

Technologie und Potential von Phasenwechsellsonden für tiefe Bohrungen - ein Ausblick zur Entwicklung

Rolf Michael Wagner

BLZ Geotechnik GmbH, Gommern

Keywords: Erdwärmesonde, Verdampfung, Phasenwechsel, tiefe Sonde

Zusammenfassung

Mit der Phasenwechsellsonde für große Tiefen ist eine Technologie (z.Z. nur als Gedankenmodell) aus den umfangreichen Erfahrungen der oberflächennahen Anwendungen abgeleitet, die besonders bei nicht fündigen hydrothermalen Erkundungsbohrungen eine Nachnutzung anbietet. Ebenso ist die Nutzung vorhandener Altbohrungen und Schachtanlagen für die Wärmegewinnung ein Anwendungsgebiet, da es mit einem oder mehreren geschlossenen Kreisläufen die Wärme ohne direkte Wechselwirkung mit dem Gebirge zulässt. Für eine qualifizierte Bewertung ist eine mathematisch-physikalische Beschreibung und Simulation des Wärmeentzugs aus dem Erdreich in Verbindung mit den Wärmetransport- und Wärmeübertragungsprozessen im Sondenrohren als vordringliche verfahrenstechnische und geoströmungstechnische (Wärme) Aufgabe zu lösen. Die Phasenwechsellsonde lässt besonders in größeren Tiefen deutliche Vorteile gegenüber den Zirkulationssonden erwarten.

1. Einleitung

Der Schwerpunkt des Vortrages liegt bei den Entwicklungsmöglichkeiten für die Anwendung tiefer Phasenwechsellsonden zur Wärmegewinnung aus Bohrungen. In den letzten Jahren hat sich das Interesse an Phasenwechsellsonden deutlich gesteigert und es liegen umfangreiche praktische Erfahrungen bei der Anwendung vor. Allein von der BLZ Geotechnik GmbH wurden über 200 Phasenwechsellsonden zum Einsatz gebracht. In der Regel haben diese Sonden eine Länge von 100 m. An ausgewählten Standorten wurden auch bereits Teufen von 200 m mit Phasenwechsellsonden installiert. Auch aus den Veröffentlichungen von Kruse /1/ und Mittermayer /2/ sind Sondenlängen bis zu 100 m im Gespräch. Als die weltweit tiefste Phasenwechsellsonde wird von Kölbel /3/ die 250 m tiefe CO₂-Sonde erwähnt.

Bei theoretischen Betrachtungen hat man sich bereits mit größeren Teufen beschäftigt. In der Studie von Ehrbar /4/ beschäftigt man sich mit maximalen Sondenlängen von 300 m. Es eröffnet sich demnach ein großer, bisher ungenutzter Teufenbereich für die potentielle Anwendung von Phasenwechsellsonden. Ein Teufenbereich, der von der Tiefbohrtechnik sicher beherrscht wird und in dem Projekt „Aachen Super C“ mit einer Zirkulationssonde auch realisiert wurde. Für die Phasenwechsellsonden wurde von Hamann /5/ der Teufenbereich bis zu 6.000 m betrachtet. Auch wenn die vorgestellten Leistungserwartungen für Strom mit 43 kW_{elektr.} bei einer optimierten Teufe von 5.600 m in keinem Verhältnis zum Aufwand stehen, so sind doch die angegebenen Wärmeleistungen mit 1.000 kW_{therm} aus einer 3.500 m tiefen Sonde beachtlich /5/. Aus den vorhandenen Erfahrungen bei der Anwendung von oberflächennahen Phasenwechsellsonden erscheint aber der Schritt von 100 m auf mehrere tausend Meter Länge zu ehrgeizig. Trotzdem weckt die mittlere abgeschätzte Entzugsleistung von 285 W/m /5/ Erwartungen, die Technologie der Phasenwechsellsonden in größeren Teufen zum Einsatz zu bringen.

Die Gefahr der Fehldeutung begleitet auch die verfahrenstechnische Entwicklung bei der Beurteilung des Strömungsverhaltens in den extrem langen Sondenrohren. Die Strömungsprozesse unter den Rahmenbedingungen der Verdampfung sind in derartig langen schlanken Behältern noch nicht experimentell untersucht. Informationen stehen aus dem Grundla-

genwerk VDI-Wärmeatlas in der Regel nur für Längen bis maximal 10m zur Verfügung. Die Aussage von Leonardo da Vinci (1493) – „*Mir aber scheint, es sei alles das Wissen eitel und voller Irrtümer, das nicht von der Erfahrung, der Mütter aller Gewissheit, zur Welt gebracht wird und nicht im wahrgenommenen Versuch abschließt*“ – sollte auch für die Aufgabe als Motto dienen.

