



Energieonderzoek Centrum Nederland

Geothermische energie en de SDE

Inventarisatie van de kosten van geothermische energie bij opname in de SDE

P. Lako

S.L. Luxembourg

A.J. Ruiter

B. in 't Groen (KEMA)



Verantwoording

ECN Beleidsstudies en KEMA zijn door het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I) gevraagd om advies uit te brengen over de technisch-economische parameters en productiekosten van geothermische warmte en elektriciteit c.q. warmtekracht in Nederland in het kader van de SDE regeling. De studie is bij ECN geregistreerd onder projectnummers 5.0562.12.01 en 5.1123.02.01.

Abstract

On behalf of the Dutch Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation (EL&I), ECN and KEMA performed a scoping study of technical-economic parameters of geothermal heat and power (combined heat and power, CHP) in the Netherlands. The geothermal heat costs, based on three reference geothermal heat plants and calculations with the ECN SDE cashflow-model, range from 32.5 €/MWh_{th} for an existing district heating system to 39.6 €/MWh_{th} for a new-built district heating system. For hydrothermal geothermal CHP, based on an Organic Rankine Cycle, a relatively deep geothermal source (4000 m) and a green field district heating system, the price of electricity is 38.6 €/kWh, in which the produced heat was valued against a reference gas-fired boiler with a gas price of 19 €/m³ and a conversion efficiency of 90%. Furthermore, it is shown that the presence of a high soil temperature-gradient, a higher geothermal flow rate or the existence of a nearby large heat demand can significantly lower the cost of geothermal electricity generation. EGS can potentially lower the cost of electricity generation to the range of 5 - 10 €/kWh, though this type of geothermal application is still in demonstration phase.

Inhoud

Lijst van tabellen	4
Lijst van figuren	4
Samenvatting	5
1. Inleiding	7
1.1 Korte introductie op geothermische energie	7
1.2 Vraagstelling	9
2. Geothermische warmte	11
2.1 Inleiding en onderscheid naar projecten	11
2.2 Glastuinbouw	11
2.3 'Groene weide'-afstandsverwarming	12
2.4 Bestaande afstandsverwarming	13
2.5 Financiële parameters geothermische warmteprojecten	15
3. Geothermische warmtekracht	16
3.1 Inleiding	16
3.2 Geothermische warmtekracht in Nederland	16
3.2.1 Referentie-installatie hydrothermale warmtekracht	17
3.2.2 Kostenverlagende factoren hydrothermale warmtekracht	18
3.2.3 EGS	19
3.2.4 Financieringsparameters en basisbedrag geothermische warmtekracht	20
3.3 Duitse en Nederlandse praktijkvoorbeelden c.q. studies	20
4. Conclusies en aanbevelingen	23
Referenties	24
Internetbronnen	27
Lijst van afkortingen	30
Bijlage A Geïnterviewde contactpersonen	31
Bijlage B Formule geothermisch vermogen (Vergelijking 1)	32
Bijlage C Selectie geothermische warmteprojecten Duitsland	33
Bijlage D Geothermische warmtekrachtprojecten Duitsland	35
Bijlage E Geothermische energie Duitsland	37

Lijst van tabellen

Tabel 1.1	<i>Mogelijke benutting geothermisch energie in Nederland</i>	8
Tabel 2.1	<i>Kengetallen parameters voor geothermische warmte - glastuinbouw</i>	12
Tabel 2.2	<i>Totale projectkosten geothermische warmte - glastuinbouw</i>	12
Tabel 2.3	<i>Technisch-economische parameters geothermische warmte - glastuinbouw</i>	12
Tabel 2.4	<i>Kengetallen parameters voor geothermische warmte project - 'groene weide'-afstandsverwarming</i>	13
Tabel 2.5	<i>Totale projectkosten geothermische warmte - 'groene weide'-afstandsverwarming</i>	13
Tabel 2.6	<i>Technisch-economische parameters geothermische warmte - 'groene weide'-afstandsverwarming</i>	13
Tabel 2.7	<i>Kengetallen parameters voor geothermische warmte project - bestaande afstandsverwarming</i>	14
Tabel 2.8	<i>Totale projectkosten geothermische warmte project - bestaande afstandsverwarming</i>	14
Tabel 2.9	<i>Technisch-economische parameters geothermische warmte project - bestaande afstandsverwarming</i>	15
Tabel 2.10	<i>Financiële parameters Geothermische warmte</i>	15
Tabel 3.1	<i>Kengetallen parameters voor geothermisch warmtekrachtproject - 'groene weide'-afstandsverwarming, voorzichtige kostenschatting</i>	18
Tabel 3.2	<i>Technisch-economische parameters voor geothermisch warmtekrachtproject - 'groene weide'-afstandsverwarming, voorzichtige kostenschatting</i>	18
Tabel 3.3	<i>Financiële parameters Geothermie - warmtekracht</i>	20
Tabel 3.4	<i>Basisbedrag voor hydrothermale geothermische warmtekracht</i>	20
Tabel 4.1	<i>Overzicht van de kosten van de verschillende bestudeerde geothermische varianten</i>	23

Lijst van figuren

Figuur 1.1	<i>Aardwarmte in Nederland, vergunningssituatie op 1 september 2010</i>	10
Figuur 3.1	<i>De elektrische opwekkosten voor hydrothermale geothermische warmtekracht: voor de referentie-installatie (doorbroken lijn) en de invloed van een hoge afzet, hoge debiet en hoge brontemperatuur zoals gedefinieerd in de tekst</i>	19

Samenvatting

Het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie heeft ECN en KEMA gevraagd om de productiekosten te ramen van diverse opties voor geothermische energie. Geothermische energie is tot nu toe beperkt toegepast in Nederland. Het aantal projecten waarvoor opsporings- of winningvergunningen zijn aangevraagd groeit snel. Er zijn vier projecten in de glastuinbouw tot stand gekomen dan wel in het stadium van realisatie (Westland) en een project voor de gebouwde omgeving (Den Haag). Vanwege de vereiste grotere boordiepte heeft warmtekracht of elektriciteitsopwekking op basis van geothermische energie in Nederland verhoudingsgewijs een verder weg liggend perspectief. Echter ook op dit gebied is er sprake van een toegenomen interesse.

Voor geothermische warmte zijn drie referentie-installaties gedefinieerd: glastuinbouw, 'groene-weide' afstandsverwarming en bestaande afstandsverwarming. Deze projecten verschillen van elkaar op basis van leveringstemperatuur (c.q. boordiepte), geothermisch vermogen en afzetmogelijkheden. De bijhorende productiekosten voor hernieuwbare warmte zijn respectievelijk: 34,7 €/MWh (glastuinbouw), 39,6 €/MWh (groene-weide) en 32,5 €/MWh (bestaande afstandsverwarming).

Voor geothermische warmtekracht is een referentiecasse in detail uitgewerkt. Hierbij is uitgegaan van hydrothermale geothermische warmtekracht onder gemiddelde condities in de Nederlandse bodem en warmtelevering volgens een groene weide project. Dit resulteert in een basisbedrag van 38,6 €/kWh. Vervolgens is aangegeven hoe verschillende parameters de opwekkosten kunnen reduceren. Een hogere brontemperatuur, een hoger debiet of een hoge warmte-afzet resulteert in een sterke daling van de opwekkosten tot 19,5 - 23,4 €/kWh. Dit leidt tot het inzicht dat alleen de combinatie van meerdere van deze gunstige factoren kan resulteren in opwekkosten onder de 15 €/kWh (het aangekondigde plafond in het basisbedrag in de laatste fase van de SDE+). Het is op voorhand moeilijk in te schatten of dit in de praktijk en op korte termijn gerealiseerd gaat worden. EGS voor elektriciteitsopwekking biedt volgens de sector potentiële opwekkosten van op langere termijn 5 - 10 €/kWh. Hierbij gaat het om boordieptes vanaf 5000 meter, deze vorm van geothermie bevindt zich nu echter nog in de demonstratiefase. De resultaten van de studie zijn samengevat in Tabel S.1.

Tabel S.1 *Overzicht van de kosten van de verschillende bestudeerde geothermische varianten*

	Subsidieduur [jaar]	Productiekosten [€/kWh _e] of €/GJ _{th}	Transactiekosten [€/kWh]	Basisprijspremie [€/kWh]	Basisbedrag [€/kWh] of [€/GJ _{th}]
Warmte					
Glastuinbouw	15	9,6	-	-	9,6
Groene-weide afstandsverwarming	15	11,0	-	-	11,0
Bestaande afstandsverwarming	15	9,0	-	-	9,0
Hydrothermale warmtekracht					
Hydrothermale warmtekracht - ref	15	38,26	0,09	0,25	38,6
<i>Hoge afzet</i>	15	23,37	0,09	0,25	23,7
<i>Hoog debiet</i>	15	22,17	0,09	0,25	22,5
<i>Hoge temperatuur</i>	15	19,46	0,09	0,25	19,8

1. Inleiding

Het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I) heeft aan ECN en KEMA gevraagd om technisch-economische parameters te verschaffen over diverse opties voor geothermische energie. Er is gekeken naar geothermische warmte en warmtekracht. Geothermische energie is tot nu toe beperkt toegepast in Nederland. Het gaat enerzijds om projecten voor verwarming in de glastuinbouw en anderzijds om enkele projecten voor afstandsverwarming c.q. verwarming van woningen en/of gebouwen. Het aantal projecten waarvoor opsporings- of winningvergunningen zijn aangevraagd groeit echter snel: op 1 november 2010 waren 58 opsporingsvergunningen verleend, 2 winningvergunningen verleend en in totaal 86 vergunningen voor geothermische energie aangevraagd (Jongierius, 2010; EZ, 2010). Niet alleen groeit de belangstelling voor geothermische energie sterk, ook heeft het Ministerie onlangs een heroriëntatie bekendgemaakt wat betreft de SDE, dat wil zeggen de contouren geschetst van de nieuwe SDE+ (ELI, 2010).

1.1 Korte introductie op geothermische energie

De belangstelling voor diepe geothermie groeit sterk. Geothermische energie kan ons, als een bron van hernieuwbare energie, voorzien van zowel warmte als elektriciteit c.q. warmtekracht. Bij inzet van geothermische energie wordt warmte uit de ondergrond onttrokken, gebaseerd op exploitatie van aquifers (watervoerende formaties) of (in combinatie met) injectie van water waarmee warmte aan het omliggende gesteente wordt onttrokken. Deze warmte is afkomstig vanuit diverse processen in het binnenste van de aarde, op een diepte van 5.000 tot 6.500 km. De temperatuur van het binnenste van de aarde wordt geschat op meer dan 5.000°C. Doordat deze warmte wordt getransporteerd naar het aardoppervlak, neemt de temperatuur toe met de diepte. Als geothermische energie wordt benut voor elektriciteit of warmtekracht, is een geothermische elektriciteitscentrale nodig.

Toepassingsgebieden maar ook investeringskosten en onderhouds- en bedieningskosten (*Operation and Maintenance*, O&M) zijn afhankelijk van de diepte waaruit de geothermische energie wordt gewonnen. Binnen deze rapportage wordt uitsluitend ingegaan op 'diepe geothermie'. Niet nader beschouwde andere vormen van geothermie zijn 'ondiepe WKO', 'ondiepe geothermie' en '*Enhanced Geothermal Systems*' (EGS).

Hier worden de relevante technieken samengevat:

- Ondiepe Warmte Koude Opslag (WKO); < 500 m-mv ('true depth' ofwel verticale diepte). Binnen deze vorm wordt een overschot aan warmte of koude opgeslagen in de bodem voor inzet in een periode met een grote warmtevraag (in de winter) of een grote koudevraag (in de zomer). Het aantal WKO-systemen groeit jaarlijks met 20-30%.
- Ondiepe geothermie: 700 - 1.000 m-mv. Met een hogetemperatuurwarmtepomp kan warmte van ongeveer 30 - 40°C in temperatuur worden verhoogd zodat deze kan worden gebruikt voor verwarming van kassen of woningen en gebouwen. Deze studie gaat er echter niet in detail op in.
- Diepe geothermie: 1.500 - 4.500 m-mv. Deze vorm van benutting van aardwarmte kenmerkt zich door temperaturen van 50 °C tot 150 °C. Deze studie gaat in hoofdzaak over deze vorm van geothermische energie. De toepassingsgebieden in deze rapportage zijn: glastuinbouw, groeneweide-afstandsverwarming, bestaande afstandsverwarming en elektriciteitsopwekking c.q. warmtekracht. Industriële processen als toepassingsgebied blijven in deze rapportage buiten beschouwing.
- *Enhanced Geothermal Systems* (EGS): 5.000 - 7.000 m-mv. Hierbij wordt door middel van thermische stimulatie of (een combinatie van) andere technieken de ondergrond (meer) permeabel gemaakt, waardoor water in een gesloten kringloop met voldoende rendement van de

invoerput naar de retourput kan stromen. Deze technieken (vroeger aangeduid als ‘*Hot Dry Rock*’, HDR) zijn erop gericht diepe gesteenteformaties door stimulering (‘fraccen’) geschikt te maken van voor winning van geothermische energie. In Hoofdstuk 3 wordt een eerste doorkijk gegeven naar EGS-warmtekracht.

Nederland kent meerdere locaties die potentieel geschikt zijn voor de winning van warmte uit de bodem door middel van diepe geothermie. In deze studie richten wij ons op voornamelijk op hydrothermale geothermische systemen, waarbij aan formatiewater uit een aquifer (waterhoudende laag) dat wordt opgepompt, warmte wordt onttrokken alvorens het weer wordt geïnjecteerd. Deze warmte kan worden ingezet in de glastuinbouw of afstandsverwarmingsnetwerken of voor de productie van elektriciteit c.q. warmtekracht. Tabel 1.1 geeft een schets van de mogelijkheden om geothermische energie te benutten voor warmte en elektriciteit c.q. warmtekracht.

Tabel 1.1 *Mogelijke benutting geothermisch energie in Nederland*

	Ondiepe aardwarmte	Diepe aardwarmte	Zeep diepe aardwarmte
Toepassing	Warmte	Warmte of warmtekracht	Warmtekracht of elektriciteit
Technologie	Aardwarmtesonde Grondwaterwarmtepomp	Diepe boring Doublet Warmtewisselaar / turbine / afstandsverwarming	Diepe boring Doublet Warmtewisselaar / turbine / afstandsverwarming
Geologische voorwaarden	Warmtegeleidend gesteente/ondiep aquifer	Diep aquifer	Kristallijn gesteente
Diepte	Tot 700 m	1.500 - 4.500 m	5.000 - 7.000 m
Temperatuur	30 - 40°C	50 - 150°C	150 - 200+°C
Toepassingsgebied	Vrijwel locatieonafhankelijk	Beschikbaarheid geschikt aquifer	Vrijwel locatieonafhankelijk
Toepassing hoge temperatuur warmtepomp	Optioneel	Nee	Nee
Stand van de techniek	Bewezen techniek	Bewezen techniek	Onderzoek, ontwikkeling en demonstratie (EGS) ^a

^a EGS = Enhanced Geothermal Systems (Hot Dry Rock, HDR).

