

Ringraumanregung zur Steigerung der Wärmeentzugsleistung von Erdwärmesonden

Winfried Kessels

GEO-TIP GmbH, Burgdorf, (geo-tip@t-online.de)

Keywords: Erdwärmesonden, hydraulischer Wärmetransport, thermische Steigrohrisolierung, Zirkulationsraten, Wärmeentzugsleistung, Permeabilität, Wärmeleitfähigkeit

Zusammenfassung

Die Nutzung tiefer Erdwärmesonden mit einem hydraulisch geschlossenen Wärmetauschersystem haben gegenüber offenen Systemen aus Sicht der technischen Handhabung und des Umweltschutzes große Vorteile. Als Nachteil ist festzustellen, dass die technisch mögliche Wärmeentzugsleistung einer Erdwärmesonde insbesondere im Langzeitbetrieb deutlich geringer ist als ein Dublettsystem mit einer guten, offenen hydraulischen Verbindung zweier Bohrungen. Im Langzeitbetrieb wird die Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde durch den radialen Wärmezustrom zur Bohrung bestimmt. Erfolgt dieser Wärmezustrom nur durch Wärmeleitung, wird die Wärme des Gebirges auch in mehreren Jahren nur in engen Grenzen um die Bohrung entnommen. Gelingt es, das geschlossene Wärmetauschersystem einer Erdwärmesonde mit einem offenen hydraulischen Zirkulationssystem um den Wärmetauscher zu koppeln, kann die Langzeitwärmeentzugsleistung deutlich gesteigert werden. Eine solche Kopplung eines hydraulischen Wärmetransportes mit den Vorteilen eines geschlossenen Wärmetauschersystems, bei dem keine Formationswässer zutage gefördert werden, wird durch das Verfahren der Ringraumanregung realisiert.

Bei diesem Verfahren wird der Ringraum zwischen dem Wärmetauscher und der Bohrlochwand nicht zementiert, sondern hydraulisch im so genannten Ringraum offen gelassen. Eine übertägige zyklische Druckbeaufschlagung des Ringraums sorgt für einen hydraulischen Wärmetransport vom Gebirge zur Bohrung. Dieser Wärmetransport kann die mögliche maximale Wärmeentzugsleistung einer Erdwärmesonde, verglichen mit einer Wärmeentnahme durch reine Konduktion, um ein Mehrfaches steigern.

Die Wärmeentzugsleistung einer Erdwärmesonde mit Ringraumanregung hängt von den petrophysikalischen Parametern der Gesteinspermeabilität und der Wärmeleitfähigkeit ab. Mit den technischen Parametern der Ringraumanregungsfrequenz und der Bohrlochspeicherfähigkeit kann die Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonde gesteuert werden.

1. Einleitung

Erdwärmesonden mit Teufen bis zu 100 m gelten heute als eine am Markt eingeführte Technik zur Wärmeentnahme aus dem flacheren Untergrund. Die vielen im Zeitraum von 2000-2008 installierten Erdwärmesonden dokumentieren den Erfolg der Technik der Wärmeversorgung im Wohnbereich unter zu Hilfenahme von Wärmepumpen. Nach wie vor bleibt bei den hydraulisch geschlossenen Wärmetauschern der Erdwärmesonden das Problem, dass die Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonden mit wachsender Zeit kontinuierlich abnimmt. Nur wenn ein hinreichend großer Grundwasserstrom für eine Erneuerung der entnommenen Wärme sorgt, stabilisiert sich die mögliche Wärmeentzugsleistung auf einem konstanten Wert.

Tiefe Erdwärmesonden sind zurzeit nur in Einzelfällen geplant oder in Angriff genommen worden. Hier ist das Aachener SuperC-Projekt der RWTH1 [1], das Projekt Arnsberg [2] und das Brandenburgische Projekt in Prenzlau [3] zu nennen. Das Problem der abnehmenden Wärmeentzugsleistung mit der Entnahmezeit trifft die tiefen Erdwärmesonden im Besonderen, da in großen Tiefen nicht mit einer natürlichen Grundwasserströmung zu rechnen ist, die für eine Wärmenachlieferung sorgt.

