

## **Das Verbundvorhaben QEWS II – Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II**

**Hanne Karrer <sup>a)</sup>, Frank Burkhardt <sup>b)</sup>, Kilian Hagel <sup>a)</sup>, Alexander Kirschbaum <sup>a)</sup>, Roland Koenigsdorff <sup>c)</sup>, Linda Makni <sup>g)</sup>, Simeon Meier <sup>d)</sup>, Manfred Reuß <sup>a)</sup>, Mathieu Riegger <sup>e)</sup>, Julian Rolker <sup>e)</sup>, Hagen Steger <sup>f)</sup>, Adinda Van de Ven <sup>c)</sup>, Sascha Wilke <sup>f)</sup>, Roman Zorn <sup>g)</sup>**

a) ZAE Bayern – Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.

b) Frank Burkhardt GmbH

c) Hochschule Biberach

d) enOware GmbH

e) Solites – Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme

f) KIT – Karlsruher Institut für Technologie

g) EIFER – European Institute for Energy Research

**Keywords:** Oberflächennahe Geothermie, Erdwärmesonde, Qualitätssicherung

### **ZUSAMMENFASSUNG**

Im Verbundvorhaben QEWS II werden verschiedene Qualitätsaspekte bei Erdwärmesonden und ähnlichen Systemen im Bereich der Oberflächennahen Geothermie betrachtet. Hierzu zählt der Aufbau eines Prüfstandes, mit dem Messeinrichtungen für Thermal Response Tests überprüft werden können. Des Weiteren werden die Dichtungseigenschaften von verfüllten Erdwärmesonden mittels einer neu entwickelten variablen Systemtriaxialzelle untersucht. Ebenso werden in situ Messverfahren zur Qualitätsüberwachung und -monitoring von Erdwärmesonden entwickelt. Darüber hinaus wird ein Verfahren entwickelt, welches die Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden verbessern soll. Auch die Modellierung geothermischer Quellsysteme wird in diesem Projekt bearbeitet. Hierbei werden konsistente Auslegungsmodelle für verschiedene oberflächennahe geothermische Anlagensysteme entwickelt und implementiert. Alle Ergebnisse sowie die Expertise der Projektbeteiligten fließen in den internationalen IEA ECES Annex 27 ein. Dort werden Empfehlungen und Vorgehensweisen zur Qualitätssicherung während der Auslegung, dem Bau und der Überwachung von Erdwärmesondenfeldern/-anlagen beschrieben. Zusammen decken die Teilprojekte ein breites Themenspektrum und wichtige Aspekte der Qualitätssicherung von Erdwärmesonden und oberflächennahen Geothermieanlagen ab.

### **1. EINLEITUNG**

Auf Grund der großen Bandbreite an Anwendungen und der hohen Flexibilität kann die Oberflächennahe Geothermie mit Erdwärmesonden und verwandten Systemen einen wichtigen Beitrag zur Energiewende liefern. Wegen des Eingriffs in den Untergrund und den möglichen Folgen für Grundwasser und Boden muss bei Planung, Bau und Betrieb mit besonderer Sorgfalt gearbeitet werden, um einen effizienten Betrieb bei hoher Anlagenlebensdauer zu gewährleisten und potenzielle Schäden zuverlässig zu vermeiden. Qualitätssicherung ist deshalb in allen Lebensphasen der Anlage von der Planung bis zur Inbetriebnahme, während des Betriebs und nach der Stilllegung von besonderer Bedeutung.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi geförderte Verbundvorhaben „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II mit Beteiligung am IEA-ECES-Annex 27“ (FKZ: 03ET1386A-G) untersucht mit seinen sechs Teilprojekten verschiedene Aspekte der Qualitätssicherung. Für die Durchführung der Forschungsarbeiten haben sich das ZAE Bayern (Garching), das Institut für Angewandte Geowissenschaften am KIT (Karlsruhe), EIFER (Karlsruhe),

das Forschungsinstitut Solites (Stuttgart), die Hochschule Biberach, die Firma enOware GmbH sowie das Bohrunternehmen Burkhardt zu einem Forschungsverbund für oberflächennahe Geothermie zusammengeschlossen.

## 2. DIE TEILPROJEKTE

### 2.1 Teilprojekt 1: Verfahren zur Überprüfung der Messeinrichtungen für Thermal Response Tests

Der Thermal Response Test wurde Anfang der 2000er Jahre in Deutschland eingeführt und hat sich als Verfahren zur in situ Bestimmung thermischer Parameter des Untergrunds für größere Anlagen bewährt. Allerdings weisen die Geräte teilweise erhebliche Unterschiede auf bedingt dadurch, dass einerseits die Messeinrichtung meist von den TRT-Anbietern selbst konzipiert und gebaut werden und andererseits durch die unterschiedlichen, in der Literatur veröffentlichten Auswerteverfahren.

