



Engineering the earth

Onderzoek naar interferentie
tussen open en gesloten bodemenergiesystemen



Engineering the earth

**Onderzoek naar interferentie
tussen open en gesloten bodemenergiesystemen**

Onderzoek naar interferentie

tussen open en gesloten bodemenergiesystemen

**Uitvoerder
onderzoek** **IF Technology bv**
Velperweg 37
Postbus 605
6800 AP ARNHEM
T 026-35 35 555 | F 026-35 35 599 | E info@iftechnology.nl
Contactpersoon: mevrouw S. de Boer

Colofon Auteurs: ir. B.J. Drijver / ing. R.G.A. Wennekes
Versie: concept 1.0
Gecontroleerd door: ir. M.M. van Aarssen

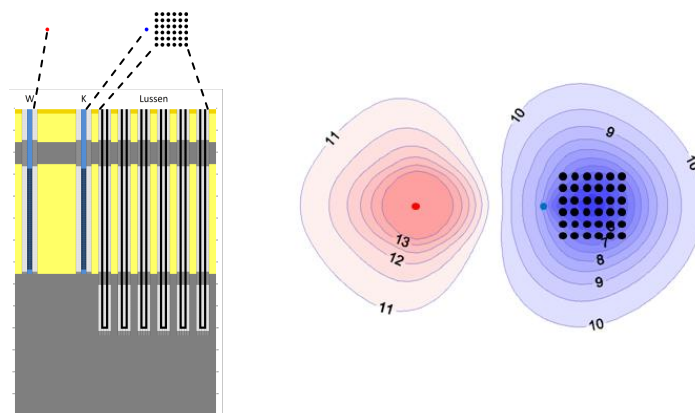
Samenvatting

Aanleiding

Vanaf 1 juli 2013 geldt in het kader van de AMvB Bodemenergie voor gesloten bodemenergiesystemen een meldings- en een vergunningplicht. Het bevoegd gezag hiervoor zijn de gemeenten. Er leven bij met name de landelijke, provinciale en lokale overheden nog een aantal vragen over gesloten bodemenergiesystemen. Deze vragen gaan onder andere over de volgende onderwerpen:

1. De positieve effecten van warmtepompen in combinatie met gesloten systemen.
2. De gevolgen van lekkage van het circulatiemedium in de bodemwarmtewisselaars naar de bodem en de gevolgen van het doorboren van scheidende lagen.
3. De invloed van grootschalige toepassing van gesloten systemen op onder andere het rendement van warmtepompen in combinatie met gesloten systemen.
4. De invloed van interferentie tussen een open en een gesloten systeem op onder andere het rendement van warmtepompen in combinatie met gesloten systemen.
5. Wat te doen met gesloten systemen bij buitengebruik stelling.

Dit onderzoek, met de titel: "Onderzoek naar interferentie tussen open en gesloten bodemenergiesysteem" geeft het antwoord op de vragen behorende bij punt 4. De overige onderzoeken zijn uitgevoerd door Groenholland Geo-Energiesystemen (1 en 3) en KWR Watercycle Research Institute (2 en 5).



Onderzoeksvragen

Dit onderzoek, met de titel: "Onderzoek naar interferentie tussen open en gesloten bodemenergiesystemen" geeft antwoord op de volgende onderzoeksvragen:

- Hoe groot is de onderlinge thermische beïnvloeding tussen open en gesloten systemen en van welke factoren is de grootte van de onderlinge beïnvloeding afhankelijk?
- Wat zijn de gevolgen van de onderlinge thermische beïnvloeding op het jaarlijks elektriciteitsverbruik, de elektriciteitskosten, de jaarlijkse CO₂-emissie en het rendement van de warmte- en koudelevering met het bodemenergiesysteem in combinatie met de warmtepomp?

Antwoorden en conclusies

Open en gesloten bodemenergiesystemen kunnen elkaar alleen beïnvloeden als het grondwater van het open systeem wordt onttrokken en wordt geïnfiltreerd op een diepte waar zich ook (een gedeelte van) de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem bevinden. Daarnaast moet de afstand tussen het open en het gesloten systeem zodanig klein zijn dat het gesloten systeem binnen het hydrologisch invloedsgebied ligt van het open systeem en/of dat de systemen in elkaars thermisch invloedsgebied liggen. Om de mate van interferentie (en de gevolgen daarvan) te kwantificeren is een groot aantal scenario's doorgerekend. De onderstaande conclusies zijn gebaseerd op de resultaten van deze scenario's.

De grootte van de onderlinge thermische beïnvloeding is afhankelijk van de horizontale afstand tussen de bronnen van het open systeem en de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem, de mate van de overlap in het dieptetraject van beide systemen en in hoeverre de bodemwarmtewisselaars nabij de warme of de koude bron van het open systeem worden geplaatst. Daarnaast is de grootte van het open systeem ten opzichte van het gesloten systeem, de grootte van de netto energieonttrekking van het gesloten systeem en de grootte van de snelheid van de grondwaterstroming van belang.

De onderlinge thermische beïnvloeding tussen open en gesloten kan zowel negatieve gevolgen maar zeker ook positieve gevolgen hebben voor een open en een gesloten systeem.

De invloed van een gesloten systeem heeft zeer beperkte invloed heeft op het elektriciteitsverbruik en het rendement van een open systeem en de hierbij behorende warmteopwekking met de warmtepomp. In de doorgerekende scenario's is dit maximaal 0,4%.

De invloed van een open systeem op het energieverbruik (en de daaraan gekoppelde elektriciteitskosten, de CO₂-emissie en het rendement) van een gesloten systeem bedraagt maximaal circa 8% ten opzichte van de situatie zonder een open systeem in de nabije omgeving. Deze invloed hangt sterk af van de grootte van het open systeem, of de bodemwarmtewisselaars nabij een warme of een koude bron liggen en de mate van energieonbalans in de warmte- en koudevraag aan het gesloten systeem.

Het rendement van de warmtepomp met het gesloten systeem wordt bij warmtelevering positief beïnvloed indien de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem nabij de warme bron liggen van een open systeem. Dit wordt veroorzaakt door de hogere temperatuur van de circulatievloeistof in de winter, wat een hogere COP van de warmtepomp en dus een lager elektriciteitsverbruik van de warmtepomp tot gevolg heeft. De hogere temperatuur in de zomer kan echter tot gevolg hebben dat in de zomer geen directe koeling met het gesloten systeem meer mogelijk is en dat de warmtepomp wordt ingezet als koelmachine om koude te leveren. Dit kan het voordeel van de hogere COP van de warmtepomp in de winter en het voordeel in het elektriciteitsverbruik (zie punt hiervoor) weer teniet doen of zelfs zorgen voor een netto nadelig effect.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
2	Methoden en uitgangspunten	9
	2.1 Interactie open en gesloten bodemenergiesysteem.....	9
	2.2 Berekeningsmodel	10
	2.3 Uitgangspunten ondergrond.....	11
	2.4 Systeemconcepten en varianten open en gesloten systemen	12
	2.5 Scenario's	15
	2.6 Elektraverbruik en CO ₂ -emissie	19
3	Modelberekeningen	22
	3.1 Inleiding.....	22
	3.2 Open systeem.....	22
	3.3 Gesloten systeem	27
4	Energieverbruik en rendement.....	32
	4.1 Inleiding.....	32
	4.2 Open systeem.....	32
	4.3 Gesloten systeem	36
5	Conclusies	41
Bijlage 1	Scenario's	
Bijlage 2	Temperatuurcontouren	
Bijlage 3	Temperatuurgrafieken	

1

Inleiding

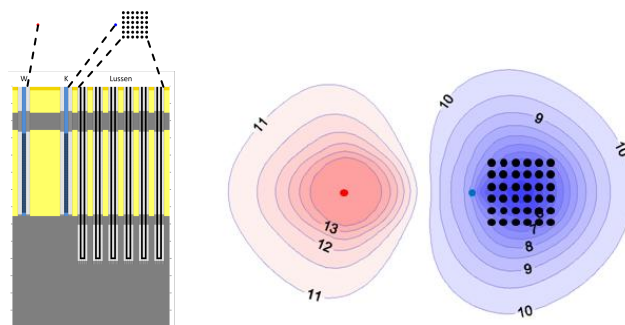
Aanleiding

Vanaf 1 juli 2013 geldt in het kader van de AMvB Bodemenergie voor gesloten bodemenergiesystemen een meldings- en een vergunningplicht. Het bevoegd gezag hiervoor zijn de gemeenten. Er leven bij met name de landelijke, provinciale en lokale overheden nog een aantal vragen over gesloten bodemenergiesystemen. Deze vragen gaan onder andere over de volgende onderwerpen:

1. De positieve effecten van warmtepompen in combinatie met gesloten systemen.
2. De gevolgen van lekkage van het circulatiemedium in de bodemwarmtewisselaars naar de bodem en de gevolgen van het doorboren van scheidende lagen.
3. De invloed van grootschalige toepassing van gesloten systemen op onder andere het rendement van warmtepompen in combinatie met gesloten systemen.
4. De invloed van interferentie tussen een open en een gesloten systeem op onder andere het rendement van warmtepompen in combinatie met gesloten systemen.
5. Wat te doen met gesloten systemen bij buitengebruik stelling.

Dit onderzoek, met de titel: "Onderzoek naar interferentie tussen open en gesloten bodemenergiesysteem" geeft het antwoord op de vragen behorende bij punt 4. De overige onderzoeken zijn uitgevoerd door Groenholland Geo-Energiesystemen (1 en 3) en KWR Watercycle Research Institute (2 en 5).

*Figuur 1
Voorbeelden van
bronconfiguratie en
onderlinge beïnvloeding
tussen open en
gesloten bodem-
energiesystemen*



Onderzoeksvragen

Het voorliggende onderzoek geeft antwoord op de volgende onderzoeksvragen:

- Hoe groot is de onderlinge thermische beïnvloeding tussen open en gesloten systemen en van welke factoren is de grootte van de onderlinge beïnvloeding afhankelijk?
- Wat zijn de gevolgen van de onderlinge thermische beïnvloeding op het jaarlijks elektriciteitsverbruik, de elektriciteitskosten, de jaarlijkse CO₂-emissie en het rendement van de warmte- en koudelevering met het bodemenergiesysteem in combinatie met de warmtepomp?

Toepassing

De landelijke, provinciale en lokale overheden kunnen de resultaten van dit onderzoek gebruiken om beleid te ontwikkelen. Daarnaast biedt het informatie voor de gemeenten, als bevoegd gezag voor gesloten systemen, voor het beoordelen van de vergunningaanvragen en ter ondersteuning bij het besluitvormingsproces of een gebied als interferentiegebied moet worden aangewezen.

Onderzoek en rapportage

Het onderzoek om de onderlinge interferentie te bepalen tussen open en gesloten bodemenergiesystemen is uitgevoerd door middel van modelberekeningen met HSTWin-2D. Het resultaat van deze modelberekeningen zijn gewijzigde temperaturen van het bodemenergiesysteem en jaarlijks te verpompen grondwaterhoeveelheden. Deze resultaten zijn input voor de berekeningen ter bepaling van het energieverbruik, de jaarlijkse elektriciteitskosten, de CO₂-emissie en het rendement.

Het onderzoek is als volgt in deze rapportage beschreven. Hoofdstuk één geeft de inleiding van het onderzoek weer, waarna in hoofdstuk twee wordt ingegaan op de methoden van het berekenen van de interferentie en de hierbij behorende uitgangspunten, varianten en scenario's. In hoofdstuk drie zijn de resultaten van de modelberekeningen weergegeven en daar waar nodig in meer detail toegelicht. In dit hoofdstuk vier zijn de gevolgen van onderlinge interferentie in het elektriciteitsverbruik, de kosten, de CO₂-emissie en het rendement omschreven, waarna in hoofdstuk vijf de conclusies zijn beschreven.

2

Methoden en uitgangspunten

2.1 Interactie open en gesloten bodemenergiesysteem

Wanneer een open en een gesloten systeem elkaar beïnvloeden, dan zal dit merkbaar zijn aan hogere of lagere temperaturen van het onttrokken grondwater (bij het open systeem) dan wel van het circulatiemedium (bij het gesloten systeem) ten opzichte van de situatie zonder beïnvloeding. Deze temperatuurveranderingen hebben op hun beurt consequenties voor de energieprestaties van beide systemen. Om de gevolgen van de interactie tussen open en gesloten systemen in beeld te kunnen brengen, is het daarom noodzakelijk om eerst de gevolgen van de eventuele interferentie voor de temperaturen vast te stellen.