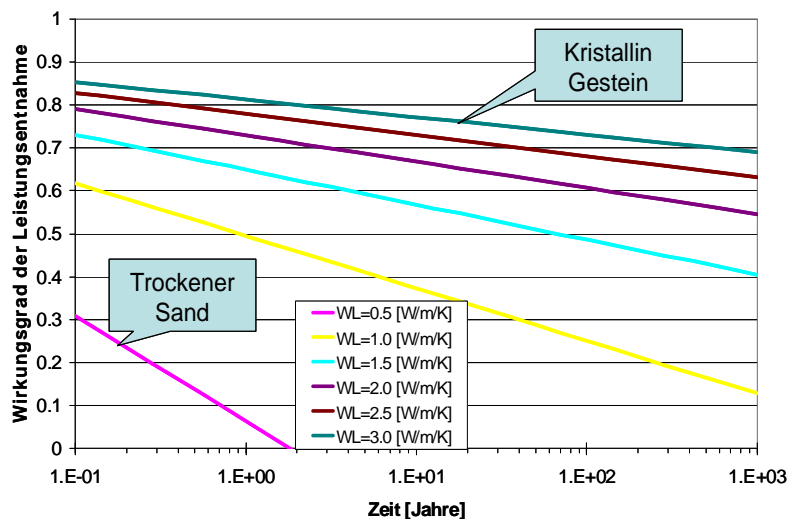


Abb. 1 Die Reduzierung der Wärmeentzugsleistung mit wachsender Betriebsdauer bei einer kontinuierlichen Wärmeentnahme von 10 W/m.

Wärmeleistung beträgt 10 [W/m]. Dieser Wert ist ein Jahresmittelwert der Wärmeentnahme. Er entspricht einer Wärmeentzugslast nach VDI 4640 [9] von ca 40 W/m. Es wurde vorausgesetzt, dass die Rücklauftemperatur von -5 [°C] nicht unterschritten werden darf. Setzt man die Grenze für die Rücklauftemperatur auf 0 [°C], würde dies die mögliche Leistungsentnahme mit wachsender Zeit deutlich verringern. Nachbarbohrungen wurden nicht berücksichtigt.

Bei tiefen Erdwärmesonden wird zwar eine höhere Temperaturdifferenz zwischen Wärmetauscherflüssigkeit und ungestörter Gebirgstemperatur möglich, aber es wird meist auch eine höhere mittlere Wärmeentzugsleistung gefordert und realisiert, da die Wärmeentnahme sich nicht auf die Wintermonate beschränkt. Ziele sind hier Wärmeentzugsleistungen > 100 W/m. Dies führt dazu, dass auch bei guten Wärmeleitfähigkeiten nur mit einer Lebensdauer einer tiefen Erdwärmesonde von 20 bis 30 Jahren auszugehen ist. Hier führt das Verfahren der Ringraumanregung zu einer deutlichen Steigerung der Lebensdauer einer tiefen Erdwärmesonde. Auch bei flachen Erdwärmesonden kann die Ringraumanregung zu einer deutlichen Steigerung des möglichen Wärmeentzuges führen. Die gilt insbesondere für Gebiete mit kleiner Grundwasserströmung.

2. Die Ringraumanregung

Mit dem GEO-TIP-Verfahren der Ringraumanregung wird die klassische Erdwärmesonde mit rein konduktivem Wärmezustrom mit einem zusätzlichen hydraulischen Wärmezustrom zum Wärmetauscher versehen. Dabei sollte der große Vorteil von Erdwärmesonden mit einem hydraulisch geschlossenen Wärmetauschersystem nach Übertage zu arbeiten, erhalten bleiben. In Abb 2 ist eine konventionelle Erdwärmesonde (links) im Vergleich mit einer Sonde mit Ringraumanregung (rechts) dargestellt.