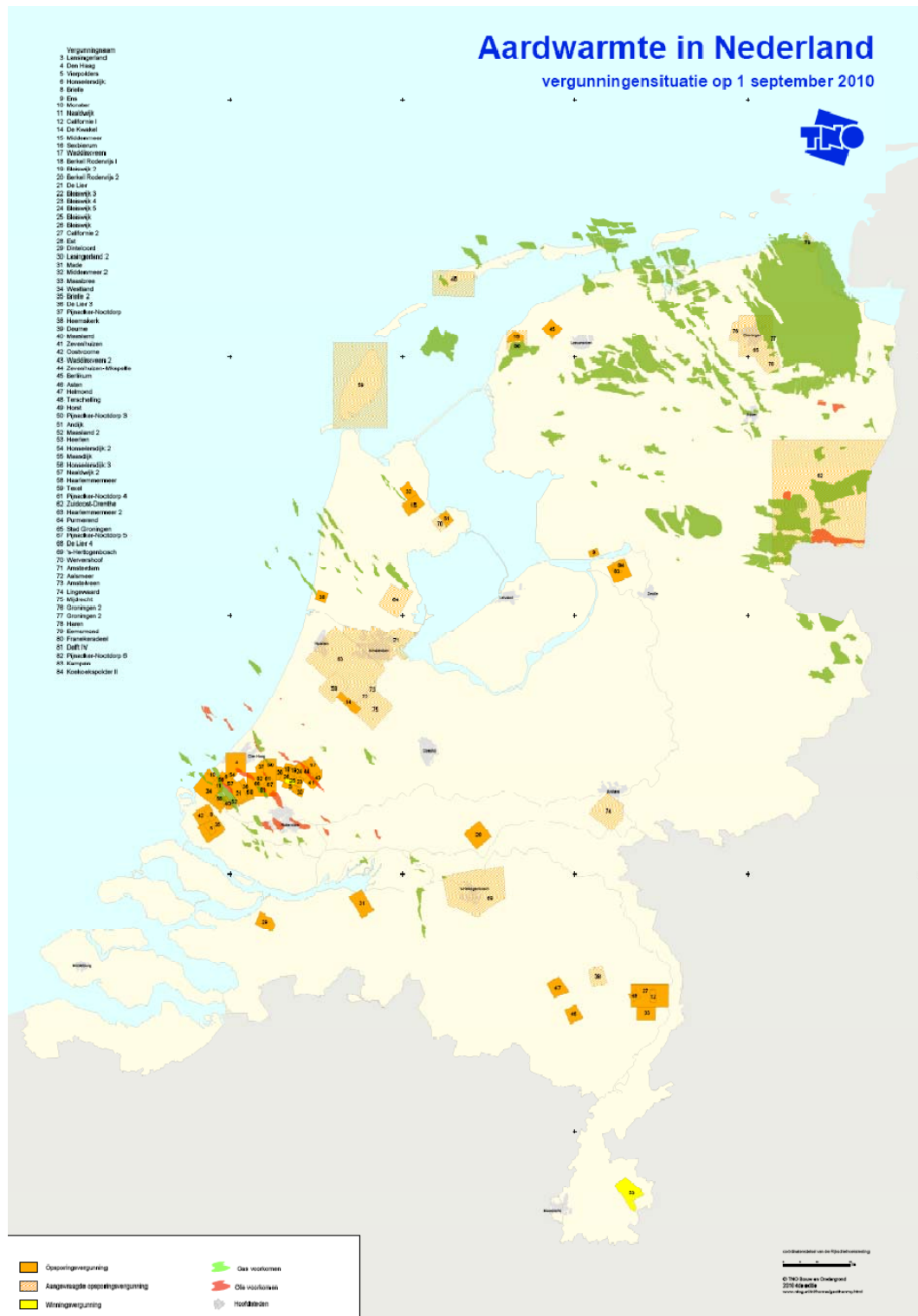
Bron: AKE, 2005.

De temperatuurgradiënt in de Nederlandse bodem is ongeveer 30°C/km. De minimale diepte voor toepassing voor verwarming in de glastuinbouw is 1.500 meter. Hierbij gaat het om zogenoemde diepe geothermie. Er is nog een tussenvorm waarbij tot ca. 700 m diepte wordt geboord en de relatief lage temperatuur van de warmte met een hoge temperatuur warmtepomp wordt opgevoerd om aan de vraag van de afnemer (glastuinder) te voldoen. Dit type project, dat ook toepassing heeft gevonden in Heerlen op basis van mijnwater, is hier niet nader geanalyseerd. Wel is het ook voor de toekomst een reële toepassingsmogelijkheid. Verder is het mogelijk om geothermische energie (warmte en warmtekracht) voor andere toepassingen te gebruiken dan glastuinbouw en afstandsverwarming, de twee toepassingen die in deze studie centraal staan. Andere toepassingen zijn middelhoge temperatuur warmtevraag zoals in de landbouw (grasdrogerijen) en in de industrie, bijvoorbeeld droogprocessen in de voedingsmiddelenindustrie. Voor elektriciteitsproductie of warmtekracht is een hogere temperatuur vereist dan voor warmtelevering, waardoor dieper boren noodzakelijk is. De lokaal aanwezige grondafzettingen zijn bepalend voor het potentieel. Voor de succesvolle toepassing van (hydrothermale) diepe geothermie is de aanwezigheid van aquifers van voldoende dikte en permeabiliteit, waterdoorlaatbaarheid, in de bodem vereist. Figuur 1.1 geeft een indicatie van delen van Nederland die veelbelovend zijn vanuit het oogpunt van de geologische ondergrond (Internetbron 1).

Diepe geothermie wordt in Nederland reeds op kleine schaal toegepast in de glastuinbouw en is ook geschikt voor afstandsverwarming in de gebouwde omgeving door middel van stadsverwarmingsnetwerken. Er zijn vier projecten in de glastuinbouw tot stand gekomen c.q. in het stadium van realisatie (Westland) en een project voor de gebouwde omgeving (Den Haag). Vanwege de vereiste grotere boordiepte heeft warmtekracht of elektriciteitsopwekking op basis van geothermische energie in Nederland verhoudingsgewijs een verder weg liggend perspectief, maar ook deze optie (geothermische warmtekracht) kan worden ontwikkeld.

1.2 Vraagstelling

De doelstelling van deze studie is om inzicht te geven in de productiekosten van geothermische warmte en elektriciteit c.q. warmtekracht. De studie is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 beschrijft de benutting van geothermische energie voor laagtemperatuur-warmteprojecten in de glastuinbouw en voor afstandsverwarming. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de benutting van geothermische energie voor warmtekracht. Tot slot wordt een aantal voorlopige conclusies en aanbevelingen geformuleerd in Hoofdstuk 4.



Figuur 1.1 Aardwarmte in Nederland, vergunningensituatie op 1 september 2010
Bron: Internetbron 1.

2. Geothermische warmte

2.1 Inleiding en onderscheid naar projecten

In Nederland en omliggende landen bestaat veel belangstelling voor het benutten van geothermische energie voor lagetemperatuurverwarming. Daarbij gaat het in Nederland om projecten voor in eerste instantie de glastuinbouw en in tweede instantie de gebouwde omgeving (afstandsverwarming). In het buitenland ligt het accent op projecten voor warmte in de gebouwde omgeving (afstandsverwarming) en in mindere mate op projecten voor de glastuinbouw.

In deze studie worden drie typen projecten voor geothermische warmte onderscheiden:

- Glastuinbouw (Paragraaf 2.2).
- Groeneweide-afstandsverwarming (gebouwde omgeving, Paragraaf 2.3).
- Bestaande afstandsverwarming (gebouwde omgeving, Paragraaf 2.4).

2.2 Glastuinbouw

Voor de referentie-installatie voor de glastuinbouw wordt uitgegaan van een doubletsysteem (één productie- en één injectieput) en warmtelevering op een temperatuurniveau van 65°C. Uitgaande van een temperatuurgradiënt van 30°C/km en een gemiddelde temperatuur van 10°C op 10 meter diepte, volgt hieruit dat een aquifer op een diepte van ongeveer 1800 meter moet worden aangeboord. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de parameters, die de referentie-installatie voor diepe geothermie in de glastuinbouw definiëren. Het nuttig aangewende geothermische vermogen wordt, conform vergelijking 1 in Bijlage B, bepaald door de leveringstemperatuur, retourtemperatuur en het debiet. Waarden voor het debiet en de COP (*Coefficient of Performance*)¹ zijn verkregen uit verschillende haalbaarheidsstudies en interviews met experts (Bijlage A).

De specifieke investeringskosten worden geschat op 1.400 €/kW_{th}. De opbouw van deze kosten is weergegeven in Tabel 2.2. De inschatting van de afzonderlijke onderdelen van de investeringskosten is gebaseerd op haalbaarheidsstudies voor projecten van 2000 tot 3000 m diepte (IF Technology) en interviews met experts. De specifieke boorkosten zijn bepaald op 1.500 €/m verticale boordiepte, waarmee de totale boorkosten 5,4 M€ bedragen. Hiermee vallen de boorkosten binnen het plafond van het garantiefonds voor geothermie (8,5 M€). Zoals uit de tabel blijkt, zijn de totale projectkosten 7,3 M€ (1.400 €/kW_{th}), waarvan ca. 75% gerelateerd is aan boorkosten. Deze verhouding tussen boorkosten en het totaal van investeringskosten wordt bevestigd door (ENGINE, 2007). De technisch-economische parameters horend bij deze referentie-installatie zijn samengevat in Tabel 2.3. De vaste 'operation & maintenance'-kosten, O&M-kosten worden geschat op 21 €/kW_{th} per jaar. Tot de O&M-kosten worden gerekend: verzekeringen (0,5% van de investeringskosten) en onderhoud en bediening van de geothermische installatie (1% van de investeringskosten) (ENGINE, 2007). De variabele O&M-kosten bestaan uit het elektriciteitsverbruik voor de pomp in de productieput. Bij elektriciteitskosten van 0,14 €/kWh_e komt het variabele deel van de O&M-kosten uit op 0,007 €/kWh_{th}. Het aantal vollasturen is gedefinieerd op 6000 vollasturen, overeenkomstig een analyse van de jaarbelasting-kromme voor glastuinbouwbedrijven zoals vermeld in een notitie aan Agentschap NL (IF Technology, 2009). Hierbij dient te worden opgemerkt dat systemen denkbaar zijn met een hoger aantal vollasturen. Voorwaarde hiervoor is een optimale afstemming tussen de basislast-warmtevraag en het beschikbare geothermische vermogen. Een mogelijkheid biedt clustering van warmteafnemers. Verdere uitkoeling van de geothermische bron, resulterend in een lagere

¹ De Coefficient of Performance (COP) geeft de verhouding aan tussen de geproduceerde geothermische energie en de benodigde pompenergie. Een COP van 20 wordt onder Nederlandse geologische condities als redelijkerwijs haalbaar beschouwd.

retourtemperatuur, is een mogelijkheid om het nuttige geothermische vermogen te vergroten. Dit is mogelijk door middel van lage buistemperaturen en luchtondersteuning langs de verwarmingsbuizen. Deze optie wordt echter niet als referentie gebruikt. De productiekosten van diepe geothermische warmte in de glastuinbouw worden ingeschat op 34,7 €/MWh² of 9,6 €/GJ.

Tabel 2.1 *Kengetallen parameters voor geothermische warmte - glastuinbouw*

Parameter	Eenheid	
Leveringstemperatuur	[°C]	65
Retourtemperatuur	[°C]	35
Debiet	[m ³ /uur]	150
COP (Coefficient of Performance)	-	20
Verticale diepte	[m]	1800
Geothermisch vermogen	[MW _{th}]	5,2

Tabel 2.2 *Totale projectkosten geothermische warmte - glastuinbouw*

	Eenheid	Investeringskosten
Boorkosten	[M€]	5,4
Vorbereidingskosten ³	[M€]	0,5
Verzekering, CAR, garantiefonds	[M€]	0,6
Geothermische installatie	[M€]	0,3
Onvoorzien (10%)	[M€]	0,6
Totaal	[M€]	7,3
Investeringskosten	[€/kW _{th}]	1400

Tabel 2.3 *Technisch-economische parameters geothermische warmte - glastuinbouw*

	Eenheid	
Installatiegrootte	[MW _{th}]	5,2
Investeringskosten	[€/kW _{th}]	1400
Vollasturen	[uur/jaar]	6000
Vaste O&M-kosten	[€/kW _{th}]	21
Variabele O&M-kosten	[€/kWh _{th}]	0,007

2.3 'Groene weide'-afstandsverwarming

Voor de referentie-installatie voor de 'groene weide'-afstandsverwarming wordt uitgegaan van een doubletsysteem (één productie- en één injectieput) en warmtelevering aan een laagtemperatuur-verwarmingsnet (LT-verwarmingsnet) dat een brontemperatuur van ongeveer 75°C vereist. De hiervoor benodigde aquifer zal zich op een diepte van ongeveer 2.200 meter bevinden. Tabel 2.4 geeft een overzicht van de parameters, die de referentie-installatie voor 'groene weide'-afstandsverwarming op basis van geothermische energie definiëren.

De temperatuurval van het fractiewater over de warmtewisselaar is aangenomen op 35°C, deze waarde wordt typisch voor de LT-afstandsverwarming verondersteld. De investeringskosten per kW_{th} zijn iets lager dan voor de referentie-installatie glastuinbouw, namelijk 1.390 €/kW_{th}. De opbouw van deze kosten is weergegeven in Tabel 2.5. De inschatting van de afzonderlijke on-

² Voor de berekening van de productiekosten voor productie van geothermische warmte in de glastuinbouw is gebruik gemaakt van SDE-kasstroommodellen. In de glastuinbouw is productie voor eigen verbruik het meest waarschijnlijke scenario.

³ De voorbereidingskosten maken een significant deel uit van de investeringskosten van geothermische warmteprojecten. Het is daarom twijfelachtig of deze kunnen worden terugverdiend uit het rendement op eigen vermogen. In afwijking van de berekeningen voor basisbedragen voor elektriciteit en groen gas in het kader van de SDE, zijn deze kosten hier meegenomen in de productiekosten. Het rendement op eigen vermogen is evenwel niet aangepast.

derdelen van de investeringskosten is gebaseerd op haalbaarheidsstudies voor projecten met een diepte range van 2000 tot 3000 meter en interviews met experts.

Vooralsnog zijn we uitgegaan van specifieke boorkosten gelijk aan de glastuinbouwcase, dat wil zeggen 1.500 €/m verticale boordiepte. De totale boorkosten zijn 6,6 M€. Hiermee vallen de boorkosten binnen het plafond van het garantiefonds voor geothermie (8,5 M€). De totale projectkosten voor het referentieproject worden geschat op 8,75 M€ (1.390 €/kW_{th}). De technisch-economische parameters horend bij deze referentie-installatie zijn samengevat in Tabel 2.6. De vaste O&M- kosten worden geschat op 21 €/kW_{th} per jaar, de variabele O&M-kosten bestaan uit het elektriciteitsverbruik voor de pomp in de productieput. Bij kosten van 0,14 €/kWh_e komt het variabele deel van de O&M-kosten uit op 0,007 €/kWh_{th}. Het aantal vollasturen is bepaald op 5000 vollasturen, gebaseerd op de eerder genoemde notitie aan Agentschap NL (IF Technology, 2009). Het aantal vollasturen dat in een ‘groene weide’-project gehaald wordt is afhankelijk van de ontwikkeling van het beoogde afzetgebied. Vertraging in de bouw en gewijzigde bouwplannen kunnen de vollasturen bij aanvang drukken. De productiekosten voor diepe geothermische warmtelevering in ‘groene weide’-afstandsverwarming worden ingeschat op 39,6 €/MWh of 11 €/GJ.

