

Geothermische Energie im Kanton Zürich

Potenziale und Technologien zur Nutzung von Erdwärme



**Baudirektion
Kanton Zürich**

AWEL Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft

Energie aus der Erde

Die in der Erdkruste gespeicherte Wärme wird als geothermische Energie bezeichnet. Die wirtschaftliche Nutzung dieser Energie ist sehr stark von der Temperatur und damit von der Tiefe der erschlossenen Erdschichten abhängig.

Geothermische Energie eignet sich zur Nutzung mittels Wärmepumpen, bei höheren Temperaturen auch zur direkten Wärmenutzung. Bei Temperaturen über 100°C ist die Stromproduktion eine interessante Option. Heute werden nur sehr geringe Anteile des riesigen Potenzials ausgeschöpft – sowohl weltweit als auch hierzulande.

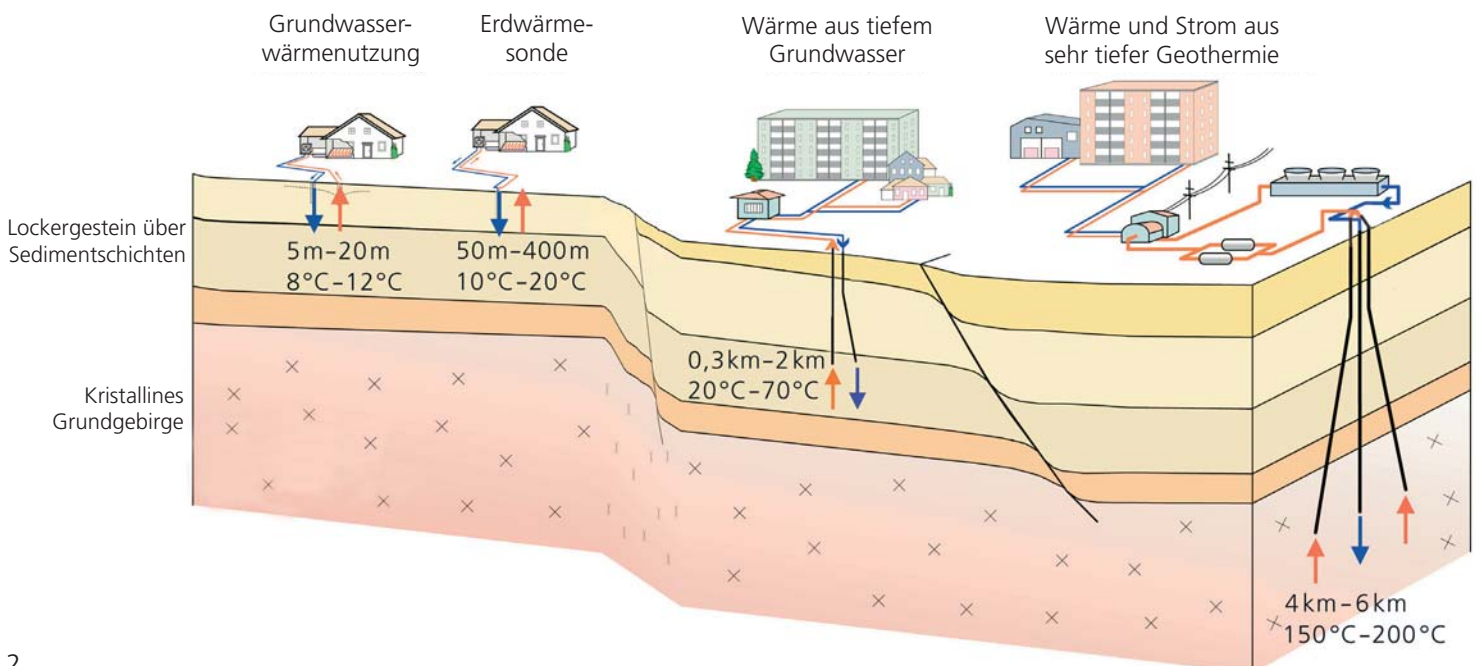
99 Prozent unseres Planeten sind sehr heiss: Nur die obersten drei Kilometer sind, mit Ausnahmen, weniger als 100°C warm. In fünf bis zehn Metern Tiefe entspricht die Temperatur des Untergrundes ungefähr der mittleren Aussentemperatur des Standortes (über das ganze Jahr gerechnet); in weiten Gebieten des Kantons Zürich sind das 8°C bis 10°C.

