

TNO-verslag
NITG 97-8-B

Een voorstudie naar de economische haalbaarheid van aardwarmtewinning voor de locaties Almere, Lelystad en Heerenveen

**Nederlands Instituut voor
Toegepaste Geowetenschappen TNO**

Hoofdvestiging Delft
Schoemakerstraat 97
Postbus 6012
2600 JA Delft

Telefoon 015 269 69 00
Fax 015 256 48 00

Hoofdvestiging Haarlem
Richard Holkade 10
Postbus 157
2000 AD Haarlem

Telefoon 023 530 03 00
Fax 023 5353 16 14

Datum

Delft, januari 1997

Auteur(s)

Ir J.P. Heederik
Ir P.C. Montijn
Drs R.H.B. Rijkers
N. Witmans-Parker

in opdracht van NV NUON
Business Unit Duurzame energie

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 1996 TNO

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO
is gevestigd in Delft en Haarlem en heeft nevenvestigingen in
Haarlem, Heerlen, Nuenen, IJmuiden en Zwolle.

Het instituut is het centrale geowetenschappelijke informatie-
en onderzoeksinstituut van Nederland, ten behoeve van het
duurzaam beheer en gebruik van de ondergrond en de
ondergrondse natuurlijke bestaansbronnen.

Nederlandse Organisatie voor toegepast-
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

Inhoud

SAMENVATTING, CONCLUSIES & AANBEVELINGEN

1. INLEIDING	1
2. AARDWARMTEWINNING D.M.V. PUTTENDOUBLETTEN	3
2.1. Principe	3
2.2. Ondergrondse werken en installaties	5
2.3. Bovengrondse installaties	6
2.4. Exploitatie	6
3. DE GEOLOGISCHE GESTELDHEID	8
3.1. Inleiding	8
3.2. De zandstenen van de Boven-Rotliegend Groep en het Tertiair	10
3.2.1 De zandstenen van de Boven-Rotliegend Groep	10
3.2.2 Tertiaire aquifers op de locatie Heerenveen	13
3.3. De structuur van het gebied	14
3.4. Chemische samenstelling van het formatiewater	15
4. KOSTEN VAN AARDWARMTEWINNING	16
4.1. Investeringskosten	16
4.2. Operationele kosten	17
4.3. Jaarlijkse exploitatiekosten	18
4.4. Kostenbeschouwing	19
REFERENTIES	21
BIJLAGEN	
Calculaties inzake locatie Lelystad	
Calculaties inzake locatie Heerenveen	
Calculaties inzake locatie Heerenveen m.i.v. een warmtepomp	

SAMENVATTING, CONCLUSIES & AANBEVELINGEN

In dit rapport zijn de resultaten weergegeven van een voorstudie naar de mogelijkheden van aardwarmtewinning op drie VINEX-locaties binnen het verzorgingsgebied van NUON. Aardwarmte kan gewonnen worden door middel van een zogenaamd puttendoublet, bestaande uit een produktieput waarmee heet water uit een watervoerende laag wordt gewonnen en een injectieput waarmee het water na uitkoeling in dezelfde laag wordt geïnjecteerd. De ondergrondse afstand tussen beide putten is zo gekozen dat gedurende een bepaalde periode, b.v. 25 jaar, de temperatuur van het geproduceerde water constant blijft. De warmte van het opgepompte, zoute, geothermische water wordt bovengronds in een warmtewisselaar overgedragen aan het warmtetransportmedium (water met antivries) van het warmtedistributienet.

Het verzorgingsgebied van NUON bestrijkt een aantal concessiegebieden van diverse concessionarissen als de NAM, Amoco, Chevron, Conoco, Elf-Petroland en Mobil. De gebieden rond de 3 bestudeerde VINEX-locaties zijn geëxploreerd door middel van geofysische opsporingstechnieken en boringen. Momenteel wordt nog gas gewonnen in de dichtbij gelegen velden Akkrum en Vledder; elders is de productie gestaakt vanwege uitputting of bleken de putten droog. Gaswinning vindt (en vond) plaats uit lagen waarvan een aantal zich ook lenen voor de onttrekking van aardwarmte.

Op basis van de beschikbare exploratiegegevens van de eerder genoemde concessionarissen zijn 3 geologische formaties bestudeerd die eventueel voor aardwarmtewinning in aanmerking zouden kunnen komen, namelijk de Formatie van Breda, de Formatie van Brussel en het veel dieper gelegen Boven-Rotliegend. Ter plaatse van de VINEX-locaties Almere, Lelystad en Heerenveen zijn de dikte, de gemiddelde doorlatendheid, de diepte en de temperatuur van de daar voorkomende watervoerende lagen (aquifers) ingeschat en zijn voor de drie locaties afzonderlijk de investerings- en exploitatie-kosten geraamd. Voor economische verantwoorde aardwarmtewinning is het noodzakelijk dat de temperatuur van het formatiewater en de transmissiviteit (het product van doorlatendheid en laagdikte) voldoende hoog is. De ondergrens voor de temperatuur is sterk afhankelijk van de de warmte-afnemer en of er wel dan niet gebruik gemaakt zal worden van een warmtepomp. Als ondergrens wordt meestal een waarde van 10 à 15 Dm (Darcymeter) gehanteerd. Voor wat de transmissiviteit betreft voldoen de geïdentificeerde formaties voor de locaties Lelystad en Heerenveen aan het gestelde criterium. De transmissiviteit ter plaatse van Almere bleek echter beduidend minder dan 10 Dm (1 Dm) te bedragen. derhalve komt de locatie Almere niet in aanmerking voor aardwarmtewinning.

Bij de berekening van de jaarlijkse exploitatiekosten is uitgegaan van inzet van aardwarmte als basislastvoorziening die bij een aansluitfractie van 33% van de aansluitwaarde ongeveer 90% van de warmtebehoefte kan dekken.

Ter plaatse van Lelystad ligt de Boven-Rotliegend aquifer ongeveer op een diepte van 2000 m en zal de temperatuur ca 82 °C bedragen. De totale transmissiviteit bedraagt hier ca 15 Dm en is wat betreft de hydraulische eigenschappen daarmee de beste optie. Bij een puttendebiet van 200 m³/u en een retourtemperatuur van 40 °C in het distributienet bedragen de exploitatiekosten van aardwarmtewinning fl 9.83/GJ.

Ter plaatse van de locatie Heerenveen ligt de Boven-Rotliegend aquifer op ongeveer dezelfde diepte als op de locatie Almere en zal de gemiddelde temperatuur eveneens ca 82 °C bedragen. De totale transmissiviteit bedraagt ca 10 Dm. Bij een geothermisch debiet van 200 m³/uur en een retourtemperatuur van 40 °C van het water in het distributienet bedragen de exploitatiekosten fl. 11.31/GJ.

Aardwarmtewinning uit ondiepe aquifers ten behoeve van ruimteverwarming met behulp van een warmtepomp is nog verre van rendabel. Water van ca 700 meter diepte (Zand van Brussel) is van een te laag temperatuurniveau om tegen een acceptabele prijs opgewerkt te worden naar een 60/40 verwarmingssysteem. De hoge elektriciteitskosten en de (te) lage COP (Coefficient Of Performance) die bij dit uitkoelingsproces horen, zijn hier debet aan. De boorkosten zijn op deze diepte juist zeer aantrekkelijk. Bij een geothermisch debiet van 200 m³/uur en een retourtemperatuur van 7 °C van het water in het distributienet bedragen de exploitatiekosten fl. 17.44/GJ. In deze opzet moet de warmtepomp het volledig aangesloten vermogen van de in totaal 3500 woningen (10 MW) zien te dekken zodat de uitkoeling groot, de COP relatief klein en de mechanisch toegevoerde arbeid in de vorm van elektriciteit groot is.

De kosten gemoeid met de aanleg van doubletten op beide locaties en de bijkomende bovengrondse aardwarmte-installaties zijn weergegeven in tabel 1:

	Heerenveen diep, zonder wp	Heerenveen ondiep, met wp	Lelystad diep, zonder wp
boorlengte (m)	2227	690	2219
putdebiet (m ³ /u)	200	200	200
kosten (kfl)			
ondergronds	6886	1211	6858
bovengronds	3097	2526	2786
totaal (kfl)	9983	3737	9644

tabel 1: kosten van ondergrondse en bovengrondse installaties t.b.v. een aardwarmtewinningsdoublet

Door optimalisatie van het puttenontwerp zouden de hierboevn vermelde kosten eventueel lager uit kunnen vallen. De uiteindelijke exploitatiekosten zouden bijvoorbeeld verlaagd kunnen worden door verdere uitkoeling van het geothermische water, door verwerving van EU-subsidie uit het Thermieprogamma (Call for Tenders October 1997), door financiering uit de z.g. Groene Fondsen en door de vrijstelling van ecotax. Net als voor groene elektriciteit reeds het geval is, zou de consument bovendien wellicht bereid zijn om voor *Groene Warmte uit de Aarde* een hogere prijs te betalen.

