

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 110 (1992)
Heft: 6

Artikel: Die Bedeutung des Hot Dry Rock-Verfahrens für die Schweiz
Autor: Rybach, Ladislaus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77855>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Bedeutung des Hot Dry Rock-Verfahrens für die Schweiz

Angesichts der voraussehbaren Folgen des Treibhauseffektes sind insbesondere jene Energiesysteme interessant geworden, welche eine Reduktion des CO₂-Ausstosses ermöglichen. Hot Dry Rock-Systeme erlauben Wärme-Kraft-Kopplung ohne CO₂-Emission. Die natürlichen Gegebenheiten der Schweiz zur Erstellung solcher Systeme sind gebietsweise ausgesprochen günstig.

Im Erdinnern sind immense Wärmemengen gespeichert. Eine geothermische Energienutzung ist überall dort

VON LADISLAUS RYBACH,
ZÜRICH

möglich, wo ein Wärmeträger-Medium (Dampf, Wasser) vorhanden ist, um die Erdwärme den tiefen Gesteinsformationen zu entziehen und zur Erdoberfläche zu fördern. Meist sind dazu Erschliessungsbohrungen notwendig.

Da nicht jede Geothermie-Bohrung fruchtig wird (d.h. die natürlichen geo-

thermalen Fluide sind nicht in genügender Menge vorhanden), ist man schon lange bestrebt, die Erdwärme durch künstliche Zirkulationssysteme zu erschliessen, d.h. den Wärmeträger von der Erdoberfläche her zuzuführen. Im Bereich der untiefen Geothermie sind in dieser Hinsicht die Erdwärmesonden zu nennen. In grössere Tiefen stösst man mit den Hot Dry Rock (HDR)-Systemen vor. Dass sich dieses Ziel lohnt, zeigt eine Übersichtsrechnung: bei der Abkühlung eines Gesteinsvolumens von bloss 1 km³ um 10° C liess sich theoretisch während 30 Jahren eine Wärmeleistung von 25 MW gewinnen.

Die HDR-Technologie

Zentraler Teil eines HDR-Systems ist der unterirdische Wärmetauscher. Um diesen zu erzeugen, wird zunächst eine Bohrung in Gesteinsbereiche mit 150–200° C abgeteuft (Bohrtiefen von mehreren km). Über einen abgedichteten Abschnitt der Bohrung wird Wasser unter hohem Druck solange in das Gestein gepresst, bis darin Risse entstehen (bzw. bestehende Klüfte aufgeweitet werden). Nach erfolgter Ortung der Risslagen (am besten eignen sich hierfür mikroseismische Methoden) wird eine zweite Bohrung zur Quering der Risse niedergebracht. In eine Bohrung wird nun Wasser eingepumpt, das durch den Wärmetauscher (= Rissystem) fliesst und sich entsprechend erwärmt. Der so gewonnene Dampf bzw. das Dampf/Wasser-Gemisch wird durch die andere Bohrung zur Oberfläche gefördert zur Erzeugung von Elektrizität und Heizwärme (Bild 1). Der abgekühlte Dampf gelangt durch die erste Bohrung wieder in den Untergrund (geschlossener Kreislauf).