Tabel 2.4 *Kengetallen parameters voor geothermische warmte project - ‘groene weide’-afstandsverwarming*

Parameter	Eenheid	
Leveringstemperatuur	[°C]	76
Retourtemperatuur	[°C]	40
Debiet	[m ³ /uur]	150
COP	-	20
Verticale diepte	[m]	2200
Geothermisch vermogen	[MW _{th}]	6,3

Tabel 2.5 *Totale projectkosten geothermische warmte - ‘groene weide’-afstandsverwarming*

	Eenheid	Investeringskosten
Boorkosten	[M€]	6,6
Vorbereidingskosten	[M€]	0,5
Verzekering, CAR, garantiefonds	[M€]	0,7
Geothermische installatie	[M€]	0,3
Onvoorzien (10%)	[M€]	0,7
Totaal	[M€]	8,75
Investeringskosten	[€/kW _{th}]	1390

Tabel 2.6 *Technisch-economische parameters geothermische warmte - ‘groene weide’-afstandsverwarming*

		Geothermische warmte; Groene weide; afstandsverwarming
Installatiegrootte	[MW _{th}]	6,2
Investeringskosten	[€/kW _{th}]	1390
Vollasturen	[uur/jaar]	5000
Vaste O&M-kosten	[€/kW _{th}]	21
Variabele O&M-kosten	[€/kWh _{th}]	0,007

2.4 Bestaande afstandsverwarming

Voor de referentie-installatie voor de bestaande afstandsverwarming wordt uitgegaan van een doubletsysteem (één productie- en één injectieput) en warmtelevering aan een bestaand ver-

warmingsnet op een temperatuurniveau van ongeveer 100°C. Dit komt overeen met een aquifer op een diepte van ongeveer 3.000 meter. Tabel 2.7 geeft een overzicht van de parameters, die de referentie-installatie voor diepe geothermie bij een bestaande afstandsverwarming definiëren. Het nuttig aangewende geothermisch vermogen is berekend conform vergelijking 1 (Bijlage B) en is op grond van het veronderstelde temperatuurverschil tussen levering en retourwater en op grond van het debiet gelijk aan 7,9 MW_{th}.

Doordat bestaande verwarmingsnetten zich niet lenen voor LT-warmtelevering wordt het temperatuurniveau hoger verondersteld namelijk op 100°C. Door de diepere boring vallen de specifieke boorkosten hoger uit dan voor de referentie-installatie glastuinbouw en de 'groene weide'-afstandsverwarming, namelijk 1.750 €/m verticale boordiepte⁴. De totale boorkosten komen hiermee op 10,5 M€. Hiermee overstijgen de boorkosten het plafond van het garantiefonds. Hier is aangenomen dat het resterende deel van de investering tegen vergelijkbare condities kan worden verzekerd bij een derde partij. De opbouw van de projectkosten is weergegeven in Tabel 2.8. Zoals uit de tabel blijkt, zijn de totale projectkosten 13,4 M€ (1.705 €/kW_{th}). De technisch-economische parameters horend bij deze referentie-installatie zijn samengevat in Tabel 2.9. De vaste O&M-kosten worden geschat op 26 €/kW_{th} per jaar, de variabele O&M-kosten bestaan uit het elektriciteitsverbruik voor de pomp in de productieput. Bij kosten van 0,14 €/kWh_e komt het variabele deel van de O&M-kosten uit op 0,007 €/kWh_{th}. Over het algemeen overtreft de warmtevraag in bestaande afstandsverwarmingssystemen de omvang van een geothermisch bron ruim. Vandaar dat kan worden uitgegaan van een zeer hoge bedrijfstijd van 8000 vollasturen. De productiekosten voor diepe geothermische warmte voor bestaande afstandsverwarmingssystemen worden ingeschat op 32,5 €/MWh_{th} of 9,0 €/GJ.

Tabel 2.7 *Kengetallen parameters voor geothermische warmte project - bestaande afstandsverwarming*

Parameter	Eenheid	
Leveringstemperatuur	[°C]	100
Retourtemperatuur	[°C]	55
Debiet	[m ³ /uur]	150
COP	-	20
Verticale diepte	[m]	3000
Geothermisch vermogen (P90)	[MW _{th}]	7,9

Tabel 2.8 *Totale projectkosten geothermische warmte project - bestaande afstandsverwarming*

	Eenheid	Investeringskosten
Boorkosten	[M€]	10,5
Vorbereidingskosten	[M€]	0,5
Verzekering, CAR, garantiefonds	[M€]	0,9
Geothermische installatie	[M€]	0,3
Onvoorzien (10%)	[M€]	1,1
Totaal	[M€]	13,4
Investeringskosten	[€/kW _{th}]	1705

⁴ Bij grotere dieptes vindt een sprong in de kosten plaats als gevolg van de noodzaak van een grotere boortoren, het meer dan proportioneel toenemen van de boortijd en een toenemend aantal *casings* (verbuizingen).

Tabel 2.9 *Technisch-economische parameters geothermische warmte project - bestaande afstandsverwarming*

		Geothermische warmte - bestaande afstandsverwarming
Installatiegrootte	[MW _{th}]	7,0
Investeringskosten	[€/kW _{th}]	1705
Vollasturen	[uur/jaar]	8000
Vaste O&M-kosten	[€/kW _{th}]	26
Variabele O&M-kosten	[€/kWh _{th}]	0,007

2.5 Financiële parameters geothermische warmteprojecten

In de berekening van de productiecosten in van de verschillende geothermische warmte referentiecasses is gebruik gemaakt van de financiële parameters uit Tabel 2.10. Er is uitgegaan van het volledige financiële voordeel van 1% rentekorting vanuit de regeling groenprojecten. De rentekorting voor aardwarmteprojecten is begrensd tot een periode van 10 jaar, de totale looptijd van de lening is daarentegen 30 jaar. De effectieve rente over de periode van 30 jaar komt hiermee op 5,2%.

Tabel 2.10 *Financiële parameters Geothermische warmte*

	Aandeel eigen vermogen [%]	Rente [%]	Rendement op eigen vermogen [%]	Kapitaalskosten [%]	Looptijd lening [jr]	Economische levensduur [jr]	Groenfinanciering	EIA-maximum (EIA bij referentie -installatie) [€/kW _c]
Geothermische warmte	20	5,2	15	6,0	30	30	Ja	Geheel

3. Geothermische warmtekracht

3.1 Inleiding

In Nederland bestaat ook belangstelling voor benutting van geothermische energie voor warmtekracht of elektriciteitsopwekking. Tot op heden is nog geen project gerealiseerd, maar een aantal initiatiefnemers bestudeert de haalbaarheid. Het is daarom de verwachting dat slechts een enkel initiatief in de periode 2011-2012 in het stadium van start procedure komt. Door toepassing van een Organic Rankine Cycle (ORC) of een Kalinacyclus (mengsel van ammoniak en water), kan bij de huidige stand van de techniek een elektrisch vermogen van enkele MW_e worden opgewekt naast een groter thermisch vermogen (lage temperatuurwarmte). In Duitsland zijn achttien warmtekrachtprojecten of projecten voor elektriciteitsopwekking gerealiseerd, in uitvoering of in voorbereiding. Bijlage D geeft een overzicht van technisch-economische parameters van tien van deze warmtekrachtprojecten op basis van diepe aardwarmte. In dit hoofdstuk is voor de Nederlandse situatie een aantal referentie-installaties gedefinieerd. De technisch-economische parameters kunnen per diepegeothermie-warmtekracht project sterk verschillen, een complicerende factor hierbij is dat geothermische warmtekracht in Nederland nog nooit is toegepast. Om inzicht te geven in de mogelijkheden van geothermische warmtekracht nu en in de toekomst is een basis referentie-installatie voor hydrothermale geothermische warmtekracht gedefinieerd. Daarnaast is aangegeven welke factoren de businesscase voor hydrothermale geothermische warmtekracht kunnen verbeteren. Tenslotte is een doorkijk gegeven naar de kosten van een EGS (Hot Dry Rock) geothermie-warmtekracht project.

3.2 Geothermische warmtekracht in Nederland

Het is de verwachting dat het eerste geothermisch warmtekrachtproject, dat in Nederland gerealiseerd zal worden, in het verlengde zal liggen van de eerste warmteprojecten en dus uit zal gaan van hydrothermale lagen. Voorts zal de gecombineerde productie van warmte en elektriciteit nodig zijn voor een aantrekkelijke business case. Zodoende is voor geothermische elektriciteitsproductie uitgegaan van de warmtekrachtoptie, waarbij een doublet wordt uitgerust met een ORC-installatie. Toepassing van een ORC-installatie kan beschouwd worden als de standaard voor geothermische elektriciteitsopwekking bij temperaturen tussen de 100 en 150°C.

Een geothermische warmtekracht installatie kan zo worden uitgevoerd dat er sprake is van seriële dan wel parallelle opwekking van elektriciteit en warmte. Bij seriële opwekking wordt een deel van de warmte-inhoud van het formatiewater omgezet in elektriciteit in een eerste trap, de resterende warmte kan vervolgens worden gebruikt voor de opwarming van een afstandsverwarmingssysteem in een tweede trap. Hierbij is de mate van afkoeling in de twee gescheiden trappen bepalend voor het geleverde elektrisch en warmte vermogen. Bij parallelle opwekking wordt het beschikbare debiet verdeeld over de elektrische en warmte toepassingen. In de definitie van onze referentie-installaties zijn we uitgegaan van seriële systemen, dit is een logische keuze op grond van de in Nederland beschikbare debieten, die lager liggen dan bijvoorbeeld in Duitsland waar ook parallelle systemen worden gerealiseerd.

In de seriële opstelling wordt een deel van de beschikbare warmte benut voor elektriciteitsopwekking met een rendement van 8-15%, afhankelijk van de brontemperatuur. In een tweede trap wordt het afgekoelde formatiewater gebruikt voor de verwarming van een afstandsverwarmingsnetwerk. Er bestaan ORC installaties waarbij de condensor op een hoge temperatuur wordt gehouden (75 - 80°C). Dit gaat ten koste van het elektrisch rendement, maar biedt de mogelijkheid om de condensorwarmte te gebruiken in een stadsverwarmingnetwerk. Langs deze weg wordt het totaal nuttig aangewend vermogen (elektrische + warmte) vergroot. Vooralsonog

beschouwen wij dit niet als de meest gangbare toepassing.⁵ Om zowel een behoorlijk elektrisch rendement als inzet in een afstandsverwarmingsnetwerk mogelijk te maken is het nodig om een voldoende hoge temperatuur van het formatiewater te realiseren. Voor deze businesscase zijn we daarom uitgegaan van de diepste gelegen hydrothermale lagen in Nederlandse bodem. Op een diepte van 4.000 m hebben deze een temperatuur van ongeveer 130°C. Nu volgt een voorzichtige kostenschatting waarbij wordt uitgegaan van een project dat zeer vergelijkbaar is met de warmteprojecten, die in Hoofdstuk 2 zijn gepresenteerd.

3.2.1 Referentie-installatie hydrothermale warmtekracht

Voor de referentie-installatie voor hydrothermale warmtekracht is uitgegaan van een temperatuur van 130°C; bij een temperatuurgradient van 30°C/km correspondeert dit met een diepte van ongeveer 4.000 m. De ingangstemperatuur van het afstandsverwarmingsnetwerk is gekozen op 75°C, overeenkomstig 'groene weide'-afstandsverwarming. De geothermische energie, die ten goede komt aan elektriciteitsopwekking wordt nu gedefinieerd door de temperatuurval in de eerste trap van de seriële warmtekracht installatie ($\Delta T = 55^\circ\text{C}$). In Tabel 3.1 is een overzicht gegeven van de kentallen van de referentie-installatie voor hydrothermale geothermische warmtekracht. Bij een aangenomen ORC-rendement van 10% is het bruto elektrisch vermogen gelijk aan 960 kW_e. Voor de bepaling van de productiekosten binnen de SDE wordt uitgegaan van de netto aan het net geleverde productie. Het bruto vermogen dient hiertoe te worden verminderd met het pompvermogen, dat benodigd is voor het oppompen van het formatiewater. In de berekening hiervan is uitgegaan van een COP van 20 ten opzichte van het geothermisch vermogen dat ten goede komt aan de elektriciteitsopwekking (zie voetnoot op pagina 12). Het op deze manier gedefinieerde netto elektrisch vermogen van de installatie is 480 kW_e. Het geothermisch vermogen beschikbaar voor afstandsverwarming bedraagt 6,1 MW_{th}.

De technisch-economische parameters zijn opgenomen in Tabel 3.2. De specifieke boorkosten zijn ingeschat op gemiddeld 2000 €/m verticale diepte. De geraadpleegde experts onderschrijven dat de boorkosten per meter verticale diepte toenemen met de diepte. Overige kosten zijn gebaseerd op de referentiecasse voor geothermische warmte groene weide. De investeringskosten voor de ORC zijn gebaseerd op (ENGINE, 2007). Deze bedragen 1700 tot 1900 €/kW bij een rendement van ongeveer 12%. Aangezien hier wordt uitgegaan van een elektrische rendement van 10% zijn iets hogere investeringskosten gehanteerd: 2160 €/kW. De elektrische en thermische rendementen zijn gedefinieerd ten opzichte van het totale geothermisch vermogen van de bron, 15,7 MW_{th} bij een ΔT_{totaal} van 90°C. Voor de warmtelevering is net als in de 'groene weide'-warmtecase uitgegaan van 5000 vollasturen. Voor elektriciteitsopwekking is uitgegaan van 90% beschikbaarheid, aangezien zowel de bron als de ORC-installatie een zeer hoge beschikbaarheid kennen (Gankema, 2011).

De waarde van de afzet van warmte is gewaardeerd volgens de waarde van warmte uit een WKK-installatie, waarbij sprake is van warmtedistributie, deze waarde ligt rond de 6 €/GJ, wat correspondeert 19 €/m³ aardgasequivalent. Er is een referentie-omzettingsrendement van 90% gehanteerd. Hiermee komen de kosten van geothermische elektriciteit, opgewekt met de referentie-installatie op 38,3 €/kWh; hiermee komt het basisbedrag op 38,6 €/kWh. Met deze kosteninschatting is het zeer onwaarschijnlijk dat er onder de SDE+ met een plafond van 15 €/kWh een project met vergelijkbare parameters als de hydrothermale geothermische warmtekrachtreferentie gerealiseerd zal worden. Er zijn echter een aantal recente ontwikkelingen en factoren die de realisatie van geothermische warmtekracht dichterbij brengen.

⁵ Voor meer informatie zie het FP6 project LOW-BIN: www.lowbin.eu.

