

Die Leistungsfähigkeit der neuen Ringrohr-Erdwärmesonde und des ModX-Softwarepaketes – Messwerte und Simulation im Vergleich

Dipl.-Ing. Sebastian Paulo (RRS Geotherm, Freiberg)

Dipl.-Ing. Sadko Meusel (Transflow GmbH, Freiberg)

Prof.i.R. Dr.-Ing. Frieder Häfner (TU Bergakademie Freiberg)

Dr.-Ing. Rolf Michael Wagner (BLZ Geotechnik GmbH, Gommern)

KURZFASSUNG

Die hochleistungsfähige Ringrohr-Erdwärmesonde, die derzeit von den Unternehmen BLZ Geotechnik GmbH und Transflow Prozesstechnik GmbH in den Markt eingeführt wird, bietet die Möglichkeit, den Wärmeertrag gegenüber den traditionellen U-Sonden um mehr als 30% zu steigern. Kern der Neuentwicklung ist die Vergrößerung der wärmeaufnehmenden Fläche und sichere Verfüllung durch das patentierte Verfüllnetz, in dem 10 dünnwandige PE-Rohre mit 16 mm Außendurchmesser und ein 40 mm Aufstiegsrohr angeordnet sind. Innerhalb dieser Neuentwicklung wurden die Simulationsprogramme ModThermWg für die Planung und ModTRT für die Interpretation von Thermal Response Test entworfen, die mit einem 3-D numerischen Berechnungsgitter alle

Sondentypen (U-Typen, Koaxial- und Ringrohr-Typen) ohne analytische Vereinfachungen erfassen.

Im Vortrag werden die Messwerte einer Anlage, die aus 3 EWS ein mehrgeschossiges Wohnhaus versorgt, die im gesamten Jahr 2022 gewonnen wurden, vorgestellt. Sie erlauben den Vergleich von Ringrohrsonde mit Verfüllnetz, ohne Verfüllnetz und Doppel-U-Sonde unter gleichen Bedingungen im Winter- und Sommerbetrieb. Diesen Messungen werden Simulationsergebnisse beigefügt, die die gute Nachbildung der tatsächlichen Leistung nachweisen.

Die Ringrohrsonde erweist sich insbesondere im kombinierten Wärme- und Klimakältebetrieb als besonders vorteilhaft und erreicht Mehrleistungen gegenüber Doppel-U-Sonden bis zu 60%. Diese

Eigenschaft macht sie besonders geeignet für kalte Nahwärmenetze, die in der Sommer- und Übergangszeit stundenweise bzw. auch monatelang industrielle Abwärme einspeichern müssen.

Zur Illustration werden Vergleiche von Mess- mit Simulationsdaten gezeigt.

EINLEITUNG

Die oberflächennahe Geothermie ist ein wichtiger Baustein zur Energiewende und wird mit vermutlich mittelfristig steigenden Stromkosten weiter an Bedeutung zunehmen. Aktuell sind die Kapazitäten der Bohrunternehmen voll ausgeschöpft. Dies spiegelt sich auch in den stark gestiegenen Preisen je Bohrmeter bzw. für die gesamte Geothermieanlagen wider. Generell unterliegen Bauprojekte einem enormen Kostendruck, welcher auch zu Lasten von Geothermieprojekten geht. Die Anlagen werden weniger leistungsfähig ausgeführt oder entfallen komplett.

Hier setzt im Bereich der Zirkulationssonden die neuartige Ringrohrsonde (RRS) [1] an, die mit mindestens einem Drittel weniger Bohrmeter die gleiche Leistungsfähigkeit wie die herkömmliche Doppel-U-Rohrsonden-Technologie (32x2,9) besitzt. Insgesamt ist eine Kosteneinsparung von ca. 30 % möglich.

