot ongeveer 3 m. De berekeningen zijn uitgevoerd met de modelcode Feflow.



Afbeelding 6: Bovenaanzicht modelgebied.

Het pompregime bestaat steeds uit perioden van 3 maanden (91,25 dagen) met een voortdurend gemiddeld pompdebiet:

- Een winter met koude injectie.
- Een lente waarin het systeem stil ligt.
- Een zomer met warme injectie.
- Een herfst waarin het systeem stil ligt.

Numerieke dispersie en knooppuntafstand

Er bestaat nauwelijks consensus over de waarde van de dispersiecoëfficiënt, hooguit over de orde van grootte. Een bijkomend probleem is dat van de numerieke dispersie, waardoor de te gebruiken waarde van de expliciete dispersie af moet hangen van de berekeningswijze. Sommige modelleers zijn van mening dat de numerieke dispersie het fenomeen al voldoende beschrijft en zien dus geheel af van een expliciete dispersie in de berekening. Onderzoek, aan de hand van gemeten temperaturen, zou hier uitsluitsel moeten geven.

Opvallend is bovendien de invloed van de knooppuntafstand bij de bronnen op de thermische resultaten. Ook bij onze berekeningen is die invloed niet te verwaarlozen gebleken voor de enkele proefberekeningen die we met afwijkende (afwijkend van rond 3 m) knooppuntafstand uitvoerden.

Onzekerheid ten aanzien van knooppuntafstand en dispersiviteit is naar onze mening een storende factor in de huidige praktijk van berekenen.

Enkel doublet, zonder achtergrondstroming

Thermisch rendement

Het thermisch gedrag kan volledig worden beschreven aan de hand van de thermische straal en de bronafstand. De thermische straal r_{th} is gedefinieerd als

$$r_{th}^2 = \frac{0,475}{0,322\pi} \frac{W}{D} \quad (5)$$

$$\text{of} \quad r_{th} \approx 0,69 \sqrt{\frac{W}{D}} \quad (6)$$

Waarbij:

W : De hoeveelheid geïnjecteerd water per seizoen [m³].

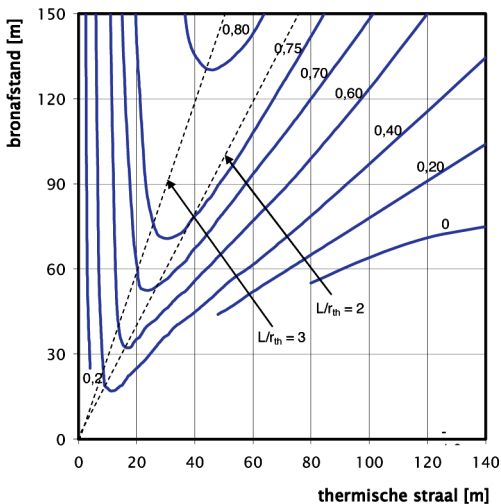
D : Dikte van de aquifer [m].

0,475: De verhouding tussen de soortelijke warmte van het water in de poriën en die van het volledige aquifer materiaal (beide per m³ aquifer), met de hier gebruikte parameterwaarden (zie artikel A).

41 Berekeningen zijn uitgevoerd om de relatie tussen thermische straal, bronafstand en thermisch rendement te onderzoeken, met

1. De bronafstand variërend tussen 10 en 137 m.
2. De thermische straal variërend tussen 9 en 120 m.

Algemeen wordt aangenomen dat een redelijk thermisch rendement wordt behaald wanneer de thermische straal niet groter is dan 1/3 deel van de bronafstand, zie NVOE (2006).



Afbeelding 7: Rendement doublet zonder achtergrondstroming.

De resultaten van de berekeningen zijn uitgezet in afbeelding 7. Bij gegeven bronafstand is het volgende te zien:

1. Het thermisch bronrendement is maximaal bij een thermische straal die in de buurt ligt van $L/2$ à $L/3$.
2. Het thermisch rendement neemt inderdaad af bij een thermische straal groter dan $L/2$ à $L/3$, maar opvallender is de afname bij een kleinere thermische straal, vooral bij kleinere systemen. Bij een kleinere thermische straal is het rendement lager door de minder gunstige verhouding tussen inhoud en oppervlak van de 'bel'. Bij een grotere thermische straal neemt het rendement af door toenemende wisselwerking tussen de warme en de koude 'bel' en vervolgens door thermische kortsluiting met de andere bron van het doublet. Aan beide kanten van het maximum spelen dus verschillende verliesmechanismen.