Für eine seriöse Bearbeitung von tiefen Phasenwechsellsonden ist ein Wechselspiel zwischen theoretischer Bearbeitung und praktischer Bestätigung der projizierten Erwartungswerte schrittweise erforderlich. Eine experimentelle Bestätigung kann nicht mit verkleinerten Anlagen nachgewiesen werden, da die Strömungsprozesse insbesondere innerhalb der Sonde von einer Vielzahl nicht modellhaft simulierbarer Randbedingungen abhängig sind. Als Alternative bietet sich deshalb die Computersimulation des Wärmeentzugsprozesses an, aber auch die muss durch Versuche belegt werden.

2. Technologien der Phasenwechsellsonden

2.1 Technologie des Sondenkreislaufes

- Rieselfilmverdampfung
- Naturumlauf des Arbeitsmittels
- Zwangsumlauf des Arbeitsmittels

Gegenwärtig werden Rieselfilmverdampfersonden angestrebt. Sie haben den Vorteil, dass bei geringem Verdampfungsdruck an dem an der Sondeninnenwand nach unten rieselnden Flüssigkeitsstrom ein latenter Wärmeübergang auf das Arbeitsmittel erfolgt. Die Sondenometrie bestimmt die Benetzung der Rohrwand und den Flutpunkt. Nur eine vollständige Benetzung gewährleistet auch einen optimalen Wärmeentzug aus dem Gebirge. Bei der gegenläufigen Strömungsrichtung zwischen dem abwärts fließenden Rieselfilm und dem aufsteigenden Dampf kann es bei zu kleinem Sondenradius im Flutpunkt zum Stillstand kommen. Der Arbeitsmitteldampf kann in der Sonde keine Wärme nach oben transportieren und er kann seine Kondensationswärme nicht an den Wärmepumpenkreislauf übertragen.

Die Technologie des Naturumlaufs scheidet für sehr tiefe Sonden aus, da der Druck der hydrostatischen Säule des Arbeitsmittels bereits bei Längen von 10 bis 100 m je nach Kälteigenschaften den Verdampfungsdruck übersteigt. Unter diesen Bedingungen wäre nur ein konvektiver Wärmeübergang auf das Arbeitsmittel möglich. Die fehlende Verdampfung verhindert gleichzeitig den effektiven Wärmetransport über dem Arbeitsmitteldampf, so dass die Phasenwechsellsonden in diesem überstauten Abschnitt nicht genutzt wird.

Diese Nachteile kann man mit einem Zwangsumlauf beseitigen. Sowohl für den Naturumlauf als auch für den Zwangsumlauf ist die Sonde mit einem zusätzlichen Transportrohr im Zentrum des Sondenrohres auszurüsten. Über dieses Transportrohr wird das flüssige Arbeitsmittel mit hoher Dichte nach unten geleitet. Beim Naturumlauf erfolgt die Zirkulation durch die Dichtedifferenz zwischen Ringraum und Rohrwand. Beim Zwangsumlauf wird der Kreislauf durch eine zusätzliche Pumpe in Bewegung gehalten. Mit den beiden Varianten wird eine vollständigere Benetzung der Sondeninnenfläche in dampfgefüllten Ringraum als Vorteil gegenüber dem Rieselfilm erwartet.

2.2 Arbeitsmittel

Für die Phasenwechsellsonde haben sich verschiedene Arbeitsmittel, wie Ammoniak, Propan und Kohlendioxid, bereits bewährt. Mit der zunehmenden Teufe und der steigenden Gebirgstemperatur sind auch Arbeitsmittel mit höheren Verdampfungsdrücken zu beachten.

Die aus bohrtechnischen Bedingungen vorgegebene Geometrie mit relativ geringen Sondendurchmessern erfordert ein Arbeitsmittel, das bei möglichst geringem Massestrom einen großen Wärmetransport ermöglicht. Hier liefert Ammoniak mit seiner hohen Verdampfungsenthalpie die günstigsten Werte.

Für die Phasenwechselsonde ergeben sich besonders in größeren Teufen mit zunehmender Gebirgstemperatur Vorteile. Um einen effizienten Wärmeentzug zu erzielen, müssen folgende Bedingungen erfüllt werden.

- Die Benetzung des Sondenrohres (innen) muss über die gesamte Länge gewährleistet sein. Ein Abreißen des Flüssigkeitsfilmes ist zu verhindern.
- Der Wärmetransport über den aufsteigenden Arbeitsmitteldampf darf durch die herabfließende Flüssigkeit nicht behindert werden. Der Grenzwert des Flutpunktes darf nicht erreicht werden.
- Während des Dampfaufstieges aus tiefen Sondenabschnitten ist eine Kondensation im oberen („kalten“) Sondenabschnitt zu verhindern. Für die Nutzung der gesamten Sondenlänge sind deshalb Sondentemperaturen während der Wärmeentnahme einzusetzen, die eine Mindesttemperaturdifferenz von ca. 5 K gegenüber der minimalen Erdreichtemperatur betragen.