Abgesehen von geothermischen Anomalien – wie sie in vulkanischen Gebieten vorkommen – beträgt die Temperatur in einer Tiefe von einem Kilometer etwa 35°C bis 40°C, in fünf Kilometern Tiefe zwischen 150°C und 200°C.

Das immense Potenzial der Geothermie lässt sich an einem Vergleich illustrieren: Durch die Abkühlung von einem Kubikkilometer heissen Gesteins in mehreren Kilometern Tiefe um 20 Grad ergibt sich theoretisch genug Wärme, um während 20 Jahren Elektrizität mit einer Leistung von 10 Megawatt zu erzeugen. Dies entspricht in etwa dem Verbrauch einer Stadt mit 25 000 Einwohnern.

70 Prozent des heutigen Energiebedarfs im Kanton Zürich könnten mit erneuerbaren Energien gedeckt werden, wobei der Deckungsgrad bei der Wärme deutlich höher als beim Strom ist. Hinzu kommt, dass bei der Stromerzeugung Abwärme anfällt, deren Nutzung ein aufwändiges, häufig nicht wirtschaftliches Verteilnetz bedingt. Die Zahlen aus der AWEL-Potenzialstudie «Das Angebot erneuerbarer Energien im Kanton Zürich» (Juni 2006) zeigen die eminente Bedeutung, die den erneuerbaren Energien – und unter diesen der Erdwärme – zukommt. Im Gegensatz zu anderen erneuerbaren Energiequellen ist die Nutzung von Geothermie weder von der Tages- noch von der Jahreszeit abhängig. Das in der Regel kontinuierliche Angebot rechtfertigt entsprechende Investitionen in Förderanlagen. Der Betrieb der Anlagen ist zudem weitgehend CO₂-frei.

Abbildung 1: Erdschichten, Temperaturen und geeignete Technologien zur Nutzung von Erdwärme. (Quelle: CREGE)



Heutige Nutzung

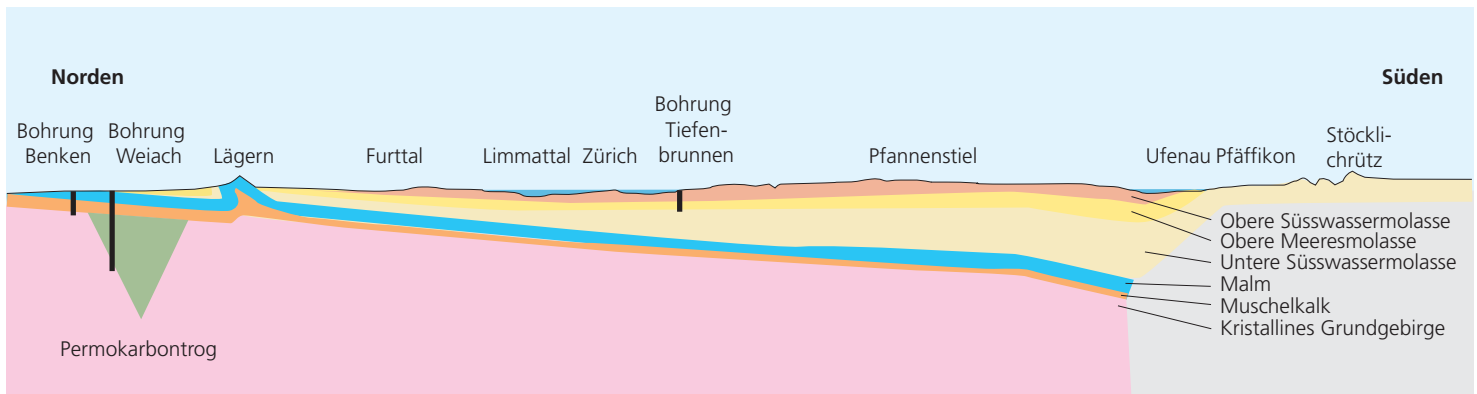
Die Nutzung geothermischer Energie ist von der Temperatur des Vorkommens abhängig. Oberflächennahe Erdwärme lässt sich für Raumheizung und Wassererwärmung nur mit einer Wärmepumpe nutzen. Mit zunehmender Tiefe steigt die Temperatur der Erdschichten an, sodass ab einer Tiefe von etwa 1000 m eine Direktnutzung von Wärme sinnvoll ist. Die Kühlung von Gebäuden dagegen ist zumeist ohne Kältemaschine möglich – auch mit untiefer Erdwärme. Für die Stromerzeugung mit Dampfturbinen sind in der Regel Temperaturen von über 100°C notwendig. Die dafür geeigneten Erdschichten liegen drei bis fünf Kilometer unter der Erdoberfläche.