KURZBESCHREIBUNG DER RINGROHRSONDE (RRS)

Die RRS setzt sich aus 10 Ringrohren (16x1,5), angeordnet um ein Zentralrohr (40x3,7), zusammen. Ein Sondenkopf verteilt den Zulauf gleichmäßig auf die Ringrohre, ein Sondenfuß führt die Ringrohre dann in einem Zentralrohr zusammen. Die Ringrohre sind an ihrer Außenseite mit einem Gewebeschlauch verklebt. Anschließend wird die Sonde gebündelt und ähnlich der Doppel-U-Rohrsonden eingebaut. Bei der Verfüllung wird der Gewebeschlauch, vom Sondenfuß beginnend, aufgeweitet und nimmt die Ringrohre mit sich an die Bohrlochwand. Die Position der Ringrohre und des Zentralrohrs sind nun im Bohrloch fest definiert.

Daraus ergeben sich bezogen auf die Doppel-U-Rohrsonde folgende Vorteile:

- (fast) direkter Kontakt zum Erdreich
minimaler Wärmeübergabewiderstand
- 25 % mehr Rohroberfläche zur Aufnahme von Wärme
- minimaler thermischer Kurzschluss bzw. maximaler Abstand zwischen ab- und aufsteigenden Rohren
- kein preisintensives, thermisch hochleitfähiges Verfüllmaterial

erforderlich, da der Wandabstand gering ist.

Hieraus folgt ein wesentlich geringerer thermischer Bohrlochwiderstand.

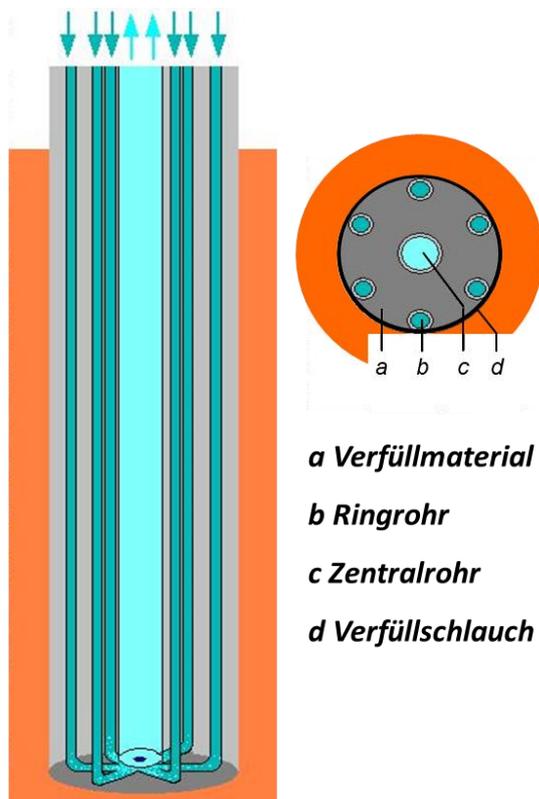


Abbildung 1: Prinzipaufbau einer Ringrohrsonde, nach [1]

Weitere Vorteile sind:

- erhöhte Verfüllqualität (keine Vermischung von Verfüllmasse mit Erdreich und Bohrspülung),
- Überbrückung von kleineren Hohlräumen / Klüften und somit Minimierung von Verfüllmaterialeinsatz und
- bestmögliche Trennung von Erdschichten und Grundwasserleitern.

Die Entwicklung der Ringrohrsonde wurde mittels Simulation begleitet. Bezogen auf eine Bohrung mit 150 mm, stellen 10 Rohre in der Dimension D16 ein Optimum dar. Mehr Rohre werden keine relevante Verbesserung der Leistungsfähigkeit nach sich ziehen, weniger Rohre verschlechtern diese aber deutlich.

KURZBESCHREIBUNG DES MODX-SOFTWAREPAKETES

Um zu ermitteln, welche Erdwärmesonde für den entsprechenden Anwendungsfall und Bedarf erforderlich ist, gibt es vereinfachende und komplexere Berechnungshilfen. Vereinfachende Berechnungshilfen arbeiten mit Kennfeldern / Tabellen, etwas komplexere mit analytischen Formeln mit im Anwendungsbereich akzeptablen Abweichungen und sehr genaue mit numerischen Berechnungsverfahren.