Tabel 3.1 *Kengetallen parameters voor geothermisch warmtekrachtproject - 'groene weide'-afstandsverwarming, voorzichtige kostenschatting*

Parameter	Eenheid	
Verticale diepte	[m]	4000
Temperatuur van de aquifer	[°C]	130
T _{in} afstandsverwarming	[°C]	75
Retourtemperatuur	[°C]	40
Debiet	[m ³ /uur]	150
COP	-	20
η _e ORC	[%]	10
Totaal geothermisch vermogen	[MW _{th}]	15,7
P _{elektrisch} - bruto	[MW _e]	0,96
P _{elektrisch} - netto	[MW _e]	0,48
P _{warmte}	[MW _{th}]	6,1

Tabel 3.2 *Technisch-economische parameters voor geothermisch warmtekrachtproject - 'groene weide'-afstandsverwarming, voorzichtige kostenschatting*

		Geothermische warmtekracht
Installatiegrootte	[kW _e]	480
Investeringskosten	[€/kW _e]	46355
Vollasturen	[uur/jaar]	7880
Vaste O&M-kosten	[€/kW _e]	565
Variabele O&M-kosten	[€/kWh]	-
Elektrisch rendement	[%]	3,1
Thermisch rendement	[%]	24,7
Vermeden brandstofkosten	[€/m ³]	0,19

3.2.2 Kostenverlagende factoren hydrothermale warmtekracht

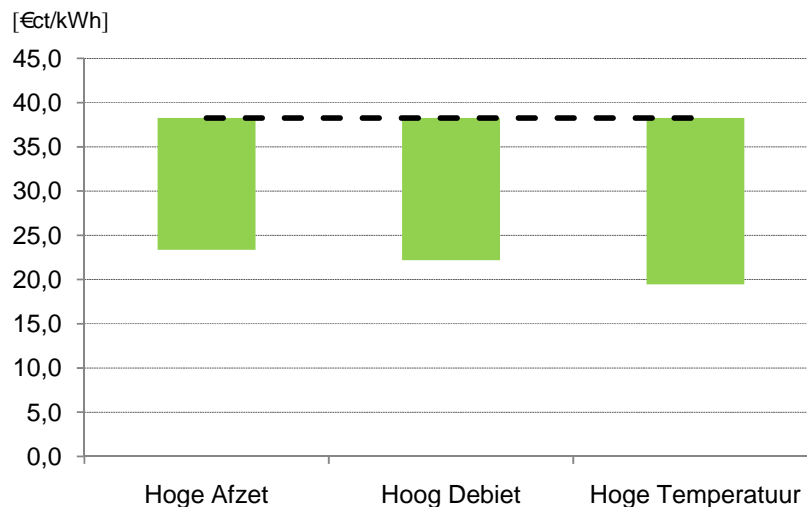
Uit bovenstaande analyse zou geconcludeerd kunnen worden dat geothermische warmtekracht in Nederland een dure optie is. De parameters uit Tabel 3.1 bieden aangrijpingspunten voor verbetering. De parameters die hierin bepalend zijn, zijn met name het temperatuurniveau (en daaraan gekoppeld het ORC-rendement) en het debiet. Daarnaast zorgt een hoge afzet van warmte voor een daling van de elektrische opwekkosten. Er zijn locaties in Nederland waar de temperatuurgradiënt in de bodem de 30°C/km overstijgt. Daarmee zijn er locaties denkbaar waar op een diepte van 4.000 m een watervoerende laag met een temperatuur van 150°C kan worden aangetroffen, corresponderend met een gemiddelde temperatuurgradiënt van 35°C/km. Dergelijke condities maken het mogelijk een groter gedeelte van de geothermische energie aan te wenden voor elektriciteitsopwekking, bovendien stijgt het omzettingsrendement van de ORC naar ongeveer 12%. Als we de overige kentallen uit Tabel 3.1 ongewijzigd laten, heeft dit tot gevolg dat het netto elektrisch vermogen toeneemt tot 920 kW_e. Daarmee komen de specifieke investeringskosten op 25.200 €/kW_e. De productiekosten dalen tot 19,5 €/kWh_e.

Een hoger debiet is een andere factor die de productiekosten van geothermische elektriciteit omhoog kan brengen. Er is in Nederland slechts een zeer beperkt aantal locaties, waar men verwacht een hoog debiet aan te treffen. De permeabiliteit van de laag kan echter ook kunstmatig worden vergroot. Men spreekt in dit geval van het ondergronds stimuleren of fraccen van de bodem. Ondanks dat er in Nederland nog geen ervaring is met het toepassing van ondergrondse stimulering voor geothermische doeleinden is het de verwachting dat deze techniek snel zijn intrede kan maken. De reden hiervoor is dat er aanzienlijke ervaring bestaat vanuit de olie- en gaswinning. De kosten die aan fraccen verbonden zijn, zijn in de orde van 1 - 1,5 M€ per project (Gankema, 2011). Op de totale kosten van een geothermisch warmtekracht project vormt dit slechts een klein onderdeel (ca. 5%). Het effect van verhoging van het debiet tot 225 m³/uur op

de elektrische opwekkosten is weergegeven in Figuur 3.1; de kosten dalen in dit voorbeeld tot 22,2 €ct/kWh.

Een derde factor die een grote invloed heeft op de opwekkosten is de warmteafzet. In de referentie-installatie voor warmtekracht is uitgegaan van warmtelevering bij 75°C, waarbij 5000 vollasturen worden gehaald. Indien dit aantal verhoogd kan worden dalen de opwekkosten. In Figuur 3.1 is het effect weergegeven van de realisatie van 8000 vollasturen voor warmteafzet; dit vertaald zich in opwekkosten van 23,4 €ct/kWh.

Uit het bovenstaande blijkt dat de referentiecasse voor hydrothermale geothermische warmtekracht niet eenduidig te definiëren is. Hierbij spelen factoren aan zowel de kant van opwekking als van afzet een rol. In geen van de hierboven geschetste situaties daalt de kostprijs van geothermische elektriciteit onder het niveau van 15 €ct/kWh. Combinatie van meerdere van deze factoren maken het mogelijk geothermische elektriciteit tegen lagere kosten te produceren dan 15 €ct/kWh. Het ontbreken van gerealiseerde warmtekrachtprojecten maakt het lastig om in te schatten in hoeverre dit op korte termijn realistisch is.



Figuur 3.1 *De elektrische opwekkosten voor hydrothermale geothermische warmtekracht: voor de referentie-installatie (doorbroken lijn) en de invloed van een hoge afzet, hoog debiet en hoge brontemperatuur zoals gedefinieerd in de tekst*

3.2.3 EGS

Onder *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) verstaan we ultradiepe geothermie (≥ 5000 m). De lagen op deze diepten zijn aantrekkelijk vanwege de hoge temperatuur (150°C tot 250°C), maar worden gekenmerkt door een lage permeabiliteit, wat stimulering noodzakelijk maakt. EGS projecten zijn nog niet gerealiseerd in Nederland. De projecten in Soultz, Frankrijk, en Landau, Duitsland, vallen in de categorie van EGS, in deze demoprojecten is ervaring opgedaan met EGS, maar van standaardisatie is nog geen sprake. Het ligt dan ook niet in de lijn der verwachtingen dat in Nederland een project in deze categorie op korte termijn gerealiseerd kan worden. Te meer ook daar de bodem op deze diepte nog maar zeer beperkt in kaart is gebracht. Dit type projecten zal in het algemeen worden aangemerkt als een demonstratieproject.

Voor EGS vervalt de voorwaarde van de aanwezigheid van een aquifer. Bovendien neemt de temperatuurgradiënt in bodem voor dieptes van meer dan 3.000 m toe, op sommige locaties tot wel 40°C/km. Hiermee kent EGS in potentie een ruimer toepassingsgebied en wordt, vanwege de hogere temperaturen, elektriciteitsproductie interessant. Bovendien kan het hoge temperatuurniveau leiden tot grotere afzetmogelijkheden, waaronder ook voor industriële toepassing

voor proceswarmte. Het ontbreken van gerealiseerde projecten (in Nederland) op het gebied van EGS voor geothermie maakt het onmogelijk om tot een accurate inschatting van de kosten te komen. Initiatiefnemers van EGS geothermie verwachten een kostenniveau in de orde van 5 tot 10 €/ct/kWh_c voor een toepassing volledig gebaseerd op elektriciteitsopwekking.

3.2.4 Financieringsparameters en basisbedrag geothermische warmtekracht

Voor de berekening van de opwekkosten van geothermische elektriciteit in hydrothermale warmtekracht projecten is uitgegaan van de financieringsparameters zoals vermeld in Tabel 3.3. Voor geothermische warmtekracht installaties komt alleen het gedeelte van de installatie dat dient voor de winning van aardwarmte in gedurende 10 jaar in aanmerking rentekorting volgens de regeling groenprojecten. Hiertoe rekenen wij de volledige installatie met uitzondering van de ORC-installatie. Voor de referentie-installatie betreft dit ruim 90% van de investering. Dit leidt tot een effectieve rente over de volledige looptijd van de lening van 5,3%. De opbouw van het basisbedrag voor de referentie-installatie hydrothermale warmtekracht is gegeven in Tabel 3.4.

Tabel 3.3 *Financiële parameters Geothermie - warmtekracht*

	Aandeel eigen vermogen [%]	Rente [%]	Rendement op eigen vermogen [%]	Kapitaalkosten [%]	Looptijd lening [jr]	Economische levensduur [jr]	Groenfinanciering	EIA-maximum (EIA bij referentie -installatie) [€/kW _c]
Geothermische warmtekracht	20	5,3	15	6,0	30	30	Ja, alleen winning aardwarmte	Geheel

Tabel 3.4 *Basisbedrag voor hydrothermale geothermische warmtekracht*

	Subsidiëduur [jaar]	Productiekosten [€/ct/kWh]	Transactiekosten [€/ct/kWh]	Basisprijspremie [€/ct/kWh]	Basisbedrag [€/ct/kWh] Eindadvies 2010
Hydrothermale geothermie warmtekracht	15	38,26	0,09	0,25	38,6

3.3 Duitse en Nederlandse praktijkvoorbeelden c.q. studies

Er zijn, zoals vermeld, achttien projecten op het gebied van geothermische warmtekracht of elektriciteitsopwekking in Duitsland gerealiseerd, in uitvoering of gepland. In Nederland zijn ca. 10 studies uitgevoerd naar warmtekracht of elektriciteit op basis van geothermische energie. Een betreft geothermische elektriciteitsopwekking of warmtekracht op Terschelling en de andere betreft geothermische warmtekracht op Texel. Beide studies worden kort samengevat.

Terschelling

In 2008 heeft IF Technologie een studie uitgevoerd naar geothermische elektriciteitsopwekking op Terschelling (IF, 2008). IF Technologie onderscheidt de volgende dieptes en geologische formaties, namelijk 3.200 m (Rotligendes), 3.000 m (Zuidwalvulkaan) en 7.000 m (kolenkalk). Uit economisch oogpunt lijkt de grootste diepte (7.000 m, kolenkalk) het meest interessant. Deze optie wordt hieronder (Texel) in meer detail aan de orde gesteld.

Texel

Ecofys en IF Technology analyseren in (Ecofys - IF, 2009) de benutting van geothermische energie voor warmtekracht op Texel. Uitsluitend een managementsamenvatting van de studie is openbaar gemaakt. De projectkosten, exclusief afstandsverwarming, worden geschat op € 51-53 miljoen. Uitgaande van een doublet - een productiebooring en een injectiebooring - en boorkosten van gemiddeld € 3.500 per meter (Internetbron 2), kan worden berekend dat de geothermische energie wordt gewonnen op ca. 7.000 m diepte. In de studie wordt gerefereerd aan de genoemde Kolenkalk Groep op 5.500 tot 7.000 m diepte. De in de studie genoemde boorkosten (projectkosten minus installatie en afstandsverwarming) zijn in overeenstemming met het kengetal van gemiddeld € 3.500 per meter.

De studie vermeldt niet het elektrische vermogen van de geothermische centrale. Wel melden Ecofys en IF Technology dat het elektriciteitsverbruik van Texel 0,24 PJ is. Geconcludeerd wordt dat een groot deel van de elektriciteitsvraag op Texel (in het gunstigste geval meer dan helft op basis van een doublet) kan worden voorzien met een geothermische elektriciteitscentrale. Door het vermeerderen van de putten is het zelfs mogelijk in de volledige elektriciteitsbehoefte van Texel te voorzien. Op basis van een capaciteitsfactor van 75% (6570 vollastuur per jaar), kan het elektrische vermogen van de geothermische centrale worden geschat op 5 MW_e. Als de genoemde investeringskosten worden toegerekend aan dit vermogen (5 MW_e), zijn de specifieke investeringskosten van een deze geothermische warmtekrachtcentrale ca. 10.000 €/kW_e.

Duitsland

Het gaat hierbij om vier typen projecten, namelijk (zie Bijlagen D en E):

- Afstandsverwarming; veel projecten (17) hebben betrekking op levering van warmte aan een warmtenet zonder elektriciteitsopwekking.
- Levering van warmte aan thermische baden (3).
- Stadsverwarming (15), een warmtekrachtproject, waarbij de warmte wordt geleverd aan een warmtenet.
- Elektriciteitsopwekking (3).

Achttien projecten betreffen warmtekracht of elektriciteitsopwekking. Tien projecten worden representatief geacht en hebben bruikbare kostendata. Deze projecten, samengevat in Bijlage D, leveren de volgende gemiddelde waarden:

- Boorconfiguratie: doublet of triplet.
- Temperatuur in aquifer: 140°C.
- Debiet: 255 m³/uur (71 l/s).
- Diepte: ca. 3700 m.
- Elektrisch vermogen: 4,1 MW_e.
- Investeringskosten boringen: 5.600 €/kW_e (ca. € 19,5 miljoen).
- Overige investeringskosten: 6.000 €/kW_e (ca. € 29 miljoen).
- Totale investeringskosten boren en installatie: 10.000 €/kW_e (ca. € 41 miljoen).

Hierbij past een aantal kanttekeningen. Ten eerste tellen niet alle kosten op. De boorkosten zijn bijvoorbeeld niet voor alle projecten bekend. Ten tweede zijn de boorkosten afhankelijk van het vermogen: hoe groter het thermische vermogen, des te lager zijn de specifieke investeringskosten. Ten derde worden de kosten van afstandsverwarming niet tot de projectkosten gerekend.

De totale projectkosten, exclusief afstandsverwarming, worden geschat op 10.000 €/kW_e. Hierbij passen twee kanttekeningen:

- Twee beschouwde projecten, Bruchsal en Unterhaching, behoorden tot de eerste projecten van dit type, reden waarom de specifieke investeringskosten relatief hoog waren.

- In de verdere toekomst zijn ten opzichte van de huidige stand van de techniek nog verdere technologische verbeteringen en kostendalingen mogelijk.

Qua orde van grootte zijn de specifieke investeringskosten van relatief kleine geothermische warmtekrachtinstallaties in Duitsland vergelijkbaar met de kosten die worden geschat voor Nederland (25.200 €/kW_e in geval van hydrothermale warmtekracht inclusief kostenverlagende factoren).

4. Conclusies en aanbevelingen

Het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie heeft aan ECN en KEMA gevraagd om de productiekosten te berekenen van diverse opties voor geothermische energie. Geothermische energie is tot nu toe beperkt toegepast in Nederland. Het aantal projecten waarvoor opsporings- of winningvergunningen zijn aangevraagd groeit snel. Er zijn vier projecten in de glastuinbouw tot stand gekomen dan wel in het stadium van realisatie (Westland) en een project voor de gebouwde omgeving (Den Haag). Vanwege de vereiste grotere boordiepte heeft warmtekracht of elektriciteitsopwekking op basis van geothermische energie in Nederland verhoudingsgewijs een verder weg liggend perspectief. Echter ook op dit gebied is er sprake van een toegenomen interesse. Tabel 5.1 geeft een overzicht van de geothermische varianten, die in dit rapport bestudeerd zijn.