In der Schweiz werden heute jährlich 1,6 Mia. kWh geothermische Wärme genutzt, was einer Steigerung von 45 Prozent gegenüber dem Jahr 2000 entspricht. Die Förderung erfolgt fast ausschliesslich durch Erdwärmesonden, die Wärmepumpen versorgen. Ausnahmen bilden unter anderen die Anlage im basellandschaftlichen Riehen – sie nutzt tiefe Erdwärme – sowie Einrichtungen zur Gewinnung von warmem Tunnelwasser. Die in der Schweiz genutzte Erdwärme substituiert jährlich 135 000 Tonnen Heizöl und mindert dadurch den CO₂-Ausstoss um 430 000 Tonnen.

Im Kanton Zürich werden jährlich rund 180 Mio. kWh geothermische Energie genutzt, 96 Prozent davon über die rund 9000 Erdwärmesondenanlagen. 10 Mio. kWh werden mittels anderer Systeme gewonnen, beispielsweise über Energie-Pfähle wie im Flughafen Zürich-Kloten. Die Anlage liefert jährlich 2 Mio. kWh Wärme und 1 Mio. kWh Kälte. Die beiden Geothermie-Bohrungen im Krankenhaus Bächli in Bassersdorf und in der Siedlung Hohstrasse in Kloten liefern zusammen rund 1,5 Mio. kWh Heizenergie. Etwa 5 Mio. kWh Heizenergie stammen von den kantonsweit rund 140 Grundwasser-Wärmepumpen. Die geothermische Energiegewinnung wird sich in den nächsten Jahren weiter erhöhen, weil mehrere grosse Anlagen in Planung oder im Bau sind. Der Beitrag der Geothermie bleibt aber insgesamt noch bescheiden. Vom gesamten Wärmebedarf für Raumheizung und für Prozesse im Kanton Zürich wird bislang lediglich 1 Prozent durch geothermische Energie gedeckt.

Im Jahre 2004 waren in 25 Ländern geothermische Stromerzeugungsanlagen mit einer gesamten Leistung von 8,9 Gigawatt und einem Ertrag von 57 Mia. kWh in Betrieb – 12 Prozent mehr als zehn Jahre zuvor. Die weltweite Stromproduktion entspricht in etwa dem Bedarf der Schweiz.

Abbildung 2: Schematisches geologisches Profil durch das Zürcher Mittelland. (Quelle: Dr. H. Jäckli AG, Zürich)



Das geothermische Potenzial im Kanton Zürich

1 Mia. kWh = 1000 Gigawattstunden = 1 Terawattstunde Gerundete Zahlen	Gespeicherte Wärme Mia. kWh	Nutzbarer Wärmeanteil * Mia. kWh pro Jahr	Anteil am Wärmebedarf von 20 Mia. kWh	Nutzbare Elektrizität ** Mia. kWh pro Jahr	Anteil am Elektrizitätsbedarf von 8,2 Mia. kWh
Oberflächennahe Geothermie in Bauzonen (Gewinnungsfaktor 1,07 %)	230	2,4	12 %		
Obere Meeresmolasse (0,17 %)	3700	6,3	31 %		
Oberer Muschelkalk (0,11 %)	6500	7,3	36 %	0,4	5 %
Zerklüftetes Kristallin (0,06%)	73000	42,5	213 %	2,8	34 %
Summe der Potenziale (0,06%)	83430	58,5	292 %	3,2	39 %

* Potenzial mit heutiger Technologie
** Elektrischer Wirkungsgrad 10 % für Temperaturen über 100 °C. Stromproduktion reduziert mögliche Wärmenutzung.

