

# **VAN THERMOSCOPEN EN DOUBLETEN**

## **Intreerede**

Uitgesproken bij de aanvaarding  
van het ambt van hoogleraar  
in de Geothermie aan de Faculteit  
der Mijnbouwkunde en Petroleumwinning  
van de Technische Universiteit te Delft  
op 12 april 1991  
door

**drs. F. Walter**

*O, die heren sprookjesdichters!  
Je moet niet denken dat ze iets leerzaams,  
iets aangenaams of verkwikkends schrijven!  
Nee! Zij graven maar in de grond en halen  
niets dan duistere zaken tevoorschijn!...  
Ik zou hun gewoon verbieden te schrijven!  
Waar lijkt dat nu op:  
je leest ... onwillekeurig raak je aan het piekeren,  
- maar er komt allerlei nonsens in je hoofd op;  
heus, ik zou hun verbieden te schrijven;  
heel gewoon, zonder meer zou ik het verbieden.*

**Vorst W.F. Odojewski**

**F.M. Dostojewski-Arme mensen**

*Mijnheer de Rector Magnificus  
en overige leden van het College van Bestuur  
Dames en heren leden van deze  
universitaire gemeenschap  
Zeer geachte gasten,  
dames en heren*

## **Inleiding**

Dat de temperatuur van de aarde vanaf het aardoppervlak met de diepte toeneemt moet voor het eerst zijn waargenomen door lieden die ondergronds werkten: de mijnwerkers. Dat moet zijn gebeurd vanaf het moment dat mijngangen werden gemaakt tot 100 à 150 m diepte onder maaiveld. Met die dieptetoename correspondeert een verhoging van de temperatuur van circa 3 à 5 °C: een duidelijke waarneembare toename voor het gevoel. Wanneer voor het eerst een dergelijke diepte bij de mijnbouw werd bereikt zal moeilijk te achterhalen zijn; evenwel maakte Georg Agricola in zijn werk *De Re Metallica* uit 1556 melding van aanzienlijk grotere diepten. Illustraties uit dat werk, waarvan enkele het Papieren Patroon van de Faculteit der Mijnbouwkunde en Petroleumwinning verlichtigen, wijzen daar ook op.

Naar het schijnt besteedde de wetenschap destijds weinig aandacht aan het fenomeen van de ondergrondse temperatuurtoename met de diepte. Een verklaring daarvoor kan onder meer worden gezocht in het ontbreken van een instrument voor het doen van temperatuurwaarnemingen: de thermometer of thermoscoop, zoals de thermometer aan het begin van zijn ontwikkeling genoemd werd. Aan de uitvinding van de thermoscoop in het begin van de 17e eeuw zijn een viertal illustere namen verbonden: die van Galilei, Santorio, Drebbel en Fludd (1), die mogelijk alle werden geïnspireerd door het werk van Heroon de Oude. Deze Griekse wiskundige en werktuigbouwer leefde omstreeks het begin van onze jaartelling in Alexandrië.

Drebbel wordt beschouwd als de uitvinder van de zogenaamde Hollandse thermoscoop die vóór het jaar 1625 in ons land in zwang kwam. Een afbeelding van zo'n thermoscoop (fig. 1) wordt aangetroffen in een werk van de jezuit Jean Leurechon, die schreef onder het pseudoniem H. van Etten. Drebbel heeft de thermoscoop niet gebruikt voor wetenschappelijke waarnemingen (wellicht omdat hem daartoe de financiële middelen ontbraken) maar hij heeft het principe waarop de thermoscoop berustte gebruikt voor een aantal praktische toepassingen, zoals de constructie van thermostatische ovens en kachels en voor de aandrijving van astronomische uurwerken, onder andere voor koning James I in Londen en keizer Rudolf II te Praag. Vooral het uurwerk van James I was in de 17<sup>e</sup> eeuw zeer beroemd. Het stond opgesteld in de tuinen van het Paleis van Eltham. Een afbeelding van dit als perpetuum mobile bekend staande mechaniek waarvan Drebbel

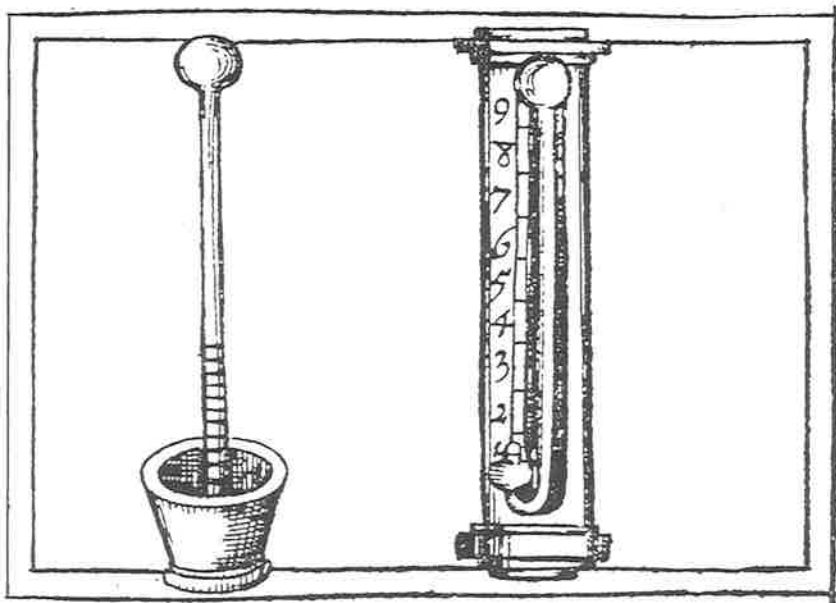


Fig. 1. De Hollandse (rechts) en de Italiaanse (links) thermoscoop.

de werking en constructie nooit bekend heeft gemaakt is te vinden in een boekje van Thomas Tymme (in: 1).

De Italiaanse thermoscopen van Santorio (fig. 1) en Galilei waren wel in vorm verschillend van die van de Hollandse maar niet in opzet; beide typen bestonden uit een glazen bol waaraan bevestigd een glazen buis. In de bol bevond zich lucht en in de buis enige vloeistof. Bij de Hollandse thermoscoop was de buis omgebogen en eindigde in een reservoirtje; bij de Italiaanse stak de buis in een kolf of beker.

Nauwkeurig waren deze typen thermometers niet want zij reageerden zowel op temperatuur- als barometerdruk-verschillen. In een wat andere vorm staan zij bekend als weerglas en dienen zij als barometer.

In het midden van de 17e eeuw begint men thermometers te bouwen waarvan de werking niet meer berust op de uitzetting van lucht bij temperatuurverhoging maar op de uitzetting van vloeistof in een buis. De uitvinding wordt toegeschreven aan groothertog Ferdinand II van Toscane; de z.g. Florentijnse thermometers, die eerst met water, later met wijngeest zijn gevuld, bereiken grote faam.

Eén van de eerste gebruikers van het Florentijnse type thermometers voor wetenschappelijke experimenten is Robert Boyle (1627-1691). Hij wordt beschouwd als degene die de eerste systematische beschouwing over on-

dergrondse temperaturen opzette (2). Daar hij er blijkbaar weinig voor voelde om zich ondergronds te begeven ("because of my being particularly subject to be offended by any thing that hinders a full freedom of Respiration, I was not solicitous to goe down into the deep mines") moest hij gebruik maken van de waarnemingen van anderen, onder andere van de Fransman Morin in de mijnen van Hongarije. Helaas kreeg hij niet de beschikking over temperatuurwaarnemingen omdat de thermometers die hij ter beschikking stelde voor waarnemingen in mijnen in de buurt van Oxford het voortijdig begaven.