Bij gegeven thermische straal blijkt:

1. Het rendement neemt steeds toe bij toenemende bronafstand.
2. Het rendement bij kleine thermische straal hangt alleen van die straal af en nauwelijks van de bronafstand. De bronnen gedragen zich alsof ze geheel onafhankelijk van elkaar zijn. Pas bij grotere thermische straal hebben de bronnen invloed op elkaar.
3. Een kleine thermische straal geeft altijd een relatief magere thermisch rendement.
4. Bij een kleine thermisch straal is het rendement bovendien zeer gevoelig voor kleine verschuivingen in die straal .
5. Pas vanaf een bronafstand van 70 m kan een rendement boven 75% worden gehaald, maar bij nog grotere bronafstand neemt het maximaal haalbare rendement niet veel meer toe.
6. Bij grote bronafstand is het rendement ook bij grotere thermische straal nog behoorlijk; dat strookt met de praktijkervaring dat voor grotere systemen een bronafstand van $2 \cdot r_{th}$ nog goede resultaten geeft.

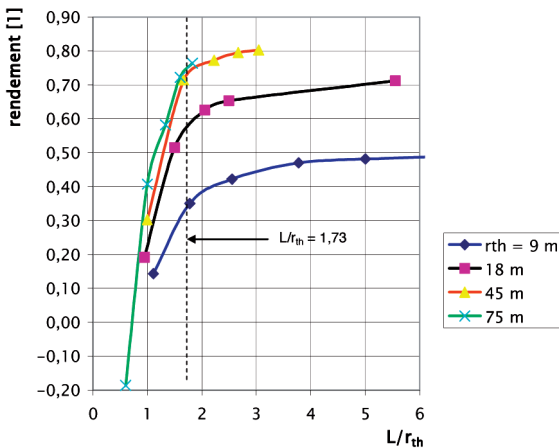
In de praktijk zal een hoeveelheid geïnjecteerd water per seizoen het uitgangspunt zijn, de thermische straal dus bij gegeven pakketdikte. Daarbij moet de kleinste bronafstand worden gezocht die nog een acceptabel rendement oplevert, vanwege de kosten van terreinleidingen en ondergronds ruimtebeslag. In afbeelding 8 is het antwoord af te lezen: het rendement als functie van de bronafstand voor verschillende thermische straal.

Te zien is, dat voor kleine systemen, met een thermische straal < 20 m , het inderdaad raadzaam is een bronafstand van tenminste $3 r_{th}$ aan te houden. Voor grotere systemen met een $r_{th} > 40$ m resulteert een bronafstand van 2 keer r_{th} in een maar weinig lager rendement. Als voorziening voor toekomstige uitbreiding zou natuurlijk toch voor 3 keer r_{th} kunnen worden gekozen. Inderdaad is een grotere bronafstand dan $3 \cdot r_{th}$ vanuit het oogpunt van thermisch rendement vrijwel zinloos.

In het geval van een duidelijk heterogene aquifer, bijvoorbeeld met grovere lagen, moet de minimaal toelaatbare bronafstand natuurlijk expliciet worden onderzocht.

Afbeelding 8 kan in verband worden gebracht met de formule voor de doorbraak van een doublet. Voor de hydraulische doorbraak geldt, zie Bear (1973):

$$t = \frac{\pi p D * L^2}{3Q} \quad (7)$$



Afbeelding 8: Rendement als functie van bronafstand.

Waarbij:

t : Doorbraaktijd [dag].

p : Effectieve porositeit.

D : Aquiferdikte = filterlengte [m] (volkomen bron).

L : Bronafstand [m].

Q : Debiet per bron [m³/dag].

Uit deze formule kan een relatie voor thermische kortsluiting bij injectie van warm water worden afgeleid. Als de hoeveelheid geïnjecteerd water wordt beschreven met de thermische straal r_{th} , kan worden afgeleid dat kortsluiting plaats vindt bij:

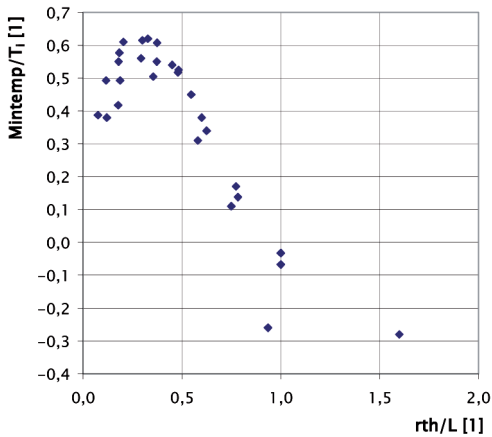
$$r_{th\text{kortsluit}} = \frac{L}{\sqrt{3}} \text{ of } L = 1,73r_{th\text{kortsluit}} \text{ [m]} \quad (8)$$

Deze waarde is in afbeelding 8 goed te herkennen, vooral voor situaties met grotere thermische straal. Bij grotere systemen is het warmteverlies naar de omgeving relatief gering, en wordt het rendementsverlies grotendeels veroorzaakt door thermische kortsluiting bij te kleine bronafstand. Bij kleinere thermische straal is het verlies naar de omgeving groter en is het aandeel van kortsluiting in het rendementsverlies daardoor minder scherp zichtbaar.