In diesem Teilprojekt ein Prüfstandsverfahren zur Qualifizierung und Überprüfung von TRT-Geräten entwickelt. Damit kann neben dem TRT-Gerät selbst auch das Auswerteverfahren mitgeprüft werden. Da es sich um eine Prüfstandsmessung handelt, bei der die Erdwärmesonde emuliert wird, kann die Prüfung unter standardisierten und reproduzierbaren Randbedingungen durchgeführt werden. Die Überprüfung erfolgt auf Grundlage der Vorgaben in der VDI Richtlinie 4640 Blatt 5 (VDI 4640 Blatt 5).

Hierzu wurde eine künstliche Erdwärmesonde errichtet. Das zu überprüfende TRT-Gerät kann sich an die künstliche Erdwärmesonde wie an eine reale Erdwärmesonde anschließen und einen TRT durchführen. Vom Prüfstand werden zwei Kreise bereitgestellt, die eine Doppel-U Sonde, sowie bei Benutzung nur eines Kreises eine Einfach-U Sonde emulieren (Abb. 1).

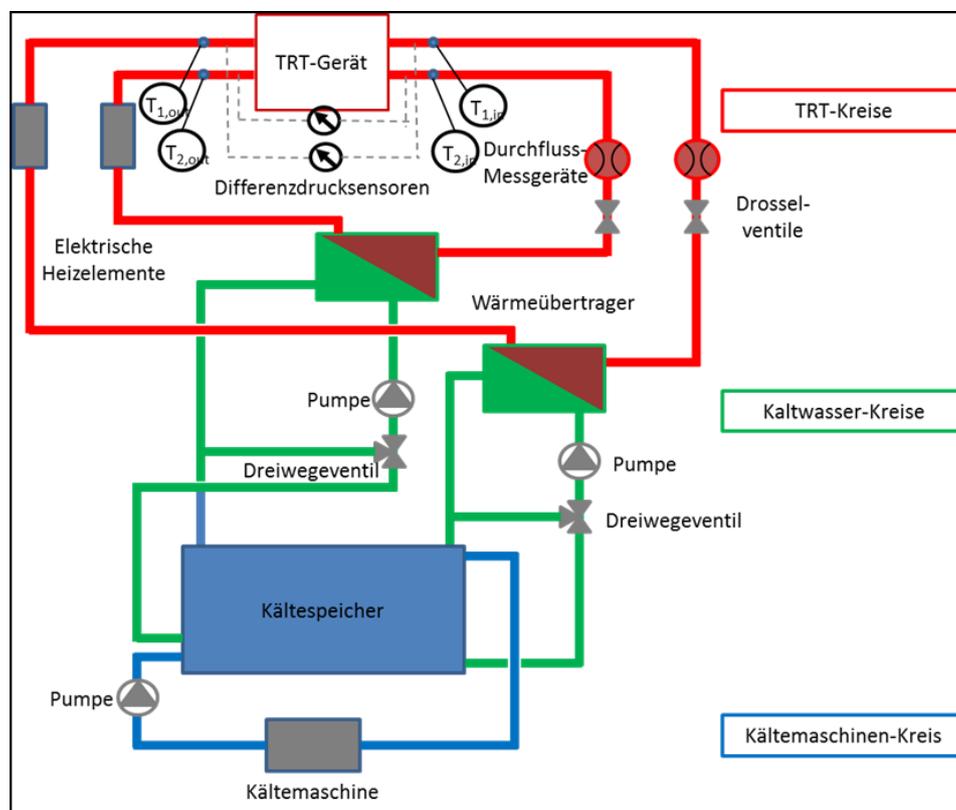


Abb. 1: Schemazeichnung des Prüfstandes „Künstliche Erdwärmesonde“.

Diese Kreise sind über Wärmeübertrager, welche die Entzugsleistung der Erdwärmesonde darstellen, an einen Kältespeicher angeschlossen. Der Kältespeicher wird von einer Kältemaschine auf einer konstanten Temperatur gehalten. Elektrische Heizelemente dienen zur Feinregelung der an das TRT-Gerät zurückgelieferten Temperatur. Diese Austrittstemperatur wird mit der Eintrittstemperatur, dem Volumenstrom und der vom TRT-Gerät eingespeisten Leistung mit Hilfe des Linienquellenmodells nach dem Verfahren Hardware-in-the-Loop berechnet. Die Regelung des Prüfstands erfolgt über eine SPS.



Abb. 2: links: Fertig aufgebauter Prüfstand; rechts: TRT-Gerät an künstlicher Erdwärmesonde angeschlossen.