Boyle geeft de volgende beschouwing inzake de aardwarmte (2.).

"I shall add as a Conjecture, that the positive cause of the actual warmth may proceed from those deeper parts of the Subterranean Region, which lie beneath those places which men have yet had occasion and ability to dig. For it seems probable to me, that in these yet unpenetrated Bowells of the Earth, there are great store-houses of either actual Fires, or places considerably hot, or, (in some Regions) of both; from which Reconditories (of I may so call them) or magazines of hypogeal heat, that quality is communicated, especially by Subterranean Channels, Clefs, Fibres or other Conveyances, to the less deep parts of the Earth, either by a propagation of heat through the substance of the interposed part of the Soil (as when the upper part of an Oven is remisly heated by the same Agents that produce an intense heat in the Cavity) or by a more easy diffusion of the Fire or heat through the above mentioned Conveyances as may be exemplified by the pipes that convey heat in some Chymicall structures:) Or else, (which is perhaps the most usual way,) by sending upwards hot mineral Exhalations and Steams".

Het boeiende in het betoog van Boyle is het verband dat hij legt tussen de aan het aardoppervlak optredende verschijnselen, de warmte-toename met de diepte en de klassieke opvatting dat het binnenste van de aarde uit vuur bestaat, of zoals de Duitse onderzoeker A. Kircher verbonden aan de Orde der Jezuiten ongeveer tездelfdertijd (1665) in zijn werk *Mundus subterraneus* (3) uitdrukt: "Ignis in centro terrae accensus sphaericus est". In dat boek dat onder meer de vulkanische verschijnselen in Italië en het toenmalige Nederlands Oost-Indië beschrijft, lijkt een wat ander verband te worden gelegd tussen het binnenste van de aarde, de "ignis, aeternae damnationis reos, divinae justitiae rigore sic exigente" (d.w.z. de hel in het binnenste van de aarde) en wat zich aan het aardoppervlak afspeelt. Met dat al schijnen er in de 17e en 18e eeuw slechts weinig ondergrondse temperatuurmetingen te zijn gedaan; publikaties omtrent waarnemingen en beschouwingen verschijnen pas weer omstreeks het midden van de 19e eeuw.

Een grote stap voorwaarts met betrekking tot het aardwarmte-onderzoek werd gedaan in de jaren 1862-1883 in Groot-Brittannië toen een speciaal daartoe in het leven geroepen comité een omvangrijk onderzoek uitvoerde en daarover verslag uitbracht in een zestiendelig rapport (4). Het onderzoek bestond uit vele temperatuurmetingen, de bepaling van het warmtegelei-

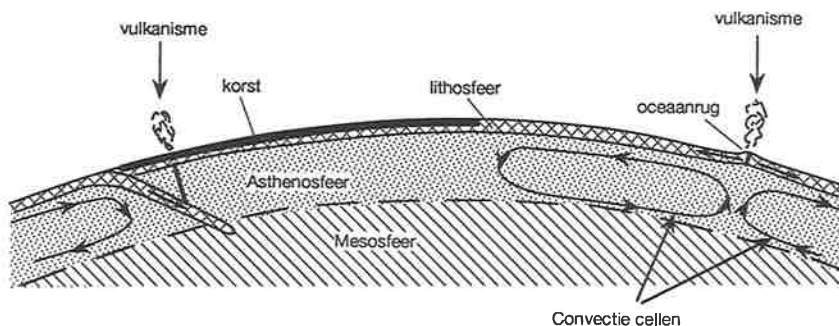


Fig. 2. Convectorie in de asthenosfeer.

dingsvermogen en de berekening daaruit van de hoeveelheid warmte die per tijdseenheid door een eenheid van oppervlak naar het aardoppervlak stroomt: de warmtestroomdichtheid.

Ondanks de beperkingen aan het onderzoek gesteld vond het comité een gemiddelde waarde die maar weinig afwijkt van de uitkomsten van onlangs uitgevoerd onderzoek ( $1,3 \times 10^{-6} \text{ cal cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  tegen  $1,27 - 1,46 \times 10^{-6} \text{ cal cm}^{-2}\text{s}^{-1} = 53\text{-}61 \text{ mWm}^{-2}$  volgens recente bepalingen) ter plaatse van de continenten.

Inmiddels heeft het geothermische onderzoek een grote vlucht genomen, mede vanwege belangstelling van praktische gebruikers van de onderzoekresultaten. Van verscheidene landen en zelfs continenten zijn ondergrondse temperatuurkaarten ter beschikking gekomen en verder is het aantal warmtestroomdichtheidsbepalingen dat in deze eeuw is verricht van minder dan 100 in 1954 gegroeid tot meer dan 10.000 in 1988 (5).

De temperatuurkaarten en in het bijzonder de warmtestroomdichtheidskaarten dragen bij tot de kennis van de lithosfeer; de warmtestroomdichtheid is één van de fysische en chemische parameters die de aardwetenschappers in staat stellen zich een beeld te vormen van het invendige van de aarde. Evenwel komt men met temperatuurmetingen alleen niet diep vanwege de onmogelijkheid om de temperatuur op afstand te bepalen. De diepste temperatuurmeting gaat niet dieper dan het diepste boorgat en momenteel zijn er nog slechts 3 boringen dieper gekomen dan 9 km. De kennis omtrent de temperatuurverdeling in de aarde op basis van metingen reikt tot slechts enkele kilometers diepte; de diepste temperatuurkaart weergegeven in de Atlas of Geothermal resources in the European Community, Austria and Switzerland (6), heeft betrekking op de temperatuur op 2000 m diepte.

Het is mogelijk om de temperatuur uit de warmtestroomdichtheid te schatten beneden de diepte tot waar metingen mogelijk zijn. Dat levert echter al-

leen enigszins betrouwbare resultaten voor het traject waarover warmte-transport slechts door geleiding en niet door massatransport (convectie) optreedt en bovendien de invloed van voorkomende warmtebronnen kan worden verdisconteerd; dat is hooguit het geval voor de lithosfeer. Voor warmtebeschouwingen onder de lithosfeer zijn er diverse fysische en chemische aanknopingspunten: belangrijke zijn de overgang tussen binnen- en buitenkern op circa 5100 km diepte en het grensvlak tussen mantel en kern op circa 3000 km diepte. De kern wordt gedacht voornamelijk te bestaan uit ijzer, het grensvlak in de kern is door seismologisch onderzoek gevonden. Het wordt beschouwd als de overgang van vast naar (ten dele) gesmolten materiaal. Op grond van hoge-drukexperimenten wordt momenteel aangenomen, dat de temperatuur in het centrum van de aarde ca.  $6600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  bedraagt (7).

De aarde bevat een grote hoeveelheid warmte. Een gedeelte daarvan is opgewekt bij het ontstaan van de aarde: bij de verdichting van de massa onder invloed van de zwaartekracht en door differentiatie van de massa tot een zwaardere kern en een lichter omhulsel. Het overige gedeelte van de warmte is geleverd door een nog steeds actieve maar in betekenis afnemende warmtebron die wordt gevormd door het verval van radioactieve elementen. De huidige bijdrage van deze warmtebron aan de totale warmtestroom naar het aardoppervlak wordt geschat op ongeveer de helft; de overige helft gaat derhalve ten koste van de opgeslagen warmtevoorraad van de aarde. De aarde koelt derhalve af, zij het dat dit aan het aardoppervlak niet waarneembaar is omdat de temperatuur daar vrijwel uitsluitend wordt bepaald door de invallende zonnestraling. Overigens is de warmte-inhoud van de aarde zo groot dat deze alleen al de huidige warmtestroom gedurende 10 miljard jaar in stand zou kunnen houden voordat de aarde zou zijn afgekoeld tot de huidige oppervlaktetemperatuur.