In hoeverre sprake zal zijn van interferentie is afhankelijk van de situatie. De bodemwarmtewisselaars bevinden zich in alle bodemlagen tussen het maaiveld en de einddiepte van de bodemwarmtewisselaars. Het open systeem onttrekt en infiltreert alleen grondwater in het gebruikte watervoerende pakket (op de diepte van de bronfilters). Interactie tussen het open en het gesloten systeem kan alleen optreden in het dieptetraject van het watervoerende pakket waarin de bronfilters van het open systeem geplaatst zijn. Er zijn nu verschillende situaties mogelijk:

1) De systemen zijn verticaal van elkaar gescheiden

De warme en koude bellen van het open systeem bevinden zich op grotere diepte dan de einddiepte van de bodemwarmtewisselaars. In dit geval zullen beide systemen elkaar niet beïnvloeden.

2) De systemen (en invloedsgebieden) zijn horizontaal van elkaar gescheiden

De horizontale afstand tussen het open en het gesloten systeem is zodanig groot dat de systemen buiten elkaars invloedsgebied liggen. Er is daardoor geen sprake van interferentie.

3) De systemen liggen dicht bij elkaar en in hetzelfde dieptetraject

In dit geval is er mogelijk sprake van interferentie. Enerzijds kan sprake zijn van hydrologische beïnvloeding. Het gaat dan om de invloed van het open systeem op de grondwaterstroming in het watervoerende pakket, wat vervolgens van invloed is op de energieoverdracht en dus de temperaturen in de bodemwarmtewisselaars. Anderzijds kan sprake zijn van thermische beïnvloeding als de warme dan wel koude bel die is gevormd door één van beide systemen het andere systeem bereikt. Alleen in het laatste geval is het nodig/wenselijk om na te gaan of sprake is van interferentie en, als dat het geval is, wat daarvan de gevolgen zijn.

2.2 Berekeningsmodel

HSTWin-2D

Om de gevolgen van de interactie tussen open en gesloten systemen te kwantificeren, zijn verschillende scenario's doorgerekend met HSTWin-2D. Dit programma is speciaal ontwikkeld voor het berekenen van grondwaterstroming, warmtetransport en stoftransport in de ondergrond. Zowel open als gesloten systemen kunnen worden doorgerekend in situaties met en zonder grondwaterstroming. Uit de resultaten van de modelberekeningen volgen de temperaturen in de koude en warme bron van het open systeem en de temperatuur van het circulatiemedium in de bodemwarmtewisselaars.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een periode van 20 jaar, waarbij per jaar wordt uitgegaan van twee periodes van elk een half jaar. In deze twee perioden wordt de warmte en de koude gelijkmatig onttrokken en toegevoerd. In werkelijkheid zal sprake zijn van een variërende warmte-/koudelevering. Voor het open systeem heeft dit geen noemenswaardige consequenties voor de onttrekkingstemperaturen. Bij het gesloten systeem varieert de temperatuur in de bodemwarmtewisselaars als functie van de warmteflux. De werkelijke temperatuur in de bodemwarmtewisselaars fluctueert daardoor rond de berekende temperatuur. Aangenomen is dat de berekende temperaturen representatief is voor het gemiddelde. Op basis van deze gemiddelde temperaturen worden het elektriciteitsverbruik, de elektriciteitskosten, de CO₂ emissie en het rendement berekend.

Verticale verdeling van de warmteflux van de bodemwarmtewisselaars

De berekeningen zijn uitgevoerd voor de bodemlaag waarin zich de bronfilters van het open systeem bevinden (en een gedeelte van de bodemwarmtewisselaars). Aangezien het momenteel niet mogelijk is om de verdeling van de warmteflux over de diepte te laten uitrekenen door (de 3D-versie van) het model, is het noodzakelijk om deze verdeling vooraf in te schatten. Hiervoor is berekend welk deel van de warmte die door de bodemwarmtewisselaars wordt onttrokken, afkomstig is uit het watervoerende pakket waarin de bronfilters van het open systeem geplaatst zijn. Uit de resultaten van deze berekeningen is per scenario afgeleid welk deel van de totale warmteflux afkomstig is uit het watervoerende pakket, wat vervolgens is gebruikt als uitgangspunt voor de berekeningen.

2.3 Uitgangspunten ondergrond

Bodemopbouw

De bodemopbouw zoals deze in de berekeningen is aangehouden is weergegeven in Tabel 1 en bestaat uit een onverzadigde zone, een freatisch pakket, een scheidende laag, een watervoerend pakket en vervolgens nog een scheidende laag. Deze bodemopbouw is bijvoorbeeld vergelijkbaar met de situatie in Eindhoven.

Tabel 1
Schematisatie van de
bodemopbouw

diepte [m-mv]	lithologie	geohydrologische benaming	warmtegeleidings- coëfficiënt [W/(m.K)]
0 - 2	fijn zand	onverzadigde zone	1,0
2 - 15	fijn zand	freatisch watervoerend pakket	2,5
15 - 25	klei	scheidende laag	1,5
25 – 75	matig grof tot grof zand	eerste watervoerende pakket	2,5
75- 140	klei	eerste scheidende laag	1,5

Bodemtemperatuur

De initiële bodemtemperatuur is met name van belang voor het ontwerp van gesloten systemen. Gesloten systemen hebben in de praktijk vaak een netto warmtevraag aan de bodem op jaarbasis. Een belangrijk criterium is het voorkomen van bevrozing van de bodem rondom de bodemwarmtewisselaars. In dit onderzoek wordt uitgegaan van een gemiddelde temperatuur van de bodem van 10,5 °C.

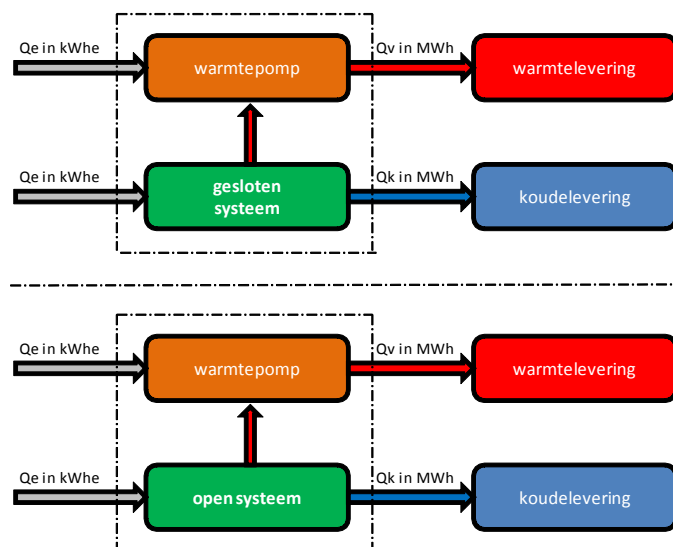
Grondwaterstroming

Bij het bepalen van het aantal bodemwarmtewisselaars, wordt veelal geen rekening gehouden met eventuele aanwezige regionale grondwaterstroming. Omdat de grondwaterstroming de temperatuurveranderingen in de bodemwarmtewisselaars beperkt (vooral op de langere termijn), kan het verwaarlozen van de grondwaterstroming bij het bepalen van het aantal bodemwarmtewisselaars een veilige aanname zijn. Hierbij is ook van belang dat de snelheid van de grondwaterstroming sterk kan verschillen per bodemlaag waarin de bodemwarmtewisselaar is aangebracht: in kleilagen is de grondwaterstroming verwaarloosbaar klein en in watervoerende pakketten met een hoge doorlatendheid kan de stroomsnelheid aanzienlijk zijn. In deze studie is aangenomen dat er geen grondwaterstroming is, met uitzondering van enkele scenario's waarin dat wel het geval is.

2.4 Systemconcepten en varianten open en gesloten systemen

Voor het bepalen van het verschil in het elektriciteitsverbruik, de CO₂ uitstoot en de energiekosten, zijn voor zowel het open als het gesloten bodemenergiesysteem systeemconcepten met systeemgrenzen (zie stippellijnen in Figuur 2) opgesteld. Deze systeemconcepten bestaan uit het bronsysteem (open of gesloten bodemenergiesysteem) en het opwekkingsysteem (warmtepomp). De energie die nodig is voor het distribueren van de warmte en koude naar de afgiftesystemen en voor de afgiftesystemen zelf, zijn in alle te vergelijken varianten gelijk aan elkaar en is zodoende buiten beschouwing gelaten in dit onderzoek. In de BOA systematiek (Bron, Opwekking en Afgifte) worden dus alleen de Bron en het Opwekkingsysteem beschouwd.

Figuur 2
Systeemconcepten met systeemgrenzen van een gesloten en een open systeem ter bepaling elektraverbruik, kosten en CO₂ uitstoot



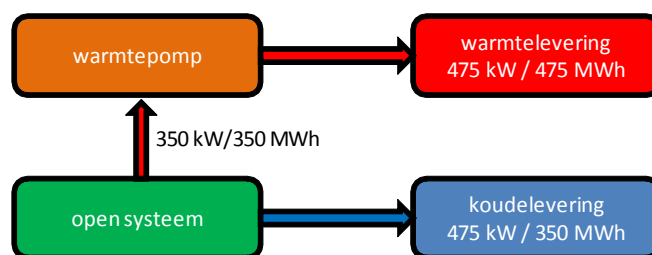
Varianten open systeem

Basisvariant

Het open systeem van de basisvariant bestaat uit één doublet met één koude en één warme bron (geen monobron) die grondwater onttrekken en infiltreren in het eerste watervoerende pakket. In de basisvariant wordt per zomer- en winterseizoen circa 350 MWh_t warmte en koude geleverd en wordt 50.000 m³ grondwater verpompt met een gemiddelde infiltratietemperatuur van 7°C in het winterseizoen en 14°C in het zomerseizoen.

Deze variant komt in de praktijk qua grootte overeen met een kantoorgebouw van orde grootte 6.000 m², waarbij de warmte wordt geleverd met een monovalent werkende warmtepompinstallatie (zonder aanvullende verwarming met bijvoorbeeld gasgestookte ketels) en ook de volledige koudevraag wordt geleverd met het open systeem.

*Figuur 3
Basisvariant open
systeem (kantoorge-
bouw van circa
6.000 m²)*



Kleine en grote variant open systeem

Er zijn ook varianten doorgerekend met een waterverpompings van 10.000 m³ per seizoen (klein open systeem) en 200.000 m³ per seizoen (groot open systeem). De hoeveelheid thermische energie die door het open systeem aan het verpompte grondwater wordt onttrokken dan wel wordt toegevoerd is op jaarbasis in balans en bedraagt circa 60 MWh_t per seizoen voor het kleine systeem en 1.500 MWh_t per seizoen voor het grote systeem. De kleine variant komt overeen met een kantoorgebouw van orde grootte 1.000 m². De grote variant is een kantoorgebouw met een oppervlak tussen 20.000 en 25.000 m².

Voor de drie varianten is aangenomen dat de bronfilters van de bronnen over de gehele dikte van het watervoerende pakket worden geplaatst. De afstand tussen de warme en de koude bron is bepaald aan de hand van de geldende ontwerprichtlijnen van Bodemener-

gieNL en bedraagt respectievelijk 30, 60 en 130 m. De uitgangspunten zijn samengevat in Tabel 2.

Tabel 2
Uitgangspunten
varianten open systemen

	verpompte waterhoeveelheid per seizoen [m ³]	aan het grondwater onttrokken/toegevoerde hoeveelheid energie [MWh _t]	afstand tussen koude en warme bron [m]
kleine variant	10.000	60	30
basisvariant	50.000	350	60
grote variant	200.000	1500	130

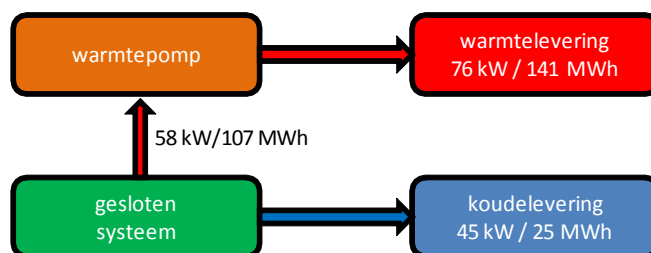
Varianten gesloten systeem

Basisvariant

De basisvariant van het gesloten systeem bestaat uit 36 bodemwarmtewisselaars tot een diepte van 100 m. De jaarlijkse energiehoeveelheid die met de warmtepomp aan de bodem wordt onttrokken, bedraagt 107 MWh_t. De jaarlijkse koudelevering met het gesloten systeem bedraagt 25 MWh_t.