Eenvoudig is te berekenen dat bij injectie tot $r_{th} = L/3$ slechts 1/3 van de waterhoeveelheid is geïnjecteerd die tot kortsluiting zou leiden: een 'veiligheid' van 3.

Laatste terugwintemperatuur

In artikel A is het belang van de laatste terugwintemperatuur uitgelegd; deze mag niet dalen tot nabij 12°C, zowel voor verarming als voor koeling, dus tot nabij de hier gekozen achtergrondtemperatuur. In het ontwerp moet voor de laatste terugwintemperatuur enige afstand tot deze grens worden gehouden. In afbeelding 9 is de laatste temperatuur van het teruggewonnen water in een seizoen in het 20ste jaar voor een enkel doublet uitgezet tegen r_{th}/L , voor situaties waarin L tenminste 60 m bedraagt.



Afbeelding 9: Mintemp tegen bronafstand.

Het blijkt dat de laatste terugwintemperatuur niet beneden de achtergrondtemperatuur zal terugvallen wanneer r_{th}/L rond 0,75 is gelegen, of bij $L/r_{th} = 1,33$. Deze verhouding ligt ruim beneden de praktijkervaring van $L/r_{th} = 2$ voor grotere systemen. Blijkbaar moet ruimte worden gelaten voor onvoorziene tegenvallers:

- Minder gunstige bodemopbouw dan in de berekeningen aangenomen.
- Kortere filterlengte dan in de berekeningen aangenomen.
- Verschillende afmeting van de warme en koude bel, door asymmetrie in injectie-temperatuur.
- Wisselend temperatuurverloop en daarmee warmte/koudevraag in de seizoenen.
- (Minder dan optimaal gedrag in de eerste jaren na ingebruikneming).
- Enz.

Uit afbeelding 9 is af te lezen dat voor grotere systemen bij een bronafstand overeenkomend met $L/r_{th} = 2$ steeds een laatste terugwintemperatuur van minimaal $0,4 T_i$ wordt berekend. Deze waarde is hier aangehouden als ontwerpgrens die later ook gebruikt zal worden als grens voor uitgestrekte patronen.

Minimale bronafstand

In de praktijk blijkt een minimale bronafstand van $2 \cdot r_{th}$ nog toelaatbaar voor grotere systemen. Voor kleinere systemen lijkt het verstandig de bronafstand niet kleiner dan $3 \cdot r_{th}$ te kiezen omdat het thermisch rendement al afneemt zonder kortsluiting. De relatie

$$L = 5,4 r_{th}^{0,75} \tag{9}$$

voorziet in een glijdende schaal die is gebruikt in tabel 10 .

r_{th} [m]	L [m]	L/r_{th} [1]	Rendement η [1]
10	30	3,0	0,47
15	41	2,7	0,63
20	51	2,6	0,68
25	60	2,4	0,72
30	69	2,3	0,75
35	78	2,2	0,76
40	86	2,1	0,76
45	94	2,1	0,76
50	100	2,0	0,76
55	110	2,0	0,76
60	120	2,0	0,76

Tabel 10: Aanbevolen bronafstand en resulterend thermisch rendement.

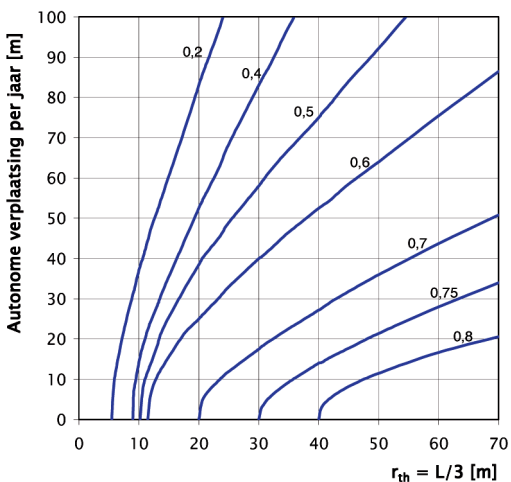
De minimale bronafstand zoals weergegeven in tabel 10 en relatie (9) is in artikel C gebruikt bij het opstellen van vuistregels voor ontwerp.