Für die RRS sind numerische Berechnungsverfahren mit dem ModX-Softwarepaket (ModThermWg, ModGeo3D, ModTRT) verfügbar. Sie bauen auf der gleichen mathematisch-numerischen Logik auf, sind aber für ihre jeweiligen Einsatzgebiete konzipiert (in dreidimensionalen Zylinder- bzw. kartesischen Koordinaten).

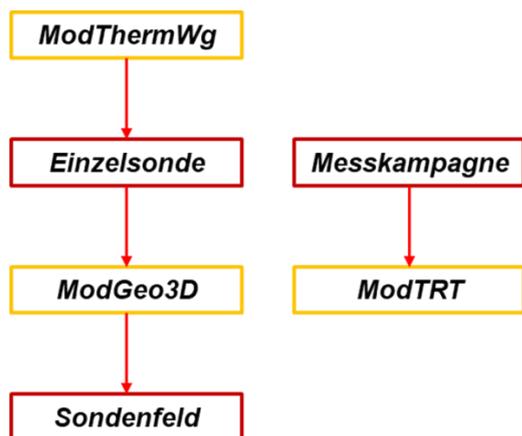


Abbildung 2: Prinzipschema des ModX-Softwarepaketes

ModThermWg simuliert den Wärmetransport zwischen Erdreich und einer Einzelsonde. Hierbei sind Eingangsparameter wie Sondentyp und -abmessungen, Bodenwärmeleitfähigkeit und andere Bodeneigenschaften, Grundwasserströmung, thermische Leistung, Jahresarbeitsstunden, Kühlung und andere Parameter anzugeben.

ModTRT wird für die Auswertung des (Geo)Thermal Response Tests (TRT) eingesetzt, sowohl für RRS als auch für die gängigen Erdwärmesondentypen. Die erforderlichen Eingangsparameter werden im TRT gemessen und bereitgestellt.

Für eine Sondenfeldberechnung kommt *ModGeo3D* hinzu. Es nutzt die Simulation für Einzelsonden aus *ModThermWg* und wendet diese auf einen im 3D-Schema definierten Erdkörper an. Hierbei ist es unerheblich, ob alle Erdwärmesonden (EWS) im Sondenfeld gleich

sind oder ob jede EWS eine eigene Dimension und einen eigenen Typ aufweist.

Das ModX-Paket arbeitet ohne analytische Vereinfachungen, sondern mittels numerischer Lösungen der Wärmetransportgleichungen im 3D-Raum in jedes und in/aus jedem Einzelrohr in seiner definierten Lage im Bohrloch (inkl. Wandabstand der Rohre zum Bohrloch). Dadurch werden der thermische Kurzschluss, der Einfluss der Rohrwanddicke, die Eigenschaften des Verfüllbaustoffs und bei Bedarf die Grundwasserströmung berücksichtigt. Ergebnis ist ein exakter, zeitlich hochaufgelöster Betriebsverlauf, der sich auch in Referenzanlagen bestätigt hat.

Mittels *ModThermWg* und *ModGeo3D* wurde eine Simulationskampagne durchgeführt. Dabei entstandene Kennfelder stehen intern für eine softwaregestützte Schnellauslegung für Einzelsonden und Sondenfelder bereit. Ausgelegt wird der Bedarf an Ringrohrsonden und Doppel-U-Rohrsonden in Anzahl und Länge im Vergleich. Für größere Sondenfelder ist eine anschließende genauere Auslegung unerlässlich. Es stehen mit der Schnellauslegung aber bereits gute Anhaltspunkte bereit. Eine Onlineversion ist in Arbeit.