1 Inleiding

Dit rapport doet verslag van een vooronderzoek naar de mogelijkheden van toepassing van aardwarmte voor ruimteverwarmingsdoeleinden in het verzorgingsgebied van N.V. NUON. Het geeft een indicatie van de mogelijkheden in een tweetal VINEX-locaties te weten Lelystad-Almere en Heerenveen.

Opdracht tot dit onderzoek werd schriftelijk verleend door NUON Business Unit Duurzame Energie middels een opdracht uit naam van mevrouw dr A. Goedmakers, dd 4 december 1996.

De te verrichten werkzaamheden werden zoals vastgelegd in het projectvoorstel van d.d. 21 oktober 1996 (GE 96/2695) als volgt omschreven:

- vaststelling van het geothermisch potentieel voor de twee eerder genoemde locaties;
- calculatie van de kosten verbonden aan de winning;
- eventuele uitbreiding van het onderzoek met de bestudering van de mogelijkheden voor lage enthalpiewinning door gebruikmaking van een warmtepompsysteem.

Als uitgangspunt voor het geologische gedeelte van deze studie dient het conceptrapport 'Studie naar de permeabiliteit van de Boven-Rotliegend aquifer in de gebieden Almere-Lelystad en Heerenveen' (RGD, 19/06/96, opdracht nr. 469605200/06).

Na oplevering van de geologische evaluatie is ter kantore van de NUON te Arnhem overleg gepleegd tussen de NUON (ing. A. Schoonwater), RGD (drs R.H.B. Rijkers) en TNO-IAG (ir J.P. Heederik, ir P.C. Montijn). Dit overleg had betrekking op de gevolgen van de resultaten van de geologische evaluatie voor de resterende activiteiten.

Geconcludeerd werd dat:

- de geschatte transmissiviteit voor de locatie Almere (>10 Dm) niet voldoet aan de minimale eisen voor technisch/economisch verantwoorde geothermische exploitatie
- de reservoirkarakteristieken van de locaties Heerenveen en Lelystad wél aan de minimale eis voldoen
- een transmissiviteit van 10 tot 15 Dm nog geen garantie is om aardwarmtewinning commercieel toe te passen
- vanwege de omstandigheid dat op de locatie Heerenveen nog kan worden gekozen voor een laag temperatuur verwarmingssysteem (60 °C - 40 °C) met vloerverwarming wordt door NUON verzocht om voor deze locatie ook het potentieel van de ondiepere reservoirs te onderzoeken

Bij de uitvoering van het vooronderzoek is gebruik gemaakt van informatie verstrekt door NUON met betrekking tot geplande warmtebehoefte van beide VINEX- locaties Lelystad en Heerenveen alsmede richtlijnen voor de verlangde kostprijsberekeningen, zoals rekenrente en afschrijvingsperiode.

Tijdens de uitvoering van het onderzoek had regelmatig overleg plaats tussen de uitvoerders van deze studie en de opdrachtgever.

2 Aardwarmtewinning d.m.v. een puttendoublet

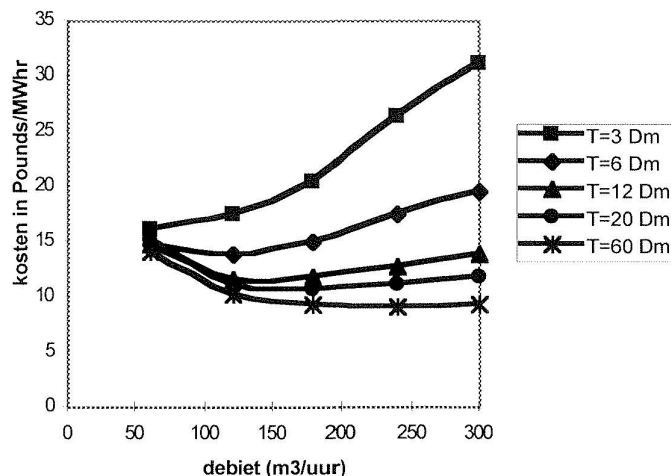
2.1. Principe

De temperatuur van bodem en ondergrond neemt met de diepte toe; in Nederland bedraagt de temperatuurtoename 30 °C - 35 °C per km. Dit betekent, dat de temperatuur op 2000 m diepte over het algemeen zo'n 70 à 80 °C zal bedragen. De gemiddelde jaartemperatuur aan het aardoppervlak bedraagt in Nederland ongeveer 10 à 11 °C.

Om warmte uit de ondergrond te kunnen winnen zijn nodig:

- een warmtetransportmiddel; daartoe dient in de voor Nederland gangbare toepassingen natuurlijk formatiewater dat op de betreffende diepte echter een hoog zoutgehalte heeft;
- een watervoerende laag (aquifer) op een diepte van een geschikt temperatuurniveau met een voldoende transmissiviteit, porositeit en laterale uitgestrektheid;
- een produktieput om het warme water op te pompen en een injectieput om het water na uitkoeling weer te injecteren in de formatie waaruit het onttrokken is;

De transmissiviteit van een watervoerende laag, b.v. een zandsteen of een kalksteen, is gedefinieerd als het product van de permeabiliteit en dikte. De permeabiliteit of doorlatendheid wordt veelal uitgedrukt in Darcy (D), de dikte in meters (m). Om een voldoende groot waterdebiet (150 -250 m³/u) te kunnen produceren (en injecteren) zonder dat daarvoor een excessieve hoeveelheid pompenergie relatief benodigd is, dient de transmissiviteit van de te exploiteren watervoerende laag tenminste ca 10 tot 15 Dm te bedragen (fig. 1).

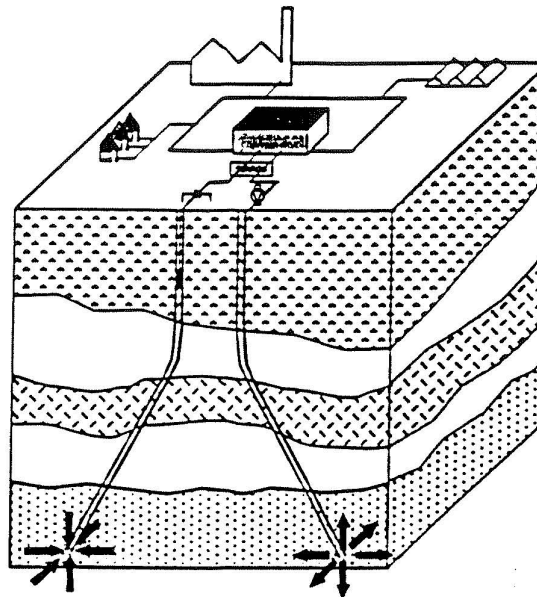


Figuur 1: Relatie tussen produktiekosten en productie-debiet bij verschillende transmissiviteitswaarden (Harrison, 1996)

Het terugvoeren van het water in de formatie is noodzakelijk om een aantal redenen. Ten eerste is het zoutgehalte van het geproduceerde formatiewater doorgaans (veel) te hoog. Lozing op het oppervlaktewater is derhalve niet toegestaan. Daarnaast is het wenselijk om de druk in de formatie constant te houden. Herinjectie van gewonnen formatiewater kent één nadeel: verstopping. Er zijn echter ook een aantal doubletten in bedrijf die niet te lijden hebben onder verstoppingsproblemen (Frankrijk, Duitsland, Denemarken). Met name reservoirs met een matrixpermeabiliteit, zoals weinig verkitte zanden of zandsteen, in het bijzonder als zij rijk zijn aan kleimineralen, zijn soms gevoelig voor verstopping. Verstopping van een injectieput die met een constante volumestroom wordt gevoed, leidt tot afname van de permeabiliteit, toename van de weerstand en, hieraan inherent, toename van de vereiste injectiedruk, toename van de elektriciteitskosten ten behoeve van de injectiepomp en afname van de rentabiliteit.

Productie- en injectieput vormen tezamen een zgn. puttendoublet (fig. 2). Meestal worden zij vanuit één locatie gedeveerd (schuin) geboord. De ondergrondse afstand tussen productie- en injectieput ter hoogte van de te exploiteren, watervoerende laag wordt zodanig gekozen dat het koudefront, dat zich radiaal om de injectieput verplaatst, niet eerder de productieput bereikt dan na verstrijken van de afschrijvingsperiode van het doublet (ca. 30 jaar). Het tijdstip waarop het koudefront de productieput bereikt, wordt de doorbraaktijd genoemd. Op dit tijdstip zal nog niet volledig opgewarmd injectiewater in de productieput arriveren en vanaf dit moment zal de temperatuur van het gewonnen produktiewater afnemen. De doorbraaktijd is een functie van het debiet, de onderlinge afstand op einddiepte tussen productie- en injectieput, de

porositeit en de dikte van de aquifer waaraan het water wordt onttrokken. In de praktijk bedraagt de afstand tussen de putten van een doublet 1200-1500 m.