Enkel doublet, met achtergrondstroming

Als een achtergrondstroming aanwezig is, is het thermisch rendement afhankelijk van de grootte van de jaarlijkse autonome verplaatsing van waterdeeltjes I_a [m/jaar], van de bronafstand en van de thermische straal. Om wille van de overzichtelijkheid is hier aangehouden dat de thermische straal steeds gelijk is aan $L/3$.

De achtergrondstroming is steeds gericht loodrecht op de lijn door de bronnen van het doublet. De bronnen worden in een praktijksituatie natuurlijk zo goed mogelijk loodrecht op de stroming georiënteerd, om thermische kortsluiting te voorkomen .

De 20 berekeningen zijn uitgevoerd met dezelfde aquiferparameters als voor de



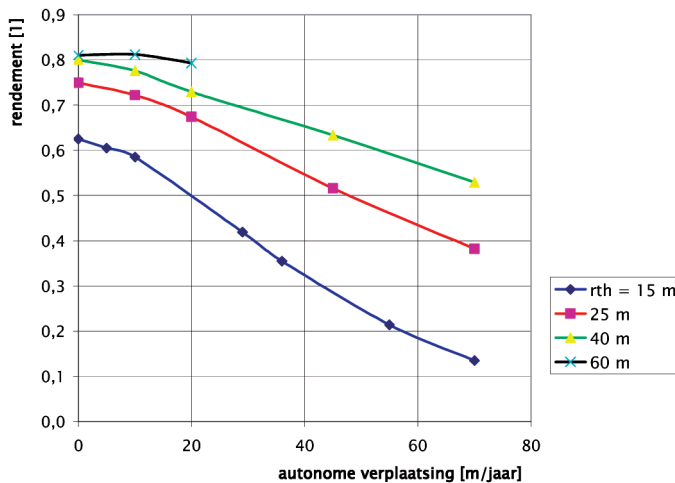
Afbeelding 11: Rendement doublet met achtergrondstroming.

berekeningen zonder achtergrondstroming hierboven. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in afbeelding 11.

In afbeelding 12 is het rendement uitgezet tegen de autonome jaarlijkse waterverplaatsing voor lijnen met gelijke thermische straal. Uit de afbeelding blijkt dat:

1. Het thermische rendement al klein is bij een kleine thermische straal zonder achtergrondstroming, maar bovendien relatief sterk afneemt onder invloed van een achtergrondstroming.
2. Hoe groter de thermische straal, des te kleiner de invloed is van een achtergrondstroming.
3. De afname van het rendement is ongeveer recht evenredig met de grootte van de achtergrondstroming.
4. Bij een achtergrondstroming overeenkomend met een verplaatsing kleiner dan 30 m/jaar blijft de afname van de bruikbare energie beperkt tot ongeveer 10% - immers evenredig met $(1+\text{rendement}) \cdot r_{th}$ niet beneden 25 m komt.

De invloed van een stroming in de richting van een lijn door de bronnen is hier niet onderzocht. Het is algemeen bekend dat een dergelijke bronoriëntatie niet gewenst is vanwege thermische kortsluiting. Verder in dit artikel, over uitgestrekte bronpatronen, wordt wel aandacht aan zo'n stroming gegeven. De invloed blijkt daar mee te vallen, zodat een lichte stroming in de richting van de lijn door de bronnen wellicht toch geen grote negatieve invloed heeft.



Afbeelding 12: Rendement als functie van achtergrondstroming.

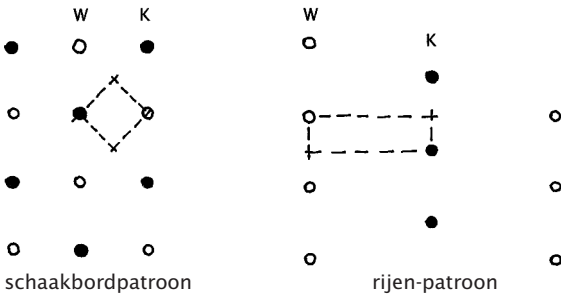
Uitgestrekte bronpatronen en vullinggraad

Twee typen rangschikkingen van WKO-bronnen worden regelmatig genoemd:

- Het schaakbordpatroon, waarbij gelijksoortige bronnen maximaal uit elkaar zijn gelegen en waar de veranderingen in stijghoogte dus waarschijnlijk minimaal zijn.
- Een patroon van rijen met afwisselend warme en koude bronnen, waar gelijksoortige

bronnen relatief dicht bij elkaar zijn gelegen en waarbij het energieverlies minimaal is door een gunstige verhouding van oppervlak ten opzichte van inhoud van de ‘bellen’.