Bei geringer Grundwasserströmung und konstanter Wärmeentnahme sinkt die Umgebungstemperatur um die Erdwärmesonde kontinuierlich und damit auch die mögliche Wärmeentzugsleistung. Das Ergebnis der in Abb.1 dargestellten GEO-TIP-Rechnung zeigt dies für eine flache Erdwärmesonde und verschiedene Wärmeleitfähigkeiten der geologischen Formation um die Erdwärmesonde. Die in Abb 1 aufgezeichneten Berechnungsergebnisse basieren auf einer Berechnung der Temperaturabsenkung in einer Erdwärmesonde mit einem Durchmesser von 10 cm. Die kontinuierliche

Bei einer klassischen Erdwärmesonde wird der geschlossene Wärmetauscher in der Bohrung einzementiert. Dabei wird ein Zement mit möglichst hoher Wärmeleitfähigkeit ausgewählt. Der Wärme-

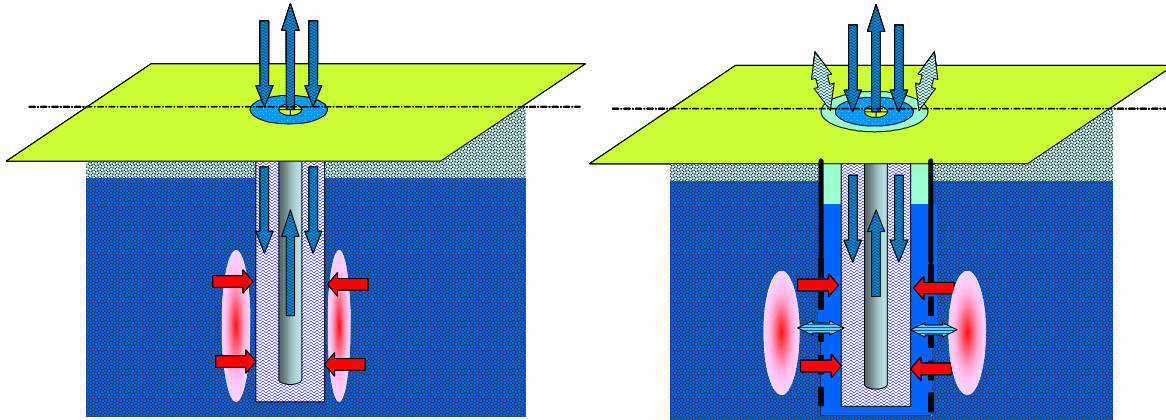


Abb. 2 Klassische Erdwärmesonde (links) und Erdwärmesonde mit Ringraumanregung (rechts) im Vergleich transport vom Gebirge zum Wärmetauscher erfolgt durch reine Wärmeleitung. Der Schwerpunkt der Wärmeentnahme liegt auch nach Jahren nur in einem geringen Abstand von der Bohrung.

Bei einer Erdwärmesonde mit Ringraumanregung (Abb. 2 rechts) wird die Bohrung erst mit einer Verrohrung versehen, die in den hydraulisch besser leitfähigen Formationen mit Filtern versehen ist (oder perforiert ist). Dann wird der Wärmetauscher in die offene Bohrung eingebaut. Auf den Ringraum werden dann periodische Druckschwankungen aufgebracht. Hierdurch wird das Formationswasser im Ringraum in die permeablen Gesteinsformationen gedrückt. Mit dem hydraulischen Fluss wird dann Wärme aus dem Gestein zum Wärmetauscher transportiert, wenn der Wärmetauscher das Gestein auf einer niedrigen Temperatur hält. Mit diesem Verfahren addiert sich der hydraulische Wärmetransport zum Wärmetransport durch Wärmeleitung. Das Verfahren vereint also die gute Planbarkeit und den geringen Eingriff in die Umwelt durch das geschlossene Wärmetauschersystem mit dem guten Wärmetransport durch den hydraulischen Fluss, wie er auch beim offenen Dublettsystem vorherrscht.

3. Berechnung der Wärmeflüsse bei Ringraumanregung

Der Wärmefluss in der porösen Gesteinsformation wird durch 3 additive Transportkomponenten gebildet. Dies sind der konduktive, der konvektive und der dispersive Wärmetransport. Es gilt

$$\mathbf{j}_{\text{gesamt}} = \mathbf{j}_{\text{konduktiv}} + \mathbf{j}_{\text{konvektiv}} + \mathbf{j}_{\text{dispersiv}} \quad (1)$$

mit

$$\mathbf{j}_{\text{gesamt}} = -\lambda_{\text{Gestein}} \cdot \nabla T + \Phi \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot T \cdot \mathbf{v}_{\text{Wasser}} - \alpha_T \cdot |\mathbf{v}_{\text{Wasser}}| \cdot \nabla T \quad (2)$$