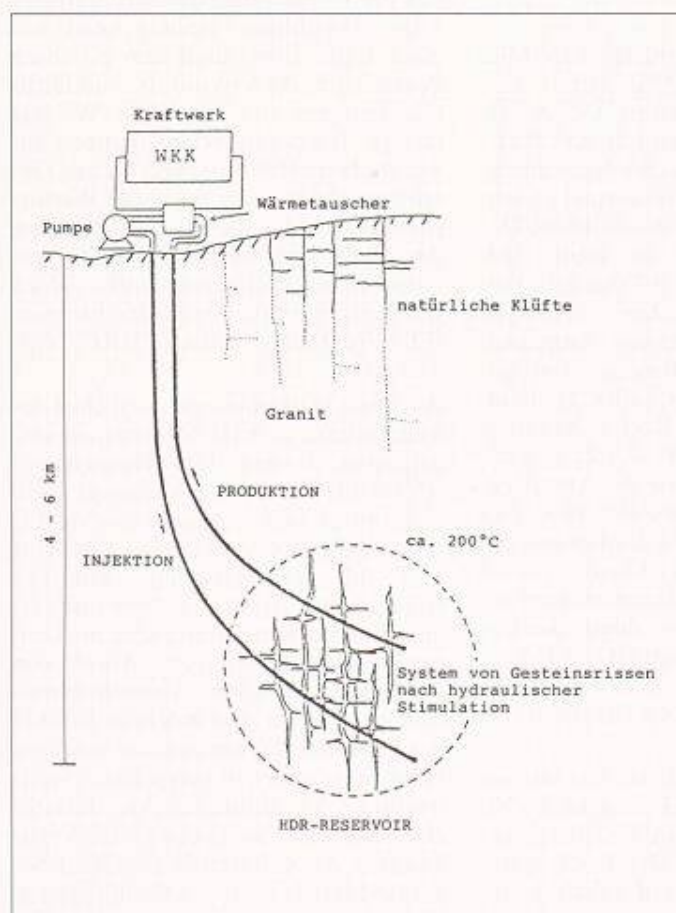


Bild 1. Prinzip-Skizze eines HDR-Systems (nach Geothermik Consult, Kappelmeyer GmbH, Passau, 1989. WKK: Wärme-Kraft-Kopplung)

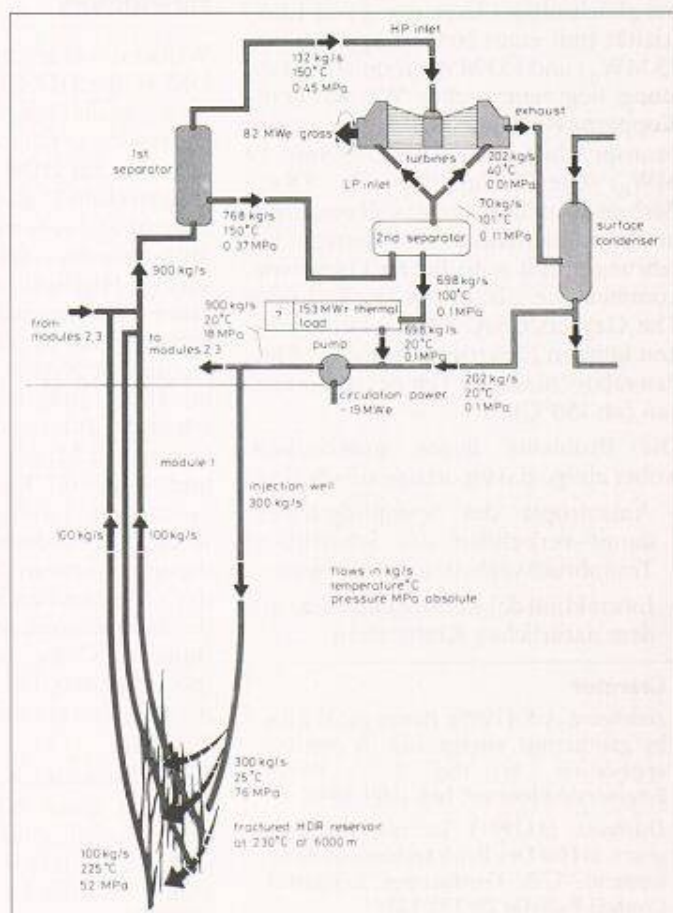


Bild 2. CO₂-freie Wärme-Kraft-Kopplung: gleichzeitige Wärme- und Elektrizitätserzeugung mit einer HDR-Anlage (63 MW_e, 153 MW_{th}, Pumpleistung 19 MW_e, nach Batchelor 1989)