Beide patronen kunnen gepositioneerd worden ten opzichte van een achtergrondstroming om thermische vervuiling te minimaliseren, maar het rijenpatroon lijkt daar het meest geschikt voor. De patronen zijn geschetst in afbeelding 13.



Afbeelding 13: Uitgestrekte patronen.

Bij nadere beschouwing blijken de patronen bijzondere gevallen van eenzelfde opzet. Beide patronen, mits voortgezet tot in het oneindige, kunnen opgebouwd gedacht worden uit geïsoleerde rechthoekige blokken grond. In het geval van het rijenpatroon zijn de rechthoeken georiënteerd in de richting van de rijen, bij het schaakbordpatroon zijn de rechthoeken 45° gedraaid, zie afbeelding 13. Het verdere onderzoek naar patronen is hier beperkt gebleven tot het gedrag van zulke rechthoekige blokken.

De blokken grond zijn aan alle vier zijden geïsoleerd, zowel thermisch als hydraulisch, vanwege symmetrieoverwegingen; om die reden worden zij verder aangeduid met ‘dozen’. Steeds zijn andersoortige bronnen (warme c.q. koude) in tegenoverliggende hoeken van de doos geplaatst, met een debiet dat gelijk is aan 1/4 van een bron. Bij iedere bron komen immers steeds 4 dozen samen.

De geïnjecteerde waterhoeveelheid per seizoen wordt bij het enkele doublet uitgedrukt in de thermische straal, die eenvoudig gerelateerd kan worden aan de bronafstand (beide uitgedrukt in lengte). Het equivalent voor de doos is het ‘thermisch oppervlak’, dat direct gerelateerd kan worden aan het oppervlak van de doos. Om praktische redenen is als parameter gebruikt de vullinggraad β , die de verhouding van die twee oppervlakken is:

$$\beta = \frac{\text{thermisch - oppervlak}}{\text{doos - oppervlak}} = \frac{0,475W_{\text{doos}}}{0,322DLB} = \frac{W_{\text{doos}}}{D} \frac{1,475}{LB} \quad [1] \quad (10)$$

In het geval van $\beta = 1$ is de hoeveelheid tot aan de injectietemperatuur opgewarmde grond gelijk aan de inhoud van de aquifer in de doos. Ter vergelijking: bij een bron van een doublet is die hoeveelheid gelijk aan een cirkelvormige cilinder met straal r_{th} . Het thermisch rendement van de bronnen hangt verder nog slechts af van de grootte van de doos en van de slankheid daarvan. Als parameters zijn gebruikt:

L : De lange afmeting van de doos [m].

α : De verhouding L/B [1], de slankheid van de doos.

Uitgestrekt patroon, zonder achtergrondstroming

Thermisch rendement

29 Berekeningen zijn uitgevoerd om de relatie tussen vullinggraad, grootste afmeting van de doos en slankheid te onderzoeken, met

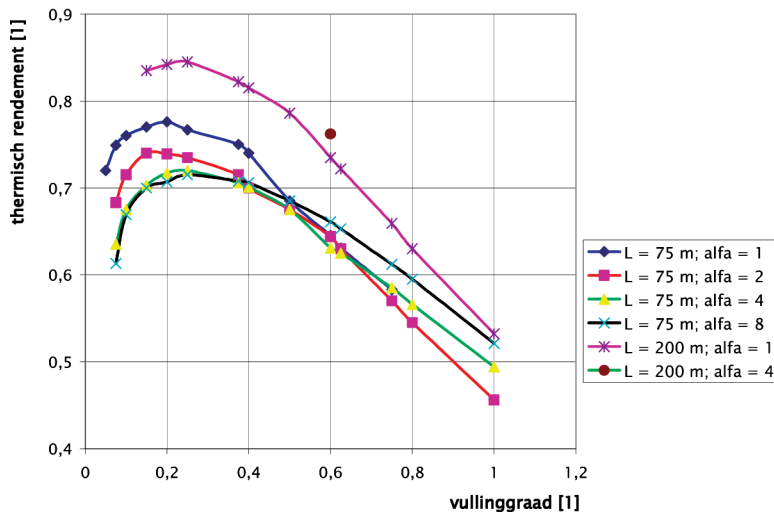
- De vullinggraad variërend tussen 0,075 en 1,0.
- De grootste afmeting L gelijk aan 75 en 200 m.
- De slankheid α variërend tussen 1 en 8.