In der folgenden Betrachtung soll der dispersive Wärmefluss vernachlässigt werden. Es gilt dann

$$\mathbf{j}_{\text{gesamt}} = -\lambda_{\text{Gestein}} \cdot \nabla T + \Phi \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot T \cdot \mathbf{v}_{\text{Wasser}} \quad (3)$$

mit

λ_{Gestein} = Wärmeleitfähigkeit, ∇ = Nabla Operator, T = Temperatur, Φ = Porosität
 c_{Wasser} = Wärmekapazität des Wassers, $\mathbf{v}_{\text{Wasser}}$ = Abs tan dsgeschwindigkeit des Wassers

für den hydraulischen Fluss gilt das Darcy-Gesetz mit

$$\mathbf{v}_{\text{Wasser}} = -\frac{k}{\eta} \cdot \nabla P \quad \text{mit} \quad k = \text{Permeabilität}, \eta = \text{Viskosität des Wassers}, P = \text{Wasser Druck} \quad (4)$$

Damit sind die Erhaltungsgleichungen instationär für das Wasser und die Wärmeenergie zu lösen. Für die zylindersymmetrische Bohrung gilt für die Wärmeenergie die Erhaltungsgleichung 5. Q Wärme ist die Wärmeproduktion, die im Folgenden gleich 0 gesetzt wird.

$$-\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\Phi \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot \mathbf{v}_{\text{Wasser}}}{\hat{\lambda}} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\rho \cdot C}{\hat{\lambda}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{Q_{\text{Wärme}}}{\hat{\lambda}} = 0 \quad (5)$$

Für das Wasser gilt die hydraulische Erhaltungsgleichung (6). Q Wasser ist die Wasserproduktion, die im Folgenden ebenfalls gleich 0 gesetzt wird.

$$-\frac{k}{\eta} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} \right) + S \cdot \frac{\partial P}{\partial t} + Q_{\text{Wasser}} = 0 \quad (6)$$

Werden die Gleichungen 6 und 5 gekoppelt über Gleichung 4 für eine Bohrung gelöst, können die konduktiven - (7) und konvektiven (8) Wärmeflüsse am Bohrlochrand berechnet werden.

$$\mathbf{j}_{\text{konduktiv}} = -\lambda_{\text{Gestein}} \cdot \nabla T \quad (7)$$

$$\mathbf{j}_{\text{konvektiv}} = \Phi \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot T \cdot \mathbf{v}_{\text{Wasser}} \quad (8)$$

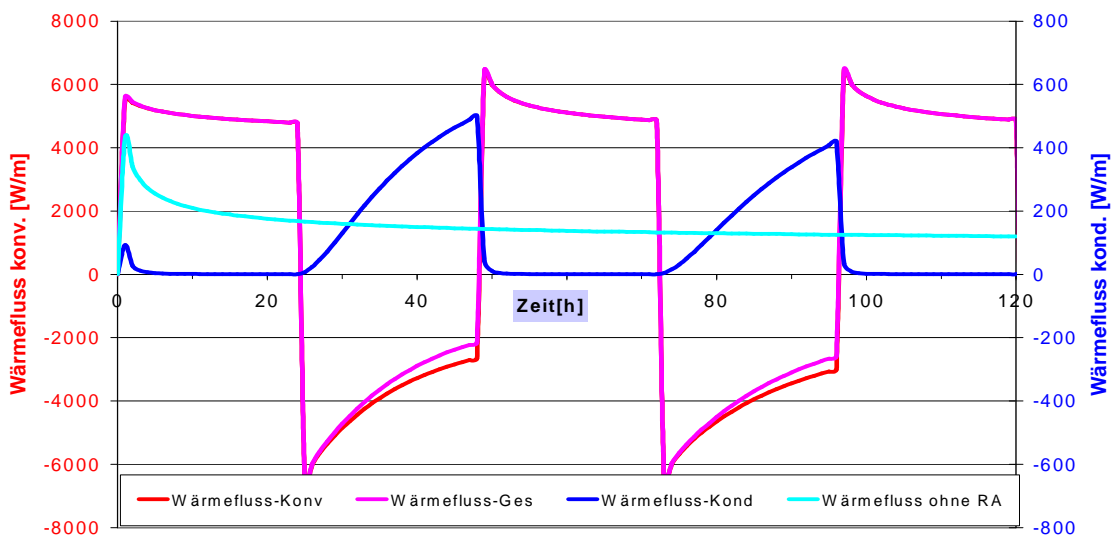


Abb. 3 : Wärmeflüsse am Bohrlochrand bei Temperaturabsenkung um 30 °C am Bohrlochrand ohne und mit Ring-raumanregung. Numerische thermohydraulische Berechnung mit dem GEO-TIP-Programm Multitrans