Het temperatuurverval van het middelpunt naar de oppervlakte van de aarde is zo groot, dat warmtegeleiding niet de enige wijze van warmte-transport kan zijn: over één of meer trajecten moet ook een andere, effectievere wijze van transport plaatshebben. Dat is de al eerder ter sprake gekomen convectie, wel bekend van de vloeistofbeweging in de fluitketel of het melkpannetje ten gevolge van de vlam eronder. Het convectieve warmtetransport maakt van onze planeet een perpetuum mobile in de betekenis van Drebbel. Niet alleen het inwendige van de aarde is in voortdurende beweging, ook het oppervlak daarvan. De aarde is een warmtemachine, waarvan de voor ons waarneembare begeleidende verschijnselen o. m. zijn aardbevingen, vulkanisme en verandering van de afstand tussen de continenten.

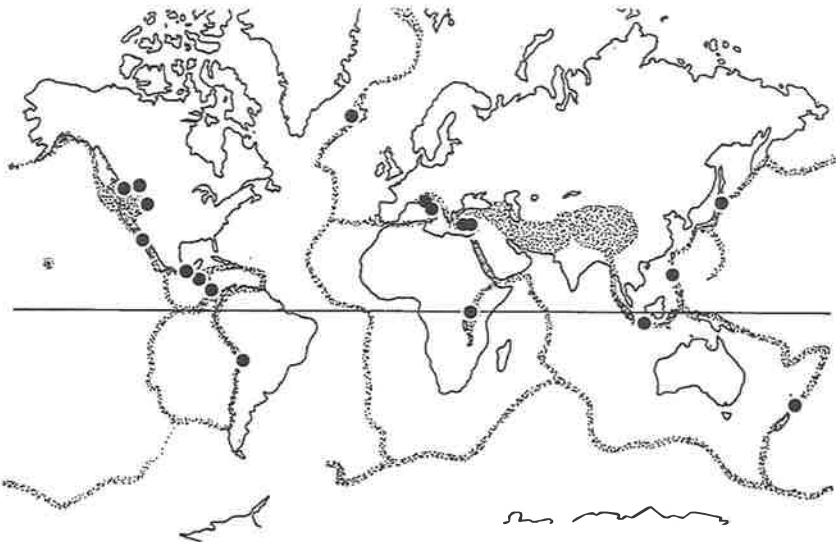
## De toepassing van aardwarmte

Zoals reeds opgemerkt neemt de bodemtemperatuur met de diepte toe. In Nederland bedraagt de toename ongeveer  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  per 100 m. Op 1000 m onder maaiveld wordt een temperatuur gevonden van  $40\text{-}50\text{ }^{\circ}\text{C}$  en op 2000 m van  $60\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ook elders binnen en buiten Europa worden gradiënten in deze orde van grootte aangetroffen. Er zijn evenwel zones waar de gradiënt een aanzienlijk hogere waarde heeft, bijv. meer dan  $30\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  in de omgeving van de plaats Larderello in Toscane. Hier bedraagt de bodemtemperatuur op ca. 400 m ongeveer  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De zones op aarde met hoge temperatuurgradiënten corresponderen ongeveer met de zones met vulkanisme en frequente aardbevingsverschijnselen (fig. 3).

Lage temperatuuraardwarmte kan slechts beperkt en in feite alleen direct worden aangewend; voor ruimteverwarming, zoals de verwarming van woning- en kantoorcomplexen en tuinbouwkassen en voor het drogen van bijv. landbouwgewassen. De oudste en meest verbreide is echter de balneologische; de hete baden in kuuroorden.

Hoge temperatuuraardwarmte kan ook indirect worden gebruikt, namelijk voor de opwekking van elektriciteit. De grens tussen hoog en laag ligt ongeveer op  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; daaronder spreekt men van lage-enthalpie-aardwarmte; daarboven van hoge-enthalpie-aardwarmte.

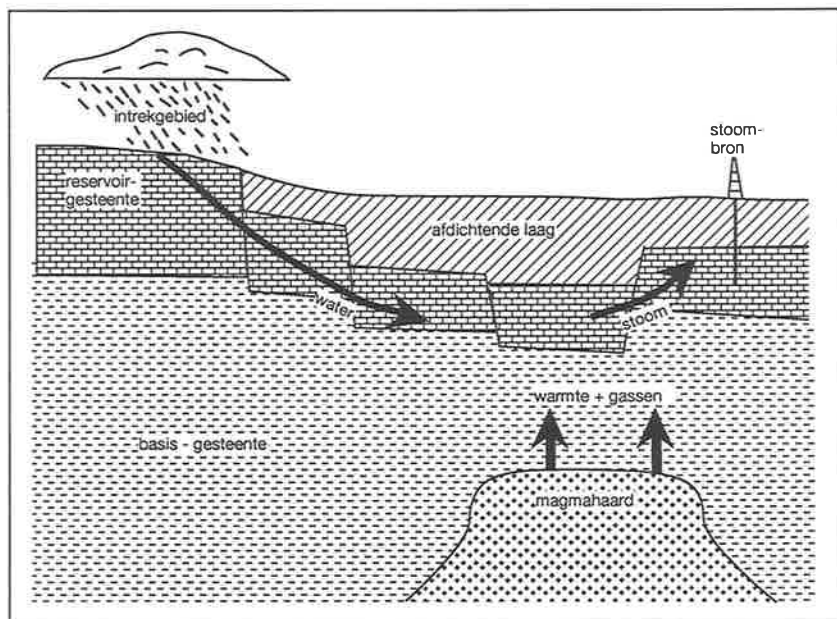
*Fig. 3. Belangrijkste aardbevingszones van de wereld en locaties van hoge-enthalpie energie winning.*

