

Beispiel Aachener Steinkohlenrevier

Nutzung von Erdwärme in aufgelassenen Bergwerken

von Christoph Clauser, Michael Heitfeld, Peter Rosner, Heinz Sahl, Kurt Schetelig

Für das Aachener Steinkohlenrevier wurde eine Machbarkeitsstudie zur Klärung von Grundsatzfragen einer Erdwärmegewinnung aus stillgelegten Bergwerken durchgeführt. Für die Gewinnung von Erdwärme aus mittleren Tiefen (ca. 100–1.500 m) sind aufgelassene und geflutete Bergwerke besonders geeignete Standorte. Das gebrochene Gebirge ermöglicht einen intensiven Wärmeaustausch zwischen Gestein und Grubenwasser; vorhandene Schächte und Rohrleitungen bilden die Grundlage für eine wirtschaftliche Nutzung der Erdwärme.

Stand der Erdwärmennutzung in Deutschland

Die Temperatur der Erde steigt mit der Tiefe an. In der Erdkruste und der Lithosphäre, also in Tiefen bis zu 80 km, werden Temperaturen bis zu 700 °C erreicht, an der Grenze zwischen Erdmantel und Erdkern in 2.890 km Tiefe an die 3.500 °C, und im Innersten der Erde gehen unterschiedliche Überlegungen von Werten zwischen 4.800 und maximal 7.700 °C aus. Der Unterschied zwischen den Temperaturen im Erdinnern und der Erdoberfläche bedingt einen nach oben gerichteten globalen Wärmestrom in der Größenordnung von 320–420 GW. Je nach der geodynamischen Situation variiert der flächennormierte Wärmestrom, die Wärmestromdichte, lokal stark. Für deutsche Verhältnisse ergibt sich eine Variationsbreite von ca. 50–150 mW/m². Neuere Studien schätzen die weltweiten geothermischen Reserven [1] auf 140.000 TWh, die Ressourcen [2] auf 1.400.000 TWh.

Erdwärme-Reservoirs werden hinsichtlich der Temperatur und des Aggregatzustands ihrer Porenfluide in wasser- bzw. dampfdominierte unterschieden. Wasserdominierte Reservoirs enthalten entweder warmes Wasser ($T < 100$ °C) niedriger Enthalpie oder Feuchtdampf (100 °C $< T < 150$ °C) mittlerer Enthalpie. Dampfdominierte Reservoirs enthalten Trockendampf ($T > 150$ °C) hoher Enthalpie. Sie kommen ausschließlich in geodynamisch aktiven Zonen der Erde vor, in Ländern wie Indonesien, Island, Italien, Japan, Mittelamerika, Neuseeland, den Philippinen und den USA. In Deutschland sind diese nicht zu finden, wohl aber wasserdominierte Warmwasser- und Feuchtdampfreservoirs.

In Deutschland werden gegenwärtig 4.922 TJ/a (1.368 GWh/a) an Erdwärme gefördert. Damit liegt Deutschland weltweit bereits an 15. Stelle in der direkten Erdwärmennutzung. Rund 86% dieser direkt genutzten Erdwärme werden mit dezentralen Erdwärmesonden geringer Tiefe gewonnen und 14% in 30 zentralen Anlagen mit einer Kapazität über 100 kW, die auch tiefere Bohrungen nutzen (Clauser, 2005).

In Deutschland ist somit die oberflächennahe Erdwärmennutzung bis ca. 100 m Tiefe im Vergleich zu den Vorkommen in mittlerer und großer Tiefe (100–1.500 m bzw. tiefer als 1.500 m) am weitesten fortgeschritten. Es werden entweder horizontale Rohrsysteme in geringer Tiefe oder Vertikalsonden in den Untergrund eingebracht, vorzugsweise in einen oberflächennahen Grundwasserstrom mittlerer bis hoher Fließgeschwindigkeit. Wegen der mäßigen Gesteins- und Wassertemperatur in Oberflächennähe von 8–12 °C ist eine Wärmepumpe erforderlich.