Tabel 4.1 *Overzicht van de kosten van de verschillende bestudeerde geothermische varianten*

	Subsidie [jaar]	Productiekosten [€/kWh _e] of €/GJ _{th}	Transactiekosten [€/kWh]	Basisprijspremie [€/kWh]	Basisbedrag [€/kWh] of [€/GJ _{th}]
Warmte					
Glastuinbouw	15	9,6	-	-	9,6
Groene-weide afstandsverwarming	15	11,0	-	-	11,0
Bestaande afstandsverwarming	15	9,0	-	-	9,0
Hydrothermale warmtekracht					
Hydrothermale warmtekracht - ref	15	38,26	0,09	0,25	38,6
<i>Hoge afzet</i>	15	23,37	0,09	0,25	23,7
<i>Hoog debiet</i>	15	22,17	0,09	0,25	22,5
<i>Hoge temperatuur</i>	15	19,46	0,09	0,25	19,8

De productiekosten van geothermische warmte liggen rond de 10 €/GJ. Er is in deze studie geen analyse van de onrendabele top van geothermische warmte gemaakt, hiervoor is meer duidelijkheid over de toekomstige regeling voor warmte in de SDE+ vereist. Hydrothermale geothermische warmtekracht is als optie voor de productie van elektriciteit uit aardwarmte relatief duur. Echter specifieke gunstige lokale omstandigheden en/of een zeer gunstige afzetmogelijkheden voor de geproduceerde warmte kunnen de kostprijs onder of in de buurt van het indicatieve hoogste plafond van 15 €/kWh in de SDE+ regeling brengen. EGS bevindt zich in de demonstratiefase, maar biedt volgens de sector in potentie de mogelijkheid de elektrische opwekkosten te verlagen tot 5 - 10 €/kWh.

Referenties

- AKE (2005): *Erneuerbare Energien in Metzingen*. AKE Metzingen, Deutschland, 2005.
<http://www.ake-metzingen.info/pdf/Potentialstudie/ake%20stadt%203.pdf>
- Bosch, R., van den (2010): *Stappenplan Winning Aardwarmte voor Glastuinbouw*. Rik van den Bosch en Ben Flipse, Kas als energiebron, 2010.
http://www.energiek2020.nu/fileadmin/user_upload/Kas_als_Energiebron/aardwarmte/sappenplanaardwarmte_november.pdf
- BMU (2009a): *Nutzungsmöglichkeiten der tiefen Geothermie in Deutschland*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, Deutschland, Januar 2009. http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/tiefe_geothermie.pdf
- BMU (2009b): *Bericht der Bundesregierung über ein Konzept zur Förderung, Entwicklung und Markteinführung von geothermischer Stromerzeugung und Wärmenutzung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, Deutschland, 2009, p. 22. http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/.../pdf/bericht_geothermie_bf.pdf
- BMU (2007a): *Geothermie-Projekt Bruchsal*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, Deutschland, November 2007. <http://www.ie-leipzig.com/IE/Geothermie/Portal/Projekte/Bruchsal.pdf>
- BMU (2007b): *Tiefe Geothermie in Deutschland*. BMU, Berlin, Deutschland, September 2007. http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_tiefe_geothermie.pdf
- Dobschütz, A., von, en T. Reif (2009): *Finanzierung und Wirtschaftlichkeit von Projekten der Tiefengeothermie*. Fachtagung 'Klima schützen - Werte schaffen', 13 Juli 2009. http://www.bayernlb.de/internet/ln/ar/sc/Internet/de/Downloads/0100_CorporateCenter/1100/1152Nachhaltigkeitsmanagement/0907_Klimatag/BayernLBTiefengeothermie.pdf
- EC (2009): *Staatssteunmaatregel nr. N 442/2009 - Nederland garantiefaciliteit voor geothermische energie*. Europese Commissie, Brussel, 22.09.2009, C(2009)7437. http://ec.europa.eu/eu_law/state_aids/comp-2009/n442-09.pdf
- Ecofys - IF (2009): *Geothermische elektriciteitscentrale op Texel - Haalbaarheidsstudie*. Ecofys/IF Technology, Utrecht/Arnhem, 10 oktober 2009. http://www.ecofys.com/nl/publicaties/documents/eindrapportTexel-managementsamenvatting_def.pdf
- EIA (2010): *Annual Energy Outlook 2010*. Energy Information Administration (EIA), Department of Energy (DoE) USA, Washington, April 2010. [http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383\(2010\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383(2010).pdf)
- ELI (2010): *Stimulering duurzame energie - Brief Minister betreffende SDE+*. Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (ELI), Den Haag, 30 november 2010. <http://www.rijksoverheid.nl/ministeries/eleni/documenten-en-publicaties/kamerstukken/2010/11/30/stimulering-duurzame-energie.html>
- ENGINE (2007): *Economic analysis of geothermal energy provision in Europe*. ENGINE - Enhanced Geothermal Network of Europe, Workpackage 5 - Deliverable D35, 2007. http://engine.brgm.fr/Deliverables/Period2/ENGINE_D35_WP5_EconomicApproach_I_E_29102007.pdf
- EZ (2010): *Delfstoffen en aardwarmte in Nederland - Jaarverslag 2009*. Ministerie van Economische Zaken (EZ), Directoraat-Generaal voor Energie en Telecom, juni 2010.

- Gankema, M. (2011): Persoonlijke mededeling M. Gankema, IF Technology, Arnhem, februari 2011.
- GEA (2005): *Factors Affecting Costs of Geothermal Power Development*. Geothermal Energy Association, Washington DC, USA, August 2005. <http://www.geo-energy.org/reports/Factors%20Affecting%20Cost%20of%20Geothermal%20Power%20Development%20-%20August%202005.pdf>
- Harmsen, R. en M. Harmelink (2007): *Duurzame warmte en koude 2008-2020: Potentiëlen, barrières en beleid*. Ecofys, Utrecht, 25 juli 2007, PBIONL071816. http://www.ecofys.com/nl/publicaties/duurzame_warmte_en_koude_2008-2020.asp
- Huenges, E. (2010): *Petrothermale Geothermie - nationaler und internationaler Stand*. International Centre of Geothermal Research Sektion Reservoirtechnologien, GFZ, Potsdam, 2010. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/01_Huenges.pdf
- Huenges, E. (2007): *Geothermische Bereitstellung von Strom, Wärme oder Kälte*. GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam, 19 April 2007. http://www.uni-saarland.de/.../AKE2007F_03_Huenges_Geothermie.ppt
- IF (2008): *Geothermie Terschelling*. IF Technology, Arnhem, 58196/GW, 24 juli 2008. http://www.duurzaamerschelling.nl/Definitief_onderzoeksrapport_Geothermie.pdf
- Jokiel, C. (2009): *Strom und Wärme aus bayerischem Thermalwasser - Das Geothermiekraftwerk Kirchstockach*. HOCHTIEF PPP Solutions GmbH, Duitsland, 6 november 2009. http://www.bdzement.de/fileadmin/gruppen/bdz/1Presse_Veranstaltung/Vortrag_Dr-Jokiel.pdf
- Jongorius, P. (2010): *Geothermie, waar staan we?* DAP Geothermie Symposium 'Groeien met Geothermie', Delft, 15 november 2010.
- Jung, R., en J. Orzol (2005): *Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland*. 2. Konferenz der Elektrizitätswirtschaft 'Regenerative Energien - Mut zum Wandel', Stuttgart, 6-7 April 2005. http://www.linzer-energiegipfel.de/documents/04_Jung.pdf
- Kriebs, K., en C. Pohl (2006): *Fernwärmekonzept für eine geothermische Wärmeversorgung in der Gemeinde Rülzheim*. Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Deutschland, 22 Februar 2006. <http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/projekte/downloads/GeothermiefernwaermeRuelzhaim.pdf>
- Lund, J.W. (2005): Combined Heat and Power Plant Neustadt-Glewe, Germany. GHC Bulletin, June 200, pp. 31-34. <http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull26-2/art8.pdf>
- Menzel, H. (2007): *Geothermische Stromerzeugung in Landau*. Geothermische Wärme- und Stromerzeugung für Kommunen und Industrie, GeoForschungs Zentrum (GFZ) Potsdam, 18-19 Oktober 2007. <http://www.ie-leipzig.com/IE/Veranstaltungen/-Geothermie/Menzel.pdf>
- MIT (2006): *The Future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Massachusetts, USA, 2006. http://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future_geo_energy.pdf
- Reif, T. (2010): *Geothermie und Biomasse: „Saubere“ Wärme für Bayerns Kommunen*. 3. GZ-Energie-Fachforum - Power für Bayerns Kommunen, Garching, 24 Juni 2010. http://www.geothermiekompetenz.de/cms/media/Downloads/GGSC/10_06_24_Praesentation_Garching.pdf

- Reif, T. (2009): *Economic Aspects of Geothermal District Heating and Power Generation - German Experience Transferable?* Sontag & Partner, Tallinn University of Technology, 17 April 2009.
http://www.geothermiekompetenz.de/cms/media/Downloads/GGSC/09_04_17_Economics_Geothermal_Energy_Tallinn.pdf
- Schellschmidt, R. et al (2005): *Geothermal Energy Use in Germany*. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
http://www.geotis.de/homepage/Ergebnisse/2005%20WGC_Germany.pdf
- Schopp, J. (2008): *Stromerzeugung aus Erdwärme - Geothermie-Projekt Bruchsal*. Energie- und Wasserversorgung Bruchsal GmbH, 2009.
http://www.energieundklimaschutzbw.de/content/public/de/_media/_pdf/Hr_Schopp_Bruchsal.pdf
- Seichter (2008): *Öffentlichkeitsveranstaltung zur Geothermie in Grasbrunn - Vaterstetten*. IB NEWS GmbH, 14 Juli 2008.
http://www.vaterstetten.de/city_info/display/dokument/show.cfm?region_id=276&id=331622
- Vaterstetten (2010): *Strom und Wärme für Vaterstetten*. Vaterstetten, Februar 2010.
<http://www.energiewende-vaterstetten.de/Docs/EnergieInVaterstetten.pdf>
- Vethman, P., en P. Kroon (2010): *Lokaal energie- en klimaatbeleid*. ECN, Petten, ECN-E--10-097. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2010/e10097.pdf>
- Zwart, B., de (2010): *Geothermie*. TVVL Bijeenkomst, 9 september 2010.
http://www.tvvl.nl/uploads/Text/document_Presentatie_Bas_de_Zwart_lunchbijeenkomst.pdf

Internetbronnen

1. http://www.nlog.nl/resources/Geothermie/Poster-Aardwarmte-verg-per%20sept_2010.pdf
2. <http://www.technischweekblad.nl/onderzoek-naar-elektriciteit-uit-ultradiepe.90277.lynkx>
3. <http://www.geothermie.de/aktuelles/projekte.html>
4. http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/aktuelles/projekte/tiefe/deutschland/Geothermie-Projekte-in-Deutschland_12.2010.pdf
5. http://www.infogeo.de/dokumente/download_pool/Tabelle%20geothermischer%20Nutzung_180507_in%20Betrieb.pdf
6. <http://www.geothermie.de/news-anzeigen/2009/12/23/bruchsal-am-netz-enbw-und-ewb-nehmen-das-erste-geothermie-kraftwerk-baden-wuerttembergs-in-betrieb.html>
7. <http://www.meine-stadtwerke.de/vkuGips/Gips;jsessionid=665803789CA5181E215D576BD2131228?SessionMandant=Kampagne&Anwendung=CMSTickerEintrag&Methode=ShowHTMLAusgabe&SessionMandant=Kampagne&RessourceID=176604&WebPublisher.NavId=176604&LightBox=true>
8. <http://www.afk-geothermie.de/cms/media/pdf/newsletter/AFK-Newsletter-2010-01.pdf>
9. <http://www.wochenanzeiger.de/article/79255.html>
10. <http://www.energy20.net/pi/index.php?StoryID=317&articleID=124021>
11. <http://www.erdwerk.com/projects/balneology-2/balneology-bad-woerishofen/>
12. http://www.steag-saarenergie.de/de/02_Leistungen/pdf/Sonderdruck_Geothermieprojekt_Erding.pdf
13. <http://www.ie-leipzig.com/IE/Geothermie/Portal/Projekte/Erding.pdf>
14. <http://www.ewg-garching.de/das-projekt/bohrung/>
15. <http://www.danpower-ekt.de/danpower/referenzen/referenz/projektsteuerung-geothermie-garching-bei-muenchen.html>
16. <http://www.geothermie.de/uploads/media/Geothermische.Energie.Nr.58.pdf>
17. http://www.tiefegeothermie.de/index.php?id=51&tx_ttnews%5BpS%5D=1281078985&tx_ttnews%5Bpointer%5D=8&tx_ttnews%5Btt_news%5D=319&tx_ttnews%5BbackPid%5D=60&cHash=f5d67f4221
18. <http://admin.merkur-online.de/lokales/landkreis-wolfratshausen/geothermie-bohrung-erst-ende-jahres-844451.html>
19. <http://www.grasbrunn.de/export/download.php?id=251>
20. http://www.vaterstetten.de/city_info/display/dokument/show.cfm?region_id=276&id=330876
21. http://www.tiefegeothermie.de/index.php?id=51&tx_ttnews%5BpS%5D=1290530071&tx_ttnews%5Bpointer%5D=8&tx_ttnews%5Btt_news%5D=349&tx_ttnews%5BbackPid%5D=60&cHash=592dd8a2ce
22. http://www.energieregion.nrw.de/_database/_data/datainfopool/FK2009-B-Baur.pdf
23. http://www.sgg-bayern.de/pro_3.shtml

24. http://www.froeschl-geothermie.de/fileadmin/geothermie/images/Presse/pdf/20101119-bohrbeginn-kirchweidach/Rosenheim24.de_191110.pdf
25. <http://www.mauerstetten.de/geothermie/geothermie.pdf>
26. <http://www.erdwerk.com/projekte/tiefe-hydrothermale-geothermie/geothermie-riem/>
27. http://landkreis-muehldorf.de/shared/data/pdf/erdwaerme_lfu_9-2006.pdf
28. http://www.eon-bayern.com/pages/eby_waerme/Presse/Pressemitteilungen/Aktuell/Pressemitteilung.htm?id=1448626
29. <http://www.ie-leipzig.com/IE/Geothermie/Portal/Projekte/Pullach.pdf>
30. http://www.iep-pullach.de/cms/media/downloads/infos_iep/IEP_Infoabend_08-11-2010.pdf
31. <http://begethermal.com/de/geothermie/47-pullach-3b>
32. <http://www.swm.de/dms/swm/dokumente/unternehmen/energieerzeugung/geothermie/geothermie-hkw-sauerlach.pdf>
33. <http://www.swm.de/dms/swm/dokumente/unternehmen/energieerzeugung/geothermie/pm-geothermie-sauerlach-01-10-2007/pm-geothermie-sauerlach-01.10.2007.pdf>
34. <http://www.zek.at/uploads/pdf/064-065.pdf>
35. <http://www.energy20.net/pi/index.php?StoryID=317&articleID=167032>
36. <http://www.geothermie.de/uploads/media/Geothermische.Energie.Nr.64.pdf>
37. <http://www.ie-leipzig.com/IE/Geothermie/Portal/Projekte/Straubing.pdf>
38. <http://idw-online.de/pages/de/news11933>
39. <http://pressemitteilung.ws/node/219272>
40. http://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/web.nsf/id/pa_daten_fakten.html
41. [http://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/web.nsf/gfx/AEEA095E9B1125D2C12576790029FA0C/\\$file/Projectinfo_BINE_english.pdf](http://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/web.nsf/gfx/AEEA095E9B1125D2C12576790029FA0C/$file/Projectinfo_BINE_english.pdf)
42. [http://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/web.nsf/gfx/73F32393CB88135BC1257663003B5456/\\$file/Projektdokumentation_Roedl.pdf](http://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/web.nsf/gfx/73F32393CB88135BC1257663003B5456/$file/Projektdokumentation_Roedl.pdf)
43. <http://www.akumwelt.py-isny.de/vortreaege/knapek.pdf>
44. http://www.unterschleissheim.de/Media/pdf/gtu/Infozeitung-Gtu_Stand-300610.pdf
45. http://www.tiefengeothermie.de/index.php?id=51&tx_ttnews%5BpS%5D=1286444959&tx_ttnews%5Btt_news%5D=449&tx_ttnews%5BbackPid%5D=62&cHash=6cffee77af
46. <http://www.ovb-online.de/waldkraiburg/januar-beginnt-zweite-bohrung-1040260.html>
47. http://www.geopotenzial-nordsee.de/nm_335476/EN/Themen/Energie/Projekte/Geothermie/GrossSchoenebeck_en.html
48. http://www.tiefengeothermie.de/index.php?id=51&tx_ttnews%5BpS%5D=1290659785&tx_ttnews%5Btt_news%5D=446&tx_ttnews%5BbackPid%5D=57&cHash=b6c599b564
49. <http://www.ie-leipzig.com/IE/Geothermie/Portal/Projekte/Prenzlau.pdf>
50. http://www.erdwaerme-grossgerau.de/uploads/media/PM_20100112_01.pdf
51. <http://www.ie-leipzig.com/IE/Geothermie/Portal/Projekte/Neustadt-Glewe.pdf>