Figuur 2: principeschema van een aardwarmtewinningsdoublet door middel van een puttendoublet

Nadat het koudefront is doorgebroken, zal de temperatuur van het geproduceerde water heel geleidelijk afnemen (ca 1 °C per 10 jaar); de exploitatie kan derhalve dan nog worden voortgezet totdat de productietemperatuur een kritische ondergrens bereikt heeft.

2.2. Ondergrondse werken en installaties

De aanleg van een doublet omvat de volgende activiteiten:

- de keuze en aanleg van een boorlocatie plus benodigde infrastructuur;
- de constructie van een boorplatform waarop de boorinstallatie kan worden geplaatst;
- het boren van twee gedeveerde putten vanaf dit boorplatform. De putten worden verbuisd (casing) om instorten van de boorgatwand te voorkomen. Tussen buizen en gesteente wordt een cementslurry geïnjecteerd die uithardt. De verbuizing geschiedt telescopisch in twee of drie diameters. Vanaf de top van het reservoir worden de putten niet meer verbuisd. Beide

boorgaten worden vervolgens over de gehele reservoir lengte uitgeruimd, voorzien van een gravel pack en afgewerkt met een filterscherm. In de verbuizing wordt een produktiebuis (liner) neergelaten. Deze kan aan de binnenzijde voorzien zijn van een kunststof coating om corrosie te voorkomen. Het is tegenwoordig zelfs mogelijk om verbuizing en liners geheel in kunststof uit te voeren.

- het afhangen van een elektrische onderwaterpomp (electric submersible pump of ESP) in de produktieput. Soms worden ook andere typen pompen toegepast. Elektrische onderwaterpompen dienen na ca drie tot vijf jaar te worden vervangen of gereviseerd te worden;
- indien de chemie van het geproduceerde water daar aanleiding toe geeft: het aanbrengen van een leiding die reikt tot aan de bodem van de produktieput ter injectie van corrosie-inhibitoren;
- de afwerking van de verbuizing tot aan het maaiveld door middel van een produktieputmond.

2.3. Bovengrondse installaties

Het bovengrondse gedeelte van het geothermische circuit omvat de volgende componenten die in één of meer gebouwtjes kunnen worden opgesteld:

- een frequentieregelaar (variable frequency drive) ten behoeve van de elektrische onderwaterpomp die de afregeling van het putdebiet mogelijk maakt;
- titanium platenwarmtewisselaars waarmee de warmte van het geothermische circuit wordt overgebracht op het warmtedistributienetwerk;
- filters voor de verwijdering van zand en eventuele corrosiedeeltjes uit het geothermische circuit (indien er een gerede kans is op verstopping);
- anti-terugslagapparatuur;
- een (horizontale) injectiepomp voor het geothermische circuit;
- een doseerinstallatie voor corrosie-inhibitoren (optioneel);
- pompen ten behoeve van de circulatie in het distributienetwerk;
- een afgescheiden transformatorgedeelte;
- een regelkamer.

Soms worden in de aardwarmtecentrale ook een warmte/kracht-installatie, buffers, een warmtepomp en/of pieklastketels opgesteld.

2.4. Exploitatie

In het buitenland wordt aardwarmte ingezet als basislastvoorziening met een nominaal thermisch vermogen van circa 30 tot 35% van de aansluitwaarde. Dit percentage noemt men de zogenaamde aansluitfractie. Hiermee kan een dekkingsgraad van ongeveer 90% van de warmtevraag worden bereikt.

Het thermische vermogen van een doublet is afhankelijk van de opgeslagen hoeveelheid warmte in de aquifer, het debiet van het geproduceerde water en

het verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur. Maximale uitkoeling (het verschil tussen productie- en injectietemperatuur) verhoogt derhalve de warmte-opbrengst. Een optimale uitkoeling wordt bereikt door warmte-afname volgens het zogenaamde cascadeprincipe waarbij men gebruik maakt van een aaneenschakeling van verschillende typen verwarmingselementen in volgorde van afnemende aanvoertemperatuur oftewel: conventionele radiatoren, (overgedimensioneerde) lage-temperatuur convectoren en vloerverwarmingssystemen. Eventueel kan het nog relatief warme retourwater nogmaals naar een hoger temperatuurniveau worden getransformeerd met behulp van een warmtepomp.

Een voorbeeld vormt de stadsverwarming op basis van aardwarmte in de Parijse voorsteden Chevilly-Larue en l'Hay-les-Roses die de klanten warmte aanbiedt op drie temperatuurniveaus: 103 °C, 72 °C en 49 °C. De retourtemperatuur kan daardoor worden verlaagd tot 35 °C zodat het aanwezige warmtepotentieel zo optimaal mogelijk wordt benut.

Het thermische vermogen (W_{th}) van een doublet kan met de volgende formule uit het waterdebiet (q), de warmtecapaciteit van het formatiewater (het produkt van soortelijke warmte (c_v) en dichtheid ρ van het formatiewater bij formatietemperatuur) en de uitkoeling van het geothermische water (ΔT) worden berekend:

$$W_{th} = q \cdot \rho \cdot c_v \cdot \Delta T$$

met W_{th} in kW, q in m³/s, ρ in kg/m³, c_v in J/kgK en ΔT in °C.

Bij een debiet van 200 m³/uur, een warmtecapaciteit van $4.452 \cdot 10^6$ J/m³K en een uitkoeling van 80 °C naar 40 °C bedraagt het vermogen derhalve 10 (9.89) MW_{th}.

Een puttendoublet beïnvloedt een ondergronds areaal van circa $2d^2$ als de putafstand d bedraagt. Indien de ondergrondse afstand op einddiepte tussen injectie- en productieput 1.5 km groot is, dan zal de oppervlakte van dit areaal dientengevolge 4.5 km² beslaan. Bij een aansluitwaarde per woning van 9 kW_{th}, een gelijktijdigheidsfactor van 0,9 en een aansluitfractie van ca 35% kan een aardwarmtecentrale gebaseerd op één puttendoublet met een vermogen van 10 MW_{th} en een bijpassende pieklastvoorziening voldoen aan de warmtevraag van zo'n 3500 woningen. Dat is gelijk aan het aantal woningen na voltooiing van de tweede en laatste fase, zoals dit voorzien is voor de VINEX-locatie Heerenveen.

3. De Geologische gesteldheid

3.1. Inleiding

De geologische gesteldheid van de diepe ondergrond rond de bestudeerde VINEX-locaties Almere-Lelystad en Heerenveen is redelijk goed bekend door de aanwezigheid van enkele exploratie-activiteiten uit de gaswinning die op relatief geringe afstand van de 2 locaties zijn uitgevoerd. Deze activiteiten bestonden destijds uit:

- seismisch onderzoek, waarmee de diepte tot reflectievlakken op de overgang van gesteentelagen (b.v. klei en zandsteen) wordt gevonden. Het onderzoek verstrekt ondermeer informatie omtrent de diepteligging van ('dikke') gesteentelagen en de posities van breukvlakken en maakt het bovendien mogelijk om (vertikale) boorprofielen onderling te verbinden tot gelogische profielen;
- de uitvoering van exploratie- en produktieboringen met wisselende beëindigingsdiepten. Tijdens het boren (Measurement While Drilling) en na ieder afgesloten boortraject (onder een vooraf vastgestelde aanvangsdiepte) werden zogenaamde geofysische logs (metingen als functie van de diepte) opgenomen en geregistreerd. Hieruit kan men bepaalde fysische grootheden berekenen, waaruit relevante gesteente-parameters als kleigehalte en porositeit kan afleiden.
- het verrichten van bijvoorbeeld produktie- en injectie-tests in boringen en putten;
- laboratoriumproeven aan gesteentemonsters, ondermeer ter bepaling van de permeabiliteit uit de porositeit van het reservoirgesteente.

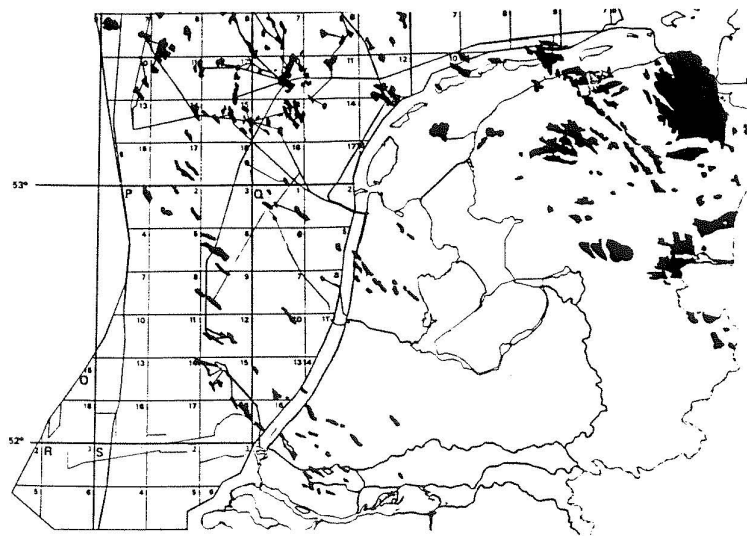
Exploratieactiviteiten, vooral gericht op de Boven-Rotliegend aquifer, hebben enige decennia geleden reeds geleid tot de vondst van diverse gasvelden, zoals - dichtbij - die van Akkrum en - iets verderop - Slochteren. Vele van die velden zijn inmiddels uitgeput; de betreffende produktieputten zijn geabandonneerd en daarmee onbruikbaar geworden voor ander gebruik. De ligging van de al dan niet uitgeproduceerde velden is weergegeven in Fig 3.