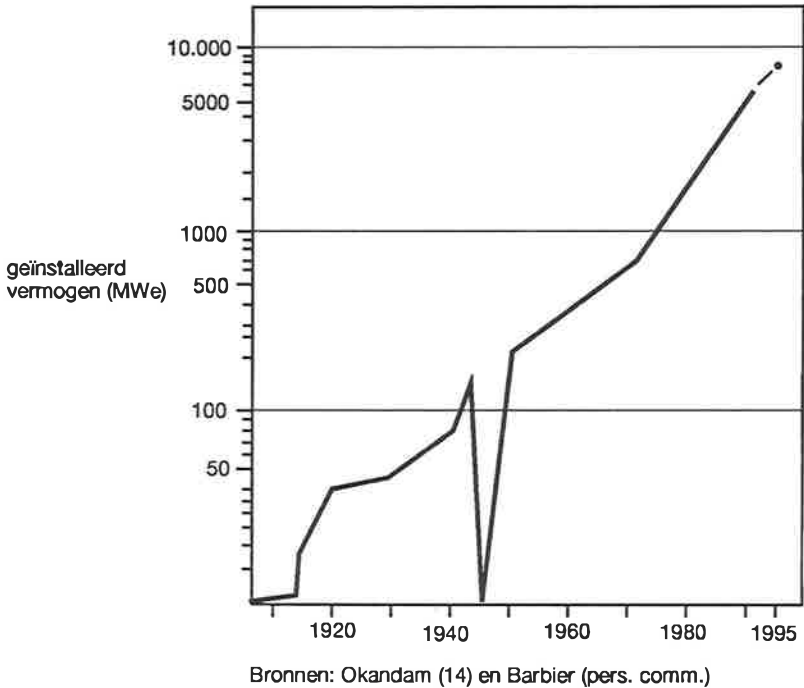




Hoge-enthalpie-aardwarmte werd voor het eerst toegepast voor elektriciteitsopwekking toen in 1904 te Larderello een stoommachine werd opgesteld die gevoed werd met stoom uit de ondergrond. Door de agressiviteit van de meegevoerde gassen was de machine evenwel een kort leven beschoren. Dat maakte de toepassing van andere technieken en materialen nodig. Tot de tweede wereldoorlog werd gebruik gemaakt van warmtewisselaars waarmee schone stoom kon worden geproduceerd en tevens de productie van boorzuur waarmee Francois de Larderel in 1827 was begonnen kon worden voortgezet. De elektrische centrales, die na de tweede wereldoorlog werden gebouwd, zijn voorzien van turbines die direct gevoed kunnen worden uit de vele honderden stoomputten die inmiddels geboord zijn; verbeterde materialen maken warmtewisselaars niet langer nodig. In 1913 werd een elektriciteitscentrale in gebruik gesteld die een vermogen had van 250 kW - een naar hedendaagse begrippen zeer bescheiden krachtinstallatie. Geleidelijk werd de productiecapaciteit uitgebreid; omstreeks 1940 bedroeg het geïnstalleerde vermogen 130 MWe waarmee het geëlektrificeerde net van de Italiaanse spoorwegen werd gevoed. Tijdens de Tweede-Wereldoorlog werden de installaties vernietigd maar daarna zijn nieuwe gebouwd met een vermogen van ca. 400 MW die 2800 ton stoom per uur verwerken.

Fig. 4. Schematische weergave van een stoomveld.





*Fig. 5. Groei van het geïnstalleerde vermogen voor geothermische elektriciteitsopwekking.*

Het producerende reservoir te Larderello bestaat uit een kalksteen die zijn doorlatendheid ontleent aan breuken en spleten (fig. 4). Voeding van het reservoir vindt plaats door inzijging van neerslag in het bekken van de rivier Cecina dat ongeveer samen valt met het geothermale gebied van Larderello. De temperaturen in het reservoir bedragen 200-250 °C. Het reservoir ter plaatse van het Larderelloveld wordt afgedekt door een ondoorlatende laag bestaande uit schalies en kleien ter dikte van ongeveer 300 m.

De eigenlijke warmtebron is nooit aangeboord maar verondersteld wordt dat er een magma-intrusie op ca. 10 km diepte voorkomt die een ouderdom heeft in de orde van 1 miljoen jaar.

In het Larderello-gebied zijn inmiddels 7 velden in exploitatie genomen, waarvan het Larderello-veld er één is. Het gebied beslaat een oppervlak van meer dan 250 km<sup>2</sup>.

Door de stoomproductie is het grensvlak, dat de stoom scheidt van het hete water daaronder, enige honderden meters gedaald en is de druk in de reservoirs van enkele velden sterk teruggelopen. Blijkbaar is de hoeveelheid water die in de vorm van stoom aan de reservoirs wordt onttrokken aan-

zienlijk groter dan de natuurlijke aanvulling. Om een verdere daling tegen te gaan wordt sinds het einde van de jaren '70 afgekoelde gecondenseerde stoom terug geïnjecteerd in de ondergrond. Die aanvulling is echter niet voldoende en zonder aanvullende maatregelen zullen er op niet al te lange termijn moeilijkheden ontstaan om de elektriciteitsproductie op het huidige niveau te handhaven.

Eerst na de tweede wereldoorlog zijn ook andere landen overgegaan tot de winning van hoge-enthalpie aardwarmte. Momenteel vindt elektriciteitsopwekking uit aardwarmte plaats in 24 landen; het geïnstalleerde elektrische vermogen bedroeg in 1990 totaal 5835 MW; dat is iets meer dan een derde van het geïnstalleerde vermogen van de Nederlandse elektriciteitsproducenten in dat zelfde jaar. Naar verwachting zal het geïnstalleerde vermogen in 1995 verder zijn toegenomen tot 9006 MWe. Fig. 5 geeft een beeld van de ontwikkelingen sinds 1913. Van 1950 tot 1970 bedroeg de jaarlijkse toename ruim 6%; van 1970 tot 1990 verdubbelde deze tot ruim 13%. De kostprijs per kWh is gunstig ten opzichte van die van andere energiebronnen zoals moge blijken uit onderstaand overzicht dat werd ontleend aan een publicatie van het U.S. Department of Energie (8).

---

**Estimated cost, in US cents of dollar, of one kWh from different sources (1986 dollars)**

---

oil	4.8
coal	5.8
nuclear	5.16
small hydro	7
hydrothermal (geothermal steam)	4
wind	10
photovoltaics	24
solar thermal	12

---

De directe toepassing van aardwarmte bedroeg in 1987, uitgedrukt in thermisch vermogen, wereldwijd ca. 7200 MW. De grootste producenten in Europa waren in dat jaar Hongarije (1000 MW), IJsland (889 MW), Frankrijk (300 MW) en Italië (288 MW). Een pioniersrol vervulde in de afgelopen decennia Frankrijk, waar het concept van het aardwarmte-doublet werd ontwikkeld. Een doublet bestaat uit één productieput waarmee warm water uit een watervoerende formatie wordt opgepompt en één injectieput waarmee het water nadat de warmte via een warmtewisselaar is onttrokken, wordt teruggevoerd in de watervoerende formatie. Met deze werkwijze wordt bereikt, dat de druk in de watervoerende formatie niet terug loopt en eventueel zout water dat geproduceerd wordt niet in het milieu terecht

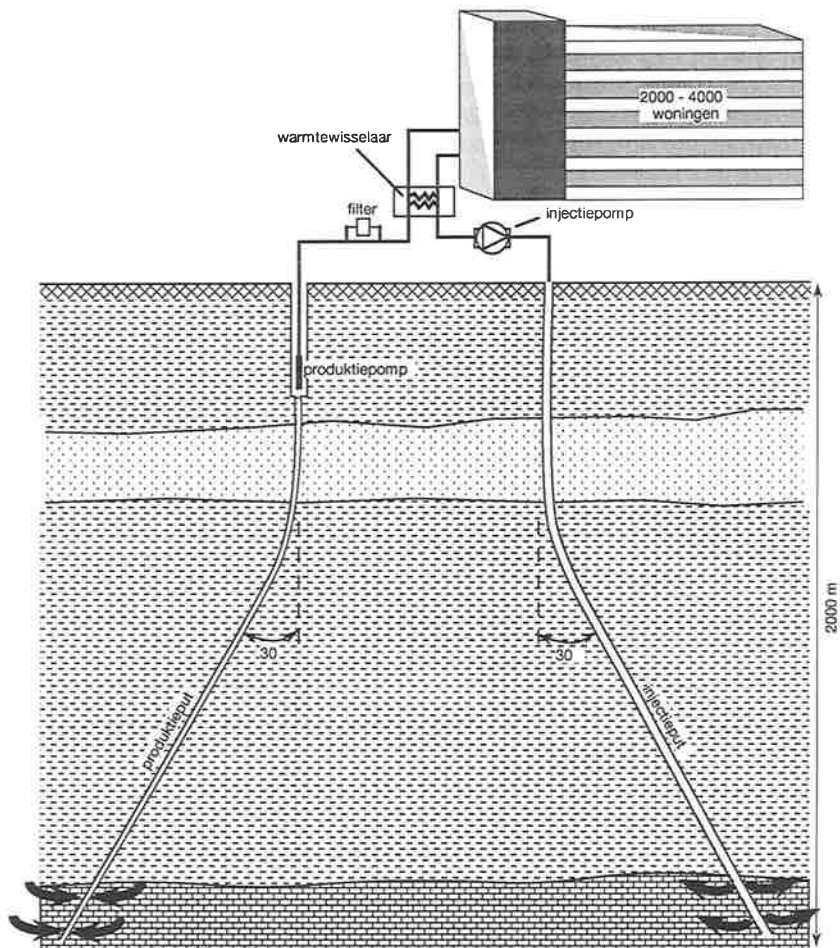


Fig. 6. Een aardwarmte doublet.