In Abb. 3 ist das Ergebnis einer solchen Rechnung für eine periodische Ringraumanregung mit einer Periodenlänge von 48h dargestellt. Als thermische Anregung wurde eine Auskühlung der Bohr-

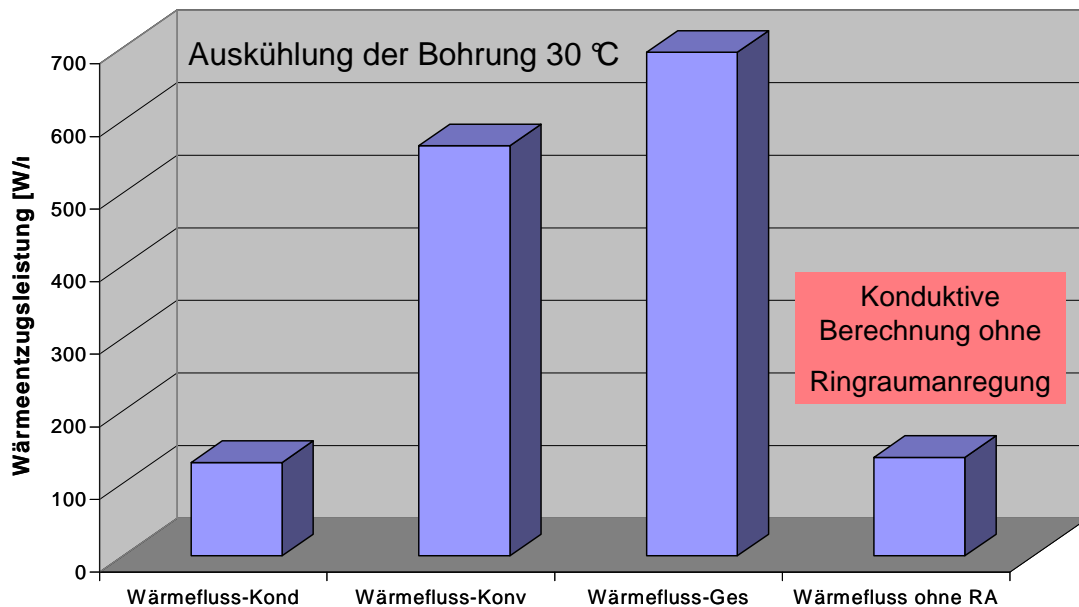


Abb. 4: Mittelwerte der Wärmeflüsse bei Ringraumanregung durch thermohydraulische Berechnung mit dem GEO-TIP-Programm Multitrans.

lochwand um 30 °C beginnend zum Zeitpunkt $t=0$ angenommen. Der hellblaue Wärmefluss ergibt sich für eine klassische Erdwärmesonde mit rein konduktivem Wärmezufuss in die Bohrung als Vergleich. Es gilt die Skala rechts am Diagramm. Wird nun im Ringraum eine periodische rechteckförmige hydraulische Druckschwankung von ± 0.1 MPa vorgegeben, ergibt sich für den konduktiven Wärmefluss an der Bohrlochwand die dunkelblaue Kurve, die auch der rechten Achse zugeordnet ist. Während der Druckerhöhung im Ringraum ist der konduktive Wärmefluss sehr klein, da das aus der Bohrung abströmende Wasser einen kleinen Temperaturgradienten an der Bohrlochwand erzeugt. Der hydraulisch bedingte Wärmefluss (rot), der der linken Achse zugeordnet ist, ist in der positiven Druckphase praktisch identisch mit dem gesamten Wärmefluss. Dieser Wärmefluss muss von dem Wärmetauscher aus der Bohrung abgeführt werden, um die Temperatur der Bohrlochwand auf der Auskühlung von 30 °C zu halten.