Exploratie- en produktieboringen zijn en worden geboord op culminaties van structuren: de hoogste punten van reservoirgesteenten waar olie en aardgas zich verzamelt. Die culminaties worden gevonden door middel van seismisch onderzoek. Als men de boorlocatiekaarten die betrekking hebben op de omgevingen van Heerenveen en Lelystad beschouwt, dan ziet men clusters van boringen (in en rond de olie- en/of gasvelden) met daartussen weinig geëxploreerde gebieden: de vele honderden uitgevoerde boringen zijn geenszins gelijkmatig verdeeld.

De gebruikte exploratiegegevens van de Nederlandse Aardolie Maatschappij, Amoco, Chevron, Conoco, Elf Petroland en Superior (Mobil) waren van zeer veel waarde voor het onderzoek naar de mogelijkheden van aardwarmtewinning. Men dient echter wel te bedenken dat ze voor andere doeleinden zijn gegenereerd en dat met name watervoerende lagen, waarin geen olie of gas vermoed wordt, niet of minder goed zijn onderzocht. Het (Boven-)Rotliegend is van meet af aan een zeer succesvol reservoirgesteente gebleken zodat de metingen over dit interval vrijwel zonder uitzondering nauwgezet en uitvoerig aanwezig zijn.

Over het algemeen zal de confidentialiteit van deze metingen de beschikbaarheid van deze gegevens voor onderzoek naar de geologische gesteldheid van potentieel interessante lagen voor toepassing in de aardwarmtewinning ernstig bemoeilijken. Hierdoor kan niet altijd een voldoende nauwkeurig geologische detaillering worden bereikt. Daarnaast zijn publikaties van resultaten in wetenschappelijke en andere tijdschriften eerder uitzondering dan regel.

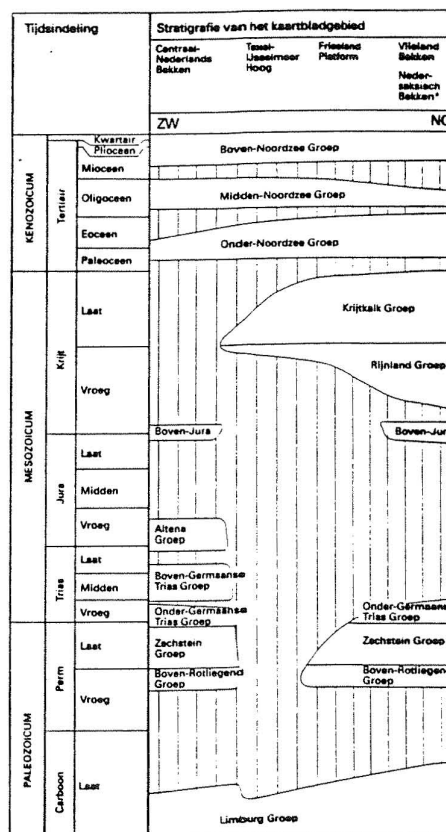
Voor wetenschappelijke doeleinden zijn de concessionarissen soms bereid om in meer of minder beperkte mate gegevens ter beschikking te stellen. Het massaal opvragen van boorgegevens bij deze concessionarissen is echter niet realistisch. De RGD, die over de meetgegevens van het gros van de in Nederland gezette boringen beschikt, mag deze met toestemming van de concessionarissen aanwenden voor dergelijke projecten mits de gegevens vertrouwelijk worden behandeld



Figuur 3: Olie- en gasvelden in de omgeving van Lelystad en Heerenveen

3.2. De zandstenen van de Boven-Rotliegend Groep en het Tertiair

In de ondergrond van Friesland en Flevoland komen verscheidene watervoerende lagen voor die in aanmerking zouden kunnen komen voor wateronttrekking ten behoeve van aardwarmtewinning. Hun relatieve positie is weergegeven in de stratigrafische tabel in Figuur 4. Zij worden hieronder in de volgorde van oud naar jong (en van diep naar ondiep) beschreven. Voor wat betreft de naamgeving werd voornamelijk de Stratigraphic nomenclature (RGD 1993-1996) gevolgd.



Figuur 4 Schema van de lithostratigrafische eenheden binnen het bestudeerde gebied

3.2.1 De zandsteenlagen van de Boven-Rotliegend Groep

De Boven-Rotliegend Groep in het bestudeerde gebied bestaat uit een opeenvolging van rode zandstenen en dunne schalies die gedurende het Vroeg-Perm zijn afgezet. Het gebied Almere-Lelystad bevindt zich in het Centraal-

Nederlands Bekken (zie Figuur 5). Hier wordt de Boven-Rotliegend Groep alleen vertegenwoordigd door de Slochteren Zandsteen Formatie. Het gebied Heerenveen ligt op het Friesland Platform. De Boven-Rotliegend Groep is hier onderverdeeld in 3 laagpakketten: de Akkrum Zandsteen Formatie, de Ten Boer Kleisteen Formatie en de reeds eerder aangehaalde Slochteren Zandsteen Formatie. Voor (gedetailleerde) beschrijvingen van de geologische ontstaansgeschiedenis, stratigrafie (beschrijving van de gelaagdheden) en lithologie (beschrijving van het gesteente) wordt verwezen naar het rapport 'Studie naar de permeabiliteit van de Boven-Rotliegend aquifer in de gebieden Almere-Lelystad en Heerenveen' (RGD, juni 1996).

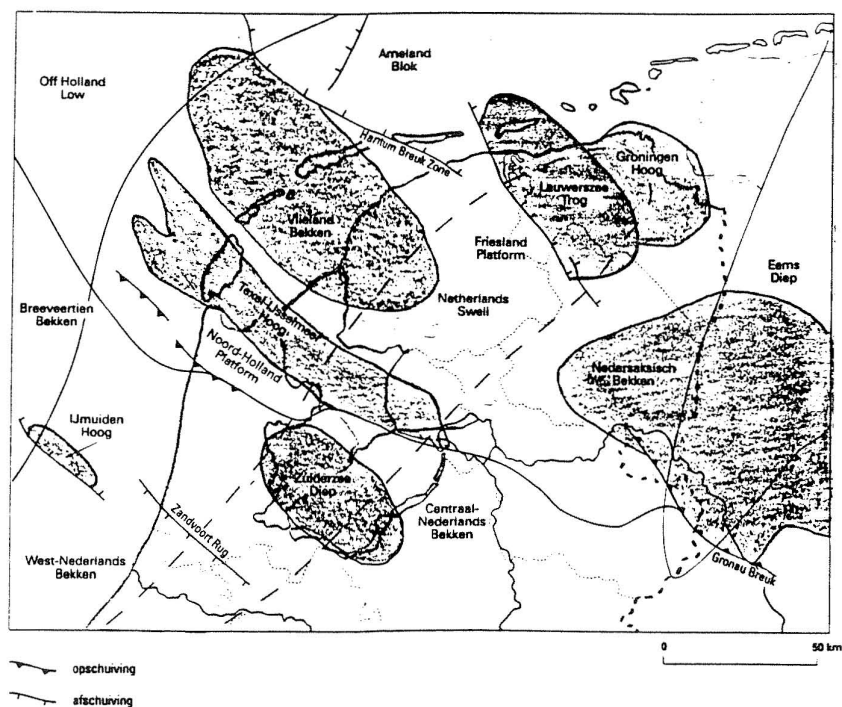


Fig. 5: Schematisch overzicht van de stratigrafische elementen in het bestudeerde gebied

De voor deze studie meest belanghebbende reservoirkarakteristieken zijn de diepteligging, dikte en doorlatendheid van de aquifer. Daarnaast is ook de structurele ontwikkeling van de deelgebieden van belang. Compartmentalisatie (= opdeling in deelreservoirs door breuken) verkleint het effectieve reservoir en heeft vaak een ongunstig effect op stromingspatronen in aanwezige aquifers. Diepteligging en compartmentalisatie is onderzocht aan de hand van verschillende seismische lijnen en regionale kaarten (RGD, 1993) en is van belang bij de locatiebepaling van een geothermisch doublet.