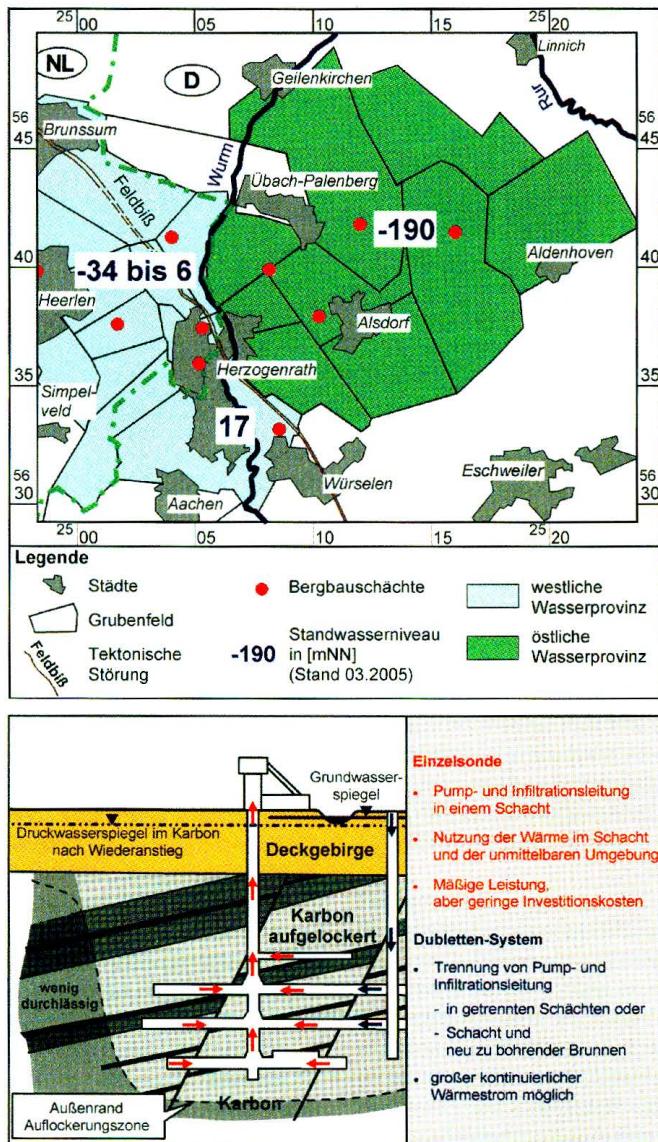
Für die Gewinnung von Erdwärme aus mittleren Tiefen stellen aufgelassene und geflutete Bergwerke besonders geeignete Standorte dar. Im Vergleich zu natürlichen Grundwasserleitern weisen Steinkohlenbergwerke insbesondere die folgenden Vorteile auf:

- großes Volumen an Gestein und Grubenwasser bei ausreichender Gebirgsdurchlässigkeit,
- günstiges Porenvolumen im nachgebrochenen Karbon,
- gut bekannte bergtechnische, geologische und hydrogeologische Bedingungen,
- Temperatur des Grubenwassers im Allgemeinen über 20 °C,
- vorhandene Schächte für Warmwassergewinnung und/oder Infiltration nutzbar.

Grundsätzliche Erfahrungen zur Nutzung offen gelassener Grubengebäude für die Gewinnung geothermischer Energie liegen z.B. aus Projekten in Ehrenfriedersdorf, Sachsen, und Springhill, Kanada, vor. Ein weiteres Pilotprojekt ist im Aachener Steinkohlenrevier vorgesehen.

Stilllegungsbereiche im Aachener Steinkohlenrevier

Das Aachener Steinkohlenrevier erstreckt sich über eine Fläche von rund 250 km² nördlich von Aachen; in nordwestlicher Richtung schließen sich die ehemaligen Grubenfelder des niederländischen Südlimburger Steinkohlenreviers an. Nach rund 800 Jahren Gewinnungstätigkeit wurde der Steinkohlenbergbau auf deutscher Seite 1992 durch die EBV Aktiengesellschaft eingestellt. Die Bauflächen erreichten Teufen bis zu 1.200 m. Seit Einstellung der Wasserhaltung in den Jahren 1993/94 steigt auf der Gesamtfläche des Aachener Steinkohlenreviers das Grubenwasser wieder an, und zwar in zwei hydraulisch voneinander getrennten, großflächigen Wasserprovinzen (Abb. 1). In der östlichen Wasserprovinz wurde bis März 2005 ein Standwasserniveau von –190 mNN, rund 320 m unter dem Geländeniveau, erreicht. In der westlichen Wasserprovinz, westlich der tektonischen Großstörung Feldbiß, lag das Standwasserniveau im März 2005 bei rund 17 mNN und damit ca. 100 m unter dem mittleren Vorflut-niveau; hier tritt das Steinkohlengebirge im Vorflutniveau zutage.