Tabelle 1: Potenzial der geothermischen Energie im Kanton Zürich. Heute beträgt im Kanton Zürich der Wärmebedarf 20 Mia. kWh und der Strombedarf 8,2 Mia. kWh pro Jahr.

Schicht	Mächtigkeit	Tiefe unter Tag
Obere Meeresmolasse	von 50 bis 700 m	von 200 bis 1000 m
Oberer Muschelkalk	70 m (Mittelwert)	von 500 bis 4500 m
Zerklüftetes Kristallin	500 m (Mittelwert)	von 800 bis 4700 m

Tabelle 2: Mächtigkeit und Tiefe der hydrothermal relevanten Erdschichten

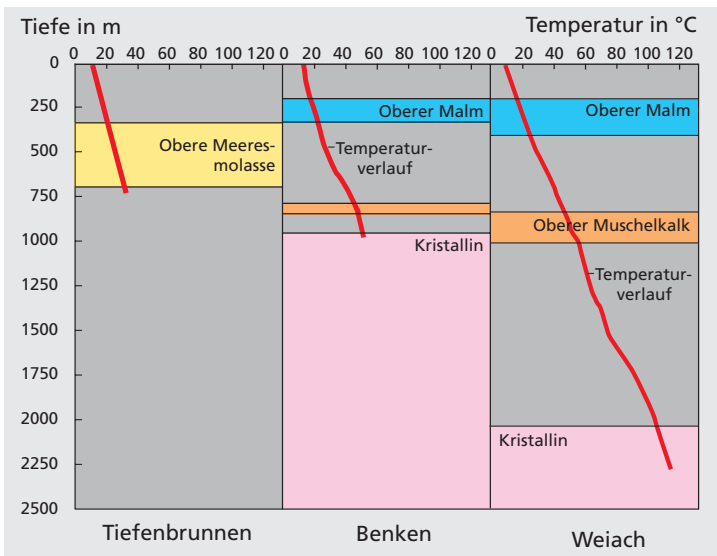


Abbildung 3: Temperaturprofil von Bohrungen an drei Standorten im Kanton Zürich. Die unterschiedliche Lage der bezeichneten Schichten illustriert die ausgeprägte Komplexität des Untergrundes.

Der Untergrund des nördlichen Teils des Kantons Zürich ist durch Untersuchungen der Nagra und anderer Institutionen relativ gut bekannt. Im südlichen Teil dagegen fehlen entsprechende geologische Informationen weitgehend. Der Kanton Zürich gehört in grossen Teilen zum schweizerischen Mittelland. Dessen unmittelbarer Felsuntergrund besteht überwiegend aus Gesteinen der Molasse. Unter weiteren Sedimentgesteinsschichten liegt schliesslich das kristalline Grundgebirge aus Gneisen und Graniten, das generell von Norden nach Süden abfällt (Abbildung 2). Die Tiefe der Bohrung richtet sich nach der Lage und der Mächtigkeit der zu erschliessenden Erdschicht. Grundsätzlich nimmt die Eignung zur Geothermienutzung mit wachsender Tiefe signifikant zu. Entsprechend beträgt in der Oberen Meeresmolasse die prognostizierte mittlere Anlagenleistung 5 MW, im Oberen Muschelkalk 10 MW und im zerklüfteten Kristallin 50 MW.

Der Gewinnungsfaktor quantifiziert das Verhältnis von gespeicherter Wärme und dem davon nutzbaren Anteil. Mit einem mittleren Gewinnungsfaktor von 0,06 ist diese Ausnutzungsquote sehr vorsichtig geschätzt: Die Prognose der jährlich nutzbaren Wärme ist um den Faktor 1700 kleiner als die in den relevanten Schichten eingelagerte Energie. Diese Schätzung basiert auf wissenschaftlichen Untersuchungen.