Diepteligging, dikte en compartimentalisatie

Het gebied Lelystad ligt direct ten zuiden van het Texel-IJsselmeer Hoog en is tektonisch zwaar verstoord door op- en afschuivingen. Langs de zuidelijke randbreuk van dit hoog hebben gedurende het Laat-Krijt en Vroeg-Tertiair inversie bewegingen plaats gevonden. De breuken lopen in een WNW-OZO richting. Als gevolg van de inversie van het Centraal-Nederlands Bekken zijn in het gebied Lelystad opschuivingen aanwezig. Delen van de Boven-Rotliegend aquifer zijn hierbij opgeheven. Opgeheven zones zijn op de structuurkaart te herkennen aan horstblokken, waarvan de voornaamste randbreuken een verticaal verzet hebben van ca. 400 m. Het verticale verzet van deze breuken is vaak groter dan de dikte van de aquifer. Dit betekent dat de aquifers in de verschillende breukblokken niet met elkaar kunnen communiceren (RGD, 1993).

De diepteligging van de top van de Slochteren-aquifer in het gebied Lelystad bedraagt in het noordelijk deel van de stad 1900 - 2000 m. In het zuidelijk deel van de stad bedraagt de diepte 2400 - 2500 m (RGD, 1993). Dit verschil wordt veroorzaakt door een breuk.

Het gebied Heerenveen ligt op het Friesland Platform waar veel erosie (Laat-Jura) heeft plaats gevonden. De top van de Slochteren-aquifer ligt op een diepte van 1900-2000 m. In tegenstelling tot het gebied Almere-Lelystad zijn hier geen grote breukstructuren aanwezig. Van enige slenkvorming door breuken met een verzet van 50 m of minder kan sprake zijn. De compartimentalisatie in het gebied Heerenveen is gering. Vanwege deze compartimentalisatie en de geringe aquifer dikte van 50 m is voor de locatiebepaling van een geothermisch doublet nader onderzoek vereist.

Gevonden waarden voor de transmissiviteiten

In de onderstaande tabel staan de waarden voor de transmissiviteiten weergegeven zoals deze berekend zijn in het rapport 'Studie naar de permeabiliteit van de Boven-Rotliegend aquifer in de gebieden Almere-Lelystad en Heerenveen' (RGD, juni 1996).

boring	permeabiliteit (mD)	aquiferdikte (m)	transmissiviteit (Dm)
Almere	6	123	1
Lelystad	105	144	15
Heerenveen	162	60 ¹	10

Tabel 2: Transmissiviteiten voor de 3 bestudeerde locaties op basis van de berekende permeabiliteiten

Transmissiviteiten kunnen aanzienlijk verhoogd worden door de lagen steeds gedeveerd of zelfs horizontaal aan te boren. Het aangeboorde traject van de aquifer wordt hierdoor verlengd en kan efficiënter gebruik worden gemaakt van goed doorlatende delen. Studie hiernaar kan worden uitgevoerd tijdens toekomstig locatiespecifiek onderzoek.

3.2.2 Tertiaire aquifers op de locatie Heerenveen

In opdracht van opdrachtgever NUON is alleen het gebied Heerenveen onderzocht op de mogelijkheid tot aardwarmtewinning uit aquifers van geringere diepte (< 800 m). In overleg met de RGD werd besloten om alleen de Tertiaire aquifers aan een nader onderzoek te onderwerpen. De aquifers in kwestie lijken op grond van hun temperatuurniveau en hydraulische eigenschappen in principe geschikt voor geothermische toepassingen met behulp van een warmtepomp.

In het onderzoeksgebied komen twee belangrijke zandige pakketten voor, te weten de Formatie van Breda en het Zand van Brussel

De *Formatie van Breda* opgebouwd uit uiterst fijne tot zeer fijnkorrelige zanden met dunne klei- en siltlaagjes.

Het Zand van Brussel bestaat uit een opeenvolging van zeer fijne en kleihoudende zanden.

De permeabiliteit van beide aquifers varieert van 200-600 mD in de zanden tot minder dan 50 mD in kleihoudende lagen. De verticale homogeniteit van deze aquifer is in Noord-Nederland vrij laag.

De aquiferkarakteristieken die van belang zijn bij de evaluatie van de geschiktheid voor toepassing in de warmtepomp-optie, staan vermeld in onderstaande tabel 3. De transmissiviteit van zowel de Formatie van Breda als

het Zand van Brussel zijn zeer hoog als gevolg van de grote dikte. Er dient echter rekening mee te worden gehouden dat het hier de bruto zanddikte betreft, inclusief niet-doorlatende kleipakketten. De netto productieve zanddikte zal aanzienlijk lager uitvallen.

Aquifer	Diepte top (m)	Dikte (m)	Temperatuur aan de top (°C)	Permeabiliteit (mD) (gemiddeld)
Formatie van Breda	385	170	13	100-1000 (300)
Zand van Brussel	690	105	24	200-600 (400)

Tabel 3: Reservoirparameters van Tertiaire aquifers in het gebied Heerenveen.

3.3. Formatietemperatuur

De geothermische gradiënten in de gebieden Almere-Lelystad en Heerenveen zijn vrijwel identiek en bedragen ca. 3,5 °C/100 m. Het verloop van de in-situ temperatuur staat weergegeven in Tabel 4. Het formatiewater zal aan de putmond enkele graden (ca. 2 °C) lager zijn.

In het noorden van Lelystad bedraagt de temperatuur aan de top van de Boven-Rotliegend aquifer (1900-2000 m) 75-82 °C. In het zuiden van het gebied Almere bedraagt de temperatuur 90-96 °C op 2400-2500 m. In Almere bedraagt de temperatuur aan de top van de Boven-Rotliegend aquifer (1700-1800 m) 67-79 °C.

In het gebied Heerenveen bedraagt de temperatuur aan de top van aquifer (ca. 1900 m) 75-79 °C.

Diepte (m)	Temperatuur (°C)
500	22 - 24
1000	43 - 48
2000	78 - 82
3000	113 - 117

Tabel 4: Het verloop van de temperatuur in de diepe ondergrond van Almere, Lelystad en Heerenveen

3.4. Chemische samenstelling van het formatiewater

De chemische samenstelling van het formatiewater wordt ten tijde van exploratie door metingen (aan monsters) aan een nadere analyse onderworpen. Van de bestudeerde putten is destijds slechts in één put het zoutgehalte gemeten. In Akkrum bleek het zoutgehalte 197.000 ppm te bedragen.

Dit is beduidend hoger dan het zoutgehalte van zeewater; het zoutgehalte blijkt over het algemeen met de diepte toe te nemen

Opgeloste stoffen die kunnen neerslaan bij de productie en injectie van geothermisch water zijn Fe^{++} en Ca^{++} . Neerslag van ijzer wordt verhinderd door toetreding van zuurstof in het geothermische circuit te voorkomen; kalkprecipitatie kan worden tegengegaan door voldoende druk in het geothermische systeem te handhaven waardoor kooldioxide (CO_2) in oplossing blijft.

Het zeer agressieve zwavelwaterstof (H_2S) blijkt niet voor te komen in de bestudeerde formatiewaters.

4. KOSTEN VAN AARDWARMTEWINNING

4.1. Investeringskosten

Bij de berekening van de aanlegkosten van een puttendoublet op de beide VINEX-locaties zijn gegevens gebruikt die gedurende de periode mei 1995 tot december 1996 verzameld werden in een speciaal voor deze doeleinden ontwikkeld programma. In nauw overleg met een aantal specialisten (contractors) zijn de kosten van het boven- en het ondergronds geothermisch circuit (inclusief materieel) in kaart gebracht.

In de kostenberekening is uitgegaan van de volgende, deels in overleg met NUON gekozen, waarden of gegevens:

- de kosten van boringen zijn bepaald tot de onderzijde van de diepste in aanmerking komende watervoerende laag. De produktiebuis is in verband met het vereiste debiet vastgesteld op 7 inch;
- een onderlinge putafstand op einddiepte van 1500 m. Bij een definitief ontwerp dient deze afstand te worden berekend aan de hand van het uiteindelijk gewenste debiet (afhankelijk van de warmtevraag) en de reservoirkarakteristieken van de watervoerende lagen. Een afwijking van enkele honderden meters heeft evenwel een geringe invloed op de totale boorlengte (en verbruizing);
- de benodigde financieel-economische cijfers zijn verstrekt door NUON, te weten rentepercentage, afschrijvingsperiode, elektriciteitsstarieven, cijfers inzake warmtegebruik en aansluitwaarde voor beide VINEX-locaties en cijfers met betrekking tot de aansluitfractie van basislastvoorzieningen;
- een produktiedebiet van 200 m³/uur (zie ook § 2.4);
- een COP (Coefficient of Performance) van 2.5 wat betreft de warmtepomp;

Zou gekozen worden voor een groter debiet dan kan overwogen worden de diameter van beide putten iets groter te kiezen (b.v. produktiebuisdiameter 7 5/8"). Dit heeft echter alleen zin als de warmteproductiekosten lager worden door de geringere hoeveelheid pompenergie die in dat geval vereist is. Deze optie is vooralsnog buiten beschouwing gelaten.

De kosten voor de aanleg van een puttendoublet op beide locaties zijn weergegeven in de Bijlagen; de investeringskosten van het bovengrondse geothermische systeem staan hier eveneens vermeld, evenals het overzicht van het investeringstotaal, alsmede de annuïteit. Bij de berekeningen is uitgegaan van een rentevoet van 6 % en een afschrijvingsperiode van 25 jaar.