52. <http://www.bine.info/hauptnavigation/publikationen/publikation/geothermische-stromerzeugung-in-neustadt-glewe/orc-anlage-in-neustadt-glewe/>
53. <http://www.gruene-roemerberg.de/Dokumente/2003-12-06%20Geothermie-LAK.pdf>
54. <http://www.ie-leipzig.com/IE/Geothermie/Portal/Projekte/Waren.pdf>
55. <http://www.geothermie.de/aktuelles/projekte/tiefe-geothermie/deutschland/niedersachsen/hannover-genesys-projekt.htm>
56. http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos_2010/Projektinfo_0510/projekt_0510_internetx.pdf
57. <http://www.ie-leipzig.com/IE/Geothermie/Portal/Projekte/Arnsberg.pdf>
58. <http://www.derwesten.de/staedte/arnsberg/Aber-diesmal-soll-es-funktionieren-id3955955.html>
59. <http://www.geothermie.de/uploads/media/Geothermische.Energie.Nr.59.pdf>
60. <http://www.pfalzwerke-geofuture.de/6246.php>
61. <http://www.geothermie.de/uploads/media/Geothermische.Energie.Nr.56-57.pdf>
62. http://www.pfalzwerke.de/unternehmen/presse/2342_6311.php
63. http://www.geox-gmbh.de/media/homepage/BINE_Informationsdienst_projektinfo_14-07.pdf
64. http://www.tiefegeothermie.de/index.php?id=49&tx_ttnews%5Bpointer%5D=5&tx_ttnews%5Btt_news%5D=439&tx_ttnews%5BbackPid%5D=48&cHash=9065d21573
65. http://hotrock.de/press_releases/news_hotrock_30_Millionen_fuer_Geothermiekraftwerk.pdf

Lijst van afkortingen

COP	Coefficient of Performance
CSC	Current Source Converter
EGS	Enhanced Geothermal Systems
EL&I	Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie
FMI	Flat Mass Impregnated
HDR	Hot Dry Rock
LT	Lage temperatuur
MI	Mass Impregnated
O&M	Operation and Maintenance
ORC	Organic Rankine Cycle
WKK	Warmtekracht koppeling
WKO	Warmte Koude Opslag

Bijlage A Geïnterviewde contactpersonen

In het kader van deze studie hebben de auteurs de volgende personen geïnterviewd:

- Victor van Heekeren, Platform Geothermie, Den Haag.
- Mark Gankema, IF Technology, Arnhem.
- Dirk Snickers, NUON, Amsterdam.
- Hugo Buis en Daan Pelders, Eneco, Rotterdam.
- Rik van den Bosch, A & G van den Bosch, Bleiswijk.
- Peter Odermatt en Egbert Vrijen, Stadsverwarming Purmerend.

Bijlage B Formule geothermisch vermogen (Vergelijking 1)

De warmteproductie (thermisch vermogen: W_{th}) van een doublet is, conform Van den Bosch (2010), afhankelijk van:

- De hoeveelheid water per uur (in m^3 per uur).
- De hoeveelheid warmte die het formatiewater kan bevatten (afhankelijk van soortelijk gewicht en samenstelling) (in kg water per m^3 x capaciteit Joule per kilo en graad afkoeling; J/m^3K).
- De afkoeling van het water in de warmtewisselaar (ΔT in K).

In formulevorm:

$$W_{th} = Q \times \rho \times cv \times \Delta T$$

W_{th} = thermisch vermogen

Q = waterdebiet in m^3 per uur

ρ = dichtheid formatiewater

cv = warmtecapaciteit formatiewater

ΔT = afkoeling water in Kelvin

Een voorbeeld (referentie-installatie glastuinbouw):

$Q = 150 m^3/uur$, $\rho \times cv \approx 4,19 MJ/ m^3K$ en $\Delta T = 65^\circ C - 35^\circ C = 30^\circ C (= 30K)$

In het voorbeeld zijn ρ (dichtheid formatiewater kg per m^3) en c (warmtecapaciteit formatiewater) al gecombineerd tot warmtecapaciteit per volume.

$W_{th} = 150 \times 4,19 \times 30 / 3600 = 5,2 MW$.

Bijlage C Selectie geothermische warmteprojecten Duitsland

Bijlage E geeft een overzicht van geothermische warmteprojecten en warmtekrachtprojecten in Duitsland. Het gaat hierbij om vier typen projecten, namelijk:

- Afstandsverwarming; veel projecten (17) hebben betrekking op levering van warmte aan een warmtenet (soms ook thermische baden) zonder elektriciteitsopwekking.
- Levering van warmte aan thermische baden (3).
- Stadsverwarming (15), een warmtekrachtproject, waarbij de warmte wordt geleverd aan een warmtenet.
- Elektriciteitsopwekking (3).

Twintig projecten op het gebied van afstandsverwarming en thermische baden betreffen uitsluitend warmtelevering. Zes afstandsverwarming projecten worden representatief geacht en hebben bruikbare kostendata. Deze zes projecten (Tabel C.1) leveren de volgende gemiddelde waarden:

- Boorconfiguratie: doublet of triplet.
- Temperatuur in aquifer: 91°C.
- Debiet: 310 m³/uur (86 l/s).
- Diepte: ca. 2370 m.
- Capaciteit geothermisch: 9,7 MW_{th}.
- Investeringskosten boringen: 1.390 €/kW_{th} (~€ 12,3 miljoen).
- Overige investeringskosten: 330 €/kW_{th} (~€ 3,2 miljoen).
- Totale investeringskosten boren en installatie: 2.000 €/kW_{th} (~€ 21 miljoen).

Hierbij past een aantal kanttekeningen. Ten eerste tellen niet alle kosten op. De boorkosten zijn bijvoorbeeld niet voor alle projecten bekend. Ten tweede zijn de boorkosten afhankelijk van het vermogen: hoe groter het thermische vermogen, des te lager zijn de specifieke investeringskosten. Ten derde worden de kosten van afstandsverwarming niet tot de projectkosten gerekend. De totale projectkosten, exclusief afstandsverwarming, worden geschat op 2.000 €/kW_{th}.

Tabel C.1 *Karakteristieken geothermische warmteprojecten gebaseerd op een doublet of triplet in Duitsland*

Beieren	Deelstaat	Beieren						Gemiddeld 'groene weide' afstandsverwarming
	Locatie	Aschheim, Feldkirchen, etc	Garching	Poing	Pullach	Unterschleißheim	Waldkraiburch	
Aantal boringen		Doublet	Doublet	Doublet	Triplet	2 X	Doublet	Doublet of triplet
T aquifer	[°C]	82-85	80	85	104	83	105	91
T surface	[°C]							
Diameter	[mm]			210 / ...				
Stroomsnelheid	[m ³ /h]	270	270	360	108	N/A	288	310
Verticale diepte	[m]	2630 / 2700	2100 / 2240	2435 / 3050	2820 / 2940 / 3304	1961 / 2002	2600	2370
Enkele boorlengte	[m]	N/A	2165?	N/A	3550 / 4120 / 3936	N/A	N/A	
Toepassing(en)		Afstands- verwarming	Afstands- verwarming	Afstands- verwarming	Afstands- verwarming	Afstands- verwarming	Afstands- verwarming	Afstandsverwarming
Capaciteit (bron)	[MWth]	9						
Capaciteit (thermisch)	[MWth]	6,9	7,7	8	9,3	12,9	13,5	9,7
Capaciteit warmtepomp	[MWth]		N/A					
Capaciteit (elektrisch)	[MWe]							
Cyclus								
Leverancier								
Investeringskosten								
- Boorkosten etc	[miljoen €]	11,5	13	25	18,8	7,61	5	12,3
- Installatie	[miljoen €]		4,1		2,9	2,79		3,2
- Afstandsverwarming	[miljoen €]		17,7		14,3	8,1		12,5
- Overig	[miljoen €]		15,2			3,70		
- Totaal excl. warmtenet	[miljoen €]	N/A	32,3		21,7	14,1	20	20,8
Specifieke inv. kosten								
Specifieke boorkosten	[€/m]	N/A	3002	N/A	1620	N/A	N/A	
- Boorkosten etc	[€/kW _{th}]	1667	1688	3125	2022	590	370	1388
- Overig	[€/kW _{th}]		532		312	216		327
- Afstandsverwarming	[€/kW _{th}]		2299		1538	628		1341
- Overig	[€/kW _{th}]		1974			287		
- Totaal excl. warmtenet	[€/kW _{th}]	N/A	4195		2333	1093	1481	2030
In bedrijf		2009	2010	2010	2005	2005	2012?	

Bronnen: Internetbronnen 8, 9, 14-16, 28-31, en 44-45.

Bijlage D Geothermische warmtekrachtprojecten Duitsland

Bijlage E geeft een overzicht van geothermische warmteprojecten en warmtekrachtprojecten in Duitsland. Het gaat hierbij om vier typen projecten, namelijk:

- Afstandsverwarming; veel projecten (17) hebben betrekking op levering van warmte aan een warmtenet (soms gecombineerd met thermische baden) zonder elektriciteitsopwekking.
- Levering van warmte aan thermische baden (3).
- Stadsverwarming (15), een warmtekrachtproject, waarbij de warmte wordt geleverd aan een warmtenet.
- Elektriciteitsopwekking (3).

Achtien projecten betreffen warmtekracht of elektriciteitsopwekking. Tien projecten worden representatief geacht en hebben bruikbare kostendata. Deze projecten, samengevat in Tabel D.1, leveren de volgende gemiddelde waarden:

- Boorconfiguratie: doublet of triplet.
- Temperatuur in aquifer: 140°C.
- Debiet: 255 m³/uur (71 l/s).
- Diepte: ca. 3700 m.
- Elektrisch vermogen: 4,1 MW_e.
- Investeringskosten boringen: 5.600 €/kW_e (~€ 19,5 miljoen).
- Overige investeringskosten: 6.000 €/kW_e (~€ 29,0 miljoen).
- Totale investeringskosten boren en installatie: 10.000 €/kW_e (~€ 41 miljoen).

Hierbij past een aantal kanttekeningen. Ten eerste tellen niet alle kosten op. De boorkosten zijn bijvoorbeeld niet voor alle projecten bekend. Ten tweede zijn de boorkosten afhankelijk van het vermogen: hoe groter het thermische vermogen, des te lager zijn de specifieke investeringskosten. Ten derde worden de kosten van afstandsverwarming niet tot de projectkosten gerekend. De totale projectkosten, exclusief afstandsverwarming, kunnen worden geschat op 10.000 €/kW_e.

Tabel D.1 *Karakteristieken geothermische warmtekracht projecten Duitsland*

	Staat Locatie	Baden-Würt Bruchsal	Beieren Aying-Dürrnhaar	Holzkirchen	Kirch-stockach	Kirchweidach	Mauerstetten	Unterhaching	Hessen Groß-Gerau	Rijnland-Pf Landau	Rülzheim	Gemiddeld
Aantal boringen		Doublet	Doublet	Doublet?	Doublet	Doublet	Triplet	Doublet	Doublet	Doublet	Doublet?	140
T aquifer	[°C]	118	135	150	135	130	125-130	122	160?	150	160	
T surface	[°C]											
Diameter	[mm]						700 / 200	765 / 350				
Stroomsnelheid	[m ³ /h]	86	540		486		288	540		180-216	216	255
Diepte	[m]	1930 / 2540	3926 / 4114	?	3881 /	3900	4473	3350 / 3580	3,000?	3000 / 3400	> 3000	3690
Boorlengte	[m]	N/A	4393 / 4530	N/A	4214 / 4452	N/A	N/A	3446 / 3864	N/A	N/A	N/A	
Toepassing(en)		Warmtekracht	Warmtekracht	Warmtekracht	Warmtekracht	Warmtekracht	Elektriciteit	Warmtekracht	Warmtekracht	Warmtekracht	Warmtekracht	
Capaciteit (bron)	[MWth]	5,5				72		38	10			
Capaciteit (thermisch)	[MWth]	4			45			15-20	6	3-6		
Capaciteit warmtepomp	[MWth]											
Capaciteit (elektrisch)	[MWe]	0,55	4,5	5	4,5	8,36	5	2,36	3	2,5	5	4,1
Cyclus		Kalina	ORC		Kalina / ORC	Kalina / ORC	Kalina	Kalina	Kalina / ORC	ORC		
Leverancier		Siemens						Siemens		Ormat		
Investeringskosten												
- Boorkosten etc	[M€]	8,1	17		20-22		20	32		9,0		19,5
- Installatie	[M€]	9,8	30-35		14	50	20	16	35	6,2		29,0
- Afstandsverwarming	[M€]							32		5,8		18,5
- Overig	[M€]											
- Totaal excl. warmtenet	[M€]	18	50	61	34-36		40	48		15,2	30?	40,8
Specifieke inv. kosten												
Specifieke boorkosten	[€/m]	N/A	1905	N/A	2539	N/A	N/A	4378	N/A	N/A	N/A	
- Boorkosten etc	[€/kW _e]	14727	3778		4889		4000	13559		3600		5569
- Installatie	[€/kW _e]	17818	7222		3111	5981	4000	6780	11667	2480		5964
- Afstandsverwarming	[€/kW _e]							13559		2320		7778
- Overig	[€/kW _e]											
- Totaal excl. warmtenet	[€/kW _e]	32545	11000	12200	8000		8000	20339		6080	6000	10119
In bedrijf		2008	2011	2013	2011?		2009-2010	2009	2013	2008	2013?	

Bronnen: BMU, 2007a en b; Schopp, 2008; Jokiel, 2009; Menzel, 2007; Kriebs en Pohl, 2006; Internetbronnen 6, 7, 10, 21-25, 39-43, 50, 61-65.