Der nutzbare Anteil der im erschließbaren Untergrund gespeicherten Wärme beträgt 58,5 Mia. kWh pro Jahr – rund dreimal mehr als der gesamte Wärmebedarf des Kantons Zürich. Das Potenzial an Elektrizität aus geothermischer Energie beträgt – auf den Kanton Zürich bezogen – 3,2 Mia. kWh pro Jahr (ca. 40 % des Bedarfs). Die Potenzialabschätzung basiert auf einer nachhaltigen Nutzung der geothermischen Vorkommen, auf der vorhandenen Abnehmer-Infrastruktur sowie auf heute verfügbaren Technologien. Nicht berücksichtigt sind die Kosten (Seite 7).

Untiefe Geothermie

Abbildung 4 zeigt die Eignung von Standorten in Bauzonen für die Nutzung von untiefer Erdwärme mittels Erdsonden- oder Grundwasser-Wärmepumpen. Ein Mass für die Eignung bildet die thermische Entnahmelistung einer Erdsonde von 150 m Länge (in Kilowatt). Der Bedarf einer durchschnittlichen Wohnung beträgt ca. 5 kW.

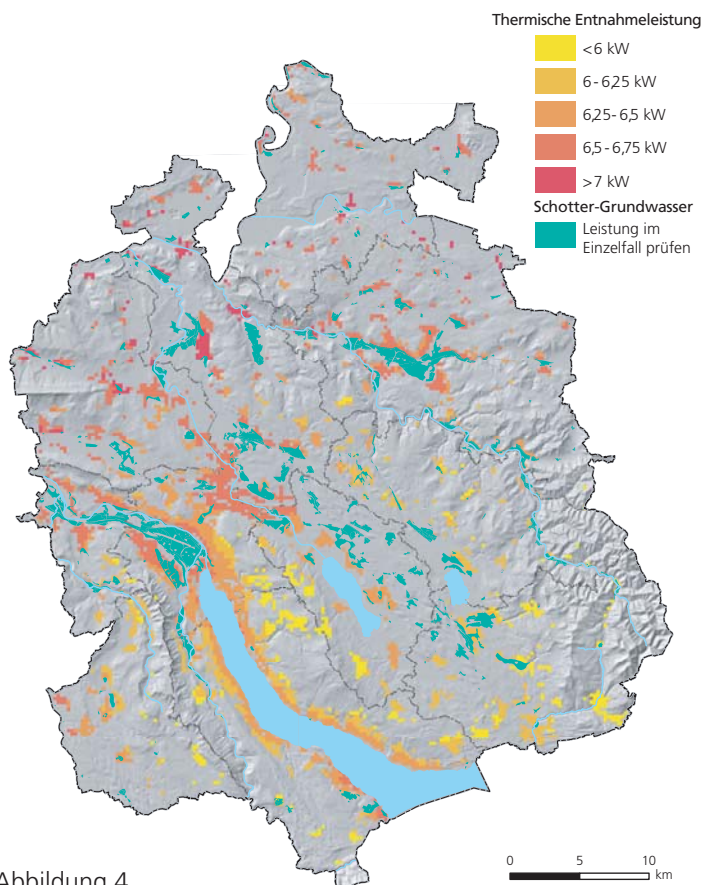


Abbildung 4

Tiefe Geothermie am Beispiel von zerklüftetem Kristallin

Die Abbildung 5 enthält regionale Prognosen für die geothermische Nutzung im zerklüfteten Oberen Kristallin anhand der thermischen Entnahmelistung einer Bohrung (in Megawatt).