komt. Ter beperking van de lengte van het bovengrondse formatiewater-circuit worden de boringen voor de putten van een doublet op korte onderlinge afstand aangezet (fig. 6). Om te vermijden dat het teruggevoerde afgekoelde water al te spoedig de productieput zal bereiken worden beide putten gedeveerd geboord. De geohydrologische omstandigheden bepalen hoe groot de afstand tussen de putten ter plaatse van de benutte formatie dient te zijn om te bewerkstelligen dat een temperatuurverlaging pas na verloop van een bepaald aantal jaren, bijvoorbeeld 30 jaar, in de productieput merkbaar wordt. Die afstand is doorgaans ca. 1 km.

Bedraagt de temperatuur van het opgepompte water ca. 80 °C en de opgepompte hoeveelheid ca. 200 m<sup>3</sup>/u, dan wordt voldoende warmte verkregen voor de verwarming van tuinbouwkassen met een totaal grondoppervlak van 16 ha zonder gebruik van een warmtepomp en ongeveer 40 ha bij inschakeling van een warmtepomp. Het aantal woningen dat met een dergelijk doublet kan worden verwarmd bedraagt 2000-4000. Dit zijn slechts indicatieve cijfers, mede gezien het sterk variërende warmtegebruik per ha onder glas en per woning enerzijds en de verschillen in temperatuur van het geïnjecteerde water anderzijds.

Verwarming met behulp van aardwarmte vergt hoge investeringen waar relatief lage exploitatiekosten tegenover staan. Om die reden worden de installaties niet ontworpen op de capaciteit die nodig is voor de koudste periodes van het jaar maar op een lagere. Als niet meer aan de warmtebehoeften kan worden voldaan wordt een bijstookvoorziening ingeschakeld. Conventionele energie (elektriciteit voor de pompen; gas voor de bijstookinstallatie) wordt derhalve toch nog gebruikt maar een besparing daarop van meer dan 75% blijkt haalbaar.

## Geothermisch onderzoek in Europees verband

De eerste energiecrisis in 1973 heeft er in sterke mate toe bijgedragen dat de Commissie van de Economische Gemeenschappen betrokken is geraakt bij onderzoek en ontwikkeling van alternatieve energiebronnen, waaronder aardwarmte. Het eerste onderzoeksprogramma op geothermisch gebied nam een aanvang in 1975, het vierde zal vermoedelijk in 1991 van start gaan. De verschillende programma's omvatten o.m. de volgende onderwerpen:

- exploratie en evaluatie van de geothermische reservoirs in het EG-gebied;
- de beproeving van geofysische exploratiemethoden;
- reservoir-fysica;
- productie-engineering en -technologie;
- scaling- en corrosieproblemen;
- onderzoek ten aanzien van Hot Dry Rock.

Hot Dry Rock is gesteente met hoge temperatuur maar met een uiterst geringe permeabiliteit. Het is alleen mogelijk om warmte te onttrekken aan dergelijk gesteente als daarin kunstmatig scheuren en spleten kunnen worden aangebracht die de mogelijkheid openen voor watercirculatie. Indien het zou gelukken om "dicht" gesteente voldoende permeabel te maken zou de hoeveelheid van technisch winbare aardwarmte op aarde aanzienlijk toenemen.

Belangrijke resultaten van de Europese geothermische programma's zijn de Atlas of Subsurface Temperatures in the European Community die in 1980 werd gepubliceerd en de Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland die dateert van 1988.

Parallel aan de onderzoekprogramma's werden demonstratieprogramma's opgezet voor de uitvoering van aardwarmtewinningsprojecten op ware schaal. In het kader van die programma's werden vele evaluatie- en exploitatieboringen mede gefinancierd en ook projecten gericht op de oplossing van problemen met technische componenten zoals pompen en warmte-wisselaars.

In velerlei opzicht hebben de opeenvolgende EG-programma's op het gebied van aardwarmte vrucht afgeworpen: het geothermisch onderzoek is binnen de Gemeenschap sterk gestimuleerd, er is een onderling goed communicerende en samenwerkende kring van deskundigen ontstaan en er is veel duplicerend werk voorkomen. Tevens zijn in vele landen aardwarmtewinningsprojecten tot stand gebracht waarmee momenteel ervaring wordt opgedaan. Dat schept in die landen de mogelijkheid om de aardwarmte-winning snel uit te breiden als de energieprijzen of de milieuproblematiek daartoe aanleiding geven.

Hieronder volgt een overzicht van projecten voor direct warmtegebruik in de ons omringende landen op basis van in 1989 gepubliceerde cijfers:

Land	Gereedgekomen Doubletten	aardwarmtewinningen Enkele putten
België	1	1
Denemarken	1	—
Frankrijk	54	12*
Verenigd Koninkrijk	1	—
West-Duitsland	1	2*

\* ) Reinjectie niet nodig i.v.m. waterkwaliteit; putten betreffen o.m. Aquitane Bekken in Zuid-Frankrijk.

Zoals dit overzicht duidelijk maakt is aardwarmte-winning alleen in Frankrijk van de grond gekomen: zo werden in Parijs en omstreken 54 aardwarmte doubletten aangelegd. Evenwel was in 1980 voorzien dat er gemiddeld 60 doubletten per jaar zouden worden aangelegd, in het kader van een tussentijdse taakstelling van 300 werkende doubletten in het jaar 1985 (9).

Duidelijk is, dat de aardwarmte-winning in het afgelopen decennium sterk is achtergebleven bij de prognoses. De belangrijkste oorzaak daarvan is on-

getwijfeld het prijsniveau van de fossiele brandstoffen geweest dat veel lager is uitgevallen dan kort na de tweede energiecrisis werd voorzien. Maar er kunnen ook andere redenen worden genoemd. Zij werden reeds in 1980 signaleerd (8) en lijken nog steeds van toepassing. Aardwarmte staat ver af van de bedrijven op wier weg het in principe ligt om aardwarmte-energie te winnen en te distribueren: de elektriciteitsbedrijven en stadsverwarmingsbedrijven. Aardwarmtewinning is een mijnbouwkundige activiteit en daarmee plegen deze bedrijven zich niet in te laten. De expertise ontbreekt om de voor- en nadelen goed te kunnen beoordelen. Een complicerende factor is de ongewisheid van het geologische risico: de kans dat een put aanmerkelijk minder water levert dan voorzien was op basis van beschikbare informatie. Als er dan al risico's moeten worden gelopen dan doen bedrijven dat liever op een terrein dat dichter aansluit op hun kennis en ervaring.

De aardwarmtewinning in Frankrijk, het enige land met lage-enthalpie-winning van enige betekenis, is het aldus vergaan (9).

Bij de exploratie naar koolwaterstoffen in het Bekken van Parijs werden belangrijke reservoirs met warm formatiewater (temperaturen variërende van 57 °C tot 80 °C) op een gemiddelde diepte van 1500-2000 m onder maaiveld aangetoond. Dat leidde ertoe dat het Bureau de Recherches Géologiques et Minières in 1963 aanving met de inventarisatie van gegevens afkomstig van olie- en gasboringen en de evaluatie van het geothermische potentieel. Het bleek, dat een gebied ten Zuiden, Oosten en Noorden van Parijs met een oppervlakte van ongeveer 25.000 km<sup>2</sup>, dat is ongeveer tweederde van het oppervlak van Nederland, gunstige perspectieven voor aardwarmtewinning bood. Een eerste aardwarmte-douplet kwam in 1969 tot stand te Méln ten behoeve van de verwarming van 3.000 woningen en enige utiliteits- en kantoorgebouwen.