Buiten beschouwing zijn gebleven:

- de kosten van het distributienet buiten de aardwarmtecentrale

- circulatiepompen vereist in het distributiecircuit
- eventuele warmtebuffers etc.
- de pieklastvoorziening

Bij de hieronder genoemde kostenposten kan het volgende worden opgemerkt.

Voor het centralegebouw waarin de warmtewisselaars, injectiepomp, circulatiepompen voor het distributienetwerk, filters in het geothermische circuit, afsluiters etc, een transformator-ruimte en een regelkamer hun plaats moeten krijgen, is een bedrag van ca kf 250.

De kosten van het inhibitorinjectiesysteem waarvan de noodzaak geenszins vaststaat, zijn niet opgenomen in de uiteindelijke, totale investeringskosten. Het betreft hier een doseerinstallatie ter bescherming van de injectieput.

Hieronder volgt een recapitulatie van de investeringsbedragen:

	Heerenveen diep, zonder wp	Heerenveen ondiep, met wp	Lelystad diep, zonder wp
boorlengte (m)	2227	690	2219
putdebiet (m ³ /u)	200	200	200
kosten (kfl)			
ondergronds	6886	1211	6858
bovengronds	3097	2526	2786
totaal (kfl)	9983	3737	9644

tabel 5: kosten van ondergrondse en bovengrondse installaties t.b.v. een aardwarmtewinningsdoublet

4.2. Operationele kosten

De operationele kosten betreffen:

- energiegebruik, elektriciteit voor de aandrijving van de productiepomp en de injectiepomp van een doublet. Uitgegaan is van door NUON ter beschikking gestelde tarieven;
- bediening en onderhoud van doublet en geothermisch circuit. Uitgegaan is van 3% van het investeringsbedrag per jaar.

Het onderhoud van het puttendoublet bestaat uit een z.g. work over-operatie. Tijdens een dergelijke operatie die ca eens in de 5 jaar plaatsvindt, worden de putten geïnspecteerd en gereinigd (verwijdering van meegeproduceerd zand en eventuele corrosie-producten) en wordt de elektrische onderwaterpomp gereviseerd of vervangen.

Bij de berekeningen is uitgegaan van een basislastvoorziening met een vermogen gelijk 33% van de aansluitwaarde (de z.g. *aansluitfractie*); de pieklastvoorziening, b.v. gasketels of een W/K-eenheid, is buiten beschouwing

gelaten. De basislastvoorziening wordt verondersteld in staat te zijn 90 % van de warmtebehoefte te kunnen leveren.

De berekening van de operationele kosten op beide VINEX-locaties, bij een debiet van 200 m³/u en een retourtemperatuur van 40 °C, is weergegeven in de Bijlage.

4.3. Jaarlijkse exploitatiekosten

Heerenveen, diepe aardwarmtewinning

Hieronder volgt een recapitulatie van de in de bijlage berekende jaarlijkse kosten verbonden aan de exploitatie van een aardwarmte-douplet op deze locatie.

Aanbodzijde (1 doublet):		
Retourtemperatuur distr.-net:	40	*C
Vermogen doublet:	10.9	MW
Aansluitwaarde:	33.0	MW
Aardwarmteproductie:	163181	GJ
Jaarlijkse exploitatiekosten:		
Elektriciteitsgebruik:	1152	kfl
Bediening en onderhoud:	346	kfl
Rente en afschrijving:	903	kfl
Totale kosten:	1846	kfl
Prijs per geprod. GJ aardwarmte:	11.31	fl/GJ

tabel 6: jaarlijkse exploitatiekosten voor de locatie Heerenveen, diepe aardwarmtewinning zonder warmtepomp

Uit de berekeningen volgt, dat wanneer een doublet met een circulatiedebiet van 200 m³/u en een uitkoeling tot 40 °C, net niet aan de verlangde warmtebehoefte kan voldoen wanneer per aangesloten wooneenheid 9 kWth geleverd moet worden. Over het algemeen zal 9 kWth nogal aan de hoge kant zijn. De NOVEM hanteert voor haar studies meestal aansluitwaarden van 5 kWth (goede isolatie is tegenwoordig vrij gangbaar) zodat in dat geval de warmtebehoefte ruimschoots gedekt wordt.

Heerenveen, ondiepe aardwarmtewinning met warmtepomp

Bij een debiet van 200 m³/u en een retourtemperatuur van 40 °C in het distributienet zullen de exploitatiekosten van aardwarmtewinning uit de Tertiaire aquifers zijn fl. 17.44/GJ bedragen.

Aanbodzijde (1 doublet):	
Retourtemperatuur distr.-net:	40 °C
Vermogen doublet:	4.57 MW
Aansluitwaarde:	13.9 MW
Aardwarmteproductie:	68472 GJ
Jaarlijkse exploitatiekosten:	
Elektriciteitsgebruik:	778 kfl
Bediening en onderhoud:	115 kfl
Rente en afschrijving:	301 kfl
Totale kosten:	1194 kfl
Prijs per geprod. GJ aardwarmte:	17.44 fl/GJ

tabel 7: jaarlijkse exploitatiekosten voor de locatie Heerenveen, ondiepe aardwarmtewinning met warmtepomp

Lelystad

Hieronder volgt een recapitulatie van de in de bijlage berekende jaarlijkse kosten verbonden aan de exploitatie van een aardwarmte doublet op deze locatie.

Aanbodzijde (1 doublet):	
Retourtemperatuur distr.-net:	40 °C
Vermogen doublet:	10.9 MW
Aansluitwaarde:	33.0 MW
Aardwarmteproductie:	163181 GJ
Jaarlijkse exploitatiekosten:	
Elektriciteitsgebruik:	789 kfl
Bediening en onderhoud:	331 kfl
Rente en afschrijving:	864 kfl
Totale kosten:	1984 kfl
Prijs per geprod. GJ aardwarmte:	9.83 fl/GJ

tabel 8: jaarlijkse exploitatiekosten voor de locatie Lelystad

4.4. Kostenbeschouwing

Met betrekking tot de hierboven weergegeven uitkomsten zijn de volgende punten relevant.

Technische mogelijkheden voor een kostprijsverlaging.

Aardwarmtewinning uit ondiepe aquifers ten behoeve van ruimteverwarming met behulp van een warmtepomp is nog verre van rendabel. Water van ca 700 meter diepte (Zand van Brussel) is van een te laag temperatuurniveau om tegen een acceptabele prijs opgewerkt te worden naar een 60/40 verwarmingssysteem. De hoge elektriciteitskosten en de (te) lage COP (Coefficient Of Performance) die bij dit uitkoelingsproces hoort zijn hier debet aan. In deze berekeningen moet de warmtepomp het volledig aangesloten vermogen van de in totaal 3500

woningen (10 MW) dekken, zodat de uitkoeling groot, de COP relatief klein en de mechanisch toegevoerde arbeid in de vorm van elektriciteit groot is. Hoewel de warmteopbrengst geringer is, zullen een grotere COP en een hieraan inherent lager elektriciteitsverbruik de rentabiliteit iets verbeteren.

Financiële en fiscale mogelijkheden

- In het kader van het lopende vierjarige Thermie-programma (1994-1998) van de EU kunnen nog eenmaal in de periode oktober 1997 - januari 1998 projectvoorstellen inzake aardwarmtewinning ter subsidiering worden ingediend. Voor een project dat gefaseerd wordt uitgevoerd kan per fase subsidie worden aangevraagd. Per fase werd gemiddeld ca 600.000 ECU aan subsidie verstrekt.
- Aardwarmteprojecten zijn financierbaar uit de z.g. Groene Fondsen, over de uitkeringen waarvan geen belasting wordt geheven. Het corresponderende rentevoordeel bedraagt 1-2 procent.
- Als duurzame bron is aardwarme vrijgesteld van de z.g. ecotax.

Een hogere, maar stabiele prijs voor een duurzaam produkt

Consumenten blijken bereid een hogere prijs te betalen voor elektriciteit uit duurzame bronnen. Naast Groene Stroom zou Groene Warmte kunnen worden aangeboden aan de consument als innovatief, duurzaam produkt. Relatief zal Groene Warmte uit de Aarde goedkoper kunnen worden aangeboden dan Groene Stroom.

De kosten van aardwarmte zijn slechts in geringe mate afhankelijk van de gas- en elektriciteitsprijzen, gezien de relatief bescheiden behoefte aan fossiele hulpenergie. Toekomstige prijsstijgingen voor fossiele energie zullen daarom slechts weinig invloed hebben op de aardwarmteprijs.