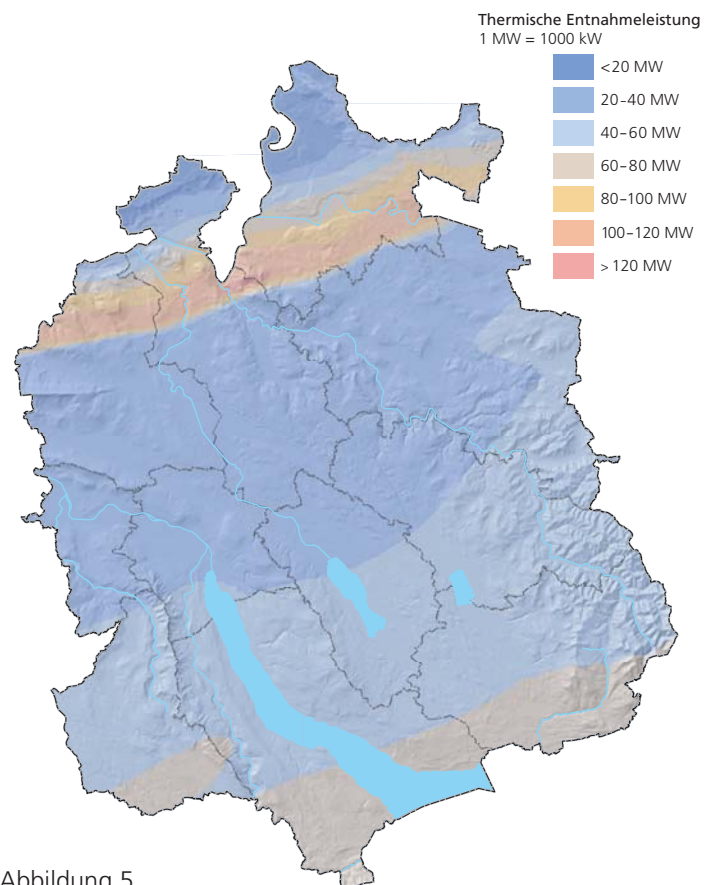


Abbildung 5

Technik und Wirtschaftlichkeit

Zur Gewinnung von tiefer Erdwärme sind drei Technologien verfügbar:

Hydrothermale Systeme, petrothermale Systeme und tiefe Erdwärmesonden. Mit hydrothermalen Systemen werden natürliche Thermalwasservorkommen, sogenannte Heisswasser-Aquifere, genutzt. Petrothermale Systeme liefern Wärme aus ursprünglich wasserfreien Gesteinsformationen, indem Wasser mit hohem Druck in den Fels gepresst wird. Dadurch bilden sich im Gestein Fließwege, die sich zu einem Kreislauf verbinden lassen: Das in der Tiefe erhitzte Wasser steigt auf, gibt an der Erdoberfläche Wärme ab und fließt in die gleiche Gesteinsformation zurück. Diese petrothermalen Systemen sind als Enhanced Geothermal Systems (EGS) oder Hot Dry Rock (HDR) bekannt. Im Gegensatz zu den hydro- und petrothermalen Systemen bilden die – allerdings nur vereinzelt eingesetzten – tiefen Erdwärmesonden einen geschlossenen Kreislauf, in dem ein Medium für den Wärmetransport in koaxialen Rohren in das Erdreich und wieder zurückfließt. Diese Technik ist für grosse Tiefen nicht wirtschaftlich.

Erdwärme mit hohen Temperaturen eignet sich für eine mehrstufige Verwendung (Kaskaden-Prinzip). Im Vordergrund steht der Einsatz als Prozesswärme

beziehungsweise in der Stromerzeugung. Die dabei anfallende Abwärme lässt sich sowohl in der Raumheizung als auch in der Wassererwärmung verwerten. Niedervertige Wärme auf tiefem Temperaturniveau kann als Wärmequelle für Wärmepumpen oder zur Vorwärmung dienen.