Wird dann nach 24 h ein Unterdruck im Ringraum der Bohrung erzeugt, sorgt das in die Bohrung zurückströmende Wasser für steilere negative Temperaturgradienten an der Bohrlochwand und damit zu einer Erhöhung des konduktiven Wärmeflusses in die Bohrung. Der konvektive Wärmefluss wird negativ.

Bei diesen Rechnungen wurde die Speicherefähigkeit der Bohrung aus Gründen der Vereinfachung nicht mitberücksichtigt.

Entscheidend für die Bewertung des Ringraumverfahrens hinsichtlich der Wärmeentzugsleistung ist nun die Integration der Wärmeflüsse über eine volle Periodenlänge. Es ergeben sich die in Abb. 4 dargestellten mittlere Wärmeentzugsleistungen. Zum Vergleich ist rechts wieder das Ergebnis einer Rechnung ohne Ringraumanregung dargestellt.

Es ergibt sich aus Abb. 4, dass der durch die Ringraumanregung erzeugte konvektive Wärmefluss in die Bohrung den vierfachen Wert des konduktiven Wärmeflusses annimmt. Das heißt, dass durch die Ringraumanregung die Wärmeentzugsleistung einer tiefen Erdwärmesonde durchaus um einen Faktor 6 gesteigert werden kann.

3. Perspektive

Drei Wärmetauscherkengrößen tiefer Erdwärmesonden müssen optimiert werden, damit ein wirtschaftliches Konzept einer geothermischen Energiegewinnung durch tiefe Erdwärmesonden realisiert werden kann. Dies sind die Erhöhung der Wärmeentzugsleistung, die Erhöhung der Auslauf-temperatur des Wärmetauschers und die Verringerung des Energieverbrauches für die Pumpen

der kontinuierlich und kostenintensive für den Betrieb der Erdwärmesonde notwendig ist. Die Ringraumanregung erhöht die Wärmeentzugsleistung drastisch. Die Realisierung einer hohen Auslauf-temperatur hängt mit der thermischen Isolierung des im Wärmetauscher genutzten Steigrohres zusammen.

Alle Planungen tiefer Erdwärmesonden, ob mit oder ohne Ringraumanregung, haben mit diesem technischen Problem zu kämpfen. Es wird ein sehr gut thermisch isoliertes Steigrohr benötigt, um den Wärmeaustausch zwischen auf- und absteigender Wärmetauscherflüssigkeit möglichst klein zu halten. Abb. 5 zeigt verschiedene Konzepte solcher thermisch isolierter Steigrohre.