Referenties

1. Rijks Geologische Dienst (1993), *Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond, Toelichting bij Kaartblad V Sneek-Zwolle*. RGD, Haarlem.
2. RGD & NOGEPa (1993), *Stratigraphic nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGEPa*. Mededelingen Rijks Geologische Dienst (Haarlem), volume 50.
3. Harrison, R., Mortimer, N.D., Smarason, O.B. (1990), *Geothermal Heating*, Pergamon Press, Oxford (U.K.)
4. Ministerie van Economische Zaken, RGD en Staatstoezicht op de Mijnen, *Olie en Gas in Nederland, Opsporing en Winning 1995*, Economische Zaken, Den Haag

Bijlagen

Opdrachtgever:	NUON
Lokatie:	Lelystad
Datum:	januari 1997
Aquifer:	Boven-Rotliegend
invoerparameters	
debiet (in m ³ /uur)	200
dichtheid van het produktiewater (kg/m ³)	1054
dichtheid van het injectiewater (kg/m ³)	1078
verticale afstand van maaiveld tot basis reservoir (m)	2020
kickoff point (gemeten vanaf maaiveld) (m)	700
afstand op eiddiepte tussen prod. & inj. put (m)	1500
buitendiameter v/d produktie-liner (inch)	7
permeabiliteit (mDarcy)	105
Netto dikte van het reservoir (m)	144
skin	0
rendement van de inj. pomp	0.7
rendement van de prod. pomp	0.7
retour temp. distr.-net (injectietemperatuur)	40
formatietemperatuur (=produktietemperatuur)	82
viscositeit bij prod temp (Pa.s)	0.000446
viscositeit bij inj temp (Pa.s)	0.000778
frictiefactor (=4*f, eenheidsloos)	0.005
druk bovengronds circuit (voor Q-wiss.)	10
gemiddelde saliniteit (NaCl) op einddiepte (gr/l)	86
rente (%)	6%
afschrijvingstijd (jaar)	25
jaar van aanvang	1996
elektrisch kWh-plateautarief voor grootgebruikers (in Nfl)	0.11
elektrisch kWh-laagtarief voor grootgebruikers (in Nfl)	0.014
gasprijs per MWh (Nfl)	24.37
jaarlijkse stijging aardgasprijs (%):	2
subsidie op totale investeringskosten (%)	50
Dollarkoers (in Nfl)	1.71

Opdrachtgever:	NUON
Lokatie	Lelystad
Ondergrondse investeringen	
diameter productie-liner (inch)	7
vaste kosten (kfl):	
inrichten boorlocatie incl. platform	1500
boorinstallatie mob. en demob.	580
gericht boren	272
putafwerking	256
testen	83
putstimulatie	83
subtotaal:	2774
variabele kosten (kfl):	
boorinstallatie	1586
beitels e.d.	194
casing	749
cementatie	167
spoeling	131
logging	198
well site geology/mud logging	110
fishing	137
afvalverwerking	226
vloeistofbemonstering	35
tech. uitvoering/supervisie	229
verzekering	96
overig/onvoorzien	226
subtotaal:	4084
totale kosten (kfl):	6858

Opdrachtgever:	NUON
Lokatie:	Lelystad
Bovengrondse investeringen	
Elektrische onderwaterpomp prod. put	450
Productiebuis	140
Injectiepomp	108
Well heads	48
Inhibitor-injectiesysteem	280
Frequentieregeling productiepomp	160
Titanium warmtewisselaars	286
Geothermisch circuit	270
Distributiecircuit	224
Verbuizing geothermisch circuit	85
Engineering (centrale)	100
Vergunningen	110
Transport/installatie op lokatie	155
Verzekering	55
Supervisie	315
Totaal	2786

Opdrachtgever:	NUON
Lokatie:	Lelystad
Benodigde pompcapaciteiten	
debiet in m3/s	0.055556
permeabiliteit in m2	1.04E-13
transmissiviteit (Dm)	15.12
afstand tussen kickoff point en reservoir (m)	1320
gedeveeerde boorlengte	1519
pseudoskin effect	0.414173
deviatiehoek (graden)	46.6
totale boorlengte (m)	2219
watersnelheid in put	2.2376
buitendiameter put (m)	0.1778
binnendiameter put (m)	0.1618
straal put (m)	0.0809
drukverlies tgv reservoir inj.put (bar)	42.2
drukverlies tgv frictie inj.put (bar)	6.6
af: druk uitgang bovengr. circuit	-8
geothermaal sifon	-4.7
totaal drukverlies (bar)	36.1
pompvermogen inj.-pomp (kW)	289
drukverlies tgv reservoir prod.put (bar)	24.2
drukverlies tgv frictie prod.put (bar)	6.4
druk (bar) ingang bovengr. circuit	10
totaal drukverlies (bar)	41
pompvermogen prod.-pomp (kW)	328
totaal benodigd pompvermogen (kW)	617

	Plaats							NUON
	Lokatie							Lelystad
	Totale investeringskosten & Annuïteiten							
	Investeringskosten:							200 m3/uur, 7" liner
	bovengronds							2786
	ondergronds							6858
	totaal							9644
	Annuïteiten:							
	rente (%)							6%
	afschrijvingstijd (jaar)							25
	annuïteit							755

Plaats						NUON
Lokatie:						Lelystad
Warmteproductie uit:						Boven-Rotliegend
formatietemperatuur (*C)						82
temperatuur aan putkop (*C)						80
temperatuur achter primaire wisselaar						77
retourtemperatuur distributienet (*C)						40
uitkoeling (Δt) *C						37
debiet	vermogen	aansluit- fractie	aansluit- waarde	warmte	aardwarm- te (90%)	vollasturen
(m3/h)	(MW)		(MW)	(MWh)	(MWh)	
200	9.1	0.33	27.6	42047	37843	4159
investeringskosten per geïnstalleerde kW voor 7" liner						1060
Opdrachtgever:						NUON
Lokatie:						Lelystad
Jaarlijkse exploitatiekosten						
Productiedebiet: 200 m3/uur, 7" liner						
1. Elektriciteitsgebruik:						
40% ink. daltarief fl/kWh		0.044	1664	617	45	
60% ink. piektarief fl/kWh		0.066	2495	617	102	
ink. kW-prijs fl/kW		291.25		617	180	
				subtotaal:	326	
2. Bediening en onderh. 3% van kfl						289
3. Rente en afschrijving annuïteit						755
				Totaal (kfl):	1371	
Geprod. warmte (GJ)			136234	fl/GJ	10.06	

Opdrachtgever:	NUON
Lokatie:	Heerenveen
Datum:	januari 1997
Aquifer	Zand van Brussel

invoerparameters

debiet (in m3/uur)	200
dichtheid van het produktiewater (kg/m3)	1082
dichtheid van het injectiewater (kg/m3)	1097
verticale afstand van maaiveld tot basis reservoir (m)	690
kickoff point (gemeten vanaf maaiveld) (m)	0
afstand op eiddiepte tussen prod. & inj. put (m)	1500
buitendiameter v/d produktie-liner (inch)	7
permeabiliteit (mDarcy)	690
Netto dikte van het reservoir (m)	105
skin	0
rendement van de inj. pomp	0.7
rendement van de prod. pomp	0.7
retour temp. distr.-net (injectietemperatuur)	7
formatietemperatuur (=produktietemperatuur)	33
viscositeit bij prod temp (Pa.s)	0.000834
viscositeit bij inj temp (Pa.s)	0.001616
friectiefactor (=4*f, eenheidsloos)	0.005
druk bovengronds circuit (voor Q-wiss.)	10
gemiddelde saliniteit (NaCl) op einddiepte (gr/l)	52
rente (%)	6%
afschrijvingstijd (jaar)	25
jaar van aanvang	1996
elektrisch kWh-plateautarief voor grootgebruikers (in Nfl)	0.11
elektrisch kWh-laagtarief voor grootgebruikers (in Nfl)	0.014
gasprijs per MWh (Nfl)	24.37
jaarlijkse stijging aardgasprijs (%):	2
subsidie op totale investeringskosten (%)	50
Dollarkoers (in Nfl)	1.71

Opdrachtgever:							NUON
Lokatie:							Heerenveen
Bovengrondse investeringen							
Elektrische onderwaterpomp prod. put							267
Produktiebuis							63
Injectiepomp							108
Well heads							48
Inhibitor-injectiesysteem							280
Frequentieregeling productiepomp							160
Titanium warmtewisselaars							286
Geothermisch circuit							270
Distributiecircuit							224
Verbuizing geothermisch circuit							85
Engineering (centrale)							100
Vergunningen							110
Transport/installatie op lokatie							155
Verzekering							55
Supervisie							315
Totaal							2526
Opdrachtgever:							NUON
Lokatie							Heerenveen
Ondergrondse investeringen							
diameter productie-liner (inch)							7
totale kosten (kfl):							1211