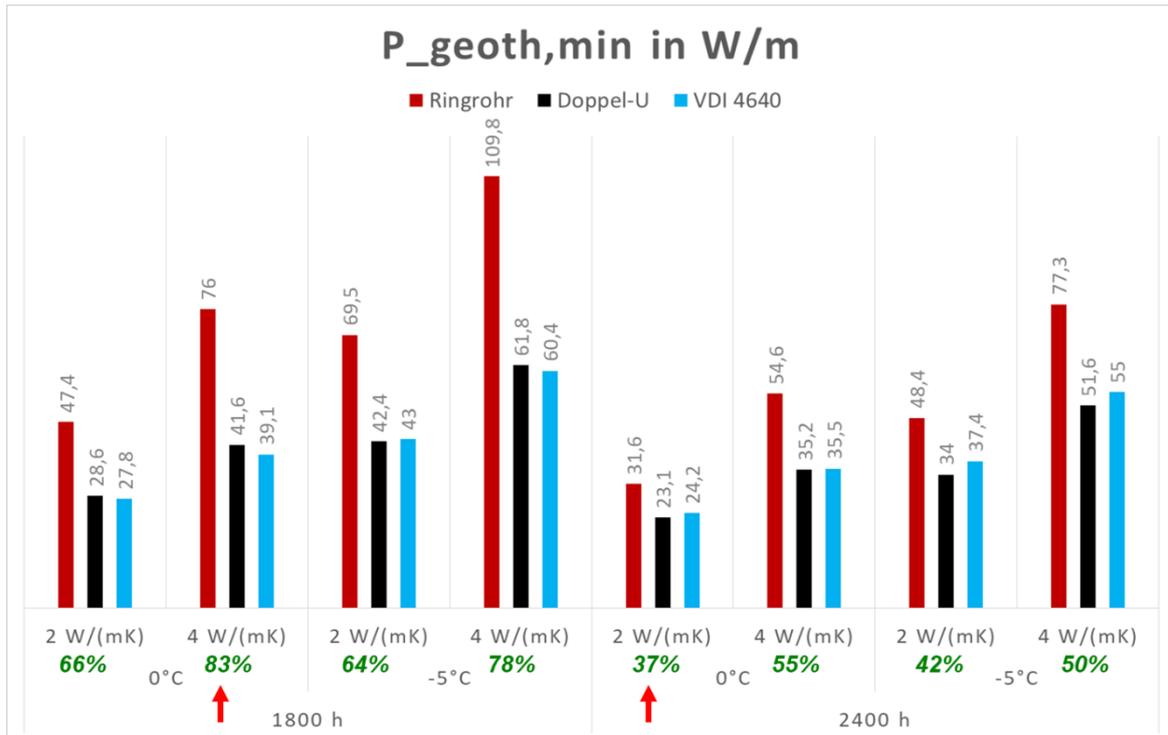


Abbildung 3: Spezifische Leistung für Ringrohrsonde, Doppel-U-Rohrsonde und VDI 4640 über Betriebsstunden der Wärmepumpe je Jahr (h), VL-Temperatur (°C) und Bodenwärmeleitfähigkeit (W/(mK))

VALIDIERUNG VON MODTHERMWG MIT VDI 4640

Zur Überprüfung der Simulationsergebnisse ist ein Vergleich mit dem aktuellen Stand des Wissens und der Technik zweckmäßig. So wurden die Simulationen für die Ringrohrsonde (10 á 16x1,5, 40x3,7) und für die Doppel-U-Rohrsonde (32x2,9) streng nach dem Schema der VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 Seite 104 ff. durchgeführt. Es zeigt sich in Abbildung 3, dass die Werte aus der VDI 4640 (rechter Balken der Dreiergruppe) mit den simulierten Werten aus ModThermWg für die Doppel-U-Rohrsonde (mittlerer Balken) sehr gut übereinstimmen. Die Werte der VDI 4640

basieren auf Berechnungen mit EED für Doppel-U-Rohrsonden mit einer Wärmeleitfähigkeit des Füllmaterials von 0,8 W/(mK). Damit ist der erste Schritt der Validierung erfolgreich abgeschlossen worden.