- 1 Wasserprovinzen im Aachener und Südlimburger Revier
© Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH
- 2 Schematisches Bergwerk mit Förderschacht- und Infiltrationsbrunnen, Wärme-/Wasserkreislauf
© Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH

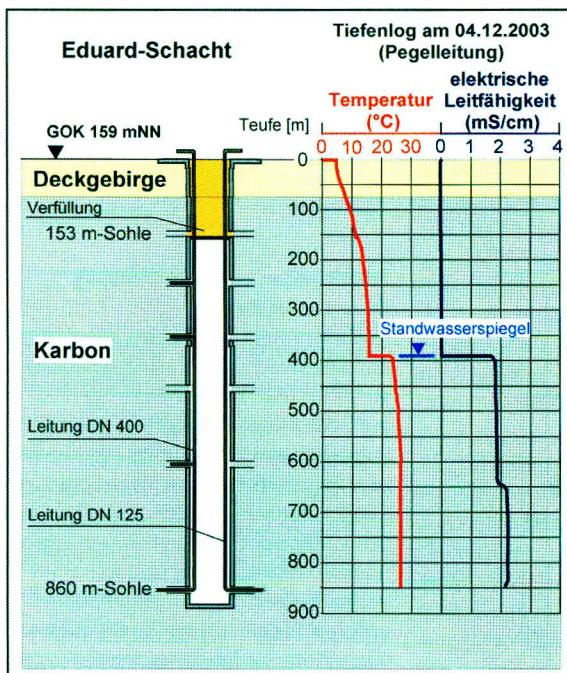
Projektskizze Erdwärmemenutzung im Aachener Revier

Im Zusammenhang mit der Abwicklung und Überwachung des Grubenwasseranstiegs betreibt die EBV Aktiengesellschaft auf deutschem Staatsgebiet derzeit Rohrleitungen (Entgasungs-, Pumpen- bzw. Pegelleitungen) in insgesamt fünf Bergbauschächten (Abb. 1). Die in diesen Schächten verfügbaren Rohrleitungen und die weiträumigen hydraulischen Verbindungen der Grubengebäude untereinander stellen eine wichtige Voraussetzung für die kostengünstige Erschließung der Erdwärme dar. Im Rahmen der Folgenutzung der ehemaligen Betriebsflächen im Umfeld der Schächte werden seitens der EBV Aktiengesellschaft Wohn- und Gewerbeeinheiten angesiedelt. Damit sind Abnehmer für die gewonnene Energie unmittelbar an der Gewinnungsstelle vorhanden.

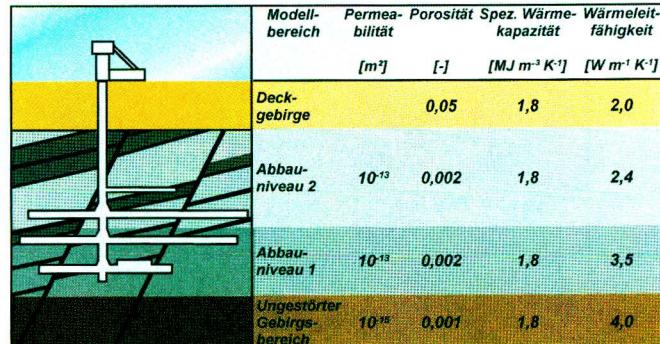
Zur Gewinnung der Erdwärme stehen im Wesentlichen zwei technische Varianten zur Verfügung (Abb. 2). Bei der Einzelsonde wird die Wärme dem umgebenden Gebirge durch ein Wärmeträgermedium in einem in sich geschlossenen Rohrsystem (Erdsondensystem) entzogen. Beim Dublettenbetrieb wird gezielt ein ausgedehnter Wärmestrom zwischen einem Pumpschacht oder Brunnen und einem oder mehreren Schächten bzw. Brunnen erzeugt, wobei das abgekühlte Wasser wieder infiltriert wird.