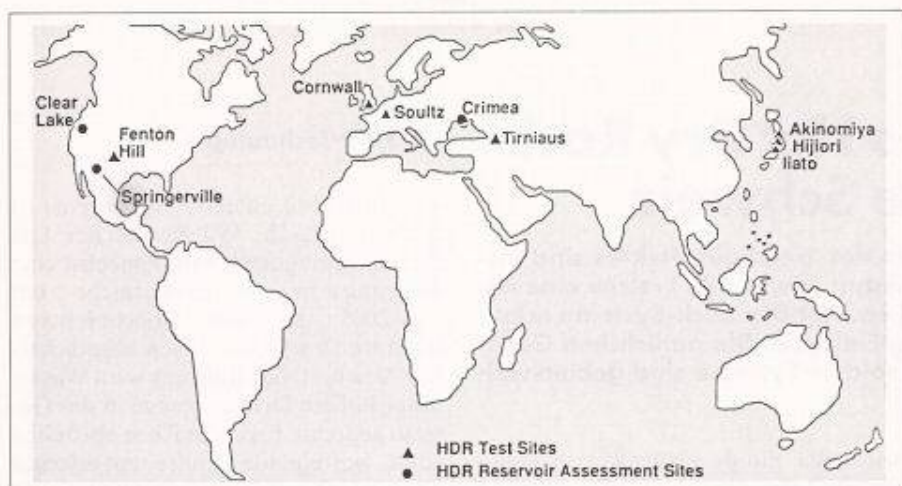


Bild 3. Lokalitäten der weltweiten HDR-Forschung (aus Duchane 1991)

Ein technisch funktionierendes und auch wirtschaftlich interessantes HDR-System muss verschiedene Bedingungen erfüllen: Reservoir-Grösse $> 2 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ (Wärmeaustauschfläche $> 5 \text{ km}^2$), nutzbare Temperaturdifferenz $> 120^\circ \text{C}$, Durchflussmenge $> 100 \text{ kg/s}$, Fließwiderstand $< 100 \text{ kPa}$ per kg/s , Wasserverluste $< 10\%$ (keine Dehnungstektonik), Spannungsfeld mit möglichst unterschiedlichen Horizontalspannungen.

Das Nutzungsschema eines HDR-Systems sieht relativ einfach aus (Bild 2); bei gleichzeitiger Erzeugung von Elektrizität (mit einer Netto-Kapazität von 63 MW_e) und 153 MW thermischer Leistung liegt eine echte Wärme-Kraft-Kopplung vor. Die Zirkulationspumpen beanspruchen eine Leistung von 19 MW_e . Die Technologie der Oberflächen-Installationen ist voll ausgereift und unproblematisch; sie basiert auf Erfahrungen mit natürlichen Dampfverhalten wie z.B. in Larderello/I oder The Geysers/USA. Binärzyklus-Turbinen können Elektrizität auch aus Fluiden relativ niedriger Temperatur erzeugen (ab 150°C).

Die Probleme liegen unterirdisch, wobei einige davon ortsspezifisch sind:

- Anisotropie des Spannungsfeldes, damit verbunden das Scherbruch/Trennbruchverhalten des Gebirges
- Interaktion der künstlichen Risse mit dem natürlichen Kluftsystem

- Kluftausbreitung während der Wärmeentnahme («thermal cracking»)
- hydraulische Kurzschlüsse, Wasserverluste
- Langzeitverhalten des Systems (Abkühlungsrate, chemische Gestein-Wasser-Interaktionen, Offenbleiben der Zirkulationswege),

d.h. sie rufen nach einer neuen Art von Reservoir-Engineering.

Stand der Forschung und Entwicklung

Weltweit wurden bislang rund 250 Mio. US\$ in die HDR-F&E investiert; eine recht bescheidene Summe. Gegenwärtig werden in mehreren Ländern F&E-Arbeiten zur HDR-Technologie durchgeführt (Bild 3). Bedeutsam und nächstliegend ist das «Europäische HDR-Demonstrationsprojekt» in Soultz (Elsass/F). Hier soll ab 1992 mit dem Bau eines wissenschaftlichen Prototyps eines HDR-Kraftwerkes begonnen werden. Federführend ist die «European HDR Industries», eine Gemeinschaft des Bureau de Recherches Géologiques et Minières/F, R.T.Z. Consultants Limited/UK sowie die Arbeitsgemeinschaft Energieprojekt Hot Dry Rock/D (eine deutsche Firmengruppe, darunter Siemens AG). Finanziert wird das Vorhaben durch die nationalen Förder-Institutionen sowie durch die Europäische Gemeinschaft (JOULE-Projekt). Für das Demonstrationsprojekt wird ein Zeitrahmen von 10 Jahren veranschlagt.