Abb. 2 links zeigt den fertig errichteten Prüfstand. In Abb. 2 rechts ist zu sehen, wie das ZAE-eigene TRT-Gerät an den Prüfstand angeschlossen ist. Erste Ergebnisse des Prüfstands sind auf dem Posterbeitrag „QEWS II: TRT-Prüfverfahren – Erste Testergebnisse einer künstlichen Erdwärmesonde“ dargestellt.

## 2.2 Teilprojekt 2: Abdichtung von Erdwärmesonden-Bohrungen mit Verfüllmaterialien

Ein besonders wichtiger Aspekt ist die Qualität der Verfüllung, die eine dauerhafte Abdichtung der Bohrung und eine gute thermische Ankopplung der Sondenrohre an das Gebirge gewährleisten soll. Diese Dichtwirkung darf sich durch die im Betrieb u. U. auftretenden Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen nicht signifikant verschlechtern.

Das zweite Teilprojekt „Abdichtung von Erdwärmesonden-Bohrungen mit Verfüllmaterialien“ dient der Verfahrensentwicklung zur Überprüfung der Abdichtung des Systems „Erdwärmesonde - Bohrung mit Sondenrohren und Verfüllbaustoff“ im Laborversuch unter reproduzierbaren, realitätsnahen Randbedingungen. Hierzu wurde eine Systemtriaxialzelle entwickelt, die den Einbau von in Länge und Probenquerschnitt variablen Systemprobekörpern erlaubt und mit der es möglich ist die hydraulische Leitfähigkeit des Systems Erdwärmesonde sowie den Einfluss von Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen zu untersuchen. Siehe hierzu den Posterbeitrag „Versuchsaufbau zur Messung der hydraulischen Systemdichtheit von Erdwärmesonden“. Parallel dazu werden Messungen in Triaxialzellen nach DIN 18130-1 sowie im vorhandenen Großversuchsstand durchgeführt.

Die entwickelte Systemtriaxialzelle (vgl. Abb. 3) ist dem Versuchsaufbau nach DIN 18130-1 nachempfunden. Zur Vermeidung von Randumläufigkeiten um den Systemprobekörper kommt eine Latexmembran zum Einsatz. Die Messzelle ist auf einen maximalen Druck von 16 bar und einen maximalen Sättigungsdruck von 9 bar ausgelegt.



Abb. 3: Systemtriaxialzelle zur Bestimmung der hydraulischen Systemdichtheit von Erdwärmesonden. Links: Isometrische Darstellung. Mitte: Schnittdarstellung mit Verfüllmaterial (1), Sondenrohren (2), Latexmembran (3), Druckbehälterwand (4) bestehend aus abwechselnd gestapelten transparenten und opaken Ringen, Fluidkreiseintritt (5), Fluidkreisaustritt (6) am oberen Probenstempel und unteren Probenstempel (7). Rechts: Systemtriaxialzelle im aufgebauten Zustand.

In der Messzelle wird die Systemprobe bei triaxial anliegendem Zellendruck und isothermen Bedingungen mit einem definierten Differenzdruck beaufschlagt. Über zwei getrennte Wasseranschlüsse (Oberwasser und Unterwasser) wird dabei der vertikal durch die Probe strömende Volumenstrom gravimetrisch gemessen. Daraus lässt sich der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  für Wasser nach dem Darcy-Gesetz berechnen.

Mittels eines kombinierten Heiz- und Kühlaggregates, welches an einem druckgeregelten Temperierkreislauf an den Sondenrohren angeschlossen ist, kann zum einen der Systemprobekörper während der Messung des  $k_f$ -Wertes isotherm temperiert und zum anderen eine definierte radialsymmetrische Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung von innen nach außen durchgeführt werden.

### 2.3 Teilprojekt 3: In situ Messverfahren zur Qualitätsüberwachung und –monitoring von Erdwärmesonden

Im Rahmen dieses Teilprojektes sollen gezielt Messverfahren zur Qualitätsüberwachung in der Bau- aber auch Betriebsphase von Erdwärmesonden entwickelt werden.

Ein Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Miniatursensoren, die zu Inspektionszwecken und Qualitätsüberwachung in neuen und in bestehenden EWS eingesetzt werden können. Die Sensoren

sollen auch bei laufendem Betrieb die Erdsondenanlage überwachen können. Mit der gleichzeitigen Messung der Temperatur, des Drucks (Tiefe) sowie weiterer möglicher Messparameter, wie z. B. die elektrische Leitfähigkeit der Sole (Dichtekompensation und Qualität der Sole) kann mit Hilfe des Miniatorsensors das thermische Verhalten, Leistung und gegebenenfalls die Qualität einer Sonde abgeschätzt werden. Die autarken Messmodule und dazugehörigen automatisierten Schleusensysteme wurden bereits entwickelt und sind für die Integration in den messtechnischen Aufbau einer TRT Anlage vorbereitet (Abb. 4).