Dit scenario komt in de praktijk qua grootte overeen met een kantoorgebouw van orde grootte 1.000 m², waarbij de warmte wordt geleverd met een bivalent werkende warmtepompinstallatie (met aanvullende verwarming door bijvoorbeeld gasgestookte ketels) en de volledige koudevraag wordt geleverd met het gesloten systeem (geen koeling met warmtepomp die werkt als koelmachine). Het bodemzijdig vermogen is kleiner dan 70 kWt. Dit houdt in dat het gesloten systeem wel meldingsplichtig maar niet vergunningsplichtig is in het kader van de AMvB Bodemenergie.

Figuur 4
Basisvariant gesloten systeem (kantoorgebouw van circa 1.000 m²)



Kleine en grote variant gesloten systeem

Ook voor het gesloten systeem is naast de basisvariant een klein en een groot systeem gedefinieerd. Het kleine systeem komt overeen met een systeem dat wordt toegepast bij een nieuwbouwwoning ter grootte van circa 125 m². Het grote systeem komt overeen met een kantoorgebouw met een grootte van circa 3.000 m². Het bodemzijdig vermogen bedraagt hierbij circa 200 kWt, waardoor voor het gesloten systeem een vergunning moet worden aangevraagd. De uitgangspunten van de drie varianten voor gesloten systemen zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3
Uitgangspunten
varianten gesloten
systemen

	jaarlijkse warmtevraag [MWh]	jaarlijkse koudevraag [MWh]	jaarlijkse netto warmtevraag [MWh]	diepte [m]	aantal
kleine variant	6,5	1,9	4,6	130	1
basisvariant	107	25	83	100	36
grote variant	241	182	60	80	81

Opgemerkt wordt dat voor het vaststellen van de varianten mede gebruik is gemaakt van de methode zoals omschreven in het onderzoek: "Methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten systemen (Groenholland, 2011)".

Voor alle scenario's zijn de bodemwarmtewisselaars in een vierkant geplaatst (1 x 1; 6 x 6; 9 x 9), met een onderlinge afstand van 6 m. Verder is aangenomen dat de temperatuur in alle bodemwarmtewisselaars op elk moment en op elke diepte gelijk is (conform de aannames die worden gemaakt in EED, een programma dat wordt gebruikt voor berekeningen aan gesloten (verticale) systemen.

2.5 Scenario's

Om de interactie tussen open en gesloten systemen in beeld te brengen zijn aan de drie open en drie gesloten varianten verschillende scenario's doorgerekend. Deze scenario's zijn in in deze paragraaf genummerd en beknopt omschreven. Tenzij anders aangegeven is gerekend zonder grondwaterstroming en heeft de warmtegeleidingscoëfficiënt van het zand in het watervoerend pakket een gemiddelde waarde. In Bijlage 1 zijn per scenario alle gegevens in meer detail omschreven.

De scenario's zijn als volgt beknopt omschreven:

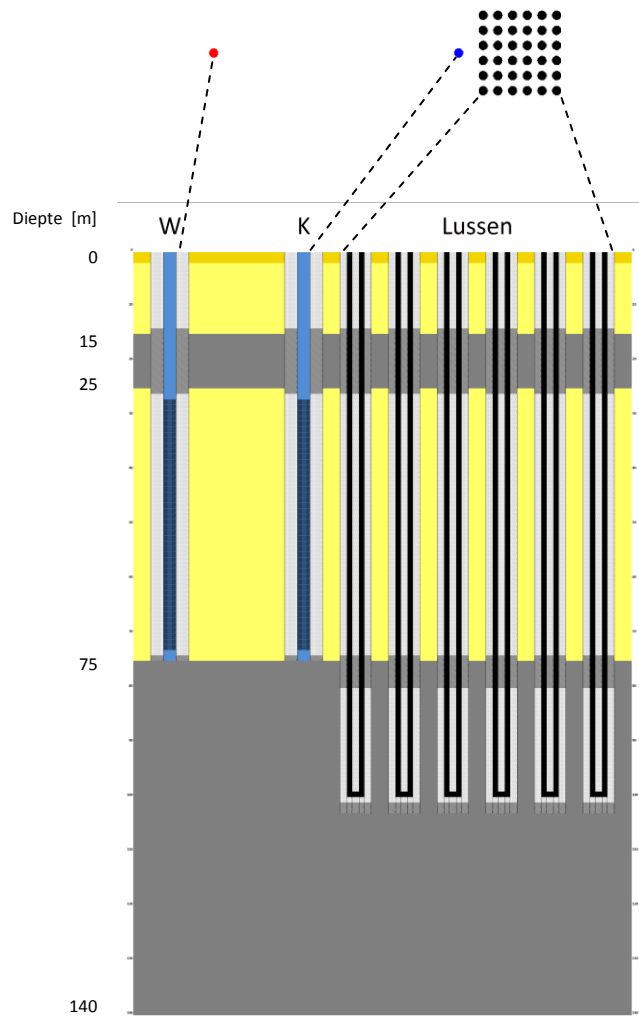
- 1a. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem.
- 1b. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de koude bron van de basisvariant van het open systeem (zie Figuur 5).
- 2a. De bodemwarmtewisselaar van het kleine gesloten systeem van één woning, ligt bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem.
- 2b. De bodemwarmtewisselaar van het kleine gesloten systeem van één woning, ligt bij de koude bron van de basisvariant van het open systeem.
- 3a. De 81 bodemwarmtewisselaars van de grote variant van het gesloten systeem liggen bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem.
- 3b. De 81 bodemwarmtewisselaars van de grote variant van het gesloten systeem liggen bij de koude bron van de basisvariant van het open systeem.
- 4a. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de warme bron van de grote variant van het open systeem.
- 4b. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de koude bron van de grote variant van het open systeem.
- 5a. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de warme bron van de kleine variant van het open systeem.
- 5b. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de koude bron van de kleine variant van het open systeem.
- 6a. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem. De warmtegeleidingscoëfficiënt van het watervoerend pakket is hierbij lager dan gemiddeld.
- 6b. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de koude bron van de basisvariant van het open systeem. De warmtegeleidingscoëfficiënt van het watervoerend pakket is hierbij lager dan gemiddeld.
- 7a. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem. De warmtegeleidingscoëfficiënt van het watervoerend pakket is hierbij hoger dan gemiddeld.
- 7b. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de koude bron van de basisvariant van het open systeem. De warmtegeleidingscoëfficiënt van het watervoerend pakket is hierbij hoger dan gemiddeld.
- 8a. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem. De snelheid van de grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket bedraagt hierbij 20 m

-
- per jaar.
- 8b. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de koude bron van de basisvariant van het open systeem. De snelheid van de grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket bedraagt hierbij 20 m per jaar.
 - 9a. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem. De snelheid van de grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket bedraagt hierbij 40 m per jaar.
 - 9b. De 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem liggen bij de koude bron van de basisvariant van het open systeem. De snelheid van de grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket bedraagt hierbij 40 m per jaar.

Om de temperaturen zonder beïnvloeding te kwantificeren zijn referentiescenario's doorge-rekend. Deze worden in dit onderzoek ook wel scenario 0 genoemd. De resultaten van scenario 1, 2, 3, 8 en 9 zijn van belang voor het bepalen van de invloed van het gesloten systeem op het open systeem. Scenario 1, 4, 5, 6, 7, 8 en 9 zijn van belang voor het bepa-len van de invloed van het open systeem op het gesloten systeem.

In Figuur 5 is de dwarsdoorsnede weergegeven van de opstelling van scenario 1b, waarbij de 36 bodemwarmtewisselaars van de basisvariant van het gesloten systeem bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem liggen. De kleinste afstand tussen een bron van het open systeem en één of meerdere bodemwarmtewisselaars van het gesloten sys-teem bedraagt 10 m. Bij een klein open systeem ligt het veld met bodemwarmtewisselaars aan de rand van het thermisch invloedsgebied van het open systeem en bij een groot open systeem volledig binnen het thermisch invloedsgebied.

*Figuur 5
Dwarsdoorsnede van
de configuratie van
de bronnen van het
open systeem en de
bodemwarmtewisse-
laars van het geslo-
ten systeem (scena-
rio 1b).*



2.6 Elektraverbruik en CO₂-emissie

Gevolgen van beïnvloeding op open systeem

Als uit de berekeningen volgt dat de temperatuur van het onttrokken grondwater uit de koude bron door beïnvloeding van het gesloten systeem hoger is dan zonder beïnvloeding, zal meer grondwater worden verpompt om dezelfde koudehoeveelheid te leveren. Dit zal resulteren in een hoger elektraverbruik van de bronpompen. Indien de temperatuur van het onttrokken grondwater uit de koude bron hoger wordt dan 10°C, wordt gesteld dat dan niet meer aan het ontwerpcriterium wordt voldaan. Er zal dan aanvullende koeling met de warmtepomp als koelmachine moeten plaatsvinden. Opgemerkt wordt dat deze situatie in de beschouwde scenario's niet optreedt.

Een hogere of lagere temperatuur van het grondwater dat wordt onttrokken uit de warme bron heeft gevolgen voor de te verpompen grondwaterhoeveelheid om eenzelfde energiehoeveelheid aan de warmtepomp te leveren. Een gewijzigde temperatuur uit de warme bron heeft geen invloed op de COP en dus het elektraverbruik van de warmtepomp. In alle varianten is de COP van de warmtepomp constant omdat de warmtepomp het grondwater altijd moet afkoelen alvorens dit grondwater met een temperatuur van 7°C in de koude bron wordt geïnfiltreerd.

Gevolgen van beïnvloeding op gesloten systeem

Als uit de berekeningen volgt dat de gemiddelde temperatuur van het circuliatiemedium in het gesloten systeem bij verwarming in de winter met beïnvloeding van het open systeem lager is dan zonder beïnvloeding, dan zal de COP van de warmtepomp lager zijn. Om dezelfde hoeveelheid warmte te leveren zal de warmtepomp met een lagere COP minder warmte aan de bodem onttrekken en dus meer elektriciteit verbruiken.

Als uit de berekeningen blijkt dat de gemiddelde temperatuur van het circuliatiemedium in het gesloten systeem bij koeling in de zomer met beïnvloeding van het open systeem hoger is dan zonder beïnvloeding, zal dit bij directe koudelevering geen gevolgen hebben in het elektraverbruik. Indien de gemiddelde temperatuur van het circuliatiemedium in het gesloten systeem op enig moment hoger wordt dan 13°C¹, dan zal aanvullende koeling met de warmtepomp als koelmachine plaats moeten vinden. Dit resulteert in een extra elektraver-

¹ Uitgangspunt is een aanvoertemperatuur van 18°C naar het afgiftesysteem in het gebouw en een temperatuurverschil over de scheidingswisselaar tussen het gesloten systeem en het gebouwssysteem van circa 2K. Een temperatuur van 18°C kan nog worden geleverd bij een temperatuur van het circuliatiemedium uit de bodem van circa 16°C tijdens *piekmomenten*. De *gemiddelde* circuliatiemediumtemperatuur bedraagt hierbij circa 13°C.

bruik in de warmtepomp als koelmachine. Opgemerkt wordt dat deze situatie voorkomt bij scenario 4a.

Een verschil in temperaturen ten gevolge van beïnvloeding geeft dus wijzigingen in het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp en van het gesloten systeem. Dit leidt vervolgens weer tot een wijziging in de CO₂-emissie en in de elektriciteitskosten. Opgemerkt wordt dat het uitgangspunt in dit onderzoek is dat het gesloten systeem wordt gerealiseerd zonder dat beïnvloeding van het open systeem wordt meegenomen. Als het gesloten systeem door thermische beïnvloeding kleiner zou kunnen worden gerealiseerd, kan dit tot problemen leiden indien de thermische beïnvloeding niet meer aanwezig is door bijvoorbeeld het buiten bedrijf stellen van het open systeem.