Auch die Schweiz arbeitet hier mit: im Rahmen eines NEFF-Projektes (Nr. 359: «Modellsimulation der Energiegewinnung mittels Hot Dry Rock-Systemen») wird das Langzeitverhalten von HDR-Reservoirs durch computergestützte Modellrechnungen untersucht. Die Arbeiten werden von der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie, Institut für Geophysik der ETH

Zürich sowie vom Forschungsbüro Polydynamics (Zürich) durchgeführt. Zur Sicherung des Zuganges zu den Daten der Feldexperimente in Soultz (für die Validierung der Modellrechnungen unerlässlich) wurden mit den englischen, französischen und deutschen Projektpartnern bilaterale Zusammenarbeitsverträge abgeschlossen.

Zum Langzeit-Verhalten von HDR-Systemen

Ein Schwerpunkt der Modellierungsarbeiten im NEFF-Projekt Nr.359 liegt bei einer möglichst realistischen Erfassung und Darstellung eines HDR-Reservoirs. Besonders wichtig ist dabei die Struktur und das Verhalten des Wärmetauscher-Riss/Kluftsystems. Für jede Kluftfamilie müssen die Häufigkeit, Orientierung, hydraulische Öffnung sowie Ausdehnung und Kontinuität betrachtet werden. Insbesondere die Kluftöffnung verändert sich unter dem Einfluss der hydraulischen Injektion nach einer nichtlinearen Gesetzmässigkeit. Es werden jedoch noch weitere Kopplungsmechanismen zwischen den hydraulischen, thermischen und felsmechanischen Vorgängen berücksichtigt: die Schrumpfung der Felsmatrix infolge Abkühlung, einhergehend mit einer Expansion durch den erhöhten Porendruck, die Viskositäts- und Dichteänderungen des injizierten Wassers infolge Temperaturschwankungen sowie die hierdurch hervorgerufenen Geschwindigkeitsänderungen der Wasserpunkte, die das thermische Verhalten des HDR-Systems stark beeinflussen (advektiver Wärmetransport). Dazu wurde eigens ein neues Finites-Element (FE)-Programm FRACTURE entwickelt.

An dieser Stelle muss auf mögliche Umwelteinflüsse von HDR-Systemen eingegangen werden. Der Hauptvorteil (CO_2 -freie Energiegewinnung) soll nicht durch andere, unerwünschte Effekte aufgewogen werden. Zunächst sind die Begleiterscheinungen der Bohrtätigkeit zu nennen; diese sind vergleichbar mit den Belastungen bei konventionellen Bohrungen (Anfall von Bohrschlamm, Lärm, Geruchsimmissionen). Sodann sind mögliche Effekte des Betriebes (Wärmeentzug aus dem HDR-Reservoir) zu betrachten (Stofffrachten, Abkühlungseffekte, künstliche Seismizität, mögliche Geländesenkungen). Aus gelösten Stoffen fallen begehrte Metalle an; die Abkühlung ökologisch sensibler, oberflächennaher Bereiche ist vernachlässigbar (die Sonneneinstrahlung dominiert); seismische Signale können hochempfindliche Geräte selbst bei der hydraulischen

Literatur

- Batchelor, A.S. (1989): Power generation by geothermal energy and its possible application in the UK. Power Engineering Journal, Jan. 1989, 39-48
- Duchane, D. (1991): International programs in Hot Dry Rock technology development. U.S. Geothermal Resources Council Bulletin 20, 135-142.
- Rybach, L., Eugster, W., Griesser, J.-Cl. (1987): Die geothermischen Verhältnisse in der Nordschweiz. Eclogae geol. Helv. 80, 521-534.