De resultaten zijn uitgezet in de grafiek van afbeelding 14.

Er blijkt grote overeenkomst te zijn met de overeenkomstige grafiek voor een enkele doublet

- Bij geringe vullinggraad is het rendement laag vanwege een grote invloed van dispersie en diffusie (geleiding) door de ongunstige verhouding van oppervlakte/inhoud van de 'bel'.
- Bij hoge vullinggraad vindt een toenemende wisselwerking plaats tussen de warme en de koude 'bel', gevolgd door thermische kortsluiting met de bron in de tegenoverliggende hoek van de doos.
- Er tussenin ligt een maximaal rendement, bij een vullinggraad van 15 à 30%.

In afbeelding 14 is te zien dat het rendement bij lagere vullinggraad hoger is naarmate de slankheid lager (maximaal bij vierkante doos). Bij hogere vullinggraad is dat juist andersom, hoewel daar het verschil gering is, zeker als de slankheid niet groter is dan 4. Bij de verdere uitwerking van de resultaten is deze invloed verwaarloosd. Vullinggraad en in mindere mate de grootste afmeting van de doos hebben wel duidelijke invloed.



Afbeelding 14: Rendement van patroon zonder achtergrondstroming.

Het rendement van patronen bij een vullinggraad boven 40% tot tenminste 100% is vrijwel lineair afhankelijk van de vullinggraad, zie afbeelding 14.

Als algemene relatie voor het rendement η is uit afbeelding 14 afgeleid:

$$\eta = L^{0,16}(0,42 - 0,18\beta) \quad (11)$$

Waarbij:

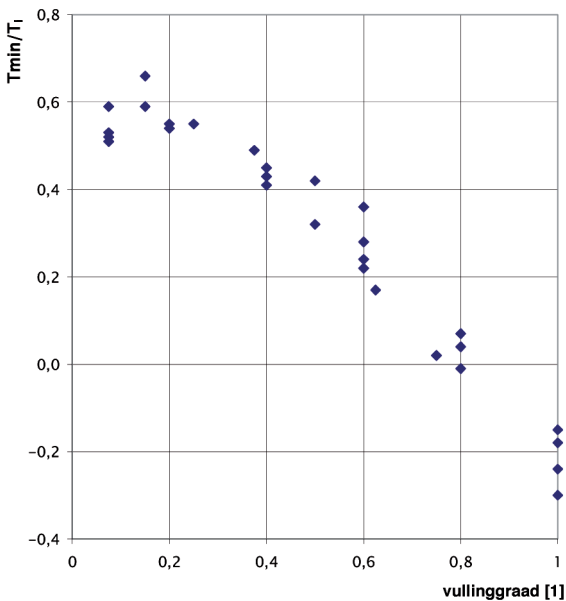
L : Afstand tussen bronnenrijen = grootste afmeting van de doos [m].

β : Vullinggraad van de doos [1], tussen 0,4 en 1,0.

Voor het uitgestrekte patroon wordt de maximale bruikbare energie per hectare gezocht. Deze blijkt bij toenemende vullinggraad nog toe te nemen, lang nadat het maximale rendement (bij een vullinggraad tussen 0,15 en 0,3) is bereikt. De toename van de hoeveelheid geïnjecteerd water wint het van de afname van het rendement, zeker tot een vullinggraad van 1,0. Er is dus geen optimale vullinggraad met maximale bruikbare energie. De grens van het toepassingsgebied lijkt te worden bepaald door de laatste terugwinttemperatuur, zoals hierna wordt uitgelegd.

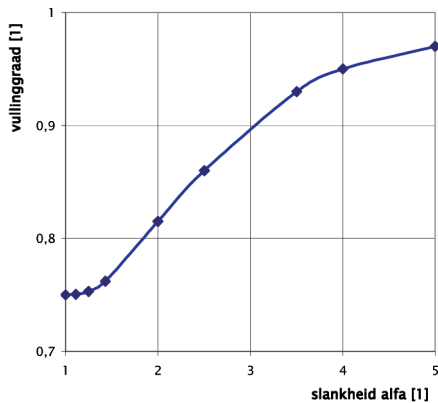
Terugwinttemperatuur en thermische kortsluiting

In afbeelding 15 is de laatste (van het seizoen) terugwinttemperatuur van de 29 berekeningen uitgezet tegen de vullinggraad. Een terugwinttemperatuur die terugvalt tot rond de achtergrondtemperatuur blijkt nog toelaatbaar voor een goed functioneren van de bovengrondse installatie. Vanwege eventuele ongunstige afwijkingen in de ontwerpaannamen moet de laatste terugwinttemperatuur bij het ontwerp hoger worden gekozen: minimaal $0,4 T_i$, zoals eerder voor het enkele doublet is uitgelegd. In afbeelding 15 is af te lezen dat de vullinggraad van het patroon dan maximaal 0,4 mag bedragen.