3. Installationsvarianten für tiefe Phasenwechselsonden

3.1 Stufenerdwärmesonde

Mit einer Stufenerdwärmesonde für eine Rieselfilmverdampfung wird das Sondenrohr aus mehreren Sondenrohrabschnitten gebildet. Somit kann der jeweilige Sondenrohrabschnitt an die günstigsten thermodynamischen Bedingungen angepasst werden. Die Bohrung kann in den unteren Abschnitten mit kleineren Durchmessern, wie bei Tiefbohrungen üblich und damit preiswerter, ausgeführt werden.

Diese teleskopartige Anordnung trägt dem Prozess der Rieselfilmverdampfung Rechnung, da im oberen Bereich die größte Menge an flüssigem Kältemittel nach unten strömt und ebenfalls in diesem Abschnitt der gesamte Kältemitteldampf aus dem Wärmeentzug durch das Sondenrohr transportiert werden muss. In den darunter liegenden Abschnitten der Phasenwechselsonde werden die Strömungsverhältnisse günstiger, so dass die Durchmesser reduziert werden können. Die Sondenrohrabschnitte sind weiterhin so zu bemessen, dass die Kältemittelmenge, die Oberfläche des Innenrohres vollständig benetzt und eine Strahlenbildung des herunterlaufenden flüssigen Arbeitsmittels verhindert. Solange der aufsteigende Dampf den herunterrieselnden Flüssigkeitsfilm nicht behindert, ist der Grenzwert des Flutpunktes nicht erreicht. Der gleiche Durchmesser wird so lange aufrecht erhalten, solange keine Gefahr besteht, dass der Flutpunkt selbst bei extremen Betriebszuständen erreicht werden kann.

Wenn bereits eine entsprechende Menge des flüssigen Kältemittels, das im Rieselfilm nach unten strömt, verdampft ist, kann der nächste Sondenrohr-Abschnitt mit einem geringeren Durchmesser ausgeführt werden. Mit der Verringerung des Durchmessers erreicht man gleichzeitig eine turbulente Strömung im Rieselfilm und damit einen besseren Wärmeübergang zum Entzug der Wärme aus dem Erdreich. Bei sehr langen Sondenrohren können mehrfach Verjüngungen des Sondenrohres installiert werden.

Mit einer derartig ausgebildeten Sondenkonstruktion ist es möglich, wesentlich größere Tiefen für Phasenwechselsonden zu erschließen, ohne dass der unerwünschte Effekt des Behältersiedens im unteren Abschnitt auftritt. Bei einer optimalen Dimensionierung wird der Verdampfungsdruck von dem hydrostatischen Druck des flüssigen Kältemittels nicht überschritten. Die Verdampfung erfolgt über die gesamte Sondenlänge. Die „trockenen“ vom Kondensat nicht benetzten Stellen auf den Rohrinneoberflächen werden vermieden.

Ein weiterer Vorteil entsteht durch die bessere Nutzung der Regenerationsphase für die Wärmeverteilung in der Stufenerdwärmesonde. Mit dem großen Durchmesser des oberen Sondenrohrabschnittes wird natürlich ein größerer Wärmeentzug auf das Erdreich ausgeübt, als bei den Sondenrohrabschnitten mit den kleinen Durchmessern. Das hat zur Folge, dass in dem oberen Sondenrohr-Abschnitt eine größere Temperaturabsenkung als in den darunter liegenden erfolgt. Im Ruhezustand der Stufenerdwärmesonde, das heißt, wenn keine Wärme von der Sonde an die Wärmepumpe abgegeben wird, erfolgt eine Regeneration des Temperaturfeldes entlang der Sonde. Diese Regeneration wird wesentlich unterstützt, in dem aus den unteren noch weniger ausgebeuteten Bereichen eine Verdampfung verstärkt einsetzt und der Dampf an den stark beanspruchten oberen Bereichen kondensiert und damit Wärme aus dem unteren Erdreich im oberen Bereich einträgt, die dann bei der nächsten aktiven Phase der Stufenerdwärmesonde effektiv nutzbar ist.