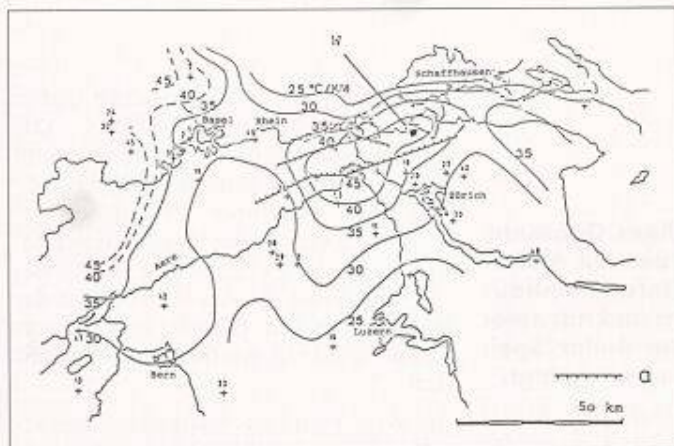


Bild 4. Die Lokalität Weiach (W) liegt in einem Gebiet der Schweiz, wo die Temperatur relativ rasch ansteigt. Die Zahlenwerte (Isolinien) geben die Temperaturzunahme pro Kilometer an (=geothermischer Gradient). a: Ränder des nordschweizerischen Permokarbon-Troges (nach Rybach et al., 1987)

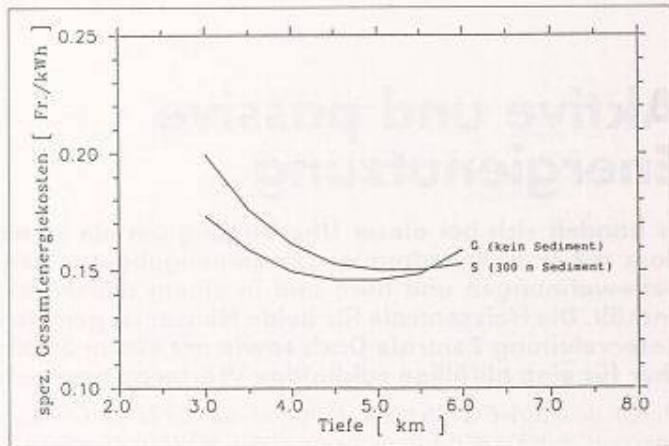


Bild 5. Berechnung der Gesamtenergiekosten einer HDR-Anlage bei variabler Tiefe für das Simplon-Gebiet (NEFF-Projekt Nr. 359)

Risserzeugung gerade noch ausmachen; die Volumenabnahme des Reservoirs infolge Abkühlung macht sich an der Erdoberfläche nicht signifikant bemerkbar. HDR-Systeme werden deshalb hinsichtlich Umweltverträglichkeit besonders gut abschneiden.

HDR-Systeme und die Schweiz

HDR-Systeme, die eine CO₂-freie Wärme-Kraft-Kopplung ermöglichen, sind auch für die Schweiz zweifellos attraktiv. Wie steht es aber mit den HDR-relevanten natürlichen Gegebenheiten hierzulande? Die nötigen Wärmeverräte sind im Untergrund der Schweiz zweifelsohne vorhanden, ganz im Gegensatz zu den geothermischen Fluiden wie Warmwasser-Vorkommen. Da bei der Wirtschaftlichkeit von HDR-Anlagen die Bohrkosten eine grosse Rolle spielen und diese Kosten mit der Tiefe etwa exponentiell ansteigen, sind Gebiete mit erhöhten geothermischen Gradienten besonders günstig. Solche Gebiete befinden sich in der Nordschweiz (Bild 4) sowie auch in den Alpen (z.B. im Wallis; hier hat man beim Bau des Simplon-Tunnels hohe Gradienten gefunden, deren Ursache in der raschen Hebung/Erosion des Alpenkörpers liegt).

Verdankungen

An dieser Stelle sei den ausländischen Kooperationspartnern (Dr. O. Kappelmeyer, Geothermik-Consult, Passau/D, Dr. A. Gérard, B.R.G.M. Orléans/F, Dr. A. Batchelor, Geoscience Ltd, Falmouth/UK) für gute Zusammenarbeit bestens gedankt; ebenso Herrn Prof. Dr. A. Baer, Bundesamt für die Energiewirtschaft (Bern) sowie dem Nationalen Energie-Forschungs-Fonds (NEFF, Basel) für die stete Unterstützung.