Für die Ringrohrsonde zeigen sich deutlich höhere spezifische Leistungen als für die Doppel-U-Rohrsonde. Evident ist, dass die Leistungsfähigkeit der Ringrohrsonde gegenüber der Doppel-U-Rohrsonde bei geringeren Jahresbetriebsstunden und höheren Bodenwärmeleitfähigkeiten auch relativ steigt.

Der Nachweis für die hohe Leistungsfähigkeit der Ringrohrsonde wird im Folgenden gezeigt.

VERGLEICH VERSCHIEDENER ERDWÄRMESONDEN (EWS) AN EINER REFERENZANLAGE

Zur Bestätigung der hohen Leistungsfähigkeit der Ringrohrsonde nach den Simulationsdaten wurde ein reales Kundenprojekt mit verschiedenen EWS realisiert und mit zusätzlicher Messtechnik (VL-, RL-Temperaturfühler, Volumenstrommesser) ausgestattet. Anonymisiert wird das aus 3 EWS bestehende Sondenfeld als Anlage E geführt. Es besteht aus einer RRS mit Verfüllschlauch (RR1), einer RRS ohne Verfüllschlauch (RR2) und einer Doppel-U-Rohrsonde (US3).

Sie sind im Abstand von 7 m zueinander abgeteuft (Tiefe 80 m) und an die gleiche Wärmepumpe angeschlossen. Die Volumenströme (18 l/min.) und die VL-Temperaturen (Injektionstemperaturen) aus der Wärmepumpe sind gleich groß. Das ermöglicht einen direkten Vergleich der Leistungsfähigkeit der drei EWS.

Das Verfüllmaterial hat für alle drei EWS den Wärmeleitwert von 0,8 W/(mK). Die Position der Doppel-U-Rohrsonden im Bohrloch ist allerdings zumeist willkürlich, was stellenweise auch Wandanlage ausdrücklich einschließt. Das vermindert den thermischen Bohrlochwiderstand.

Der Verlauf der Messdaten als Tagesmittelwerte ist in Abbildung 4 gezeigt. Bei einer Bodenwärmeleitfähigkeit von ca. 1,8 W/(mK) ergibt sich für die Ringrohrsonde (RR1) eine um 37 % höhere Leistungsfähigkeit gegenüber der Doppel-U-Rohrsonde (US3) bei gleicher Zirkulationsrate. Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, liegt die Rücklauftemperatur der RR1 um ca. 0,4 K über der von US3, so dass eine Erhöhung der Zirkulationsrate in RR1 um 6 l/min. auf 24 l/min. zu einer weiteren Leistungserhöhung um etwa 8 % geführt hätte. Die Volllastnutzungsdauer der Anlage E liegt bei ca. 2200 Jahresbetriebsstunden.

Die Ringrohrsonde ohne Verfüllschlauch (RR2) ist nur minimal besser als die Doppel-U-Rohrsonde – eine Folge der willkürlichen Rohranordnung gegenüber der RR1.

An der passiven Kühlung nehmen RR2 und US3 praktisch kaum Teil. Fast die komplette Kühlung übernimmt die mit dem Erdreich optimal verbundene Ringrohrsonde (RR1).