Opdrachtgever:		NUON
Lokatie:		Heerenveen
Benodigde pompcapaciteiten		
debiet in m3/s		0.055556
permeabiliteit in m2		6.81E-13
transmissiviteit (Dm)		72.45
afstand tussen kickoff point en reservoir (m)		690
gedevieerde boorlengte		1020
pseudoskin effect		0.782291
deviatiehoek (graden)		55.84
totale boorlengte (m)		1020
watersnelheid in put		2.2376
buitendiameter put (m)		0.1778
binnendiameter put (m)		0.1618
straal put (m)		0.0809
drukverlies tgv reservoir inj.put (bar)		17.6
drukverlies tgv frictie inj.put (bar)		3.1
af: druk uitgang bovengr. circuit		-8
geothermaal sifon		-1
totaal drukverlies (bar)		11.7
pompvermogen inj.-pomp (kW)		94
drukverlies tgv reservoir prod.put (bar)		9.1
drukverlies tgv frictie prod.put (bar)		3.1
druk (bar) ingang bovengr. circuit		10
totaal drukverlies (bar)		23
pompvermogen prod.-pomp (kW)		184
totaal benodigd pompvermogen (kW)		278
Opdrachtgever:		NUON
Lokatie:		Heerenveen
Benodigde warmtepompcapaciteit		
COP		2.5
Injectietemperatuur (*C)		7
Uitkoeling (*C)		31
Primair vermogen warmtepomp (MW)		6.03
Toegevoegde mechanische arbeid (MW)		4.02
Totaal geleverd vermogen (MW)		10.06

Plaats	NUON							
Lokatie	Heerenveen							
Totale investeringskosten & Annuïteiten								
Investeringskosten:							200 m3/uur, 7" liner	
bovengronds							2526	
ondergronds							1211	
totaal							3737	
Annuïteiten:								
rente (%)							6%	
afschrijvingstijd (jaar)							25	
annuïteit							293	

Plaats		NUON				
Lokatie:		Heerenveen				
Warmteproductie uit:		Zand van Brussel				
formatietemperatuur (*C)						33
temperatuur aan putkop (*C)						31
temperatuur achter primaire wisselaar						28
retourtemperatuur distributienet (*C)						7
uitkoeling (Δt) *C						21
debiet	vermogen	aansluit- fractie	aansluit- waarde	warmte	aardwarm- te (90%)	vollasturen
(m3/h)	(MW)		(MW)	(MWh)	(MWh)	
200	10.06	0.33	30.5	46473	41826	4159
investeringskosten per geïnstalleerde kW voor 7" liner						372
Opdrachtgever:		NUON				
Lokatie:		Heerenveen				
Jaarlijkse exploitatiekosten						
Productiedebiet:		200 m3/uur, 7" liner				
<i>1. Elektriciteitsgebruik tbv prod.- en inj.-pomp</i>				uren	kW	bedrag kfl
40% ink. daltarief fl/kWh			0.044	1664	278	20
60% ink. piektarief fl/kWh			0.066	2495	278	46
ink. kW-prijs fl/kW			291.25		278	81
				subtotaal:		147
<i>2. Elektriciteitsgebruik tbv warmtepomp</i>				uren	kW	bedrag kfl
40% ink. daltarief fl/kWh			0.044	1664	4023	294
60% ink. piektarief fl/kWh			0.066	2495	4023	663
ink. kW-prijs fl/kW			291.25		4023	1172
				subtotaal:		2129
<i>1. + 2.</i>				totaal		2276
<i>3. Bediening en onderh. 3% van kfl</i>						112
<i>4. Rente en afschrijving annuïteit</i>						293
				Totaal (kfl):		2681
<i>Geprod. warmte (GJ)</i>			150573		fl/GJ	17.81

Opdrachtgever:	NUON
Lokatie:	Heerenveen
Datum:	december 1996
Aquifer	Boven-Rotliegend
invoerparameters	
debiet (in m3/uur)	200
dichtheid van het produktiewater (kg/m3)	1054
dichtheid van het injectiewater (kg/m3)	1078
verticale afstand van maaiveld tot basis reservoir (m)	2030
kickoff point (gemeten vanaf maaiveld) (m)	700
afstand op eiddiepte tussen prod. & inj. put (m)	1500
buitendiameter v/d produktie-liner (inch)	7
permeabiliteit (mDarcy)	162
Netto dikte van het reservoir (m)	60
skin	0
rendement van de inj. pomp	0.7
rendement van de prod. pomp	0.7
retour temp. distr.-net (injectietemperatuur)	40
formatietemperatuur (=produktietemperatuur)	82
viscositeit bij prod temp (Pa.s)	0.000446
viscositeit bij inj temp (Pa.s)	0.000779
frictiefactor (=4*f, eenheidsloos)	0.005
druk bovengronds circuit (voor Q-wiss.)	10
gemiddelde saliniteit (NaCl) op eiddiepte (gr/l)	86
rente (%)	6%
afschrijvingstijd (jaar)	25
jaar van aanvang	1996
elektrisch kWh-plateautarief voor grootgebruikers (in Nfl)	0.11
elektrisch kWh-laagtarief voor grootgebruikers (in Nfl)	
gasprijs per MWh (Nfl)	24.37
subsidie op totale investeringskosten (%)	50
Dollarkoers (in Nfl)	1.71

Opdrachtgever:	NUON
Lokatie	Heerenveen
Ondergrondse investeringen	
diameter productie-liner (inch)	7
vaste kosten (kfl):	
inrichten boorlocatie incl. platform	1500
boorinstallatie mob. en demob.	580
gericht boren	272
putafwerking	256
testen	83
putstimulatie	83
subtotaal:	2774
variabele kosten (kfl):	
boorinstallatie	1598
beitels e.d.	195
casing	754
cementatie	168
spoeling	132
logging	199
well site geology/mud logging	111
fishing	137
afvalverwerking	228
vloeistofbemonstering	35
tech. uitvoering/supervisie	230
verzekering	96
overig/onvoorzien	228
subtotaal:	4112
totale kosten (kfl):	6886

Opdrachtgever:		NUON
Lokatie:		Heerenveen
Bovengrondse investeringen		
Elektrische onderwaterpomp prod. put		696
Productiebuis		205
Injectiepomp		108
Well heads		48
Inhibitor-injectiesysteem		280
Frequentieregeling productiepomp		160
Titanium warmtewisselaars		286
Geothermisch circuit		270
Distributiecircuit		224
Verbuizing geothermisch circuit		85
Engineering (centrale)		100
Vergunningen		110
Transport/installatie op lokatie		155
Verzekering		55
Supervisie		315
Totaal		3097

Opdrachtgever:	NUON
Lokatie:	Heerenveen
Benodigde pompcapaciteiten	

debiet in m3/s	0.055556
permeabiliteit in m2	1.6E-13
transmissiviteit (Dm)	9.72
afstand tussen kickoff point en reservoir (m)	1330
gedevieerde boorlengte	1527
pseudoskin effect	0.678499
deviatiehoek (graden)	46.43
totale boorlengte (m)	2227
watersnelheid in put	2.2376
buitendiameter put (m)	0.1778
binnendiameter put (m)	0.1618
straal put (m)	0.0809
drukverlies tgv reservoir inj.put (bar)	63.8
drukverlies tgv frictie inj.put (bar)	6.6
af: druk uitgang bovengr. circuit	-8
geothermaal sifon	-4.7
totaal drukverlies (bar)	57.7
pompvermogen inj.-pomp (kW)	462
drukverlies tgv reservoir prod.put (bar)	36.6
drukverlies tgv frictie prod.put (bar)	6.5
druk (bar) ingang bovengr. circuit	10
totaal drukverlies (bar)	54
pompvermogen prod.-pomp (kW)	432
totaal benodigd pompvermogen (kW)	894

	Plaats							NUON
	Lokatie							Heerenveen
	Totale investeringskosten & Annuïteiten							
	Investerings:							200 m3/uur, 7" liner
	bovengronds							3097
	ondergronds							6886
	totaal							9983
	Annuïteiten:							
	rente (%)							6%
	afschrijvingstijd (jaar)							25
	annuïteit							781

Plaats						NUON
Lokatie:						Heerenveen
Warmteproductie uit:						Boven-Rotliegend
formatietemperatuur (*C)						82
temperatuur aan putkop (*C)						80
temperatuur achter primaire wisselaar						77
retourtemperatuur distributienet (*C)						40
uitkoeling (Δt) *C						37
debiet	vermogen	aansluit- fractie	aansluit- waarde	warmte	aardwarm- te (90%)	vollasturen
(m3/h)	(MW)		(MW)	(MWh)	(MWh)	
200	9.1	0.33	27.6	42047	37843	4159
investeringskosten per geïnstalleerde kW voor 7" liner						1097
Opdrachtgever:						NUON
Lokatie:						Heerenveen
Jaarlijkse exploitatiekosten						
Productiedebiet: 200 m3/uur, 7" liner						
1. Elektriciteitsgebruik:						
				uren	kW	bedrag kfl
	40% ink. daltarief fl/kWh	0.044		1664	894	65
	60% ink. piektarief fl/kWh	0.066		2495	894	147
	ink. kW-prijs fl/kW	291.25			894	260
				subtotaal:		473
2. Bediening en onderh. 3% van kfl						
						299
3. Rente en afschrijving annuïteit						
						781
Totaal (kfl):						1554
Geprod. warmte (GJ)			136234			fl/GJ 11.40