Bijlage E Geothermische energie Duitsland

Data van geothermische energie projecten - warmte, warmtekracht of elektriciteitsopwekking - worden gepubliceerd door GtV Bundesverband Geothermie (Internet bronnen 7-9). Vier verschillende toepassingen of combinaties daarvan worden onderscheiden, namelijk:

- Afstandsverwarming; 17 projecten betreffen levering van warmte aan een warmtenet zonder elektriciteitsopwekking, soms in combinatie met thermische baden.
- Levering van warmte aan thermische baden (3 projecten).
- Stadsverwarming (15 projecten), warmtekracht waarbij de warmte wordt geleverd aan een warmtenet.
- Elektriciteitsopwekking (3 projecten).

Hierna volgt een samenvatting van de 38 projecten, gebaseerd op de gegevens in Tabel E.1.

Baden-Württemberg

1. Bruchsal

Het geothermie project in Bruchsal betreft een stadsverwarming project (warmtekracht). Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot een diepte van 1930 en 2540 meter, met een temperatuur van het aquifer van 118°C. De stroomsnelheid is 86 m³/uur (24 l/s). De geothermische centrale heeft een capaciteit van 0,55 MW_e en 4 MW_{th}, gebaseerd op een Kalina cyclus en geleverd door Siemens. De totale projectkosten bedragen € 18 miljoen, waarvan € 8,1 miljoen voor boorkosten en € 9,8 miljoen voor de geothermische centrale. De geothermische installatie is in 2008 in bedrijf genomen (BMU, 2007a; Schopp, 2008; Internetbronnen 6-7).

Beieren

2. Aschheim

Het project in Aschheim, Fieldkirchen en Kirchheim betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 2630 en 2700 meter diepte, met een temperatuur van 85°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 270 m³/uur (75 l/s). De geothermische installatie heeft een capaciteit van 6,9 MW_{th}. De totale projectkosten bedragen € 57,5 miljoen, waarvan € 11,5 miljoen voor boren. De installatie is in 2009 in bedrijf genomen (Internetbronnen 8-9).

3. Aying-Dürrenhaar

Het project in Aying-Dürrenhaar betreft een stadsverwarming project. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 3926 en 4114 m diepte, met een temperatuur van 135°C in het aquifer. De stroomsnelheid wordt geschat op 540 m³/uur (150 l/s). De warmtekrachtcentrale (ORC) heeft een elektrisch vermogen van 4,5 MW_e. De investeringen voor de boringen worden geschat op € 17 miljoen en voor de centrale op € 30-35 miljoen. De installatie wordt in 2011 in bedrijf genomen (Internetbron 10).

4. Bad Wörishofen

Het project in Bad Wörishofen betreft thermische baden. Er is een boring uitgevoerd tot 2600 m diepte, met een temperatuur van 80°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 18 m³/uur (5 l/s). De installatie is in 2005 in bedrijf genomen (Internetbron 11).

5. Erding

Het project in Erding betreft een project voor afstandsverwarming en thermische baden. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 2100 en 2350 m diepte, met een temperatuur van

62°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 198 m³/uur (65 l/s). De geothermische installatie heeft een capaciteit van 2 MW_{th} en de absorptiewarmtepomp heeft een capaciteit van 7 MW_{th}. De investeringen in de uitbreiding van het afstand verwarmingsnet zijn € 18,7 miljoen. De installatie is in twee fasen in 1998 en 2009 in bedrijf genomen (Internetbronnen 12-13).

6. Garching

Het project in Garching betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 2100 en 2240 m diepte, met een temperatuur van 80°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 270 m³/uur (75 l/s). De geothermische installatie heeft een capaciteit van 7,7 MW_{th} en de capaciteit van de absorptiewarmtepomp is onbekend. De projectkosten bedragen € 50 miljoen, waarvan naar schatting ca. € 12,5 miljoen voor boringen, € 4,1 miljoen voor de geothermische installatie en € 17,7 miljoen voor het afstandsverwarming net. De installatie is in 2010 in bedrijf genomen (Reif, 2010; Internetbronnen 14-16).

7. Geretsried

Het project in Geretsried betreft een stadsverwarming project. Er zijn twee boringen (doublet) gepland in 2010 tot een diepte van meer dan 5000 m. De temperatuur in het aquifer is 127-135°C. De stroomsnelheid bedraagt ca. 612 m³/uur (170 l/s). De centrale heeft een beoogd elektrisch vermogen van 5 MW_e en een thermisch vermogen van ca. 50 MW_{th}. De projectkosten worden geraamd op meer dan € 70 miljoen, waarvan € 20 miljoen voor boringen. De in bedrijf name is voorzien in 2012 (Internetbronnen 17-18).

8. Grasbrunn-Vaterstetten

Het project in Grasbrunn-Vaterstetten betreft een stadsverwarming project. Er zijn twee boringen (doublet) gepland in 2010 tot een diepte van 3280 en 3375 m. De temperatuur in het aquifer is naar schatting 92-105°C. De stroomsnelheid bedraagt 144-270 m³/uur (40-75 l/s). Het elektrisch vermogen is onbekend. De boorkosten worden geraamd op € 10,5 miljoen. De in bedrijf name is onbekend (Internetbronnen 19-20).

9. Holzkirchen

Het project in Holzkirchen betreft een stadsverwarming project. Er worden boringen (doublet) voorbereid, met een verwachte temperatuur van 150°C in het aquifer. De centrale heeft een beoogd elektrisch vermogen van 5 MW_e. De totale projectkosten worden geschat op € 61 miljoen. De installatie wordt naar verwachting in 2013 in bedrijf genomen (Internetbron 21).

10. Kirchstockach

Het project in Kirchstockach betreft een stadsverwarming project. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 3881 en 4114 m diepte, waarbij de temperatuur in het aquifer 135°C is. De stroomsnelheid wordt geschat op 486 m³/uur (135 l/s). De centrale heeft een beoogd elektrisch vermogen van 5 MW_e en een thermisch vermogen van 45 MW_{th}. De totale projectkosten worden geraamd op € 34-36 miljoen, waarvan € 20-22 miljoen boorkosten en € 14 voor de warmtekrachtcentrale. De in bedrijf name is voorzien in 2011 (Jokiel, 2009; Internetbronnen 22-23).

11. Kirchweidach

Het project in Kirchweidach betreft een stadsverwarming project. In 2011 worden twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 3900 m diepte, waarbij de temperatuur in het aquifer naar verwachting 130°C is. De warmtekrachtcentrale heeft een elektrisch vermogen van 8,36 MW_e. De investeringskosten voor de warmtekrachtcentrale worden geraamd op € 50 miljoen. De in bedrijf name is voorzien in 2013 (Internetbron 24).

12. Mauerstetten
 Het project in Mauerstetten betreft een project voor elektriciteitsopwekking. Er zijn drie boringen uitgevoerd tot 3760 m diepte, met een temperatuur van 125-130°C in het aquifer. De diameter van de boringen varieert van 700 mm aan het oppervlak tot 200 mm op 4470 m diepte. De stroomsnelheid is 288 m³/uur (80 l/s). De centrale heeft een elektrisch vermogen van 5 MW_e gebaseerd op een Kalina cyclus. De totale projectkosten worden geraamd op € 40 miljoen (50% boorkosten, 50% installatie). De installatie is in 2009/2010 in bedrijf genomen (Internetbron 25).
13. München-Riem
 Het project in München-Riem betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 2900 - 3020 m diepte, met een temperatuur van 90°C in het aquifer. De diameter van de boringen varieert van 470 mm aan het oppervlak tot 150 mm op 3000 m diepte. De stroomsnelheid is 180 m³/uur (50 l/s). De installatie heeft een capaciteit van 8 MW_{th}. De boorkosten bedragen € 5,3 miljoen. De installatie is in 2004 in bedrijf genomen (Internetbron 30).
14. Neu-Ulm
 Het project in Neu-Ulm betreft een project voor thermische baden en afstandsverwarming. Er is een boring (singlet) uitgevoerd tot 1036 m diepte, met een temperatuur van 57°C in het aquifer. De installatie heeft een capaciteit van 0,4 MW_{th}. Het jaar van in bedrijf name is onbekend (Internetbron 27).
15. Poing
 Het project in Poing betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 2435 en 3050 m diepte, met een temperatuur van 85°C in het aquifer. De diameter van de boringen is 210 mm aan het oppervlak. De stroomsnelheid is 360 m³/uur (100 l/s). De installatie heeft een capaciteit van 8 MW_{th}. De boorkosten zijn € 25 miljoen. De installatie is in 2010 in bedrijf genomen (Internetbronnen 13 en 28).
16. Pullach
 Het project in Pullach betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn boringen (triplet) uitgevoerd tot 2829, 2940 en 3310 m diepte, met een temperatuur van 104°C in het aquifer. De stroomsnelheid na de derde boring is 360 m³/uur (100 l/s) op basis van een doublet (uit te breiden tot een triplet, met een tweede productieboring). De installatie heeft een capaciteit van 9,3 MW_{th}. De projectkosten bedragen € 36,0 miljoen, waarvan € 18,8 miljoen voor de drie boringen, € 2,9 miljoen voor de geothermische installatie en € 14,3 miljoen voor afstandsverwarming. De installatie is in 2005 in bedrijf genomen (Internetbronnen 29-31).
17. Sauerlach
 Het project in Sauerlach betreft een stadsverwarming project. Er zijn vier boringen (twee doubletten) uitgevoerd tot 4179, 4181 en 4480 m diepte. De temperatuur in het aquifer is 140°C. De stroomsnelheid is 432 m³/uur (120 l/s). De warmtekrachtcentrale (type ORC) heeft een elektrisch vermogen van 5 MW_e en een thermisch vermogen van 4 MW_{th}. De geplande in bedrijf name is 2011 (Internetbronnen 32-33).
18. Simbach (Beieren) en Braunau (Oostenrijk)
 Het project in Simbach en Braunau betreft een stadsverwarming project. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot ca. 2500 m diepte, met een temperatuur van 80°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 266 m³/uur (74 l/s). De geothermische warmtekrachtcentrale heeft een elektrisch vermogen van 0,15 MW_e en een thermisch vermogen van 7,1 MW_{th}. De totale projectkosten bedragen ca. € 30 miljoen, waarvan € 12,5 miljoen voor boringen en € 17 miljoen voor afstandsverwarming. De installatie is in 2001 in bedrijf genomen (Internetbronnen 34-36).

19. Straubing

Het project in Straubing betreft een project voor afstandsverwarming en thermische baden. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 800 en 825 m diepte, met een temperatuur van 36°C in het aquifer. De installatie heeft een capaciteit van 4,1 MW_{th}. De capaciteit van de warmtepomp is niet bekend. De projectkosten bedragen ca. € 23,5 miljoen. De installatie is in 1999 in bedrijf genomen (Internetbronnen 37-38).

20. Unterföhring

Het project in Unterföhring betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn boringen (doublet) uitgevoerd tot 2500 en 2600 m diepte, met een temperatuur van 87°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 270 m³/uur (75 l/s) De kosten van de geothermische centrale bedragen € 5 miljoen. De installatie is in 2009 in bedrijf genomen (Internetbron 39).

21. Unterhaching

Het project in Unterhaching betreft een stadsverwarming project. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 3350 en 3580 m diepte, met een temperatuur van 122-133°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 540 m³/uur (150 l/s). De capaciteit van de geothermische bron is 38 MW_{th}. De warmtekrachtinstallatie heeft een netto elektrisch vermogen van 2,36 MW_e (na aftrek van 1 MW_e pompvermogen) en een thermisch vermogen van 15-20 MW_{th}, gebaseerd op een Kalina cyclus (Siemens). De projectkosten zijn € 80 miljoen, waarvan € 32 miljoen voor boringen, € 16 miljoen voor de geothermische installatie en € 32 miljoen voor het warmtenet. De installatie is in 2009 in bedrijf genomen (BMU, 2007b; Internetbronnen 40-43).

22. Unterschleißheim

Het project in Unterschleißheim betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn twee boringen uitgevoerd tot 1961 en 2002 m diepte, met een temperatuur van 83°C in het aquifer. De geothermische installatie heeft een capaciteit van 12,9MW_{th}. De totale projectkosten bedragen € 22,2 miljoen, waarvan € 7,61 miljoen voor boringen, € 2,79 miljoen voor de geothermische installatie, € 8,104 miljoen voor afstandsverwarming en € 3,70 miljoen voor overige kosten. De installatie is in 2005 in bedrijf genomen (Internetbron 44).

23. Waldkraiburch

Het project in Waldkraiburch betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot ca. 2600 m diepte, met een geschatte temperatuur van 105°C in het aquifer. De capaciteit van de geothermische installatie bedraagt naar schatting 13,5 MW_{th}. De projectkosten bedragen ca. € 15-20 miljoen, waarvan € 5 miljoen voor boren. De installatie wordt in 2012 in bedrijf genomen (Internetbron 45).

Brandenburg

24. Groß Schönebeck

Het project in Groß Schönebeck betreft een onderzoeksproject gericht op elektriciteitsopwekking. Er zijn in 2006 twee boringen uitgevoerd - een door uitdiepen van een aardgasboring - tot 4300 en 4400 diepte m, met een temperatuur van 150°C in het aquifer. De geothermische centrale (ORC) heeft een vermogen van 0,75 MW_e. Het budget bedraagt ca. € 30 miljoen. De installatie wordt naar verwachting in 2011 in bedrijf genomen (Huenges, 2010; Huenges, 2007; Internetbronnen 46-48).

25. Neuruppin
Het project in Neuruppin betreft een project voor afstandsverwarming en thermische baden. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 1675 en 1700 diepte, met een temperatuur van 64°C in het aquifer. De installatie heeft een capaciteit van 1,4 MW_{th} en is in 2007 in bedrijf genomen.

26. Prenzlau
Het project in Prenzlau betreft een project voor afstandsverwarming. Er is een boringen uitgevoerd tot 2786 m diepte, met een temperatuur van 60°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 12 m³/uur (3,3 l/s). De capaciteit van de geothermische installatie is 0,15 MW_{th} en die van de warmtepomp 0,55 MW_{th}. De installatie is in 1994 in bedrijf genomen (Internetbron 49).

Hessen

27. Groß-Gerau
Het project in Groß-Gerau betreft een stadsverwarming project. Er worden twee boringen (doublet) uitgevoerd tot ca. 3000 m diepte, met een temperatuur van naar schatting 160°C in het aquifer. De centrale heeft een voorzien elektrisch vermogen van 3 MW_e en een thermisch vermogen van 6 MW_{th} (type en leverancier onbekend). De investeringen in de warmtekrachtcentrale bedragen € 35 miljoen. De geplande in bedrijf name is 2013 (Internetbron 50).

Mecklenburg-Vorpommern

28. Neustadt-Glewe
Het project in Neustadt-Glewe betreft een stadsverwarming project. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 2335 en 2455 m diepte, met een temperatuur van 92-98°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 40-110 m³/uur (10-30 l/s). De warmtekrachtcentrale heeft een bruto elektrisch vermogen van 0,21 MW_e, een netto elektrische vermogen van 0,1 MW_e en een thermische vermogen van 4,5 MW_{th}, gebaseerd op een ORC cyclus en geleverd door GMK. Restwarmte van 70-84°C wordt aan het stadsverwarmingnet geleverd. De installatie is in 2003 in bedrijf genomen (BMU, 2007b; Lund, 2005; Internetbronnen 51-53).

29. Neubrandenburg
Het project in Neubrandenburg betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 1270 en 1285 m diepte, met een temperatuur van 55°C in het aquifer. Koelwater van een nabijgelegen STEG centrale wordt opgeslagen in het aquifer. De geothermische installatie heeft een capaciteit van 3,8 MW_{th}. De installatie is in 2004 in bedrijf genomen.