In einer dritten Stufe der Validierung (Abbildung 5) werden die gemessenen VL-

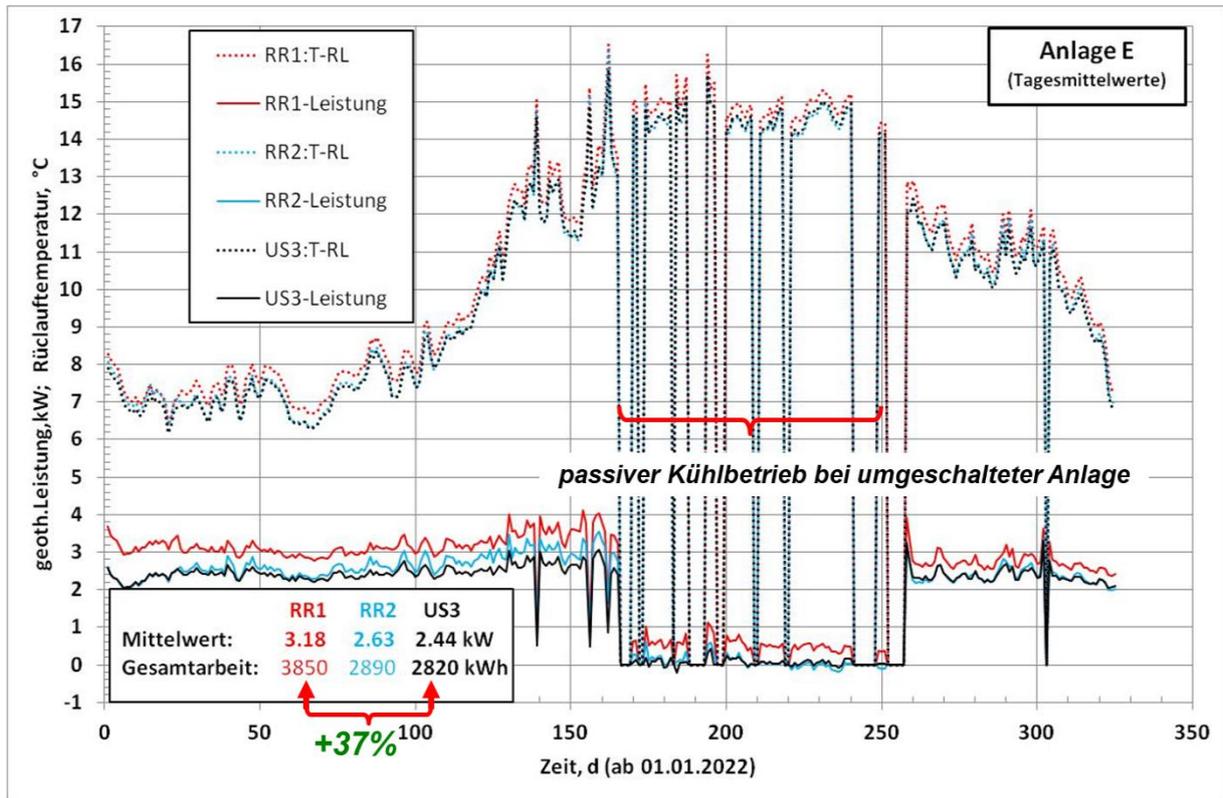


Abbildung 4: Jahresverlauf in Tagesmittelwerten für die Ringrohrsonde mit Verfüllschlauch (RR1), die RRS ohne Verfüllschlauch (RR2) und Doppel-U-Rohrsonde (US3) für die Referenzanlage E

Temperaturen der EWS als Eingangsparameter für die Simulation in ModThermWg eingesetzt. Simulationsverlauf und Messpunkte ähneln sich sehr. Die mittlere quadratische Abweichung der simulierten von der gemessenen Wärmeleistung für die Doppel-U-Rohrsonde liegt bei 16,5 % (bezogen auf die

die Ringrohrsonde bei 21,7 %. Die Abweichungen bewegen sich in einem akzeptablen Korridor. Messungen und Simulation zeigen für die Ringrohrsonde auch hier wieder die höhere Leistungsfähigkeit.