Afbeelding 15: Minimale temperatuur.

Voor het moment van kortsluiting bij een doos is bij de auteurs geen analytische uitdrukking bekend. Met stroomlijnen en verblijftijden uit een eenvoudig numeriek model kan deze wel worden benaderd. De resultaten zijn uitgezet in afbeelding 16.



Afbeelding 16: Kortsluiting bij doospatroon.

Thermische kortsluiting bij een vierkante doos (schaakbordpatroon) begint bij een vullinggraad van 0,75 (waarschijnlijk exact 3/4) en bij een doos met $L/B = 4$ bij een vullinggraad van ongeveer 0,95. Voor een extreem slanke doos is de vullinggraad uiteraard 1,0 bij begin van kortsluiting. Bedacht moet worden dat de effecten van dispersie en heterogeniteit hier niet zijn meegenomen.

Maximale vullinggraad

Als maximale vullinggraad voor uitgestrekte patronen wordt hier verder 0,4 aangehouden; in artikel C worden vuistregels gepresenteerd die voor deze vullinggraad zijn opgesteld. Waarschijnlijk kan de grens nog wel scherper worden gesteld. Het lijkt er op dat bij een slankere doos een wat hogere vullinggraad kan worden toegestaan, evenals bij een grotere afstand tussen de bronnenrijen. Verder onderzoek is gewenst.

	Enkel doublet met $r_{th} = 10$ m en $L = 30$ m	Enkel doublet met $r_{th} = 50$ m en $L = 100$ m	Patroon vierkante doos met vullinggraad 0,4
Laatste terugwintemperatuur	0,4 T_i	0,4 T_i	0,4 T_i
Veiligheid tegen thermische kortsluiting	3,0	1,33	1,88

Tabel 17: Kortsluiting en laatste terugwintemperatuur.

In tabel 17 is de veiligheid (betrokken op de geïnjecteerde waterhoeveelheid) tegen thermische kortsluiting voor het enkele doublet en het uitgestrekte patroon gepresenteerd, voor minimale bronafstand resp. maximale vullinggraad. Voor het 'kleine' doublet blijkt de veiligheid tegen kortsluiting hoog te zijn: een factor 3. Al lang voordat kort-

sluiting optreedt daalt de terugwintemperatuur namelijk beneden $0,4 T_i$ door warmteverlies naar de omgeving, zodat de relatie tot het moment van kortsluiting hier geen betekenis heeft.

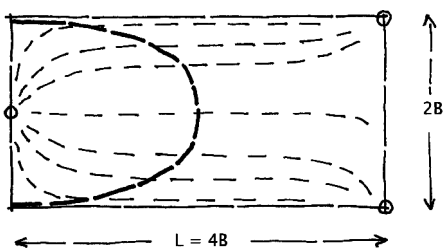
Voor het 'grotere' doublet wordt de laatste terugwintemperatuur wel door kortsluiting bepaald. Als veiligheid blijkt een factor 1,33 al voldoende te zijn, waarschijnlijk omdat bij het begin van kortsluiting maar uit één richting water vanuit de andere bron wordt aangetrokken en het effect dus verdund is.

De doospatronen zijn niet voor kleine doosafmetingen berekend (alleen voor dooslengten van 75 en 200 m), zodat 'kleine' patronen hier niet zijn vertegenwoordigd. Voor dooslengten van 75 m of meer blijkt een wat grotere veiligheid tegen kortsluiting gewenst te zijn dan voor het doublet, namelijk $0,75/0,4 = 1,88$. De reden is waarschijnlijk dat bij uitgestrekte patronen kortsluiting vanuit 4 richtingen plaats vindt, waardoor daling van de terugwintemperatuur relatief plotseling verloopt.

Uitgestrekt patroon, met achtergrondstroming

Achtergrondstroming evenwijdig aan rijen

Wanneer een niet te verwaarlozen achtergrondstroming aanwezig is zal bij voorkeur een rijen-patroon worden gebruikt, met de rijen in de richting van die achtergrondstroming. In deze situatie zou een homogene stroomsnelheid tussen de rijen ideaal zijn, omdat dan lijnen van gelijke temperatuur evenwijdig aan de richting van de achtergrondstroming zijn gelegen en die stroming geen invloed op het thermisch gedrag zou hebben. Een homogene snelheid wordt zo goed mogelijk bereikt door de gelijksoortige (warm resp. koud) bronnen in de rijen zeer dicht op elkaar te plaatsen, wat om economische redenen niet optimaal is.