In het onderzoek naar de methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten systemen onderling² wordt gesproken over het “toegestane cumulatieve absolute temperatuureffect”. Als deze temperatuur groter is dan 1,5°C wordt gesproken over thermische interferentie tussen kleine gesloten systemen onderling. In dit onderzoek zal worden aangegeven of de wijziging in de gemiddelde temperatuur van het circuliatiemedium in het gesloten systeem kleiner of groter is dan de toegestane cumulatieve absolute temperatuureffect van 1,5°C.

De uitgangspunten voor de berekeningen aan het elektriciteitsverbruik, de CO₂ uitstoot en de kosten van het energiegebruik zijn opgenomen in Tabel 4.

Tabel 4
Kentallen t.b.v. de berekeningen

Elektraverbruik bronpompen	Wh _e / m ³	180
Elektraverbruik circulatiepomp gesloten systeem	kWh _e / kWh _t	0,01
Emissiefactor CO ₂ (2013) ³	kg / kWh _e	0,565
Rendement elektriciteitsopwekking ³	%	43
Kostenkental elektriciteit	€ / kWh _e	0,20

² Bron: Ministerie van I&M, 2011. Methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen. Rapport GHNL 011103.

³ Bron: Uniforme Maatlat voor de warmtevoorzieningen in de woning- en utiliteitsbouw, Agentschap NL, versie 3.1, d.d. 9 februari 2012

Bij de resultaten wordt de prestatie ook uitgedrukt in de Seasonal Performance Factor (SPF) in MWh_t/MWh_e en de Primary Energy Ratio (PER) in $MWh_t/MWh_{\text{primair}}$. De SPF is gelijk aan de geleverde hoeveelheid warmte met de warmtepomp en koude met het bodemenergiesysteem gedeeld door de daarvoor verbruikte hoeveelheid elektriciteit [MWh_e]. De PER is gelijk aan de geleverde hoeveelheid warmte met de warmtepomp en koude met het bodemenergiesysteem gedeeld door de daarvoor verbruikte hoeveelheid primaire energie [MWh_{primair}]. Dit komt overeen met de SPF vermenigvuldigd met het opwekkingsrendement van de verbruikte elektriciteit. De formules hiervoor zijn hieronder weergegeven.

$$SPF = \frac{(Q_{\text{koeling}} + Q_{\text{verwarming warmtepomp}})}{(Q_{\text{elektrisch bodemsysteem}} + Q_{\text{elektrisch warmtepomp}})}$$

$$PER = SPF \times \eta_{\text{elektr.}}$$

3

Modelberekeningen

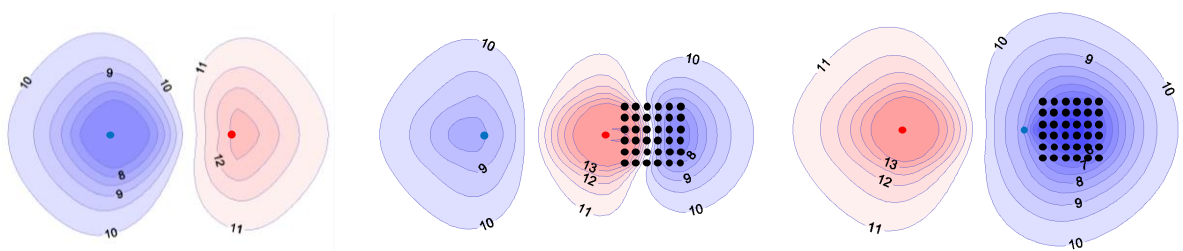
3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van scenario 1 volledig beschreven. Hierbij is zowel voor het open systeem als voor het gesloten systeem een vergelijking gemaakt met de situatie waarbij geen onderlinge beïnvloeding aanwezig is (scenario 0). Bij de andere scenario's is dezelfde methodiek gehanteerd. Om de omvang van het rapport te beperken zijn voor de overige scenario's alleen de eindresultaten opgenomen.

Scenario 1a bestaat uit een gesloten systeem met 36 bodemwarmtewisselaars (basisvariant) die liggen bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem. Scenario 1b bestaat uit een gesloten systeem met 36 bodemwarmtewisselaars (basisvariant) die liggen bij de koude bron van de basisvariant van het open systeem.

3.2 Open systeem

In Figuur 6 zijn voor het nulscenario en de scenario's 1a en 1b de berekende temperaturen in het watervoerende pakket weergegeven aan het einde van de zomer en het einde van de winter van het 20^e jaar.

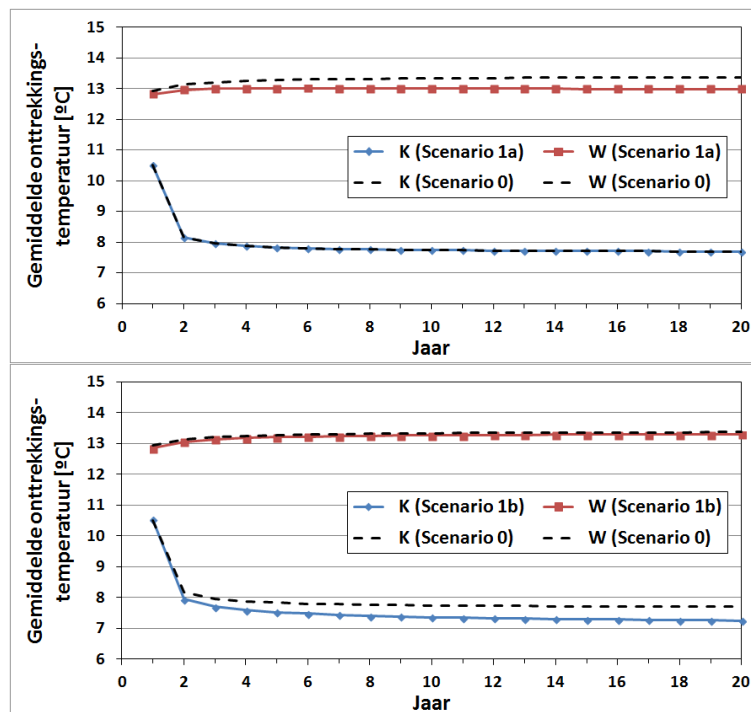


Figuur 6

Berekende temperatuur in het watervoerende pakket in het 20^e jaar aan het einde van de winter (boven) en aan het einde van de zomer (onder). Links = scenario 0; Midden = scenario 1a; Rechts = scenario 1b.

Om de effecten van de interferentie tussen het open en het gesloten systeem te bepalen zijn de gemiddelde temperaturen van het grondwater dat wordt onttrokken aan de warme en koude bron berekend en vergeleken. In Figuur 7 zijn de berekende gemiddelde onttrekkingstemperaturen van scenario 0, 1a en 1b uitgezet in grafieken, zodat een vergelijking mogelijk is tussen de temperaturen in de situatie met en zonder gesloten systeem.

Figuur 7 Berekende seizoensgemiddelde temperatuur van het grondwater onttrokken uit de warme en koude bron voor de scenario's 0 (stippellijnen), 1a (boven) en 1b (beneden).



Uit Figuur 7 wordt afgeleid dat in scenario 1a sprake is van een lichte afname van de gemiddelde onttrekkingstemperatuur uit de warme bron als gevolg van het gesloten systeem. Doordat de koude bron zich op relatief grote afstand van de bodemwarmtewisselaars bevindt, is de invloed op de koude bron te verwaarlozen. In scenario 1b daalt de gemiddelde onttrekkingstemperatuur bij de koude bron voor een periode van 20 jaar met ongeveer 0,3°C en is de invloed van de bodemwarmtewisselaars op de warme bron circa 0,1°C. Het berekende temperatuurverschil zal door de onnauwkeurigheid van de meetopnemers in het systeem (tolerantie) veelal niet meetbaar zijn.

Deze effecten op de temperatuur van het onttrokken water vormen de basis voor de berekeningen aan de gevolgen voor het elektriciteitsverbruik, de elektriciteitskosten, de CO₂-emissie en het rendement.

Voor de overige scenario's is een vergelijkbare analyse gemaakt. In tabel Tabel 5 zijn voor alle doorgerekende scenario's de gemiddelde onttrekkingstemperaturen voor de warme bron en de koude bron gepresenteerd over de doorgerekende 20 jaar, met daarbij de temperaturen in het bijbehorende nulscenario (zonder beïnvloeding) en het verschil. In bijlage 2 zijn de hierbij behorende temperatuurcontouren na 20 jaar in bedrijf weergegeven. Bijlage 3 geeft de temperatuurgrafieken over de periode van 20 jaar weer.

*Tabel 5
Berekende gemiddelde onttrekkings-temperatuur over de doorgerekende 20 jaar voor de koude en warme bron met en zonder beïnvloeding door het gesloten systeem.*

Scenario	gemiddelde onttrekkingstemperatuur koude bron			gemiddelde onttrekkingstemperatuur warme bron		
	zonder beïnvloeding	met beïnvloeding	invloed	zonder beïnvloeding	met beïnvloeding	invloed
1a	7,9	7,9	0,0	13,3	13,0	-0,3
1b	7,9	7,6	-0,3	13,3	13,2	-0,1
2a	7,9	7,9	0,0	13,3	13,3	0,0
2b	7,9	7,9	0,0	13,3	13,3	0,0
3a	7,9	7,9	0,0	13,3	13,1	-0,2
3b	7,9	7,7	-0,2	13,3	13,3	-0,1
8a	8,3	8,3	0,0	12,8	12,6	-0,2
8b	8,3	8,1	-0,2	12,8	12,8	-0,1
9a	8,8	8,8	0,0	12,2	12,1	-0,1
9b	8,8	8,6	-0,1	12,2	12,2	0,0

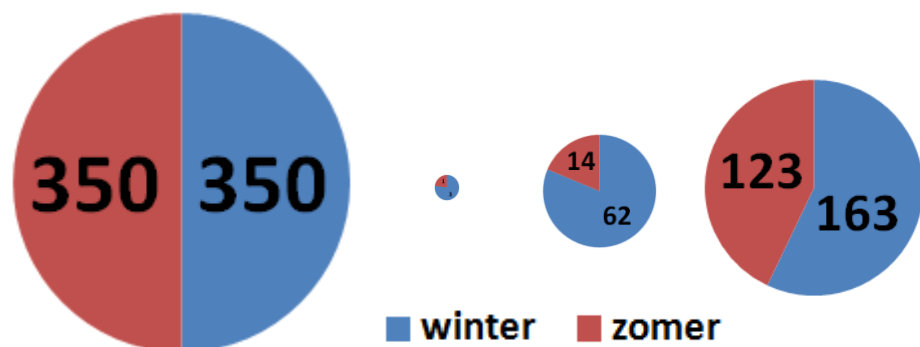
Uit Tabel 5 blijkt dat de invloed van het gesloten systeem op het open systeem in alle scenario's beperkt blijft tot maximaal 0,3°C. Ook hiervoor geldt dat het berekende temperatuurverschil door de onnauwkeurigheid van de meetopnemers in het systeem (tolerantie) veelal niet meetbaar zijn.

Het gemiddelde temperatuurverschil tussen het onttrokken en geïnfiltreerde water is in het referentiescenario ongeveer 6,2°C. In de "a-scenario's" (gesloten systeem bij de warme bron) betekent dit een beperkte afname van de geleverde hoeveelheid energie. Dit tekort wordt gecompenseerd door meer grondwater te verpompen.

De beperkte invloed van het gesloten systeem op het open systeem wordt verklaard door het verschil in de onttrokken/toegevoerde hoeveelheden energie (zie Figuur 8). Het open systeem onttrekt in het basisscenario per seizoen ongeveer 350 MWh_t aan thermische energie aan het watervoerende pakket. Hierbij wordt in de winter warmte onttrokken (=

koude toegevoerd) en in de zomer warmte toegevoerd (= koude onttrokken). Voor de invloed van het gesloten systeem op het open systeem is vooral de netto warmteonttrekking uit het watervoerende pakket op jaarbasis van belang. Bij de middelgrote variant van het gesloten systeem is dat 48 MWh_t, wat ten opzichte van het open systeem overeen komt met ongeveer 14%. Bij de kleine variant van het gesloten systeem gaat het om 2 MWh_t, ofwel 0,6%. Bij de grote variant betreft het 40 MWh (163 MWh_t warmte en 123 MWh_t koude) wat gelijk is aan 12%.