Auch die Messungen der zweiten und dritten Stufe der Validierung zeigen die hohe

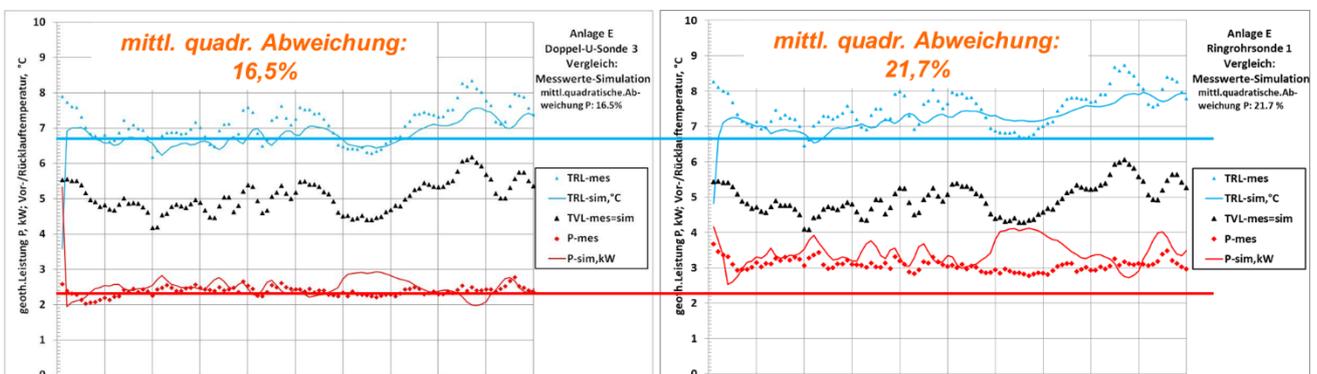


Abbildung 5: Doppel-U-Rohrsonde (US3) und Ringrohrsonde (RR1) im direkten Vergleich gemäß Messungen und Simulation

mittlere gemessene Wärmeleistung), die für

Leistungsfähigkeit der Ringrohrsonde und des ModX-Softwarepakets.

ZUSAMMENFASSUNG

Die als Wärmewende bezeichnete Umstellung der Gebäudeheizung und -klimatisierung auf CO₂-freie bzw. -arme Verfahren lässt sich nur unter Einsatz von Wärmepumpen erreichen.

Die von Erdwärmesonden versorgte Anlage hat dabei die beste energetische Effizienz. Gerade hier gibt es in Errichtung und Betrieb großes Einsparpotenzial. Die neuartige Ringrohrsonde hebt dieses Einsparpotenzial. Einsparungen von mindesten 35 % an Bohrm Metern oder an Anzahl Bohrungen vermindern die erforderlichen Aufwendungen für

- die Bohrungen und den dadurch verbundenen Energie- und Materialaufwand,
- den Verbrauch für das Sondenmaterial und die Sole,
- bei Sondenfeldern (ab 2 EWS) auch den obertägigen Verrohrungsaufwand und
- den elektrischen Stromverbrauch der Soleumwälzpumpe durch kürzere Strömungswege.

In Summe ergeben sich dadurch Kosteneinsparungen in Anschaffung und Betrieb.

In Kombination mit der erforderlichen Geschwindigkeit, in der die Energiewende vorangehen soll, muss auch die Kapazität an Heizungsbauern und Bohrunternehmen für die Errichtung von neuen Heizungs- und Erdwärmesondenanlagen berücksichtigt werden. Prinzipiell könnten bei 35 % Einsparung an Bohrm Metern auch deutlich mehr Geothermieanlagen errichtet werden.

Die Ringrohrsonde hat das Potenzial die Energiewende weiter zu beschleunigen, erheblich Ressourcen einzusparen und den CO₂-Fußabdruck deutlich zu senken.

LITERATUR

[1] Häfner, F., Wagner, R.M., Meusel, L.: Bau und Berechnung von Erdwärmelanlagen. Springer Vieweg, 2015

SCHLÜSSELWÖRTER

Ringrohrsonde, Geothermie, Energiewende, Simulation, Erdwärmesonde, Doppel-U-Rohrsonde, Sondenfelder