Afbeelding 18: Warmtefront bij $\alpha = 4$ en vulling = 0,4.

Wanneer de bronafstand gelijk wordt gekozen aan 0,5 keer de rijen-afstand, ontstaat bij een vullinggraad van 0,4 een warmtefront zoals getoond in afbeelding 18. De invloed van de individuele bronnen is nog wel zichtbaar, maar de ruimte tussen de bronnen is al grotendeels opgevuld. Het lijkt dus het raadzaam een 'doos' te kiezen met een slankheid van tenminste 4. Om die reden wordt deze configuratie in artikel C verder uitgewerkt voor bruikbare energie en de hydraulische overwegingen.

Onduidelijk is voornamelijk in welke mate een minder slanke doos last heeft van een achtergrondstroming. Dat is hier niet verder onderzocht.

Let op: De afstand tussen bronnen in een rij = $2 \cdot$ de korte zijde van de doos! De afstand tussen rijen is gelijk aan L .

Achtergrondstroming loodrecht op rijen

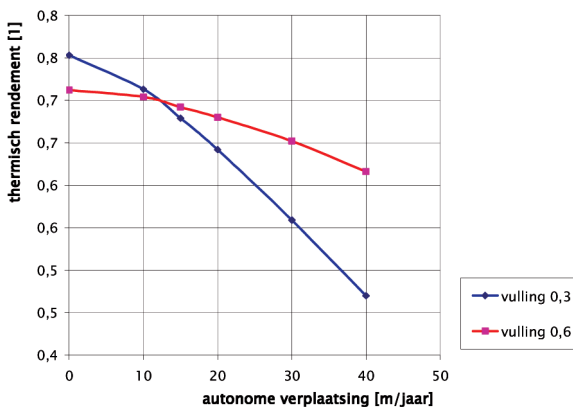
Een component van de achtergrondstroming loodrecht op de rijen kan nooit worden uitgesloten:

- Om praktische redenen is oriëntering van de rijen precies in de richting van de achtergrondstroming misschien niet mogelijk.
- De richting van de achtergrondstroming is nooit precies bekend; bij een hoge stromingsintensiteit kan de component loodrecht op de aangenomen richting niet te verwaarlozen zijn.

Om die reden is de invloed van een lichte achtergrondstroming hier beknopt onderzocht. Het gedrag van een doos van 75 bij 18,75 m is daartoe berekend, voor vullingsgraden van 30% en 60% en voor autonome achtergrondverplaatsingen tot 40 m/jaar. De 'doos' was in de situatie met achtergrondstroming uiteraard niet waterdicht en niet thermisch geïsoleerd. Het model voor de berekeningen bestond uit 5 loodrecht op de stroming gelegen bronnenrijen met randinvoer die bovenstroomse bronnenrijen vertegenwoordigde. Geverifieerd is daarbij dat de tweede en vierde gemodelleerde rijen identiek gedrag vertoonden en dat de onnauwkeurigheid in de randinvoer dus te verwaarlozen was. De resultaten van de berekeningen zijn uitgezet in afbeelding 19.

De invloed blijkt bij een geringe jaarlijkse verplaatsing beperkt, maar is bij een verplaatsing van 20 m/jaar al wel belangrijk, vooral bij kleine vullingsgraad.

Een verplaatsing van 20 m/jaar loodrecht op de aangenomen richting van de stroming is overigens al een hoge waarde. Bij een doorlaatfactor van 35 m/dag, bijvoorbeeld, komt die verplaatsing overeen met een grondwaterverhang van 0,5 m/km. Bij zeer hoge



Afbeelding 19: Achtergrondstroming bij doos.

doorlaatfactoren kan een dergelijke stroming wel onopgemerkt blijven door het geringe verhang dat er voor nodig is.

Een achtergrondstroming loodrecht op de rijen veroorzaakt eerder thermische kortsluiting, met bijbehorende daling van de temperatuur van het onttrokken water aan het einde van het seizoen tot gevolg. Als een stroming loodrecht op de rijen niet te verwaarlozen is, moet de vullinggraad waarschijnlijk worden verlaagd of moet voor een andere oriëntatie van de rijen worden gekozen. Verder onderzoek hiernaar lijkt ons gewenst.

Literatuur

Bear, J. (1979) *Hydraulics of Groundwater*; McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, McGraw-Hill

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