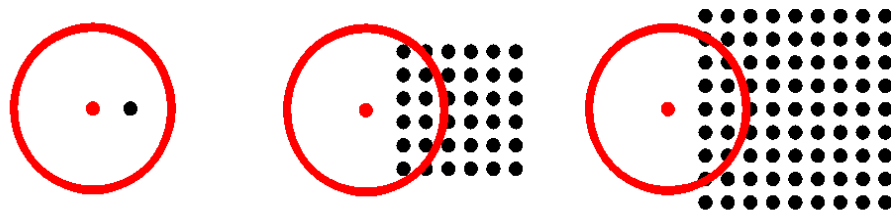
*Figuur 8
Energiehoeveelheden [MWh]
die per seizoen worden ont-
trokken/toegevoerd in het
watervoerende pakket. Van
links naar rechts de basisvari-
ant open systeem en de kleine,
basis- en grote variant van het
gesloten systeem.*



Invloed grootte gesloten systeem

De invloed van het gesloten systeem is het grootst in scenario 1. In scenario 2 is de invloed verwaarloosbaar doordat het gesloten systeem, bestaande uit één bodemwarmtewisselaar, klein is. Opvallend is dat de invloed van het grote gesloten systeem (scenario 3) kleiner is dan van de basisvariant van het gesloten systeem (scenario 1). Hiervoor zijn twee verklarende factoren, namelijk (1) de netto warmteonttrekking op jaarbasis is bij de basisvariant van het gesloten systeem (48 MWh_t) is groter dan bij de grote variant van het gesloten systeem (40 MWh_t) en (2) bij het grote gesloten systeem ligt slechts een deel van de bodemwarmtewisselaars binnen de thermische straal van het open systeem.

*Figuur 9
Posities van de
bodemwarmtewisselaars in de kleine
variant (links), basis-
variant (midden) en
grote variant (rechts)
van het gesloten
systeem ten opzichte
van de thermische
straal van de bron
van de basisvariant
van het open systeem*



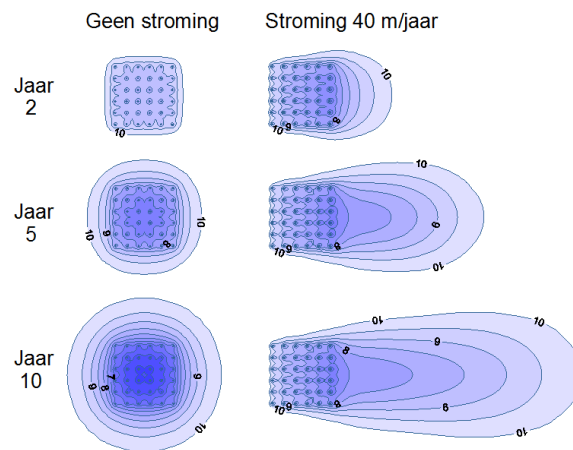
Bij de kleine variant van het gesloten systeem ligt de bodemwarmtewisselaar binnen de intrekzone van de naastgelegen bron van het open systeem. Bij de basisvariant en de grote variant ligt slechts een deel van de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem binnen de intrekzone van de naastgelegen bron van het open systeem, waardoor slechts een deel van de totale onbalans van het gesloten systeem van invloed is op het open systeem. Niet alleen de grootte van het gesloten systeem is dus van belang, maar ook de mate van energiebalans en de posities van de bodemwarmtewisselaars ten opzichte van de open bronnen.

Invloed grondwaterstroming

Uit Tabel 5 blijkt dat de gemiddelde temperatuur van het grondwater dat wordt onttrokken aan de koude en warme bron nadelig wordt beïnvloed door de grondwaterstroming. Hoe hoger de snelheid van de grondwaterstroming, hoe groter het aandeel van de opgeslagen warmte en koude dat verloren gaat. Dat betekent dat de gemiddelde onttrekkingstemperatuur bij een hogere grondwaterstroming dichterbij de natuurlijke grondwatertemperatuur zal liggen dan in dezelfde situatie zonder grondwaterstroming.

Ook de invloed van het gesloten systeem op het open systeem blijkt af te nemen bij een toename van de grondwaterstroming. Door de grondwaterstroming ontstaat ter plaatse van de bodemwarmtewisselaars namelijk al snel een “stabiele eindsituatie”. In deze stabiele eindsituatie is de netto hoeveelheid koude die jaarlijkse aan het grondwater wordt toegevoerd gelijk aan de hoeveelheid koude die wordt afgevoerd door de grondwaterstroming. Alleen in de stroomafwaartse richting neemt het thermisch invloedsgebied dan nog toe (en dus niet in de richting van de bronnen van het open systeem).

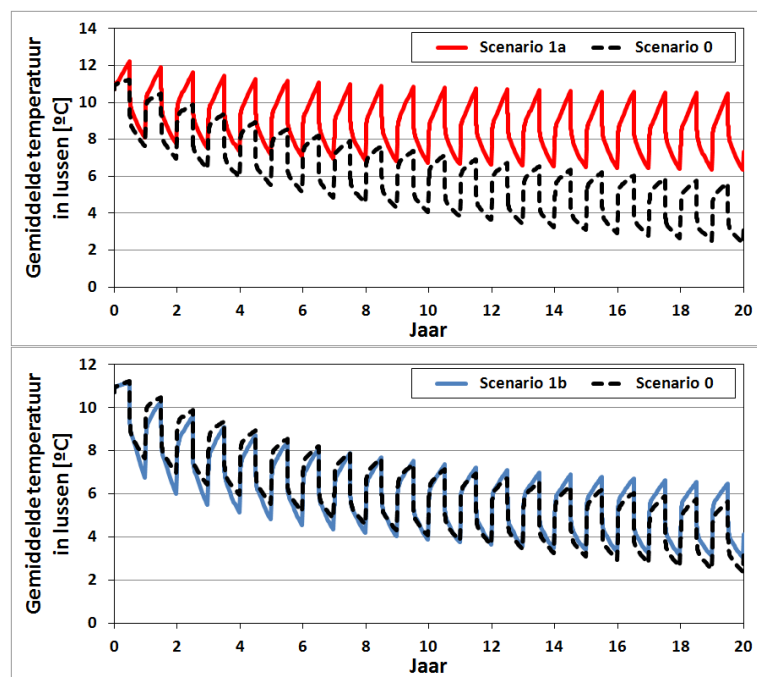
Figuur 10
Berekende bodem-
temperaturen op de
diepte van het water-
voerende pakket met
en zonder grondwa-
terstroming voor de
basisvariant gesloten
systeem.



3.3 Gesloten systeem

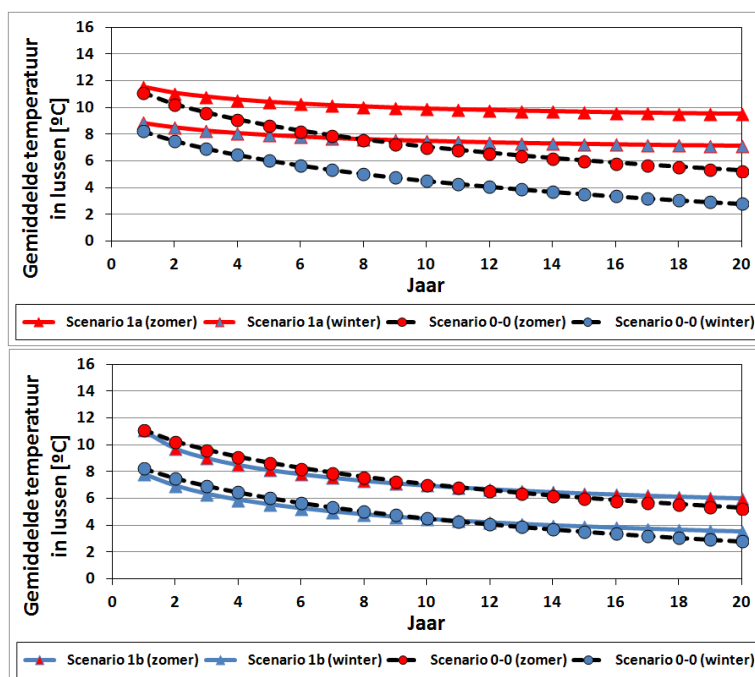
Net als voor het open systeem, zijn voor het gesloten systeem de temperaturen in de bodemwarmtewisselaars berekend en is alleen scenario 1 uitgebreid beschreven. Figuur 11 toont het berekende verloop van de temperatuur in de bodemwarmtewisselaars. Deze temperatuur is in het winterseizoen van belang in verband met het rendement van de warmtepomp (hoe hoger de temperatuur, hoe hoger het rendement van de warmtepomp) en in het zomerseizoen voor de mogelijkheid om direct te koelen (bij een te hoge temperatuur moet de warmtepomp worden ingezet als koelmachine). Opgemerkt moet worden dat gerekend is met de seizoensgemiddelde warmteflux. De temperatuurveranderingen zullen bij het piekvermogen groter zijn en bij een relatief laag vermogen kleiner. Hiermee wordt bij de berekeningen van het energieverbruik rekening gehouden.

*Figuur 11
Temperatuur verloop
in de bodemwarmte-
wisselaars in de
scenario's 1a (boven)
en 1b (onder) in
vergelijking met de
situatie zonder open
systeem (stippelij-
nen).*



Om de resultaten beter inzichtelijk te maken, zijn ook de seizoensgemiddelde temperaturen in de bodemwarmtewisselaars berekend voor de verschillende scenario's en vergeleken met het bijbehorende nulscenario. Figuur 12 toont de resultaten voor scenario 1 (a en b) in grafiekvorm.

Figuur 12
Berekende seizoensgemiddelde temperatuur in de bodemwarmtewisselaars in de scenario's 1a (boven) en 1b (onder) in vergelijking met de situatie zonder open systeem (stippellijnen).



Uit zowel Figuur 11 als Figuur 12 blijkt dat de temperatuur in de bodemwarmtewisselaars in scenario 1a aanmerkelijk hoger ligt dan in het nulscenario, door de invloed van de warme bel van het open systeem. In scenario 1b liggen de bodemwarmtewisselaars naast de koude bron en is de invloed van het open systeem beperkt. Blijkbaar heffen de nadelige invloed van de lagere bodemtemperatuur onder invloed van de koude bel en het positieve effect van de veroorzaakte grondwaterstroming elkaar grotendeels op. De resultaten kunnen nog verder worden vereenvoudigd door de gemiddelde temperaturen over de gehele doorgerekende periode van 20 jaar te bepalen. In Tabel 6 zijn de resultaten voor alle scenario's op deze manier inzichtelijk gemaakt. In bijlage 2 zijn de hierbij behorende temperatuurcontouren na 20 jaar in bedrijf weergegeven. Bijlage 3 geeft de temperatuurgrafieken over de periode van 20 jaar weer.

Tabel 6
Berekende gemiddelde vloeistoftemperatuur over de door-gerekende 20 jaar voor het zomerseizoen en het winterseizoen met en zonder beïnvloeding door het open systeem. Het verschil geeft de invloed van het open systeem weer.

scenario	gemiddelde vloeistoftemperatuur zomer [°C]			gemiddelde vloeistoftemperatuur winter [°C]		
	zonder beïnvloeding	met beïnvloeding	invloed	zonder beïnvloeding	met beïnvloeding	invloed
1a	7,33	10,08	2,76	4,76	7,62	2,86
1b	7,33	7,34	0,01	4,76	4,78	0,02
4a	7,33	13,75	6,43	4,76	10,93	6,17
4b	7,33	7,34	0,01	4,76	4,43	-0,33
5a	7,33	8,03	0,71	4,76	5,55	0,79
5b	7,33	7,34	0,01	4,76	4,43	-0,33
6a	7,01	9,92	2,91	4,12	7,19	3,06
6b	7,01	7,15	0,13	4,12	4,28	0,15
7a	7,58	10,24	2,66	5,24	7,96	2,72
7b	7,58	7,45	-0,13	5,24	5,07	-0,17
8a	9,48	10,57	1,09	6,66	7,77	1,11
8b	9,48	9,01	-0,47	6,66	6,16	-0,50
9a	10,20	10,86	0,66	7,23	7,86	0,63
9b	10,20	9,80	-0,40	7,23	6,79	-0,44

In de scenario's waarin de bodemwarmtewisselaars naast de warme bron zijn geplaatst ("a-scenario's") ligt de gemiddelde temperatuur in de bodemwarmtewisselaars zowel in de winter als in de zomer hoger dan in de situatie zonder beïnvloeding, waarbij in scenario 1a, 4a, 6a en 7a het cumulatieve absolute temperatuureffect groter dan 1,5°C. Daar de gemiddelde temperaturen met beïnvloeding hoger zijn dan zonder beïnvloeding, wordt gesproken over positieve beïnvloeding. Opgemerkt wordt nog dat de opwarming groter is bij een groot open systeem (scenario 4a) en kleiner is bij een klein open systeem (scenario 5a).