Erste, orientierende Wirtschaftlichkeitsberechnungen (ebenfalls im Rahmen des NEFF-Projektes Nr.359 durchgeführt) ergeben Energie-Gestehungskosten im Bereich von 0.15 bis 0.20 Sfr./kWh für einen Standort im Simplon-Gebiet. Optimierungsmöglichkeiten sind vorhanden (Bild 5).

Eine wichtige Einflussgrösse bei der Erstellung und beim Betrieb von HDR-Reservoirs ist das natürliche Spannungsfeld. Anisotropie-Effekte sind sowohl beim Erzeugen von Rissen bzw. Öffnen von bestehenden Kluftsystemen ebenso wichtig wie bei der Zirkulation des Wärmeträgers (Wasserverluste). Insbesondere kommt es dabei auf den Unterschied zwischen den horizontalen Spannungskomponenten an ($S_H - S_h$). Diesbezügliche Daten sind in der Schweiz nur äusserst spärlich vorhanden. Immerhin lassen Erdbebenherd-Mechanismen (häufige Blattverschiebungen) erwarten, dass die kleinste Horizontalspannung (S_h) horizontal liegt und somit die aufweitbaren Riss/Kluftflächen im relevanten Tiefenbereich vertikal bis subvertikal verlaufen. Dies würde sich günstig auf die Wärmetauscher-Eigenschaften der zu schaffenden Reservoirs auswirken.

Schlussfolgerungen

Einheimische geothermische Ressourcen sind hierzulande in der Form von gewaltigen Erdwärmeverräten mit Bestimmtheit vorhanden. Ihre Nutzung mittels HDR-Verfahren ist naheliegend. Diese Technologie ermöglicht eine CO₂-freie und auch sonst umweltverträgliche Wärme-Kraft-Kopplung, eine Imperative angesichts der gegenwärtigen Umwelt-Problematik.

Die sonstigen, HDR-relevanten natürlichen Gegebenheiten der Schweiz sind ebenfalls günstig. Allerdings bedarf es

noch intensiver Forschungsarbeiten, insbesondere hinsichtlich des Spannungs- und Temperaturfeldes im Untergrund. Auch sind die numerischen Modellsimulationen des Langzeitverhaltens von HDR-Systemen (gekoppelte Prozesse) weiterzuführen, einschliesslich ihrer Validierung anhand von Datensätzen, die bei «ausländischen» HDR-Feldexperimenten gewonnen werden (z.B. in Soultz/F). Eine diesbezügliche Beteiligung der Schweiz am EG-Programm JOULE II wurde in Brüssel bereits vorangemeldet.

Standort-Evaluationen können ebenfalls in Angriff genommen werden; Gebiete mit erhöhten geothermischen Gradienten sind bereits identifiziert (siehe oben). Wichtige Detailinformationen liefern die Sondierbohrungen der Nagra (z.B. die Bohrung Weiach). Eine schweizerische HDR-Experimentieranlage würde sowohl zu Forschungszwecken als auch zu industrieorientierten Entwicklungsarbeiten Gelegenheit bieten. Als mögliche Standorte kämen u.a. die Region Weiach/ZH oder das Gebiet südlich Brig/VS in Frage.

Schliesslich sei erwähnt, dass Entwicklungen auf dem Gebiet der Bohrtechnologie (Schmelzbohrverfahren LITHO-JET), ferner das Energiegewinnungskonzept mittels horizontalen Bohrungen mit Zentralschacht (System K. Brunnschweiler) weitere schweizerische Bestrebungen zur Nutzung dieser attraktiven Energiequelle darstellen.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Ladislav Rybach, Institut für Geophysik, ETH, Hönggerberg, Zürich. – Mitteilung Nr. 699, Institut für Geophysik der ETH Zürich.

Vortrag, gehalten anlässlich der zweiten technischen Informationstagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie SVG am 27. 9. 1991 in Biel.