Eine Einzelsonde kann ohne besondere Schwierigkeiten in noch offene Schächte eingebaut werden, nutzt aber dabei nur die Wärme in der unmittelbaren Umgebung der Rohrleitung; die Wärmezufuhr aus dem weiteren Gebirgsraum bleibt gering. Das aufwändigere Dubletten-System bietet eine größere kontinuierliche Energiemenge. Allerdings erfordert es Leitungen zu den Punkten der Wiedereinleitung über Tag. Außerdem muss sichergestellt sein, dass sich kein hydraulischer Kurzschluss zwischen Förderstelle und Re-Infiltrationsstelle ergibt. Für die langfristige Nutzung der Erdwärme stellt diese Technik aber nach dem derzeitigen Kenntnisstand die wirtschaftlich sinnvol-

REGENERATIVE ENERGIEN



3 Tiefenlog Eduard-Schacht
© Projektgruppe „Erdwärme in aufgelassenen Bergwerken“



4 Gebirgsparameter für die Modellberechnungen
© Projektgruppe „Erdwärme in aufgelassenen Bergwerken“

lere Variante dar.

Zur umfassenden Klärung der Möglichkeiten einer wirtschaftlichen Gewinnung von Erdwärme im Aachener Steinkohlenrevier im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde eine Projektgruppe aus Bergwerkseigentümer, Bergbehörde und kompetenten Fachleuten aller betroffenen Fachrichtungen gebildet. Am Beispiel eines Bebauungsplangebietes am Standort einer ehemaligen Schachtanlage wurden Modellrechnungen zur Abschätzung des Energiepotenzials sowie eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Hinblick auf den Einsatz der Erdwärme als Energieträger für Heizung und Brauchwassererwärmung durchgeführt.

Ermittlung der Modellparameter

Als Grundlage für die Ermittlung des Wärmepotenzials in den Grubengebäuden wurden in den einzelnen Bergbauschächten im Aachener Revier über die zugänglichen Rohrleitungen Tiefenlogs zur Ermittlung der Wassertemperaturen und der elektrischen Leitfähigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse eines Tiefenlogs sind beispielhaft für den Eduard-

Schacht in Abb. 3 dargestellt.

Im Eduard-Schacht wurden in einem Teufenbereich zwischen dem Standwasserspiegel (391 m Teufe) und der 860-m-Sohle Wassertemperaturen zwischen rund 22 °C und 26 °C angetroffen; dabei lag die Wassertemperatur unterhalb der 610-m-Sohle weitgehend konstant bei rund 26 °C. Die elektrische Leitfähigkeit des Grubenwassers beträgt im Mittel rund 2,0 mS/cm.

Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass in den Schächten ein erhebliches Wärmepotenzial vorhanden ist; es wurden Grubenwassertemperaturen bis zu 32 °C ermittelt. Gleichzeitig zeigt sich, dass aufgrund der differenzierten Strömungsverhältnisse im Grubengebäude in den einzelnen Schächten sehr unterschiedliche hydrochemische Randbedingungen vorliegen und auch über die einzelnen Sohlanschlüsse innerhalb eines Schachtes Wässer von sehr unterschiedlicher Qualität auftreten können. Die Festlegung der für eine Erdwärmegewinnung geeigneten Sohlanschlüsse muss daher auf der Grundlage eingehender hydrochemischer Untersuchungen und einer detaillierten Auswertung des Grubenbildes erfolgen.

Zur Ermittlung exemplarischer Werte von Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität, Dichte und Porosität der im Modellbereich anstehenden Gesteine wurden an stichprobenartig ausgewähltem Material des Grund- und

Deckgebirges gesteinsphysikalische Laboruntersuchungen durchgeführt. Für die Sandsteine ergaben sich Wärmeleitfähigkeiten bis zu 3,7 W/mK, für Tonsteine deutlich geringere Werte von rund 2,5 W/mK. Dies zeigt die Bedeutung einer zuverlässigen Ermittlung des geologischen Aufbaus der für eine Erdwärmegewinnung vorgesehenen Gebirgsbereiche.