Die Wirtschaftlichkeit von Anlagen

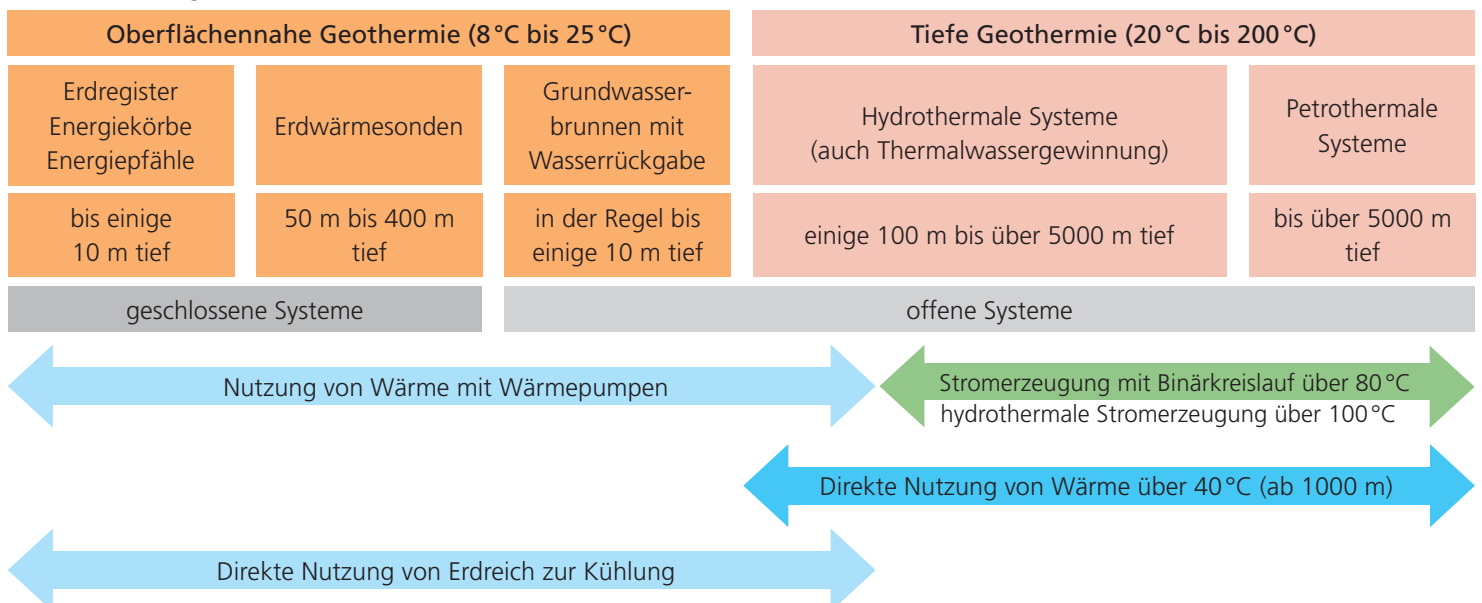
zur Nutzung von Geothermie sind im wesentlichen von vier Faktoren abhängig:

- Temperatur und Ergiebigkeit des geothermischen Vorkommens
- Tiefe der Bohrung (Bohrkosten und Förderenergie für den Kreislauf)
- Verwertbarkeit der anfallenden Abwärme (Nah- oder Fernwärmenetz)
- Einspeisevergütung bei Abgabe ins öffentliche Netz der Elektrizitätswerke.

Die hydrogeologische Eignung und

damit die Ergiebigkeit eines geothermischen Vorkommens ist umso besser, je grösser die Wasserdurchlässigkeit und je mächtiger die erschlossene Gesteinschicht ist. Die Wirtschaftlichkeit hängt zudem stark von der notwendigen Bohrtiefe ab (Abbildung 7). Da die hydrogeologischen Parameter naturgemäss stark schwanken, sind Geothermie-Bohrungen mit einem entsprechenden Risiko behaftet. Dieses erhöht sich mit der Unsicher-

Abbildung 6: Typologie der Nutzungstechnologien



heit der Prognosen. Je nach Eignung des Vorkommens ergeben sich spezifische Stromkosten, die bis zu einem Faktor 50 differieren. Die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme mittels Erdsonden und Wärmepumpen dagegen birgt kaum wirtschaftliche oder ökologische Risiken. Sowohl die Investitions- und die Betriebskosten als auch die umweltrelevanten Wirkungen lassen sich aufgrund der grossen Erfahrung mit dieser Technik relativ präzise quantifizieren.

Betreiber von Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Elektrizität profitieren künftig von einer kostendeckenden Einspeisevergütung.

Ökologie

Ökobilanzen von Systemen zur Energiegewinnung basieren auf der Summe der umweltrelevanten Wirkungen über deren gesamte Lebensdauer, eingeschlossen die Beschaffung der Rohstoffe, die Erstellung der Komponenten, der Aufwand für den Betrieb sowie den vollständigen Rückbau und die Entsorgung der Anlage. Typische Wirkungsindikatoren für die Bewertung sind der Verbrauch an nicht erneuerbaren Energien, der Ausstoss an Treibhausgasen (CO₂-Äquivalente) und an Schadstoffen sowie die Ozonbildung. Rund 90 Prozent des Energieverbrauchs sowie der luftgetragenen Emissionen entfallen bei einer geothermischen Stromerzeugung auf die Erschliessung des Vorkommens. Lediglich 10 Prozent beträgt der Anteil für den Betrieb.