Een wijziging in de warmtegeleidingcoëfficiënt (scenario's 6 en 7) heeft nauwelijks invloed op de interferentie. Uit een vergelijking van de resultaten van de scenario's 1, 8 en 9 blijkt dat de invloed van het open systeem op het gesloten systeem afneemt bij een toename van de snelheid van de grondwaterstroming. Het invloedsgebied van het open systeem strekt zich namelijk vooral uit in de richting van de grondwaterstroming en in de door-gerekende scenario's liggen de bodemwarmtewisselaars niet stroomafwaarts van de bronnen van het open systeem.

In de scenario's waarin de bodemwarmtewisselaars naast de koude bron zijn geplaatst ("b-scenario's") is gelijktijdig sprake van een nadelige invloed (lagere achtergrondtemperatuur door de ligging in de koude bel) en een positieve invloed (toename van de snelheid van de grondwaterstroming). In de meeste scenario's is de invloed op de gemiddelde temperatuur in de bodemwarmtewisselaars daardoor beperkt (kleiner dan 1,5°C). Alleen in scenario 8b en 9b is de temperatuur zowel in het winterseizoen als in het zomerseizoen wat lager, waarschijnlijk omdat er in die scenario's ook zonder open systeem al sprake is van grondwaterstroming: de toename van de dynamiek van het grondwater onder invloed van het open systeem levert dan minder voordeel op.

4

Energieverbruik en rendement

4.1 Inleiding

Op basis van de resultaten van de modelberekeningen in hoofdstuk 3, is het elektriciteitsverbruik van de warmteopwekking met de warmtepomp en het bodemenergiesysteem berekend zonder en met onderlinge beïnvloeding van de open en gesloten systemen. Een gewijzigd elektriciteitsverbruik resulteert in gewijzigde kosten van het elektriciteitsverbruik en de emissie van CO₂. Omdat meer of minder elektriciteit nodig is om dezelfde warmte- en koudehoeveelheden te leveren, zal de seasonal performance factor (SPF) en de primary energy ratio (PER) ook wijzigen.

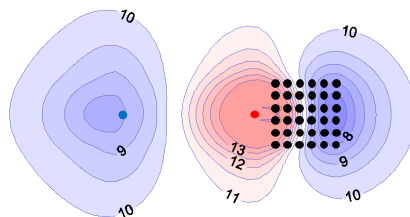
Voor alle scenario's zijn bovenstaande grootheden berekend. In dit hoofdstuk zullen in detail de resultaten van scenario worden uitgelegd. Scenario 1a bestaat uit een gesloten systeem met 36 bodemwarmtewisselaars (basisvariant) die liggen bij de warme bron van de basisvariant van het open systeem. Scenario 1b bestaat uit een gesloten systeem met 36 bodemwarmtewisselaars (basisvariant) die liggen bij de koude bron van de basisvariant van het open systeem. De resultaten voor de overige scenario's zijn in samenvattende tabellen opgenomen.

4.2 Open systeem

Scenario 1a

Ten gevolge van de beïnvloeding van de bodemwarmtewisselaars, die liggen nabij de warme bron van het open systeem (scenario 1a), is de gemiddelde temperatuur van het grondwater dat wordt onttrokken uit de warme bron geen 13,3°C maar 13,0°C. Daar de infiltratietemperatuur in de koude bron te allen tijde constant is (7°C), betekent deze hogere

Figuur 13
Bodemwarmtewisselaars nabij warme bron



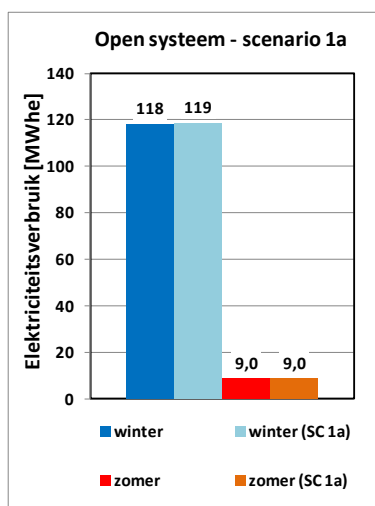
gemiddelde onttrekkingstemperatuur dat het temperatuurverschil tussen het onttrokken en het geïnfiltreerde water afneemt. Om dezelfde energiehoeveelheid van 365 MWh_t aan de

verdamer van de warmtepomp te leveren zal de te verpompen grondwaterhoeveelheid toenemen met ongeveer 4%. De COP van de warmtepomp zal ten gevolge van de ongewijzigde infiltratietemperatuur in de koude bron niet veranderen (zie toelichting in paragraaf 2.6).

Uit de modelberekening volgt dat de gemiddelde onttrekkingstemperatuur van 7,9°C uit de koude bron niet wordt beïnvloed door het gesloten systeem. Hieruit volgt dat de toename in het elektriciteitsverbruik, de elektriciteitskosten en de CO₂-emissie volledig veroorzaakt wordt door de invloed van het gesloten systeem op de temperatuur in de warme bron van het open systeem.

Over het gehele jaar gezien, neemt het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp en het open systeem in deze situatie toe met 0,35% van 127,2 MWh_e (€ 25.440,-) naar 127,7 MWh_e (€ 25.530,-). De toename in CO₂-emissie bedraagt eveneens 0,35%, wat overeen komt met circa 250 kg per jaar. De beperkte toename in het elektraverbruik leidt niet tot een significante daling van de SPF en PER. Deze zijn en blijven 6,5 respectievelijk 2,8.

Figuur 14
Elektraverbruik open
systeem – scenario
1a

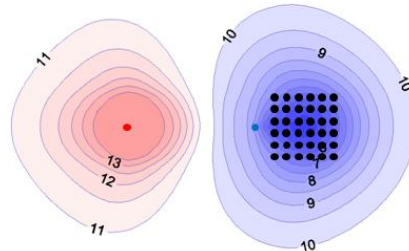


Geconcludeerd wordt dat met deze grootte van het open en gesloten systeem en waarbij de bodemwarmtewisselaars nabij de warme bron van het open systeem liggen, het open systeem zeer beperkt negatief wordt beïnvloed door het gesloten systeem.

Scenario 1b

Bij dit scenario, waarbij de bodemwarmtewisselaars nabij de koude bron van het open systeem liggen, is de gemiddelde temperatuur van het grondwater dat wordt onttrokken uit de warme bron 13,2°C in plaats van 13,3°C. Dit is een klein negatief effect dat resulteert in een beperkte toename van de te verpompen hoeveelheid water in het winterseizoen (en dus ook van het bijbehorende elektriciteitsverbruik). De gemiddelde temperatuur van het grondwater dat wordt onttrokken uit de koude bron neemt af van 7,9°C naar 7,6°C. Dit is dus een positief effect, dat resulteert in een beperkte afname van de te verpompen hoeveelheid water in het zomerseizoen (en dus ook van het bijbehorende elektriciteitsverbruik).

*Figuur 15
Bodemwarmtewisselaars nabij koude bron*



Bovenstaande resulteert op jaarbasis in een netto afname van het elektriciteitsverbruik met 0,2%. Over het gehele jaar gezien, neemt het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp en het open systeem af van 127,2 MWh_e (€ 25.440,-) naar 126,9 MWh_e (€ 25.368,-). De reductie in CO₂-emissie bedraagt eveneens 0,2%, wat overeen komt met circa 150 kg per jaar. De beperkte afname in het elektraverbruik leidt niet tot een significante stijging van de SPF en PER. Deze zijn en blijven 6,5 respectievelijk 2,8.

Geconcludeerd wordt dat met deze grootte van het open en gesloten systeem en waarbij de bodemwarmtewisselaars nabij de koude bron van het open systeem liggen, het open systeem zeer beperkt positief wordt beïnvloed door het gesloten systeem.

Alle scenario's

In Tabel 7 zijn voor alle relevante scenario's de grootheden van het open systeem zonder en met thermische beïnvloeding door het gesloten systeem weergegeven.

scenario	zonder beïnvloeding door gesloten systeem					met beïnvloeding door gesloten systeem					ΔQe %
	Qe [MWh _e]	kosten [€]	CO ₂ [ton/jaar]	SPF	PER	Qe [MWh _e]	kosten [€]	CO ₂ [ton/jaar]	SPF	PER	
1a	127,2	25.440	71,9	6,5	2,8	127,7	25.530	72,1	6,5	2,8	+ 0,4
1b	127,2	25.440	71,9	6,5	2,8	126,9	25.386	71,7	6,5	2,8	- 0,2
2a	127,2	25.440	71,9	6,5	2,8	127,2	25.440	71,9	6,5	2,8	0
2b	127,2	25.440	71,9	6,5	2,8	127,2	25.440	71,9	6,5	2,8	0
3a	127,2	25.440	71,9	6,5	2,8	127,5	25.500	72,0	6,5	2,8	+ 0,2
3b	127,2	25.440	71,9	6,5	2,8	126,9	28.383	71,7	6,5	2,8	- 0,2
8a	127,3	25.460	71,9	6,3	2,7	127,6	25.530	72,1	6,3	2,7	+ 0,3
8b	127,3	25.460	71,9	6,3	2,7	127,0	25.399	71,8	6,3	2,7	- 0,2
9a	128,0	25.590	72,3	6,0	2,6	128,2	25.640	72,4	6,0	2,6	+ 0,2
9b	128,0	25.590	72,3	6,0	2,6	127,6	25.523	72,1	6,0	2,6	- 0,3

Tabel 7

Overzicht resultaten
open systeem

Uit de resultaten worden de volgende conclusies getrokken:

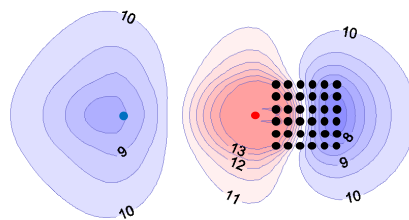
- Bij alle scenario's is de negatieve beïnvloeding (toename van het energieverbruik en de daaraan gekoppelde elektriciteitskosten, CO₂-emissie, SPF en PER) altijd kleiner dan 0,4%. Het open systeem wordt beperkt negatief beïnvloed als het gesloten systeem in de nabijheid van de warme bron ligt.
- De positieve beïnvloeding is altijd kleiner dan 0,3%. Een positieve beïnvloeding vindt plaats als het gesloten systeem in de nabijheid van de koude bron ligt.
- Geconcludeerd wordt dat een gesloten systeem (in de scenario's die in dit onderzoek zijn uitgewerkt) geen significant effect heeft op het energieverbruik en het rendement van het open systeem.
- Het plaatsen van één bodemwarmtewisselaar nabij een koude of warme bron (scenario 2a en 2b) heeft geen invloed op het energetisch functioneren van het open systeem.

4.3 Gesloten systeem

Scenario 1a

De invloed van het open systeem op de 36 bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem is een toename van gemiddelde temperatuur van het circuliatiemedium van 2,9°C in de winter bij verwarming en 2,8°C in de zomer bij koeling.

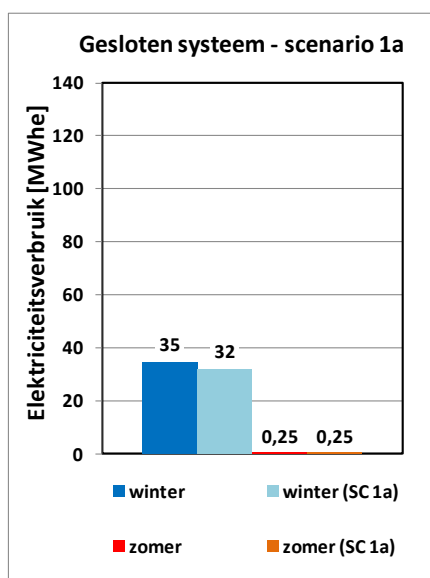
Figuur 16
Warme bron nabij
bodemwarmtewisselaars



De hogere temperatuur in de winter heeft een hogere temperatuur van de verdamper van de warmtepomp tot gevolg en zorgt dus voor een hogere gemiddelde COP. Om eenzelfde hoeveelheid warmte met de warmtepomp te leveren, wordt in deze situatie minder elektriciteit verbruikt door de warmtepomp en wordt meer energie onttrokken aan de bodem. In de zomer is de gemiddelde temperatuur van het circuliatiemedium nog voldoende laag om de koudevraag volledig te leveren met directe koeling door het gesloten systeem. Aanvullende koeling met de warmtepomp als koelmachine is hierbij niet nodig.

