

Künstliche geothermische Energiesysteme: eine Studie der Internationalen Energieagentur

Autor(en): **Brunnschweiler, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **98 (1980)**

Heft 48

PDF erstellt am: **20.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74257>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Künstliche geothermische Energiesysteme

Eine Studie der Internationalen Energieagentur

Im Rahmen der Internationalen Energieagentur haben im April 1978 die Bundesrepublik Deutschland, Grossbritannien, Schweden, die USA und die Schweiz ein Zusammenarbeitsabkommen für die Erforschung und Entwicklung von künstlichen geothermischen Energiesystemen (MAGES) unterzeichnet. Später ist dem Abkommen auch Japan beigetreten. Zur Abklärung der mannigfaltigen, neuartigen technischen Probleme wurden namhafte Firmen und Hochschulen der Bundesrepublik Deutschland und eine Unternehmung der Schweiz beigezogen. Anfang dieses Jahres wurden die Arbeiten abgeschlossen und ein umfangreicher Bericht erarbeitet. Der NEFF hat mit 231 400 Franken die Studie mitfinanziert. Das Exekutivkomitee wurde durch PD Dr. L. Rybach von der ETH Zürich präsi diert.

Definition

Mit einem MAGES-System ist es möglich, Erdwärme aus tiefliegenden undurchlässigen Gesteinen (z.B. kristallines Grundgebirge) zu gewinnen. Dazu müssen künstliche Wärmeaustauschflächen geschaffen werden, in die Wasser eingeführt wird, das sich erwärmt und als Dampf oder Heisswasser genutzt werden kann. Dadurch ist man von natürlichen Warmwasservorkommen unabhängig und kann eine solche Anlage in die Nähe der Verbraucher platzieren.

Erdwärmepotential

Wenn man mit Bohrungen und Schächten ins Erdinnere vordringt, stellt man fest, dass die Gesteinstemperatur regelmässig zunimmt, im Durchschnitt mit 3 °C je 100 m («geothermischer Temperaturgradient»). In 1000 m treten daher Temperaturen von mehr als 40 °C, in 2000 m mehr als 70 °C usw. auf. Wird ein Granitvolumen von einem Kubikmeter um nur 10 °C abgekühlt, liess sich theoretisch während 30 Jahren Wärme mit einer Leistung von 25 MW gewinnen. Es liegen somit in erreichbarer Tiefe enorme Wärmemengen vor.

Elemente des Systems

Im Lauf der Studie wurden mehrere, grundsätzlich verschiedene Wärmege-
winnungssysteme untersucht, denen folgende wichtige Elemente gemeinsam sind:

- tiefliegendes Wärmereservoir,
- Wärmeaustauschflächen,
- Zugang zur Wärmequelle,
- Wärmeverteilung,
- Wärmekonsumenten,
- Wärmespeicher, um Verbrauchsschwankungen auszugleichen.

Es wird nun versucht, das Zusammenwirken der verschiedenen Elemente zu optimieren.

Bohrungen

Um zur Wärmequelle zu gelangen, sind Bohrungen oder Schächte denkbar. Bis heute sind für Erdölbohrungen Tiefen bis gegen 10 000 m erreicht worden. Dabei traten Temperaturen höher als 240 °C und Drücke von mehr als 1000 bar auf. Bei diesen extremen Bedingungen müssen neue Spülungen, Zementierungen und Messgeräte entwickelt werden. Um künstliche steilstehende Spalten zu treffen, werden die Bohrungen abgelenkt (directional drilling). In dieser Technik hat man von Bohrplattformen der Nordsee bereits grosse Erfahrungen. Auch Turbodrill (Antrieb des Bohrers durch Spülung, ohne starres Gestänge) wird erfolgreich eingesetzt.

Schächte

Die längsten Schächte im Bergbau dringen bis in 3600 m Tiefe vor. Man kann Schächte konventionell - Kurzbohrungen, Sprengen und Ausheben, Sichern - oder mittels grosskalibriger Bohranlagen mit Durchmessern bis 10 m abteufen. Auch geneigte Tunnels sind denkbar. Sofern in grosser Tiefe Menschen arbeiten, muss der Schacht belüftet, gekühlt und allfällig isoliert werden. Bei mehr als 250 °C müssen ferngesteuerte Ausrüstungen eingesetzt werden. Für die Sicherheit der Arbeiter sind die im Bergbau üblichen Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Um möglichst grosse Felsvolumen zu erfassen, können von Schächten und Stollen aus Bohrungen niedergebracht werden.