30. Waren (Müritz)
Het project in Waren betreft een project voor afstandsverwarming. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 1500 m diepte, met een temperatuur van 62°C in het aquifer. De geothermische installatie heeft een capaciteit van 1,5 MW_{th}. De installatie is in 1984 in bedrijf genomen (Internetbron 54).

Nedersachsen

31. Hannover
Het project in Hannover betreft een project voor elektriciteitsopwekking. Er is in 2009 een boring (sonde) uitgevoerd tot 3820 m diepte, met een temperatuur van ca. 165°C in het aquifer. De stroomsnelheid wordt geschat op 25 m³/uur (7 l/s). De geothermische installatie heeft naar verwachting een thermisch vermogen van 2 MW_{th}. Het jaar van in bedrijf name is onbekend (Internetbronnen 55-56).

Noordrijn-Westfalen

32. Bonn

Het project in Bonn betreft een project voor thermische baden en afstandsverwarming. Er is een boring gepland tot 3000 m diepte, met een temperatuur van 90°C in het aquifer. Het jaar van in bedrijf name is onbekend.

33. Arnsberg

Het project in Arnsberg betreft een project voor afstandsverwarming. Er is een boring uitgevoerd tot 2835 m diepte, met een temperatuur van 85°C in het aquifer. De stroomsnelheid wordt geschat op 10 m³/uur (3 l/s). De geothermische installatie heeft een capaciteit van 0,30 MW_{th}. De kosten van boringen zijn € 3,35 miljoen. Het jaar van in bedrijf name is onbekend (Internetbronnen 57-58).

Rijnland-Pfalz

34. Daaden

Het project in Bonn betreft een project voor thermische baden. Er is een boring (sonde) gepland tot 1020 m diepte. De temperatuur in het aquifer is onbekend. De geothermische installatie heeft een capaciteit van 0,20 MW_{th}. De installatie is vermoedelijk in 2010 in bedrijf genomen (Internetbron 59).

35. Insheim

Het project in Insheim betreft een stadsverwarming project. Er zijn boringen (doublet) uitgevoerd tot 3800 m diepte, met een temperatuur van 165°C in het aquifer. De warmtekrachtcentrale heeft een elektrisch vermogen van 4,5 MW_e en een thermische vermogen van 6-10 MW_{th}. De installatie wordt naar verwachting in 2011 in bedrijf genomen (Reif, 2009; Internetbron 60).

36. Landau

Het project in Landau betreft een stadsverwarming project. Er zijn twee boringen (doublet) uitgevoerd tot 3000 en 3400 m diepte, met een temperatuur van 150°C in het aquifer. De stroomsnelheid is 180-216 m³/uur (50-60 l/s). De centrale (ORC, Ormat) heeft een elektrisch vermogen van 2,5 MW_e en een thermisch vermogen van 3-6 MW_{th}. De projectkosten waren ca. € 21 miljoen, waarvan € 9 miljoen voor boringen, € 6,2 miljoen voor de geothermische installatie en € 5,8 miljoen voor het warmtenet. De installatie is in 2008 in bedrijf genomen (Menzel, 2007; Internetbronnen 61-63).

37. Rülzheim

Het project in Rülzheim betreft een stadsverwarming project. Er zijn twee boringen (doublet) gepland tot meer dan 3000 m diepte, met een temperatuur van 160°C in het aquifer. De verwachte stroomsnelheid is 216 m³/uur (60 l/s). De warmtekrachtcentrale heeft een voorzien elektrisch vermogen van 5 MW_e en een onbekend thermisch vermogen. Het type warmtekrachtcentrale (ORC of Kalina) is niet bekend. De projectkosten bedragen volgens een schatting uit 2006 ca. € 30 miljoen (Kriebs en Pohl, 2006; Internetbronnen 64-65). De installatie kan wellicht in 2013 in bedrijf worden genomen.

Thüringen

38. Bad Langensalza

Het project 'Bad Langensalza' betreft thermische baden. Er is een boring uitgevoerd tot 750 m diepte, met een temperatuur van 37°C in het aquifer. De geothermische installatie heeft een capaciteit van 32 MW_{th}. De installatie is in 1997 in bedrijf genomen.

Tabel E.1 *Geothermische energie in Duitsland*

	Deelstaat Gemeente	Baden-Württemberg Bruchsal	Beieren Aschheim, Feldkir- chen en Kirchheim	Aying-Dürrnhaar	Bad Wörishofen	Erding	Garching
Aantal boringen		Doublet	Doublet	Doublet	1 X	Doublet	Doublet
T aquifer	[°C]	118	82-85	135	80	62	80
T surface	[°C]						
Diameter	[mm]						
Stroomsnelheid	[m ³ /h]	86	270	540	18	198	270
Diepte	[m]	1930 / 2540	2630 / 2700	3926 / 4114	2600	2100 / 2350	2,100 / 2,240
Boorlengte	[m]	N/A	N/A	4393 / 4530	2600	N/A	2165?
Toepassing(en)		Stadsverwarming	Afstandsverwarming	Stadsverwarming	Thermische baden	Afstandsverwarming & thermische baden	Afstandsverwar- ming
Capaciteit (bron)	[MWth]	5,5	9			8,1	
Capaciteit (thermisch)	[MWth]	4	6,9			2	7,7
Capaciteit warmtepomp	[MWth]					7	N/A
Capaciteit (elektrisch)	[MWe]	0,55		4,5			
Cyclus		Kalina		ORC			
Leverancier		Siemens					
Investeringskosten							
- Boorkosten etc	[€ miljoen]	8,1	11,5	17			13
- Geothermische installatie	[€ miljoen]	9,8		30-35			4,1
- Afstandsverwarming	[€ miljoen]					18,7	17,7
- Overig	[€ miljoen]						15,2
- Totaal excl.warmtenet	[€ miljoen]	18	N/A	50			32,3
Specifieke boorkosten	[€/m]	N/A	N/A	1905	N/A	N/A	3002
In bedrijf		2008	2009	2011	2005	1998 / 2009	2010

Tabel E.1 *Geothermische energie in Duitsland*

	Deelstaat Gemeente	Beieren Geretsried	Grasbrunn- Vaterstetten	Holzkirchen	Kirchstockach	Kirchweidach	Mauerstetten
Aantal boringen		Doublet?	Doublet?	Doublet?	Doublet	Doublet	Triplet
T aquifer	[°C]	127-135	92-105	150	135	130	125-130
T surface	[°C]						
Diameter	[mm]						700 / 200
Stroomsnelheid	[m ³ /h]	612	144-270		486		288
Diepte	[m]	5000+	3280 / 3375	?	3881 / 4114	3900	4473
Boorlengte	[m]	N/A	3540 / 3580	N/A	4214 / 4452	N/A	N/A
Toepassing(en)		Stadsverwarming	Stadsverwarming	Stadsverwarming	Stadsverwarming	Stadsverwarming	Elektriciteitsop- wekking
Capaciteit (bron)	[MWth]	50			45		
Capaciteit (thermisch)	[MWth]						
Capaciteit warmtepomp	[MWth]						
Capaciteit (elektrisch)	[MWe]	5	?	5	4,5	8,36	5
Cyclus		Kalina / ORC		Kalina / ORC	Kalina / ORC	Kalina / ORC	Kalina
Leverancier							?
Investeringskosten							
- Boorkosten etc	[€ miljoen]	20	10,5		20-22		20
- Geothermische installatie	[€ miljoen]				14	50	20
- Afstandsverwarming	[€ miljoen]						
- Overig	[€ miljoen]						
- Totaal excl.warmtenet	[€ miljoen]			61	34-36		40
Specifieke boorkosten	[€/m]	N/A	1475	N/A	2539	N/A	N/A
In bedrijf		2012	?	2013	2011?	2013?	2009-2010

Tabel E.1 *Geothermische energie in Duitsland*

	Deelstaat Gemeente	Beieren München-Riem	Neu-Ulm	Poing	Pullach	Sauerlach	Simbach (Beieren) & Braunau (Oostenrijk)
Aantal boringen		Doublet	Singlet	Doublet	Triplet	2 X Doublet	Doublet
T aquifer	[°C]	90	57	85	104	140	80
T surface	[°C]						
Diameter	[mm]	470 / 150		210 /			
Stroomsnelheid	[m ³ /h]		17	360	360	396	266
Diepte	[m]	3020 / 2900	1036	2435 / 3050	2820 / 2940	4179 / 4181	ca. 2500
Boorlengte	[m]	3275 / 3400	N/A	N/A	3550 / 4120	4757 / 5060	N/A
Toepassing(en)		Afstandsverwarming	Thermische baden & afstandsverwarming	Afstands- verwarming	Afstands- verwarming	Stadsverwarming	Stadsverwarming
Capaciteit (bron)	[MWth]		0,4				
Capaciteit (thermisch)	[MWth]	8		8	9,3	4	7,1
Capaciteit warmtepomp	[MWth]						
Capaciteit (elektrisch)	[MWe]					5	0,15
Cyclus						ORC	ORC
Leverancier							
Investeringskosten							
- Boorkosten etc	[€ miljoen]	5,3		25	18,8		12,5
- Geothermische installatie	[€ miljoen]				2,9		
- Afstandsverwarming	[€ miljoen]				14,3		17,0
- Overig	[€ miljoen]						
- Totaal excl.warmtenet	[€ miljoen]			21	21,7		12,5
Specifieke boorkosten	[€/m]	795	N/A	N/A	1620	N/A	N/A
In bedrijf		2004	?	2009	2005	2011	2001

Tabel E.1 *Geothermische energie in Duitsland*

	Deelstaat Gemeente	Beieren Straubing	Unterföhring	Unterhaching	Unterschleißheim	Waldkraiburch	Brandenburg Groß Schönebeck
Aantal boringen		Doublet	Doublet	Doublet	2 X	Doublet	2 X
T aquifer	[°C]	36	87	122	83	105	150
T surface	[°C]						
Diameter	[mm]			... / 350			
Stroomsnelheid	[m ³ /h]	162	270	540		288	76
Diepte	[m]	800/ 825	2500 / 2600	3350 / 3580	1961 / 2002	2600	4300 - 4400
Boorlengte	[m]	N/A	2578 / 3042	3446 / 3864	N/A	N/A	N/A
Toepassing(en)		Afstandsverwarming & thermische baden	Afstandsverwarming	Stadsverwarming	Afstandsverwar- ming	Afstandsverwarming	Onderzoeksproject
Capaciteit (bron)	[MWth]			38			10
Capaciteit (thermisch)	[MWth]	4,1		15-20	12,9	13,5	
Capaciteit warmtepomp	[MWth]	N/A					
Capaciteit (elektrisch)	[MWe]			2,36			0,75
Cyclus				Kalina Siemens			ORC
Leverancier							
Investeringskosten							
- Boorkosten etc	[€ miljoen]			32	7,61	5	
- Geothermische installatie	[€ miljoen]		5	16	2,79		
- Afstandsverwarming	[€ miljoen]			32	8,10		
- Overig	[€ miljoen]				3,70		
- Totaal excl.warmtenet	[€ miljoen]	23,5		48	14,1	15-20	
Specifieke boorkosten	[€/m]	N/A	N/A	4384	N/A	N/A	N/A
In bedrijf		1999	2009	2009	2005	2012?	2011?

Tabel E.1 *Geothermische energie in Duitsland*

	Deelstaat	Brandenburg		Hessen	Mecklenburg- Vorpommern	Neubrandenburg	Waren (Müritz)
	Gemeente	Neuruppin	Prenzlau	Groß-Gerau	Neustadt-Glewe		
Aantal boringen		Doublet	1 X	Doublet	Doublet	Doublet	Doublet
T aquifer	[°C]	64	60	160?	92-98	55	62
T surface	[°C]						
Diameter	[mm]						
Stroomsnelheid	[m ³ /h]	50	12		40-110	100	
Diepte	[m]	1675 / 1700	2786	3000?	2250 / 2335	1270 / 1285	1500
Boordiepte	[m]	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Toepassing(en)		Afstandsverwarming Afstandsverwarming & thermische baden		Stadsverwarming	Stadsverwarming	Afstandsverwarming & warmteopslag STEG	Afstands- verwarming
Capaciteit (bron)	[MWth]			10			
Capaciteit (thermisch)	[MWth]	1,4	0,15	6	4,5	3,8	1,5
Capaciteit warmtepomp	[MWth]		0,55				
Capaciteit (elektrisch)	[MWe]			3	0,1		
Cyclus				Kalina / ORC	ORC		
Leverancier					GMK		
Investeringskosten							
- Boorkosten etc	[€ miljoen]						
- Geothermische installatie	[€ miljoen]			35			
- Afstandsverwarming	[€ miljoen]						
- Overig	[€ miljoen]						
- Totaal excl.warmtenet	[€ miljoen]			35			
Specifieke boorkosten	[€/m]	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
In bedrijf		2007	1994	2013	2003	2004	1984

Tabel E.1 *Geothermische energie in Duitsland*

	Deelstaat Gemeente	Nedersachsen Hannover	Noordrijn-Westfalen Bonn	Arnsberg	Rijnland-Pfalz Daaden	Insheim	Landau
Aantal boringen		1 X (sonde)		1 X (sonde)	1 X (sonde)	Doublet	Doublet
T aquifer	[°C]	165	90	85		155	150
T surface	[°C]						
Diameter	[mm]						
Stroomsnelheid	[m ³ /h]	25		10		288	180-216
Diepte	[m]	3820	3000	2835	1020	3800	3000 / 3400
Boorlengte	[m]	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Toepassing(en)		Elektriciteitsopwekking	Thermische baden & afstandsverwarming	Afstandsverwarming	Thermische baden & afstandsverwarming	Stadsverwarming	Stadsverwarming
Capaciteit (bron)	[MWth]						
Capaciteit (thermisch)	[MWth]	2		0,30	0,20	6-10	3-6
Capaciteit warmtepomp	[MWth]						
Capaciteit (elektrisch)	[MWe]	N/A				4,5	2,5
Cyclus							ORC
Leverancier							Ormat
Investeringskosten							
- Boorkosten etc	[€ miljoen]			3,35			9,0
- Geothermische installatie	[€ miljoen]						6,2
- Afstandsverwarming	[€ miljoen]						5,8
- Overig	[€ miljoen]						
- Totaal excl.warmtenet	[€ miljoen]						21
Specifieke boorkosten	[€/m]	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
In bedrijf		2010?	?	?	2010?	2010?	2008

Tabel E.1 *Geothermische energie in Duitsland*

	Deelstaat Gemeente	Rijnland-Pfalz Rülzheim	Thüringen Bad Langensalza
Aantal boringen		Doublet?	1 X (sonde)
T aquifer	[°C]	160	32
T surface	[°C]		
Diameter	[mm]		
Stroomsnelheid	[m ³ /h]	216	
Diepte	[m]	> 3000	750
Toepassing(en)		Stadsverwarming	Thermische baden
Capaciteit (bron)	[MWth]		
Capaciteit (thermisch)	[MWth]		30
Capaciteit warmtepomp	[MWth]		
Capaciteit (elektrisch)	[MWe]	5,0	
Cyclus		N/A	
Leverancier			
Investeringskosten			
- Boorkosten etc	[€ miljoen]		
- Geothermische installatie	[€ miljoen]		
- Afstandsverwarming	[€ miljoen]		
- Overig	[€ miljoen]		
- Totaal excl.warmtenet	[€ miljoen]	30?	
Specifieke boorkosten	[€/m]	N/A	N/A
In bedrijf		2013?	1997