Modellrechnungen zur Abschätzung des Energiepotenzials

Für eine erste Abschätzung des verfügbaren Energiepotenzials wurde ein zweidimensionales, zylindersymmetrisches Modell bearbeitet. Hierfür wurde das numerische Simulationswerkzeug Shemat (Clauser, 2003) eingesetzt. Dem zylindersymmetrischen Finite-Differenzen-Modell wurde eine vereinfachte, vierfach geschichtete Modellstruktur unter Berücksichtigung der generellen geologisch-hydrogeologischen und bergbaulichen Verhältnisse zugrunde gelegt. Abb. 4 gibt einen Überblick über die vertikale Modellstruktur und die zugehörigen Modellparameter. Das Modell wurde mit den Daten des zeitlichen Verlaufs des Grubenwasseranstiegs kalibriert.

Mit den oben beschriebenen Modellparametern wurden die zeitliche Entwicklung der Grubenwassertemperatur am Schachtsumpf und die Ausbildung des Absenkungstrichters für eine kontinuierliche Förderung von Grubenwasser zum Zweck der Erdwärmegewinnung für einen geplanten Wohnpark mit etwa 70 Einfamilienhäusern berechnet. Der Jahresheizenergiebedarf wurde unter Berücksichtigung einer Brauchwassererwärmung mit rund 450 MWh ermittelt; die Spitzenleistung wurde auf rund 420 kW ausgelegt. Die Modellrechnungen lieferten dazu unter Ansatz der im Eduard-Schacht angetroffenen Temperaturverteilung folgende wesentliche Ergebnisse:

- Für die Betriebsdauer von 30 Jahren kann eine weitgehend konstante Wärmemenge gefördert werden; die Abkühlung des Grubenwassers an der Entnahmestelle im Niveau der Schachtsohle beträgt maximal 2 °C.
- Unter Berücksichtigung der getroffenen Modellvereinfachungen ist eine Versorgung des geplanten Wohnparks mit Erdwärme für Heizzwecke aus geophysikalischer Sicht sichergestellt.

Für die Gesamtbewertung der Möglichkeiten zur Nutzung von Erdwärme aus den aufgelassenen Grubengebäuden im Aachener Steinkohlenrevier ergaben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Für das insgesamt in den Grubengebäuden zur Verfügung stehende Erdwärmepotenzial lässt sich bei einer Abkühlung des geförderten Wassers um 10 °C mittels Wärmepumpe und unter Ansatz der derzeitigen natürlichen Wasserzutritte eine theoretische Entzugsleistung von rund 4,6 MW angeben. Dabei sind durchaus auch höhere Abkühlungstemperaturen und höhere Fördermengen mit entsprechend höherer Entzugsleistung realisierbar.
- Aufgrund der guten hydraulischen Verbindungen der zur Verfügung stehenden Schächte untereinander ist dieses Potenzial über einen Schacht gewinnbar oder kann entsprechend den örtlichen Erfordernissen auf mehrere Schächte aufgeteilt werden. Auch eine Erschließung über Bohrungen im Bereich konkreter Bauprojekte ist denkbar.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Eine vergleichende Betrachtung der Kosten für die Errichtung und den Betrieb der Heizung und Brauchwasserversorgung für die geplante Wohnsiedlung unter Berücksichtigung verschiedener Energieträger (Gas, Strom, Fernwärme, Sonnenkollektoren) zeigte, dass unter Berücksichtigung der Investitionskosten für die Förderanlage, die Re-Infiltrationsanlage, die Wärmepumpentechnik und die Hausanschlüsse die jährlichen Kosten bei einer Versorgung des Wohnparks mit Erdwärme ohne Fördermittel um etwa 40 % über den aktuellen Kosten für herkömmliche Energieträger liegen. Dies ist im Wesentlichen dadurch begründet, dass den vergleichsweise hohen Investitionskosten nur ein geringer Energiebedarf der Wohnsiedlung (450 MWh/a) gegenübersteht.