Wärmeaustauschflächen (WAF)

Die im Gestein enthaltene Wärme wird über künstliche WAF an eingeführtes Wasser übertragen. Die WAF kühlen sich dabei ab. Sie sollten

- möglichst gross sein,
- den Wasserdurchfluss möglichst wenig behindern,

- eine optimale Wärmeübertragung erlauben,
- das Gesteinsvolumen gleichmässig abkühlen,
- für längere Zeit offen bleiben und einen dauernden Durchfluss gestatten,
- kostengünstig sein.

Die WAF können geschaffen werden durch:

- Bohrungen, Schächte, Stollen usw.,
- mechanisches Zerbrechen,
- Schneiden (mechanisch, thermisch),
- Zertrümmerung mit Sprengungen,
- Hydrofrac mit schwerer Spülung, Gasfrac,
- thermische Zerbrechung,
- chemisches Auslaugen

oder durch Kombination der Methoden, abhängig von der Gesteinsbeschaffenheit. Die natürlichen Klüfte und offenen Zertrümmerungszonen verhalten sich wie künstliche, sind aber nicht kontrollierbar.

In den zur Zeit laufenden Untersuchungen (z.B. in Los Alamos, USA) werden durch «Hydrofrac», d.h. Anwendung hoher Spülungsdrucke, Spaltsysteme erzeugt. Ein wesentlicher Nachteil bei dieser Methode ist, dass die Form der entstehenden WAF noch nicht genau bestimmt werden kann. Infolge der ungleich verteilten Spannungen wird die Spalte unregelmässig, verzweigt sich, oder es können sich Kanäle bilden. Während des Wärmeentzuges werden sich die Spalten öffnen und vergrössern. Wenn Serien von parallelen Spalten erzeugt werden, können sich das Spannungsfeld und die Temperatur benachbarter Spalten gegenseitig ungünstig beeinflussen. Ihr minimaler Abstand sollte daher mindestens 100 m betragen, sonst kühlt sich das Gestein dazwischen zu rasch ab. Zu grosser Stress könnte die Spalten schliessen und die Zirkulation vermindern. Bei zu hohem Flüssigkeitsdruck könnte die Spalte unkontrolliert nach oben ausbrechen.

Wichtig ist auch, wie das Wasser in die Spalte gelangt, sich verteilt und sie wieder verlässt. Die Kenntnis ihrer Ausdehnung, Form und Lage während der Bildung und nach längerem Betrieb ist daher für eine optimale Wärmegewinnung sehr wichtig. Es ist vor auszusehen, dass durch eine Kombination verschiedener geophysikalischer Methoden im Bohrloch und von der Oberfläche aus diese Parameter ermittelt werden können (Felsspannungsmessungen, Mikroseismik u.a.).

Wärmeentnahme aus Gestein

Da nur spärliche Erfahrungen vorliegen, ist man für die Ermittlung der physikalisch-chemischen Vorgänge beim

Wärmeentzug auf *mathematische Modelle* angewiesen. Obwohl viele Spalten sich öffnen, sich kreuzen und miteinander verbunden sein können, wurden die Phänomene zuerst einmal an einer einfachen Spalte theoretisch abgeklärt. Normalerweise stellt sich eine Spalte senkrecht zum geringsten Kompressions-Stress, d.h. steht in grosser Tiefe etwa vertikal. Die Wärmeübertragung hängt u.a. ab von der Fliessgeschwindigkeit, sodann tritt auch Auftrieb und Reibung des Wassers an den Wänden auf. Die MAGES-Studie zeigt, dass mit sorgfältig ausgewählten Betriebsgrößen Spaltensysteme offengehalten werden können, ohne dass die Wärmeleistung abnimmt.

Seismische Effekte

Das *Aufreissen von Spalten* in der Tiefe bewirkt seismische Effekte, die sich jedoch auf der Oberfläche kaum bemerkbar machen. Hier ist das druckausgeglichene Zirkulationssystem (Einpressung = Entnahme) von Bedeutung, wodurch keine Spannungen aufgebaut werden. In wenigen Fällen ist es jedoch denkbar, dass durch den Betrieb der Anlage in seismisch labilen Gebieten kleinere Erdbeben ausgelöst werden könnten. Bei der Standortwahl sollten tektonische Lineamente vermieden werden.

Lebensdauer des Systems

Das eingeführte kalte Wasser erwärmt sich in den Spalten und gelangt an die Oberfläche. Nach der Nutzung seines Wärmeinhalts fliesst es wieder in die Spalten zurück (geschlossener Kreislauf). Es ist klar, dass die Temperatur des entnommenen Wassers mit den Betriebsjahren langsam abnimmt, abhängig von der Wärmeentzugsrate und der Ausdehnung der Spalten. In einer Spalte von 500 m Länge und 3 mm Klaffung und einer Fliessgeschwindigkeit von 1 cm/s kühlt sich das Wasser in 27 Jahren von 200 auf nur 190 °C ab. Wenn die Temperatur absinkt, werden auch die Fliessrate und die Wärmeleistung abfallen. An der Oberfläche müssen Pumpen installiert werden, die stündlich Hunderte bis Tausende von Kubikmetern befördern können.