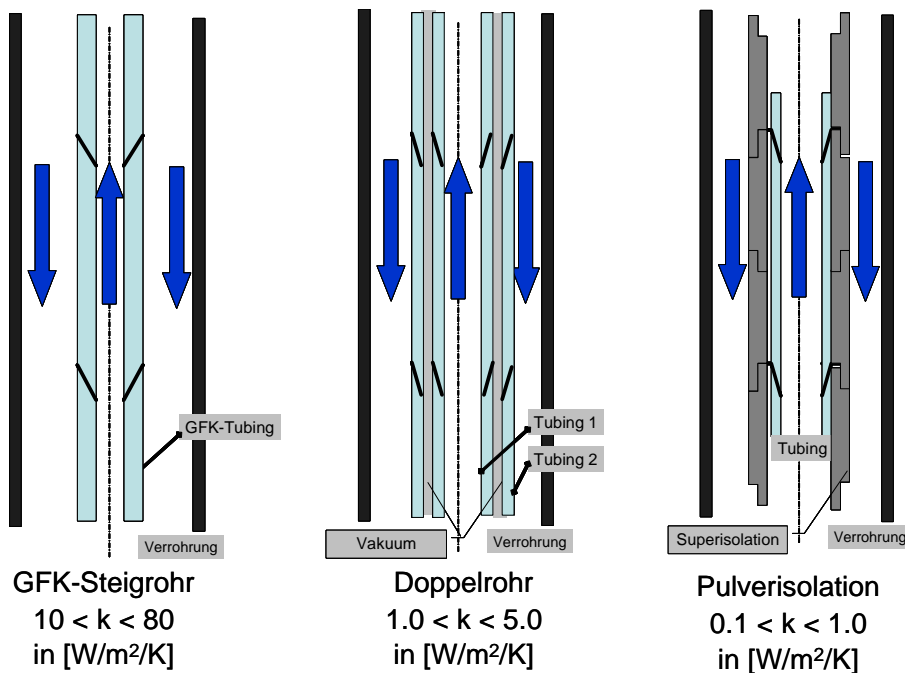


Abb. 5: Thermische Steigrohrisolierungen mit erreichbaren Wärmedurchgangszahlen für Kunststoffrohre, evakuierte Doppelrohre und Pulverisolationen.

Kessels [4] diskutiert diese Isolierungen für tiefe Erdwärmesonden und zeigt, dass eine Steigrohrsuperisolation sehr wichtig ist, um hohe Auslauf-temperaturen aus dem untertägigen Wärmetauscher zu erreichen. Diese hohen Auslauf-temperaturen können auch durch den Einsatz thixotroper Wärmetauscherflüssigkeiten nicht realisiert werden [5]. Eine optimierte Auslegung tiefer Erdwärmesonden erfordert immer die Durchführung komplexer, meist numerischer Auslegungsrechnungen. Kessels et. al. entwickeln geeignete Berechnungsprogramme für konventionelle Erdwärmesonden [6-9]. Für die Optimierung des Verfahrens der Ringraumanregung sind allerdings Berechnungen mit gekoppelter Hydraulik notwendig, wie sie hier von der Firma GEO-TIP vorgestellt wurden.

Die Reduzierung der benötigten elektrischen Leistung für die Zirkulationspumpen kann durch eine Nutzung der Druckdifferenzen zwischen der kalten absteigenden und der warmen aufsteigenden Wärmetauscherflüssigkeit erreicht werden. Dieser Effekt wird erfolgreich in Prenzlau genutzt, wo diese gravitative Pumpe ausschließlich genutzt wird.

Gelingt es in tiefen Erdwärmesonden, diese drei Einflüsse gekoppelt zu optimieren, sind tiefe Erdwärmesonden schon heute eine wirtschaftliche technische Maßnahme zur Gewinnung geothermischer Energie. Auch in der flachen Geothermie kann die Ringraumanregung einen positiven Beitrag zur Erhöhung der Wärmeentzugsleistung von Erdwärmesonden liefern.

Quellenangaben

- [1] RWTH1, http://www.superc.rwth-aachen.de/cms/front_content.php?idcat=25
- [2] Projekt Arnsberg, <http://www.geothermie.de/news-anzeigen/arnsberg-neustart-fur-tiefste-erdwarmerbohrung-in-nrw.html>
- [3] Prenzlau, http://stadtwerke-prenzlau.de/CMS1//index.php?option=com_content&task=view&id=21&Itemid=36
- [4] Kessels, W., Thermisches und hydraulisches Wärmeentzugspotenzial tiefer Erdwärmesonden, Energie und Rohstoffe 2009, Goslar, 363-372
- [5] Kessels, W. (2008): Auslegungsrechnungen für eine Erdwärmesonde in der 4000 m tiefen KTB Vorbohrung, Geothermiekongress 2008, Karlsruhe.11.-13. November 2008; Geothermische Vereinigung (GTV)
- [6] Kessels, W. (1987): Das Wärmetauschersystem einer Tiefbohrung, Sitzungsbericht der 17. Sitzung der FKPE-Arbeitsgruppe „Ermittlung der Temperaturverteilung im Erdinnern, Herausg. : G- Buntebarth, TU Clausthal auch Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Archiv-Nr. 101 304, Hannover
- [7] Kessels, W. (1988): Abschätzung der zu erwartenden Temperaturstörungen im Gebirge durch das Erstellen der Kontinentalen Tiefbohrung der Bundesrepublik Deutschland (KTB), KTB-Report 88-4, S. 155-177, Hrsg.: Draxler, J. K. & Hänel, R., Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.

Dr. Winfried Kessels, Zur Papenkuhle 9a, 31303 Burgdorf
E-Mail: geo-tip@t-online.de