Grundsätzlich eignen sich daher vor allem energieintensive Großgebäude für eine Versorgung mit Erdwärme. Allerdings kann die Erdwärmenutzung unter Berücksichtigung von Fördergeldern, z.B. nach dem Energieeinspeisungsgesetz, sowie einer sinnvollen Kombination mit anderen Energieträgern auch für eine Wohnsiedlung nach dem oben beschriebenen Vorbild interessant sein. Wichtig ist dabei, die Gebäudetechnik schon in einer frühen Planungsphase auf die Erdwärmenutzung auszurichten. Ferner ist natürlich auch die Preisentwicklung der herkömmlichen Energieträger zu berücksichtigen, was langfristig für eine Erdwärmenutzung spricht.

Fazit

Die für das Aachener Steinkohlenrevier erarbeitete Machbarkeitsstudie zeigt, dass in den aufgelassenen ehemaligen Steinkohlenbergwerken ein erhebliches, wirtschaftlich nutzbares Erdwärmepotenzial vorliegt. Die Nähe der Gewinnungsschächte zu geplanten Wohn- und Gewerbegebäuden ist ein wichtiger Aspekt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Bei der Realisierung von Einzelprojekten ist jeweils eine Optimierung im Hinblick auf Investitionskosten und Leistung der Anlage vorzunehmen; die Möglichkeiten einer Erdwärmenutzung sind bereits frühzeitig bei der Bauleitplanung zu berücksichtigen. Die bisherigen theoretischen Untersuchungsergebnisse werden im Rahmen eines Pilotprojektes in den nächsten Jahren verifiziert; die Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Erdwärmenutzung auch in anderen Bergbauregionen.

Autoren:

Univ.-Prof. Dr. Christoph Clauer, Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes für Angewandte Geophysik an der RWTH Aachen, Gesellschafter der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Stolberg

Dr.-Ing. Michael Heitfeld, Geschäftsführer des Ingenieurbüros Heitfeld-Schetelig GmbH, Aachen

Dipl.-Geol. Peter Rosner, Projektleiter im Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH

Dipl.-Ing. Heinz Sahl, Leiter des Bereiches Bergbaufolgearbeiten – Umwelt der EBV Aktiengesellschaft, Herzogenrath

Univ.-Prof. Dr. Kurt Schetelig, bis 2002 Inhaber des Lehrstuhls für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen, Gesellschafter des Ingenieurbüros Heitfeld-Schetelig GmbH, Aachen

Projektgruppe

»Erdwärme in aufgelassenen Bergwerken«

- EBV Aktiengesellschaft, Herzogenrath
- Bezirksregierung Arnsberg, Abt. 8 – Bergbau und Energie in NRW, Dortmund
- Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH, Aachen
- Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Stolberg
- Elektro-Physik Aachen EPA, Aachen

Anmerkungen

- [1] Teil der zugänglichen Ressourcenbasis, dessen Förderung innerhalb von 10 bis 20 Jahren wirtschaftlich wird
- [2] Teil der zugänglichen Ressourcenbasis, dessen Förderung innerhalb von 40 bis 50 Jahren wirtschaftlich wird

Literatur

- Clauer, C. (Ed.) (2003): Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers Using Shemat/Processing Shemat. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- Clauer, C. (2005): Geothermal Energy. In: K. Heinloth (Ed.), Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships, New Series, Vol. VIII: Energy Technologies, Subvolume: 3 Renewable Energies, Springer Verlag, Heidelberg, Berlin (im Druck).
- Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH (14.07./18.12.2003): Erläuterungsbericht zum Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis zur Aufsuchung von geothermischer Energie im Bereich des Aachener Steinkohlenreviers – Erlaubnisfeld »Honigmann«, östlich Feldbiß. unveröffentlichter Bericht im Auftrag der EBV Aktiengesellschaft, Aachen.
- Projektgruppe »Erdwärme in aufgelassenen Bergwerken« (30.04.2004): Machbarkeitsstudie zur Gewinnung von Erdwärme im Bereich des Aachener Steinkohlenreviers unter besonderer Berücksichtigung einer ErdwärmeverSORGUNG des »Wohnpark Grube Adolf«, Merkstein. Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der EBV Aktiengesellschaft, Aachen.