Geochemische Probleme

Führt man Wasser in heisses Gestein ein, wird es mit ihm reagieren. Diese chemischen Reaktionen (Ausfällungen, Auflösung u.a.) können die Eigenschaften des Systems mit der Zeit wesentlich verändern. Die Vorgänge sind abhängig von der Zusammensetzung von Ge-

Erdwärme als Energiequelle

Eine Zuschrift

Dieser Tage macht eine Notiz des *Bundesamtes für Energiewirtschaft* zum MAGES-Katalog die Runde durch Presse und Medien. Das Thema des Kataloges «Man made Geothermal Systems» ist eine, für die Energieversorgung der Welt eminent wichtige Angelegenheit, die in der Fachwelt sorgfältig ausdiskutiert werden sollte.

Der Katalog enthält auch mein Projekt. Ich hatte am 23. Januar Gelegenheit, in Bern Einsicht zu nehmen. Das veranlasste mich am 28. Januar u.a. folgendes an das Bundesamt zu schreiben:

Der Katalog ist berufen, als Leitfaden zu dienen für die Ablösung der fossilen und nuklearen Brennstoffe durch die Erdwärme, hat also schicksalhafte Bedeutung. Seine *Konsultation ist dringend*, da die *Ablösung viel Zeit* braucht und weil die ablösende Energiequelle allen Ländern zur Verfügung steht.

Unter den fünf Bewertungskriterien 1.4. der verschiedenen Modelle bringt eines die erbrachte Leistung in Beziehung zur geschaffenen Wärmeaustauschfläche. Das stiftet Verwirrung. Wohl hängt die gewinnbare Momentanleistung von der geschaffenen Tauschfläche ab, nicht aber die gewinnbare Energie, auf welche allein es ankommt. Sie ist mehr durch die Wärmeleitfähigkeit des Gesteines, als durch den Wärmeübergang an der Tauschfläche begrenzt. Deshalb sollte die Leistung in Beziehung gebracht werden zum erschlossenen Gesteinsvolumen. Hauptzweck des grossen Werkes ist Wegleitung zum besten Modell. Da fällt bei kurzer, doch vorläufig genügender Konsultation die erstaunliche Leichtfertigkeit auf, mit der den verschiedenen Modellen Kosten zugeteilt werden.

Wenn mein Modell M6 mit 300×10^8 Mark 500 MW erbringt und M9 mit 118×10^8 Mark 10000 MW, darf man rasch M6 zugunsten von M9 vergessen, umso mehr, als laut

Katalog die Verwirklichung von M6 30 bis 50 Jahre dauert und die von M9 nur 25 bis 30 Jahre. Wenn schon Kosten angegeben werden, so dürften wohl billigerweise Angaben darüber erwartet werden, wieviel davon Entwicklungskosten sind und wieviel die folgenden Kraftwerke des betreffenden Modelles kosten würden. Unter der Voraussetzung der Ausführbarkeit eines Modelles sind die Kosten des letzten leichter abzuschätzen als die des ersten.

Was so rasch als möglich in Angriff genommen werden sollte, ist die Wahl des zu verfolgenden Modelles. Dazu sollen die Resultate der grundlegenden Studien konsultiert und mit deren Verfasser besprochen werden. Dann sollen die Einzelheiten durch Spezialfirmen und Hochschulen überarbeitet werden, und wenn das Projekt in allen Teilen als wahrscheinlich ausführbar erscheint, können die Kosten der Entwicklungsarbeit einigermaßen abgeschätzt werden und genauer als die der späteren Kraftwerke im Erfolgsfalle. Die Kosten einer solchen Abklärung, die eigentlich von mehr als nur einer Stelle vorgenommen werden sollte, sollten erschwänglich sein.

Der Katalog zeugt mit einem Gewicht von 2 kg von grosser Arbeit, doch scheint mir, er werde der gestellten Aufgabe nicht gerecht. Das war doch die Stelle, an der die Techniker den Politikern hätten klar machen sollen, was Aussicht auf Erfolg bietet. Nach meiner Auffassung ist M9 weder als ausführbar zu betrachten, noch erbrachte es mehr Energie als M6. Eine vielleicht grössere thermische Momentanleistung interessiert wenig. (Wenn in den heutigen Zeitungen dieses Modell als theoretische Möglichkeit angepriesen wird, möchte ich dies als verantwortungsarme Phantasterei bezeichnen.)