In 1973 brak de eerste energiecrisis uit. Dat leidde ertoe dat de Franse overheid een politiek van diversificatie van energiebronnen en de ontwikkeling van nieuwe inheemse energiebronnen, waaronder aardwarmte, aanvaardde. Er werd een comité "Geothermie" in het leven geroepen met de taak de industriële ontwikkeling te stimuleren. Twee inmiddels gebleken barrières werden geslecht:

- het risico van onvoldoende produktieve boringen werd opgevangen door overheidssteun ten bedrage van 80-100% van de kosten voor de eerste boring, terug te betalen in geval van succes;
- de mijnwet werd aangepast door de "ressource géothermique" gelijk te stellen met de "ressource minière". Enerzijds schiep dit garanties voor een rationele exploitatie van de reservoirs en anderzijds werden hiermee de rechten van de exploitant op een bepaalde locatie beschermd.

Met de realisering van deze maatregelen en met de verzekering van onderzoeksinstituten dat de technologie voor aardwarmtewinning onder de knie was gekregen werd de weg geopend voor grote demonstratieprojecten. Ter uitvoering daarvan wendde de centrale overheid zich tot het bedrijfsleven en tot de gemeentelijke autoriteiten. Het vooruitzicht dat de kosten van aardwarmte stabiel zouden zijn en die van aardolie sterk zouden stijgen was voor vele gemeenten een sterk argument om de exploitatie van aardwarmte ter hand te nemen. Aldus ontstonden vele kleine aardwarmtewinningsbedrijven (in totaal 36) zonder financiële draagkracht en zonder expertise om de doubletten die werden opgeleverd doelmatig te kunnen beheren. Technische problemen konden niet uitblijven en toen die ontstonden brandde de strijd los wie verantwoordelijk was en voor de kosten zou moeten opdraaien. Het gevolg was, dat puttendoubletten vaak gedurende lange tijd buiten bedrijf moesten worden gesteld en aardwarmte ten onrechte de reputatie verwerf onbetrouwbaar te zijn.

Omstreeks 1986 kwam de aardwarmtebedrijfstaking in de problemen. Deze waren van financiële en technische aard. De olieprijsen waren tegen de verwachtingen gedaald en de inflatie die op 12 en 15% was voorzien ten tijde van de afsluiting van de leningen en waarvan uitgegaan was bij de vaststelling van de rente, was verminderd tot 3,5%.

Het gevolg hiervan was dat de meeste bedrijven in de rode cijfers terecht waren gekomen. Alhoewel de meeste doubletten technisch goed funktioneerden gingen zich bij een vijftiental ernstige problemen voordoen ten gevolge van corrosie en verstopping (scaling) die ertoe hebben geleid dat vijf moesten worden stil gelegd (10). Inmiddels zijn vele bedrijven echter weer in de zwarte cijfers gekomen door aanpassing van de rentepercentages en lijkt het dieptepunt gepasseerd, getuige ook de vervanging van enkele reeds lang in gebruik zijnde putten door nieuwe.

## **De situatie in Nederland**

Na de energiecrisis ontwaakte ook in Nederland de belangstelling voor niet-conventionele energie en werden pogingen ondernomen om de mogelijkheden voor de winning van aardwarmte uit eigen bodem na te gaan. Op initiatief van de Centrale Organisatie TNO werd in 1974 de Gespreksgroep Aardwarmte opgericht waarin zitting namen Shell Internationale Petroleum Maatschappij, TNO, het Energieonderzoekcentrum Nederland en enige universiteiten, waaronder de Technische Hogeschool Delft. Onder de bezielende leiding van de voorzitter, dr. W.A. Visser, werd een onderzoekprogramma opgesteld en werd gepoogd in te spelen op het energiediversificatiebeleid van de Nederlandse overheid. Dat lukte aanvankelijk niet goed, getuige een nota uit 1978 (11) waarin het volgende valt te lezen: "Het is inmiddels duidelijk geworden, dat de onderzoekvoorstellen onvoldoende aangrijpingspunten hebben geleverd voor besluitvorming door de

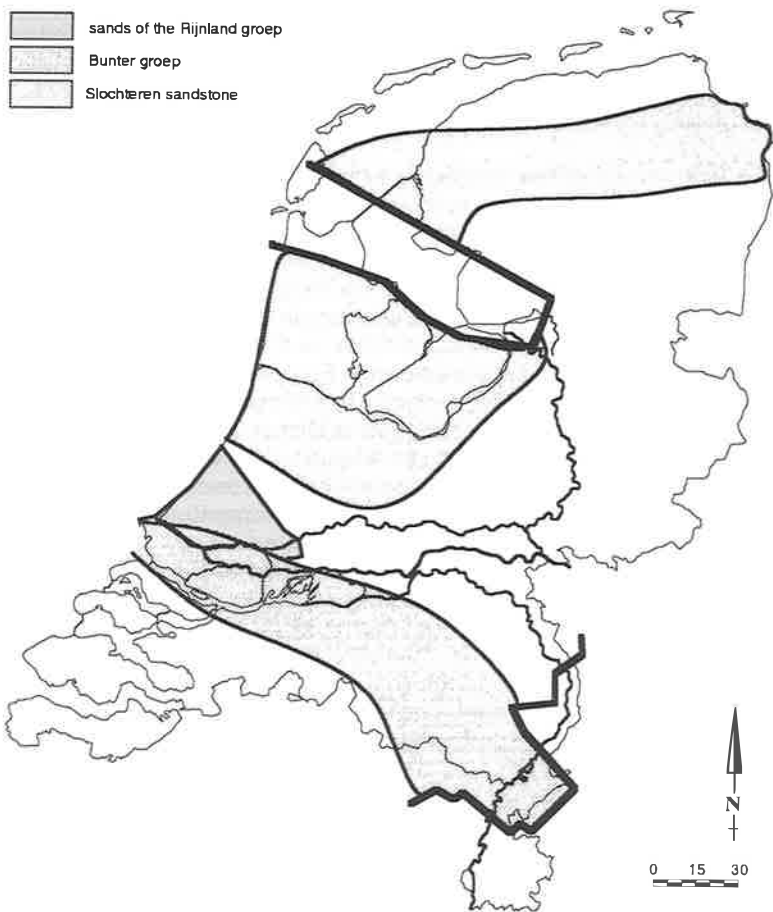


overheid. Deze wordt overstelpt met voorstellen op andere gebieden van energie-onderzoek, waarvan de betekenis voor de Nederlandse energievoorziening - deels ten onrechte - met veel grotere overredingskracht naar voren is gebracht."