Die Injektion von Wasser unter hohem Druck in tief liegenden Gesteinsschichten bei petrothermalen Systemen birgt Risiken,

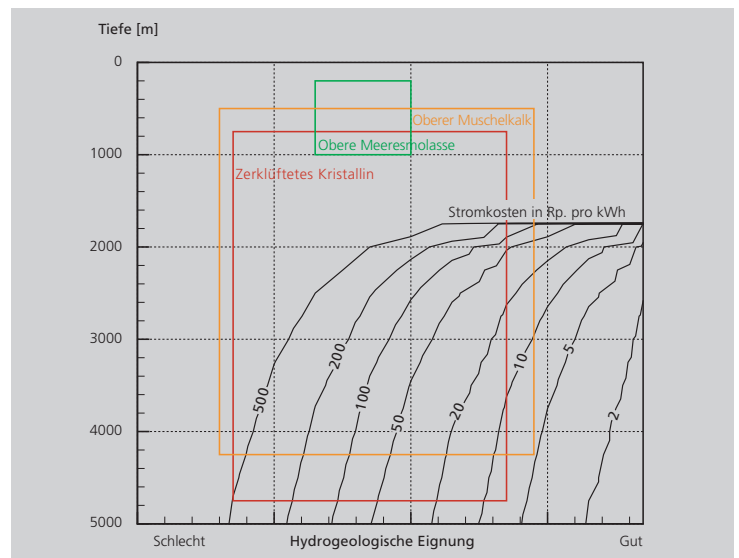


Abbildung 7: Stromkosten in Rp. pro kWh in Abhängigkeit der hydrogeologischen Eignung und der Tiefe der genutzten Gesteinsschichten. Annahme: Bohrkosten 3500 Fr. pro Meter.

beispielsweise für Erschütterungen oder kleine Erdbeben. Diese Risiken lassen sich indessen durch den sorgfältigen Einsatz von Stimulationstechniken beschränken.

Um die Klimaziele des Kantons Zürich, wie sie in der Vision 2050 des AWEL (Dezember 2007) dokumentiert sind, zu erreichen, ist ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energien notwendig. Entsprechend dem Angebot an erneuerbaren Energieträgern kommt der Geothermienutzung eine grosse Bedeutung zu, denn die Nutzung von Erdwärme ist zu grossen Teilen CO₂-neutral, ganz im Gegensatz zu Energieanwendungen, die auf fossilen Energieträgern basieren. Dieses Argument bekommt noch mehr Gewicht, wenn bei der geothermischen Stromerzeugung die anfallende Abwärme genutzt wird. Fazit: Geothermie bildet in Zukunft ein unverzichtbares Element einer nachhaltigen Energieversorgung im Kanton Zürich.

Editorische Notiz

Quelle: Machbarkeitsstudie des AWEL «Geothermische Energie im Kanton Zürich – Grundlagen und Potenziale» (Oktober 2007). Verfasser: Geowatt AG, Zürich. Titelbild: DHM, Basel.

Herausgeber: Baudirektion Kanton Zürich, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Januar 2008.

Download dieser Broschüre: www.energie.zh.ch, www.grundwasser.zh.ch

Der Kanton Zürich liegt auf einem riesigen Wärmereservoir. Mit zunehmender Tiefe steigt die Temperatur der Erdschichten – etwa 3 bis 4 Grad je 100 Meter. Oberflächennahe Schichten eignen sich für die Nutzung von Wärme für Heizung und Wassererwärmung mittels Wärmepumpen, Erdschichten unterhalb von 1000 Metern Tiefe erlauben eine direkte Wärmenutzung. Um heute wirtschaftlich Strom zu produzieren, sind Temperaturen von über 100°C notwendig, was Bohrungen von mehreren Kilometern Tiefe bedingt. Das Potenzial an Wärme aus der Erde beträgt im Kanton Zürich fast 60 Mia. kWh pro Jahr – dreimal mehr als der gesamte heutige Wärmebedarf des Kantons. Das Potenzial zur Stromerzeugung wird auf 3,2 Mia. kWh pro Jahr geschätzt, rund 40 Prozent des heutigen Elektrizitätsbedarfs.