Kurt Brunnschweiler, Bischofszell.

stein, den im Wasser gelösten Stoffen, von Temperatur und Druck, Fliessrate, Wärmetauscherflächen usw. Man kann einen Teil von ihnen beeinflussen und den Kreislauf günstig steuern. Die Löslichkeit der Mineralien nimmt mit steigender Temperatur, steigendem Druck und abnehmendem pH stark zu. Auflösung ist ein exothermer Vorgang, Ausfällung ist endotherm. Wenn Auflösung vorherrscht, kann man somit zusätzliche Wärme gewinnen. Dabei wird das Gestein an Volumen verlieren («schrumpfen») und sich die Durchlässigkeit erhöhen. Bei Ausfällungen können die Spalten ausgefüllt und der Wärmeaustausch infolge Isolationswirkung verringert werden. Zu hohe Konzentrationen (z.B. Feldspäte in saurer Lösung) können auch Verrohrungen und andere Anlageteile verkrusten. Es ist anzunehmen, dass das System so gesteuert werden kann, dass negative chemische Effekte minimal sind, wenig Abfälle anfallen und die Wärmeausbeute optimal ist.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit bei Bau und Betrieb eines MAGES-System ist standortabhängig. Sie ist dann gegeben, wenn am Standort

- der geothermische Gradient erhöht ist (mind. 40 °C/km),
- das Wärmereservoir aus kristallinem Gestein besteht,
- Durchlässigkeit und Porosität minimal sind,
- die Seismizität gering ist,
- die Wärmeabnehmer in der Nähe sind.

Bei der Erstellung einer Anlage kosten die Zugänge zum tiefliegenden Wärmeherd, d.h. Bohrungen und Schächte weitaus am meisten (Bohrkosten für eine 4000-m-Bohrung etwa 6 Mio × 2, Schacht mind. 100mal mehr). Die Kosten zur Herstellung von Spaltflächen im Kristallin sind noch schwierig abzuschätzen, sind aber relativ gering, z.B. 5

bis 10 DM/m². Die Betriebs- und Unterhaltskosten belaufen sich auf 15 bis 25 Prozent der Baukosten pro Jahr.

Bau und Betrieb einer Pilotanlage

Obwohl man aus der Erdölforschung und dem Bergbau schon viele praktische Erfahrungen hat und in immer grössere Tiefen vorstösst, ist der Bau und das Testen einer MAGES-Pilotanlage notwendig. Nur so erhält man wichtige Daten über Spaltflächenerzeugung, Wärmeentzug, Wasserdurchfluss, chemische Erscheinungen, Wirtschaftlichkeit, Performance, Umwelteinflüsse usw.

Die Studie schlägt am Schluss zwei verschiedene Pilotanlagen vor:

- Eine Anlage mit einer geneigten Injektionsbohrung von 5500 m Tiefe und zwei geneigten Förderbohrungen von je 4500 m Tiefe, welche zwei parallele subvertikale Spaltflächen schneiden. Die Baukosten ohne

Oberflächenanlagen würden sich auf etwa 70 Mio Franken belaufen, die Betriebskosten auf etwa 2 Mio Franken/Jahr. In der Anlage könnte bei einer Temperaturdifferenz von 160° → 40 °C während 30 Jahren eine Wärmeleistung von 85 MW aufrechterhalten werden.

- Eine grosse Anlage mit noch vielen zu lösenden Problemen, bestehend aus Schächten, Tunnels, gesägten, horizontalen Wärmeaustauschflächen, die durch Vertikalbohrungen verbunden werden. Während 30 Jahren könnte damit theoretisch eine Wärmeleistung von 10000 MW aufrechterhalten werden. Die Baukosten werden auf 3,1 Mia Franken, die Betriebskosten auf 50 Mio Franken/Jahr geschätzt. Dabei ist die Anlage zur Stromerzeugung nicht inbegriffen.

Schlussfolgerungen

Die Studie MAGES hat gezeigt:

- Künstliche geothermische Energiesysteme sind technisch machbar. Weitere

re Anstrengungen, sie zu entwickeln, sind gerechtfertigt.

- Zur Erdwärmegewinnung sind grundsätzlich verschiedene technische Systeme möglich.
- Wirtschaftlichkeit und Optimierung der Anlage sind standortabhängig.
- Es sind keine nennenswerten Umweltbeeinträchtigungen (seismisch, thermisch, chemisch) vorauszusehen.
- Wichtige Fragenkomplexe, die noch intensiv abgeklärt werden müssen, sind die Erzeugung von Wärmeaustauschflächen im Kristallin und die geochemischen Effekte der Heisswasserzirkulation.
- Neben eingehenden Laboruntersuchungen, mathematischen Modellstudien u.a. ist es notwendig, eine Pilotanlage zu bauen und zu testen, um dringend benötigte Daten für die Optimierung des MAGES-Systems zu erhalten.
- Es sollte eine internationale Zusammenarbeit angestrebt werden, da die Erdwärme überall vorhanden ist.