Deze gang van zaken had tot gevolg dat van Nederlandse zijde grotendeels moest worden afgezien van actieve deelneming aan het eerste vierjarenprogramma van de EG. Verbetering in de situatie ontstond, toen in 1979 een voorstel voor een Nationaal Programma van onderzoek op het gebied van aardwarmte werd geformuleerd op instigatie van het Ministerie van Economische Zaken dat tot op zekere hoogte ook werd gehonoreerd. Aldus kon een aantal studies worden uitgevoerd in het kader van de vervaardiging van de eerder ter sprake gekomen Europese temperatuuratlas en de atlas van geothermische voorkomens. Genoemd kunnen worden de inventarisatiestudies van de Rijks Geologische Dienst inzake drie potentiële reservoirs in de diepe ondergrond van Nederland en van in boringen van de olie-industrie gemeten temperaturen alsmede het onderzoek van de Dienst Grondwaterverkenning TNO aangaande het temperatuurveld tot circa 500 m diepte door middel van metingen in peilbuizen deel uitmakende van het landelijke grondwaterstandsmeetnet dat door dit instituut in stand worden gehouden. Bij de inventarisatiestudies van drie potentiële reservoirs - zandsteenlagen van de Slochteren Formatie, de Main Buntsandstein Formatie en de Vlieland Formatie - kon de Rijks Geologische Dienst gebruik maken van de 1500 diepe boringen die door de olie-industrie in de loop der jaren waren uitgevoerd in het kader van de opsporing en winning van koolwaterstoffen. Waar deze potentiële reservoirs zich bevinden is weergegeven in fig. 7.

Op basis van de dikte, de uitgestrektheid, de temperatuur en de specifieke warmte werd de warmtevoorraad (de hoeveelheid warmte-energie boven het temperatuurniveau van 40 °C) van de drie potentiële reservoirs berekend; deze bleek ongeveer zo groot te zijn als de aanvankelijke warmtevoorraad van het Slochterenveld. Helaas kan weinig praktische betekenis aan deze berekening worden gehecht. De Algemene Energieraad (12) rekende uit, dat als een derde tot de helft van de Nederlandse ondergrond het voor aardwarmtewinning geschikte reservoirgesteente bevat conform de studie van de Rijks Geologische Dienst, de theoretische maximale opbrengst gedurende 50 jaar in de orde van 530-800 PJ per jaar zou bedragen, overeenkomende met 20-30% van het primaire energiegebruik in Nederland in het betreffende jaar 1981. Dat zou de aanleg van vele duizenden put-tendoubletten nodig maken, goed voor een nieuwe mijnbouwindustrietaak in ons land.

Naast de evaluatie van het geothermische potentieel werden in 1979 tevens in het programma opgenomen de uitvoering van een demonstratieproject



*Fig. 7. Belangrijkste voorkomen van de drie diepe reservoirs die mogelijk voor warmtewinning in aanmerking komen. Bron: Rijks Geologische Dienst.*

ter aantoning van de technische realiseerbaarheid van een aardwarmtewinning en een locatiekeuzestudie voor toekomstige projecten op het gebied van aardwarmtewinning, waarbij de gedachten uitgingen naar de realisatie van 3-5 demonstratieprojecten vóór het jaar 1990.

Vanwege de prijsontwikkeling van fossiele brandstoffen in de jaren '80 is het programma niet gerealiseerd. Na een aanvankelijke plaatsbepaling voor een demonstratieproject in de omgeving van Rotterdam, waar in een olie-exploratieboring op een diepte van ongeveer 2900 m een watervoerende laag met een capaciteit van 200 m<sup>3</sup>/u en een temperatuur van 100 °C

werd aangetroffen, werd later een locatie in het Westland gekozen waarover een gedegen voorbereidingsstudie door TNO werd uitgevoerd. De studie kwam gereed in 1983 maar bleef helaas zonder vervolg; de investering in een evaluatieboring aldaar werd te kostbaar geacht.

Vervolgens werd een voorbereidingsstudie uitgevoerd voor een locatie bij Asten in Noord-Brabant die uit reservoir-technische overwegingen weliswaar minder gunstig werd beoordeeld als de eerdere locatie in het Westland doch waar een proefboring vanwege de geringere diepte van de potentiële reservoirs minder kosten met zich mee zou brengen. Het gelukte, mede dankzij een bijdrage van de Europese Gemeenschap, om financiering te verkrijgen waarop in 1987 dan eindelijk de eerste geothermische proefboring in Nederland gereed kwam. De boring bereikte een maximale diepte van circa 1670 m onder maaiveld. Als onderzoekboring was deze succesvol: hij leverde veel gegevens op omtrent de tertiaire zanden die werden doorboord en de Formatie van Houtem (top-Krijt) maar uit oogpunt van warmtewinning niet: de produktiviteit van de reservoirs bleek onder de maat.

Helaas is, evenals in de ons omringende landen, de taakstelling niet gehaald en is aardwarmte als schone energiebron op achterstand geraakt ten opzichte van andere nieuwe energiebronnen. Moet dat een reden zijn tot wanhopen voor diegenen in deze landen die zich beijveren voor aardwarmte? Naar mijn stellige overtuiging niet; aardwarmte zoals die in Nederland voorkomt is een aantrekkelijke energiebron voor ruimteverwarming, en wel om de volgende redenen:

- lage-enthalpie aardwarmteproductie geschiedt milieuvriendelijk: er worden geen verzurende stoffen en broeikasgassen bij opgewekt;
- aardwarmte is doorlopend beschikbaar en vergt geen opslagcapaciteit;
- het ruimtebeslag aan het aardoppervlak voor de winning is gering; een bescheiden gebouwtje is voldoende om de warmtewisselaar, de circulatie- en injectiepompen en een eventuele doseerinstallatie van chemicaliën ter vermindering van corrosie en putverstopping te herbergen;
- er treedt geen visuele omgevingsvervuiling op door staketsels die bovendien gedoemd zijn er het grootste gedeelte van de tijd werkeloos bij te staan;
- de technische problemen zijn beperkt: waar het formatiewater (te) corrosief is kunnen kunststofproductiebuizen worden gebruikt. Resteert derhalve de opgave om tegen aanvaardbare kosten mogelijk optredende verstopping van de injectieput tegen te gaan. Het probleem daarbij schuilt in het kostenaspect;
- wat betreft kosten scoort aardwarmte ten opzichte van andere niet-conventionele energiebronnen goed en kan deze bij de huidige energieprijzen soms reeds rendabel worden geëxploiteerd (13).

De problemen, ontstaan bij de organisatie van de exploitatie in Frankrijk, zouden kunnen worden voorkomen als zou kunnen worden bereikt dat olie- en gasproducerende maatschappijen en regionale energiedistributiebedrijven samenwerking aangaan voor de winning en distributie van aardwarmte. Die formule wordt met name in Italië met succes toegepast bij de lage-enthalpie aardwarmtewinning.

Het probleem van het geologische risico zou op tweeërlei wijze kunnen worden aangepakt:

- door de uitvoering van een programma van verkenningsboringen specifiek gericht op de aardwarmtewinning. Een dergelijk programma dient de grootste risico's voor de toekomstige aardwarmte-exploitanten weg te nemen; het kan worden vergeleken met de exploratie-promotie programma's die in sommige ontwikkelingslanden worden uitgevoerd om internationale oliemaatschappijen aan te trekken. Om de kosten van een programma van verkenningsboringen te drukken zou gebruik gemaakt kunnen worden van nieuwe "droge" putten van oliemaatschappijen waarin aanvullende geothermische onderzoeken worden uitgevoerd.
- door de invoering van een regeling vergelijkbaar met Franse en Italiaanse, waarbij de kosten van de eerste boring van een aardwarmte-doubling grotendeels door de overheid worden gedragen in geval van onvoldoende produktiviteit.