Het plaatsen van de bodemwarmtewisselaars nabij de warme bron heeft op jaarbasis een positief effect dat resulteert in een netto afname van het energiegebruik. Het jaarlijkse elektriciteitsverbruik van de warmtepomp en het gesloten systeem neemt af van 34,8 MWh_e (€ 6.970,-) naar 32,5 MWh_e (€ 6.500,-), wat overeen komt met een daling met 6,7%. De reductie in CO₂-emissie bedraagt eveneens 6,7%, ofwel circa 1.300 kg per jaar. De afname in het elektraverbruik van 6,7% leidt tot een stijging van de SPF (van 4,8 naar 5,1) en de PER (van 2,0 naar 2,2).

Figuur 17
Elektriciteitsverbruik
gesloten systeem –
scenario 1a

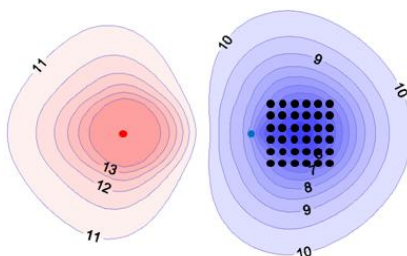


Geconcludeerd wordt dat met deze grootte van het open en gesloten systeem en waarbij de bodemwarmtewisselaars nabij de warme bron van het open systeem liggen, het rendement van de warmtepomp en het gesloten systeem positief wordt beïnvloed door het open systeem.

Scenario 1b

De invloed van het open systeem met de 36 bodemwarmtewisselaars op het gesloten systeem nabij de koude bron, heeft geen gevolgen voor de gemiddelde temperaturen van het circuliemedium in het gesloten systeem. Het elektraverbruik van de warmtepomp en van het gesloten systeem is dus identiek aan de situatie dat er geen open systeem in de omgeving aanwezig is.

Figuur 18
Koude bron nabij
bodemwarmtewisselaars



Geconcludeerd wordt dat met deze grootte van het open en gesloten systeem en waarbij de bodemwarmtewisselaars nabij de koude bron van het open systeem liggen, het rendement van de warmtepomp en het gesloten systeem nagenoeg niet wordt beïnvloed door het open systeem.

Alle scenario's

In Tabel 8 zijn voor alle relevante scenario's de grootheden van het gesloten systeem zonder en met thermische beïnvloeding door het open systeem weergegeven.

scenario	zonder beïnvloeding door open systeem					met beïnvloeding door open systeem					ΔQ_e %
	Q_e [MWh _e]	kosten [€]	CO ₂ [ton/jaar]	SPF	PER	Q_e [MWh _e]	kosten [€]	CO ₂ [ton/jaar]	SPF	PER	
1a	34,8	6.970	19,7	4,8	2,0	32,5	6.500	18,4	5,1	2,2	- 6,7
1b	34,8	6.970	19,7	4,8	2,0	34,8	6.970	19,7	4,8	2,0	0
4a	34,8	6.970	19,7	4,8	2,0	37,3	7.450	21,1	4,4	1,9	+7,0
4b	34,8	6.970	19,7	4,8	2,0	35,1	7.020	19,8	4,7	2,0	+0,8
5a	34,8	6.970	19,7	4,8	2,0	34,2	6.830	19,3	4,9	2,1	-1,9
5b	34,8	6.970	19,7	4,8	2,0	35,1	7.020	19,8	4,7	2,0	+0,8
6a	35,6	7.120	20,1	4,7	2,0	33,0	6.600	188,6	5,0	2,2	-7,3
6b	35,6	7.120	20,1	4,7	2,0	35,4	7.090	20,0	4,7	2,0	-0,4
7a	34,3	6.860	19,4	4,8	2,1	32,1	6.420	18,1	5,1	2,2	-6,3
7b	34,3	6.860	19,4	4,8	2,1	34,4	6.890	19,5	4,8	2,1	+0,4
8a	32,8	6.550	18,5	5,0	2,1	31,9	6.380	18,0	5,1	2,2	-2,6
8b	32,8	6.550	18,5	5,0	2,1	33,2	6.630	18,7	4,9	2,1	+1,2
9a	32,2	6.440	18,2	5,1	2,2	31,7	6.340	19,9	5,1	2,2	-1,5
9b	32,2	6.440	18,2	5,1	2,2	32,5	6.510	18,4	5,0	2,2	+1,0

Tabel 8
Overzicht resultaten
gesloten systeem

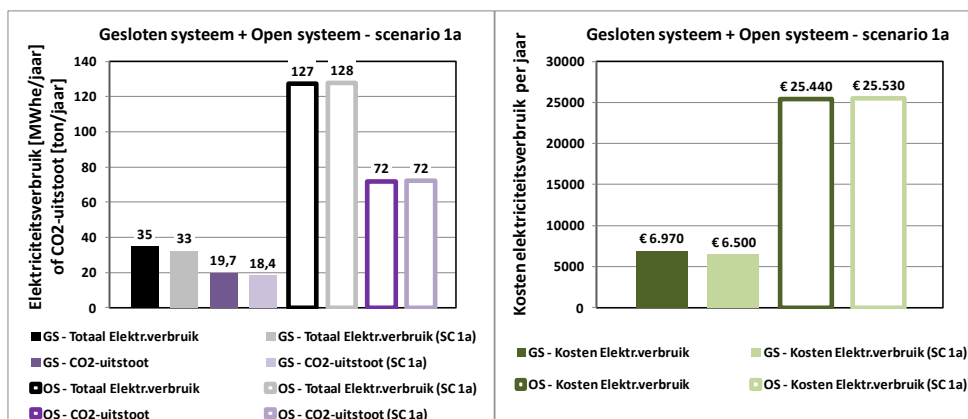
Uit de resultaten worden de volgende conclusies getrokken:

- De invloed van het open systeem op het energieverbruik (en de daaraan gekoppelde kosten, CO₂-emissies, SPF en PER) van het gesloten systeem kan zowel positief als negatief zijn en bedraagt maximaal circa 8% ten opzichte van de situatie zonder open systeem.
- Het rendement van de warmtepomp met het gesloten systeem wordt positief beïnvloed indien de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem nabij de warme bron liggen van het open systeem. Dit wordt veroorzaakt door de hogere temperatuur van de circulatievloeistof in de winter, wat een hogere COP van de warmtepomp en dus een lager elektriciteitsverbruik van de warmtepomp tot gevolg heeft.
- Indien de temperatuur van het circuliatiemedium in het gesloten systeem niet te hoog wordt, kan in de zomer nog directe koeling plaatsvinden. Bij scenario 4a is directe koeling niet meer mogelijk, waardoor de warmtepomp als koelmachine moet functioneren en de condensorwarmte wordt afgevoerd aan de bodem met het gesloten systeem. Dit feit zorgt voor een netto stijging van het elektriciteitsverbruik en dus een netto afname van de SPF en PER.
- Het rendement van de warmtepomp met het gesloten systeem wordt beperkt negatief beïnvloed indien de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem nabij de koude bron liggen van het open systeem. Dit wordt veroorzaakt door de lagere temperatuur van de circulatievloeistof in de winter, wat een lagere COP van de warmtepomp en een hoger elektriciteitsverbruik van de warmtepomp tot gevolg heeft.
- Geconcludeerd wordt dat een open systeem (zoals deze in dit onderzoek zijn uitgewerkt) een effect kan hebben van maximaal 8% op het energieverbruik en het rendement van een gesloten systeem.
- De invloed van het open systeem op het gesloten systeem hangt sterk af van de grootte van het open systeem. Bij een klein open systeem (scenario 5a en 5b) is de invloed maximaal 1,9%. Bij een groot open systeem (scenario 4a en b) is de invloed maximaal 7%. Ook is belangrijk of het gesloten systeem bij de warme bron of bij de koude bron van het open systeem ligt.

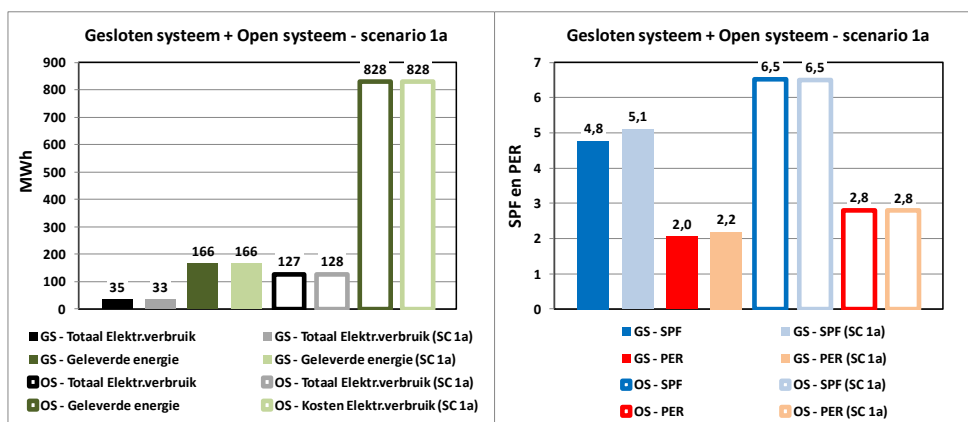
Open en gesloten systeem

In Figuur 19 zijn het elektraverbruik, de CO₂ emissie, de kosten van het elektriciteitsverbruik voor de referentie en scenario 1a weergegeven. De gesloten staven betreffen het gesloten systeem. De open staven gaan over het open systeem. Figuur 20 geeft het elektraverbruik én de totaal geleverde koude en warmte met de warmtepomp in combinatie met het gesloten systeem voor de referentie en variant 1a. Tevens zijn hiervan de SPF en de PER in de rechter figuur weergegeven

Figuur 19
Samenvattende figuren elektriciteitsverbruik, CO₂-emissie en kosten



Figuur 20
Samenvattende figuren elektriciteitsverbruik, SPF en PER



5

Conclusies

Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen die in dit onderzoek zijn beantwoord, luiden als volgt:

- Hoe groot is de onderlinge thermische beïnvloeding tussen open en gesloten systemen en van welke factoren is de grootte van de onderlinge beïnvloeding afhankelijk?
- Wat zijn de gevolgen van de onderlinge thermische beïnvloeding op het jaarlijks elektriciteitsverbruik, de elektriciteitskosten, de jaarlijkse CO₂-emissie en het rendement van de warmte- en koudelevering met het bodemenergiesysteem in combinatie met de warmtepomp?

De antwoorden op de onderzoeksvragen zijn beschreven in dit hoofdstuk en vormen de conclusies voor dit onderzoek.

Wanneer is er mogelijk sprake van interferentie?

- Als het grondwater van het open systeem wordt onttrokken en wordt geïnfiltreerd op eenzelfde diepte waar zich de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem bevinden. Ofwel er zit een overlap in het dieptetraject.
- Als het open systeem en het gesloten systeem dicht bij elkaar liggen en in elkaars thermisch invloedsgebied liggen, zal er sprake zijn van thermische interactie.
- Als het gesloten systeem binnen het hydrologisch invloedsgebied ligt van het open systeem, waardoor de snelheid van de grondwaterstroming bij het gesloten systeem toeneemt. Over het algemeen is dit een gunstig effect voor de energetische prestatie van het gesloten systeem en is er dus geen sprake van nadelige beïnvloeding.

Van welke factoren is de onderlinge beïnvloeding afhankelijk?

- De horizontale afstand tussen de bronnen van het open systeem en de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem is bepalend voor de mate waarin de thermische invloedsgebieden overlappen. Hoe groter de onderlinge afstand, hoe kleiner de interferentie zal zijn.
- Van belang is de grootte is van overlap in het dieptetraject van beide systemen. Het open systeem zal grondwater onttrekken en infiltreren in een gedeelte van de diepte van de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem. Hoe groter de overlap in het dieptetraject van beide systemen, des te groter de thermische interferentie.