3.2 Kaskadenerdwärmesonde

Kaskadenerdwärmesonden sind mehrfach übereinander angeordnete einfache Phasenwechselsonden. In den Phasenwechselsonden wird ein flüssiges Kältemittel durch die Erdwärme verdampft. Der Wärmetransport ist sehr effizient, so dass die gesamte Verdampfungswärme fast verlustfrei oben als Kondensationswärme übergeben werden kann. Dieser Wärmetransport funktioniert aber nur dann effektiv, wenn der Verdampfungsdruck in der Sonde unterschritten wird. Lange Arbeitsmittelsäulen mit einem hohen hydrostatischen Druck bringen die Verdampfung und damit einen effizienten Wärmeentzug aus dem Erdreich wie oben beschrieben zum Erliegen. Insbesondere im Anfahrprozess würde sich das Arbeitsmittel unten sammeln. Deshalb müssen die Sondenabschnitte mit einem geschlossenen Kreislauf in ihrer Länge begrenzt werden.

Bei tiefen Erdwärmesonden treten von dem oberflächennahen Temperaturniveau von ca. 10 °C an der Oberfläche bis zu den Temperaturen auf der Sohle der Bohrung von bis zu 150 °C erhebliche Temperaturunterschiede auf, die eine Anwendung der effizienten Verdampfertechnologie in einem geschlossenen Kreislauf ausschließen würden. Eine Verdampfung bei hohen Temperaturen im Tiefenbereich der Sonde würde zur Kondensation des Kältemittels im oberen Bereich bei niedrigen Temperaturen führen und damit dem Prozess schaden oder gar zum Erliegen bringen. Denn erst wenn der obere Gebirgskörper auf die Temperatur aufgeheizt durch Eintrag der Kondensationswärme wäre, bei der keine Kondensation während des Wärmeentzugs im Sondenrohr auftritt, kann das gesamte Sondenrohr effizient genutzt werden. Mit der Kaskadentechnologie wird der extrem lange Behälter (Sondenrohr) in mehrere kleine Sondenabschnitte aufgeteilt. Mit diesen Kaskadensonnen kann die Wärme aus dem Erdreich abschnittsweise entzogen und aus einem in sich geschlossenen unteren Wärmeentzugs-Abschnitt an einen in sich geschlossenen oberen Wärmeentzugs-Abschnitt übertragen werden. Zur Realisierung des Verfahrens wird die erprobte Anordnung zum Transport von Wärme aus den bereits erprobten Phasenwechselsonden genutzt. Für jeden Abschnitt wird ein Temperaturbereich im Erdreich überspannt, der ausreichend klein ist, um einen stabilen Kreislauf ohne Überschreitung des Flutpunktes und mit guter Benetzung des Sondenrohres mit der Rieselfilmverdampfung aufzubauen. Die entzogene Wärme aus dem unteren Abschnitt wird über einen Wärmetauscher, der für den unteren Abschnitt als Kondensator und für den oberen als Verdampfer arbeitet, übertragen. Auf der Verdampferseite wird der Wärmetauscher überflutet gefahren. Das am Wärmetauscher als Flüssigkeit vorliegende Arbeitsmittel auf dem Boden des oberen Abschnittes wird verdampft und transportiert als Dampf die Wärme zum nächsten Wärmetauscher. Dieser Prozess wird solange fortgesetzt bis die Energie den Wärmetauscher am Kopf der Sonde erreicht. Die Wärmeabnahme an dem Kopf der Verdampfersonde steuert den gesamten Prozess.

Der wesentliche Vorteil einer Kaskadendirektverdampfersonde besteht in der höheren spezifischen Wärmeentnahme pro Sondenmeter und dem stabilen Betrieb in großen Tiefen. Der

äußerst verlustarme Transport von Energie aus großer Tiefe nach oben bleibt dabei erhalten. Lediglich die Verluste bei der Wärmeübertragung von Abschnitt zu Abschnitt sind ein in Kauf zu nehmender Nachteil dieser Anordnung. Mit der Einteilung der Verdampfersonde in Abschnitte kann der Wärmeentzug auf das teufenabhängige Temperaturniveau und auf die spezifischen Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs in dem anstehenden Teufenabschnitt angepasst werden. In den jeweiligen Abschnitten können unterschiedliche für das Temperaturniveau besonders geeignete Arbeitsmittel verwendet werden.

Literaturverzeichnis

- /1/ Kruse, H.; Stiller, W. u. Rüssmann, H.
Stand der Entwicklung und Markteinführung des FWK-CO₂-Erdwärmerohres
Zeitschrift Geothermische Energie 56 + 57/2007
- /2/ Mittermayer, K.
Selbstzirkulierende Tiefensonde mit CO₂
Schulung Heliotherm – M-TEC, Mai 2004
- /3/ Kölbel, Thomas
Geothermie aus Sicht eines Energieversorgers Dübendorf, März 2008
- /4/ Ehrbar, M.; Peterlanger, A.; Basetti, S.; Rohner, E.
Pumpenlose Erdwärmesonden
Bhundesamt für Energie, November 2004
- /5/ Hamann, J.
Verfahren zur wirtschaftlichen Erzeugung von Wärme und Strom aus
Tiefbohrungen
Amotherm AG, Juli 2000