Aardwarmte kan reeds op veel kortere termijn dan voorzien in de Nota "Energiebesparing - Beleidsplan energiebesparing en stromingsbronnen", die in 1990 door de Minister van Economische Zaken aan de Tweede Kamer werd aangeboden, een bijdrage leveren in de produktie van duurzame energie in ons land. Daarvoor is het echter wel nodig dat de Steunregeling Energiebesparing en Stromingsenergie (SES) toegepast kan worden bij de aanleg van dubletten en bovengrondse installaties. Daardoor zullen de Vereniging van Exploitanten van Electriciteitsbedrijven in Nederland (VEEN), de Vereniging van Gasbedrijven in Nederland (VEGIN) en de Vereniging van Stadsverwarmingsbedrijven in Nederland (VESTIN) in staat zijn aardwarmte op te nemen in hun gezamenlijke Milieu-actieplan (MAP).

## Geachte toehoorders,

Mijn betoog heeft zich gericht op de historie van het geothermisch onderzoek en de aardwarmtewinning: de eerste temperatuurmetingen in de ondergrond, de bepaling van de warmtestroom naar het aardoppervlak, de eerste praktische toepassingen van aardwarmte, de stimulerende rol van de Europese Gemeenschap en de voortgang in Nederland. Ik heb gepoogd aspecten te belichten van zowel de meer fundamenteel gerichte geother-

mie als van de toegepaste geothermie, welke laatste zich in Nederland richt op de verkenning en exploitatie van lage-enthalpie-aardwarmte ten behoeve van de ruimte-verwarming.

Aardwarmte kan een in milieutechnische zin aantrekkelijke bijdrage leveren aan de Nederlandse energievoorziening; in kwantitatief opzicht zal die bijdrage nooit groter kunnen zijn dan enkele procenten maar dat is het geval met alle niet-conventionele energiebronnen. De barrières die overwonnen moeten worden op het gebied van bekendheid van de bron, de organisatorische inpassing en de geologische risico's zijn hoog; de slechting van die barrières vergt derhalve nog een grote inspanning. Ik ben verheugd en dankbaar, dat de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu B.V. mij door de bekostiging van de leerstoel Geothermisch Onderzoek van de Technische Universiteit Delft in de gelegenheid heeft gesteld een bijdrage te leveren in het geven van bekendheid aan aardwarmte als energiebron en in de verdere ontwikkeling van de geothermie in Nederland.

Mijne heren leden van het College van Bestuur,

Gaarne wil ik mijn dank uitspreken voor mijn benoeming tot hoogleraar geothermisch onderzoek aan deze universiteit. Mijn dank gaat ook uit naar het College van Dekanen en naar de commissie die mij voor deze benoeming heeft voorgedragen.

Waarde collega's en leden van de Faculteit der Mijnbouwkunde en Petroleumwinning,

Lage-enthalpie aardwarmtewinning is in feite waterwinning van grotere diepte, dat wil zeggen van de diepte waarop koolwaterstoffen plegen te worden gewonnen. Het moge duidelijk zijn dat de problematiek van de aardwarmtewinning vrijwel naadloos aansluit op die van de petroleumwinning.

Samenwerking op een veelheid van onderwerpen, zoals produktiegeologie, produktiechemie, petrofysica en produktietechnologie is derhalve in principe mogelijk. Ik hoop tot intensieve samenwerking met velen Uwer te komen; dat dat mogelijk is is mij gebleken in mijn vorige functie bij TNO, tijdens welke ik goede werkkontakten en samenwerking met verscheidene van U en Uw voorgangers heb gehad gedurende velen decennia.

Dames en heren studenten,

Vooralsnog is de aardwarmtewinning geen gevestigde mijnbouwkundige activiteit in Nederland en absolute zekerheid dat het binnen afzienbare tijd zover zal komen is er niet. Het is evenwel goed daarbij te bedenken dat het

nog geen halve eeuw geleden net zo gesteld was met de koolwaterstofwinning uit vaderlandse bodem, nu een van de pijlers onder de Nederlandse economie.

Aardwarmte speelt een belangrijke rol bij de diagenese, waaronder de vorming van aardolie en -gas. Uit dien hoofde is kennis van geothermie van praktische waarde voor de petroleumingenieur. Het is mij een genoegen om U behulpzaam te zijn bij het verwerven van die kennis.

Tenslotte, last but not least, wil ik mij richten tot enige zeer goede vrienden. De eerste daarvan is Prof. O. Koefoed, mijn Delfste leermeester die mij de beginselen van de exploratie geofysica heeft bijgebracht. Ik heb de eer en het genoegen gehad zijn steun en advies te mogen ontvangen gedurende het grootste gedeelte van mijn loopbaan en denk nog vaak met genoegen aan een gezamenlijk onderzoek in de jaren 1967-1968 in Chili. Veel dank ben ik hem verschuldigd en veel respect draag ik hem toe.

Tevens wil ik noemen ir. F.C. Dufour, die vrijwel vanaf het begin betrokken is geweest bij het aardwarmte-onderzoek in Nederland en een grote bijdrage heeft geleverd bij de kennisverwerving dienaangaande hier te lande. Ik hoop nog vele jaren met hem te mogen samenwerken.

De derde die ik gaarne wil vermelden is mijn opvolger bij TNO, dr. H. Speelman. Ik dank hem, onder andere voor de mogelijkheid die hij mij biedt om gebruik te blijven maken van de faciliteiten van het Instituut voor Grondwater en Geo-Energie TNO en voor zijn inspanningen om in het Delftse de goede samenwerking tussen de industrie, de onderzoeksinstituten en de Technische Universiteit op aardkundig gebied te intensiveren en uit te bouwen, tot profijt van de betrokken partijen. En als laatste dank ik mijn vrouw die steeds een grote steun voor mij is geweest en dat ongetwijfeld ook in de komende jaren zal zijn.

Mijnheer de Rector, dames en heren.  
Ik heb gezegd.

1. Knowles Middleton, W.E. (1966)  
A history of the Thermometer and its use in meteorology.  
The Johns Hopkins Press Baltimore.
2. Boyle, R. (1671)  
Of the temperature of the subterranean regions as to heat and cold, in: Tracts  
Written by the Honourable Robert Boyle Davis, Oxford 1671.
3. Kircher, A. (1664)  
Mundus Subterraneus J. Janssonius en E. Weyerstraet Amsterdam.
4. Everett, J.D. (1883)  
Rept. Brit. Assoc. for 1882 London.
5. Uyeda, S. (1988)  
in: Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination. Kluwer Acad.  
Publ. Dordrecht.
6. Haenel, R. en E. Staroste, eds. (1988)  
Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Swit-  
zerland. Verlag Th. Schaefer, Hannover.
7. Williams, Q e.a. (1987)  
The melting curve of iron to 250 gigapascals: A constraint on the temperature at  
Earth's Center. Science, PP 181-182.
8. US Dept. of Energy (1988)  
Beyond goals and objectives. Proc. Geoth. Progr. Review VI April 19-21.1988  
San Francisco.
9. Ungemach, P. (1980)  
Geothermal Research in the European Community - Objectives and Reality in:  
Proc. of the Second Int. Sem. on the Results of EC Geoth. En. Res., held in  
Strasbourg. D. Reidel Publ. Co. Dordrecht.
10. IGA New Newsletter of the International Geothermal Association(1990)  
No. 3 Oct./December Pergamon Press Oxford.
11. Van der Wart, R. (1978)  
Onderzoek en demonstratie van geothermische energiewinning in Nederland -  
benodigde maatregelen voor het inlopen van een achterstand. ECN Petten.
12. Algemene Energieraad (1982)  
Duurzame energie. Staatsuitgeverij 's-Gravenhage.
13. Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (1990)  
Nationaal Onderzoekprogramma voor Aardwarmte en Energie-opslag in Aqi-  
fers (NOAA). Meerjarenprogramma 1990-1991 Utrecht.
14. Okandan, E. (1988)  
In: Geothermal Reservoir Engineering Kluwer Acad. Publ. Dordrecht.