-
- Het plaatsen van de bodemwarmtewisselaars nabij de warme of koude bron van het open systeem.
 - Het plaatsen van de bodemwarmtewisselaars nabij een warme bron van een open systeem heeft in zowel de winter als in de zomer hogere gemiddelde temperaturen van het circuliatiemedium in het gesloten systeem tot gevolg. De invloed op de temperatuur van het onttrokken grondwater uit de warme bron van het open systeem is beperkt.
 - Bij het plaatsen van de bodemwarmtewisselaars nabij een koude bron zijn de temperatuurveranderingen in het gesloten systeem beperkt doordat de positieve invloed van de toegenomen grondwaterstroming en de negatieve invloed van de afgenomen grondtemperatuur elkaar grotendeels compenseren. Ook het effect op de temperatuur van het grondwater in de koude bron is klein.
 - De grootte van het open systeem is bepalend voor de invloed op het gesloten systeem. De grootte van de jaarlijkse grondwaterpompning, bepaalt de grootte van het thermisch invloedsgebied en zodoende ook het gedeelte van de bodemwarmtewisselaars dat zich in het thermisch invloedsgebied bevindt.
 - De grootte van de netto energieonttrekking van het gesloten systeem (die wordt bepaald door een combinatie van de grootte van het gesloten systeem en de mate van energieonbalans) is bepalend voor de thermische invloed op het open systeem. Een grotere netto energieonttrekking resulteert in een toename van de invloed op het open systeem.
 - De grootte van de thermische interactie tussen het open en het gesloten systeem neemt af bij een grotere snelheid van de grondwaterstroming. Opgemerkt wordt dat de richting van de grondwaterstroming hierbij wel van belang is.

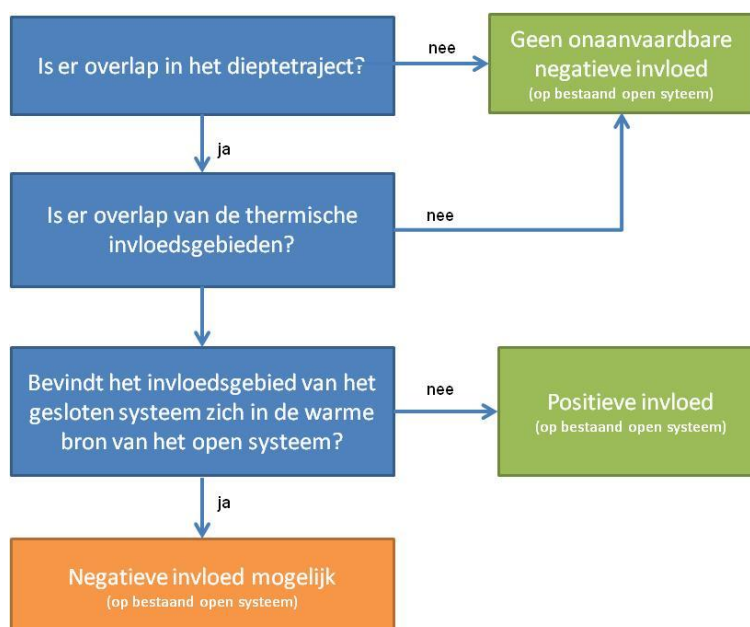
Wat zijn de gevolgen van een nieuw gesloten systeem voor een bestaand open systeem?

Aan de hand van drie varianten van het open systeem en drie varianten van het gesloten systeem zijn diverse scenario's vastgesteld en doorgerekend. Op basis van deze berekeningen zijn voor het open systeem de volgende conclusies getrokken:

- Het gesloten systeem heeft een zeer beperkte invloed op de onttrokken temperatuur uit de bronnen van het open systeem. Het verschil in temperaturen zal door de onnauwkeurigheid van de meetopnemers in het opensysteem (tolerantie) veelal niet meetbaar zijn.
- Door de beperkte invloed op de onttrokken temperaturen uit de bronnen zal het verschil in het elektriciteitsverbruik en het rendement van het open systeem en de hierbij behorende warmteopwekking met de warmtepomp gering zijn ten opzichte van de situatie zonder beïnvloeding gering zijn. Deze geringe invloed kan zowel negatief als positief zijn.
- Negatieve invloed van het gesloten systeem op het open systeem vindt plaats als de bodemwarmtewisselaars nabij de warme bron liggen en op jaarbasis netto warmte onttrekken. Deze negatieve invloed is gering en resulteert in een toename van het elektriciteitsverbruik (en de daaraan gekoppelde elektriciteitskosten, CO₂-emissies en rendementen) met maximaal 0,4% (in de doorgerekende scenario's).
- Positieve invloed van het gesloten systeem op het open systeem vindt plaats als de bodemwarmtewisselaars nabij de koude bron liggen en op jaarbasis netto warmte onttrekken. Deze positieve invloed is gering en resulteert in een afname van het elektriciteitsverbruik (en de daaraan gekoppelde elektriciteitskosten, CO₂-emissies en rendementen) met maximaal 0,3% (in de doorgerekende scenario's).
- Het plaatsen van één bodemwarmtewisselaar nabij een koude of warme bron heeft geen invloed op het rendement van het open systeem.
- De interferentie van het gesloten systeem op het open systeem is gering, doordat de netto warmteonttrekking van het gesloten systeem binnen het thermische invloedsgebied van het open systeem (deel van de warmteonttrekking die plaatsvindt in het dieptetraject van de bronfilters en binnen de thermische straal van de betreffende bron) naar verhouding klein is.

In Figuur 21 wordt in een schema de vraag beantwoord of een nieuw gesloten bodemenergiesysteem invloed heeft op een bestaand open bodemenergiesysteem.

Figuur 21
Heeft een nieuw
gesloten systeem
invloed
op een bestaand
open systeem?



Wat zijn de gevolgen van een nieuw open systeem voor een bestaand gesloten systeem?

Aan drie varianten van het open en drie varianten van het gesloten systeem zijn diverse scenario's doorgerekend. Op basis van deze berekeningen zijn voor het gesloten systeem de volgende conclusies getrokken:

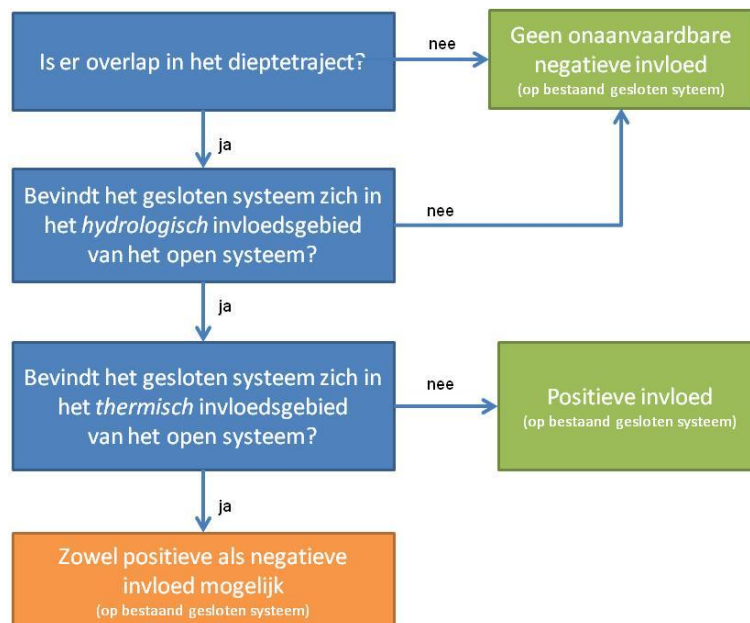
- Het open systeem heeft invloed op het elektriciteitsverbruik en het rendement van het gesloten systeem. Deze invloed kan zowel negatief als positief zijn.
- De invloed van het open systeem op het elektriciteitsverbruik (en de daaraan gekoppelde elektriciteitskosten, de CO₂-emissies en de rendementen) bedraagt maximaal circa 8% ten opzichte van de situatie zonder een open systeem in de nabije omgeving.
- De invloed van het open systeem op het gesloten systeem hangt sterk af van de grootte van het open systeem. Bij een klein open systeem is de invloed kleiner dan bij een groot open systeem. Ook is belangrijk of het gesloten systeem bij de warme bron of bij de koude bron van het open systeem ligt.
- Het rendement van de warmtepomp met het gesloten systeem wordt positief beïnvloed indien de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem nabij de warme bron lig-

gen van het open systeem. Dit wordt veroorzaakt door de hogere temperatuur van de circulatievloeistof in de winter, wat een hogere COP van de warmtepomp en dus een lager elektriciteitsverbruik van de warmtepomp tot gevolg heeft (in de doorgerekende scenario's maximaal 8%).

- Als de bodemwarmtewisselaars nabij de warme bron liggen, kan dit tot gevolg hebben dat in de zomer geen directe koeling met het gesloten systeem meer mogelijk is en dat de warmtepomp als koelmachine koude moet leveren. Dit kan het voordeel van de hogere COP in de winter (zie punt hiervoor) en het voordeel in het elektriciteitsverbruik weer te niet doen of zelfs zorgen voor een netto nadelige invloed (in één van de doorgerekende scenario's was dit het geval met als gevolg een netto 7% hoger elektriciteitsverbruik).
- Het rendement van de warmtepomp met het gesloten systeem wordt veelal beperkt negatief beïnvloed indien de bodemwarmtewisselaars van het gesloten systeem nabij de koude bron liggen van het open systeem. Dit wordt veroorzaakt door de lagere temperatuur van de circulatievloeistof in de winter, wat een lagere COP van de warmtepomp en een hoger elektriciteitsverbruik van de warmtepomp tot gevolg heeft (in de doorgerekende scenario's maximaal 2%).

In Figuur 22 wordt in een schema de vraag beantwoord of een nieuw open bodemenergiesysteem invloed heeft op een bestaand gesloten bodemenergiesysteem.

Figuur 22
Heeft een nieuw
open systeem in-
vloed
op een bestaand
gesloten systeem?



Bijlage 1

Scenario's

Scenario	Bodemwarmte-wisselaars bij	λ_a [W/(m °C)]	C_a [MJ/(m ³ °C)]	k [m/d]	SG [m/km]	Grootte open systeem [m ³ /seizoen]	Aantal bodemwarmte-wisselaars
0-0 (open)	n.v.t.	2,5	2,5	40	0,0	50000	n.v.t.
0-20 (open)	n.v.t.	2,5	2,5	40	0,5	50000	n.v.t.
0-40 (open)	n.v.t.	2,5	2,5	40	1,0	50000	n.v.t.
0-0 (gesl.)	n.v.t.	2,5	2,5	40	0,0	n.v.t.	36
0-20 (gesl.)	n.v.t.	2,5	2,5	40	0,5	n.v.t.	36
0-40 (gesl.)	n.v.t.	2,5	2,5	40	1,0	n.v.t.	36
1a	warme bron	2,5	2,5	40	0,0	50000	36
2a	warme bron	2,5	2,5	40	0,0	50000	1
3a	warme bron	2,5	2,5	40	0,0	50000	81
4a	warme bron	2,5	2,5	40	0,0	200000	36
5a	warme bron	2,5	2,5	40	0,0	10000	36
6a	warme bron	2,0	2,5	40	0,0	50000	36
7a	warme bron	3,0	2,5	40	0,0	50000	36
8a	warme bron	2,5	2,5	40	0,5	50000	36
9a	warme bron	2,5	2,5	40	1,0	50000	36
1b	koude bron	2,5	2,5	40	0,0	50000	36
2b	koude bron	2,5	2,5	40	0,0	50000	1
3b	koude bron	2,5	2,5	40	0,0	50000	81
4b	koude bron	2,5	2,5	40	0,0	200000	36
5b	koude bron	2,5	2,5	40	0,0	10000	36
6b	koude bron	2,0	2,5	40	0,0	50000	36
7b	koude bron	3,0	2,5	40	0,0	50000	36
8b	koude bron	2,5	2,5	40	0,5	50000	36
9b	koude bron	2,5	2,5	40	1,0	50000	36

 λ_a [W/(m °C)] C_a [MJ/(m³ °C)]

n [-]

k [m/d]

SG [m/km]

= Warmtegeleidingcoëfficiënt aquifer

= Warmtecapaciteit aquifer

= Porositeit aquifer

= Doorlatendheid aquifer

= Regionale stijghoote gradiënt

Bijlage 2

Temperatuurcontouren

Bijlage 3

Temperatuurgrafieken