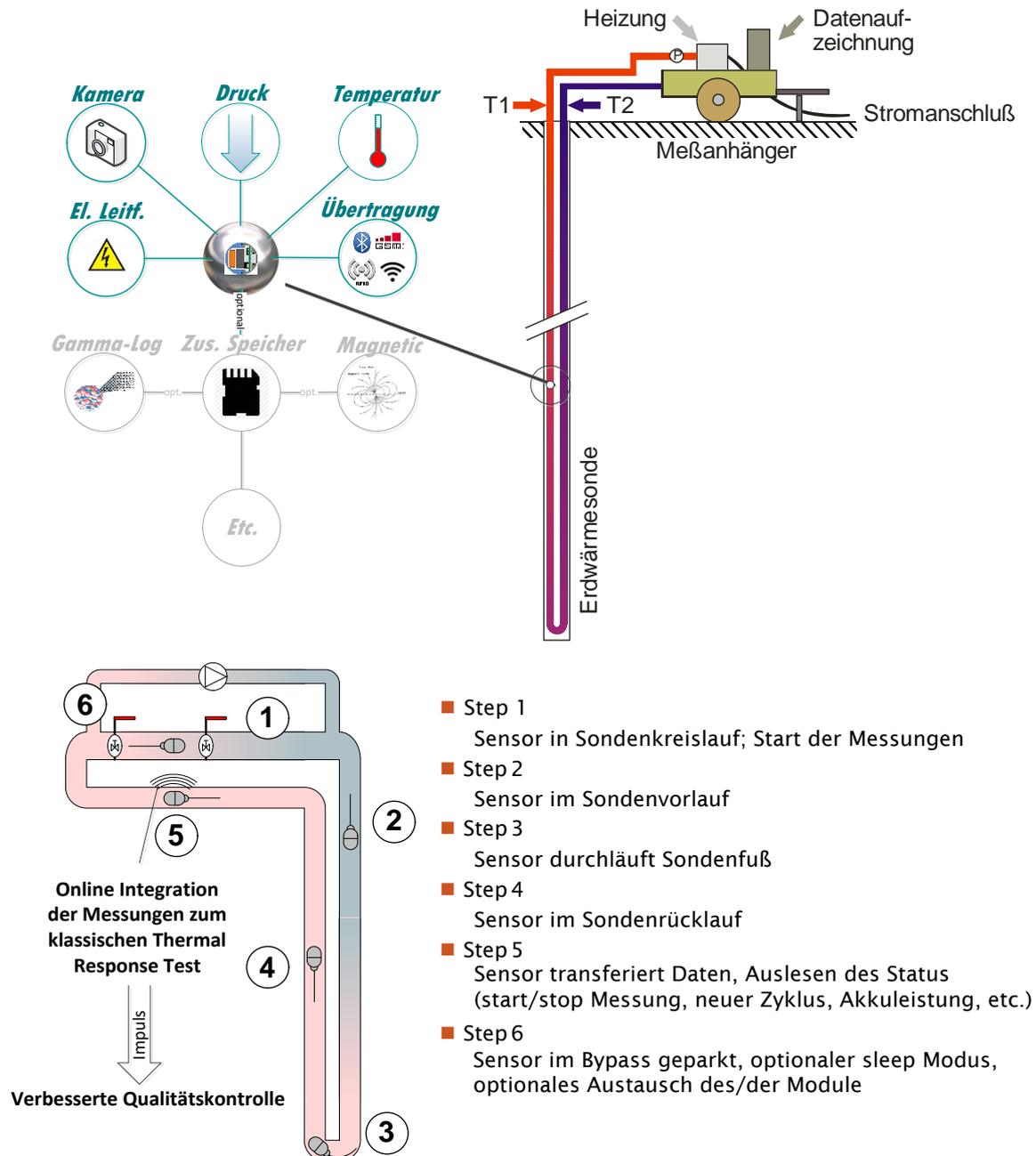


Abb. 4: Integration mobiler autarker Messmodule in den messtechnischen Aufbau einer TRT Anlage (Bild oben: schematischer Aufbau eines TRT's nach Gehlin 2002).

Die Messsysteme sind so entwickelt, dass sie prinzipiell in einer Erdwärmesonde permanent eingesetzt werden können. Verschiedene tiefenorientierte Temperaturmessungen und TRT's (Heizdrahtmethode) mittels der mobilen Sensoren (GEOsniff) im Vergleich mit faseroptischen Messungen und fest verbauten Temperatursensoren wurden bereits durchgeführt und dazugehörige theoretische Auswertemethoden entwickelt. Eigens für das Vorhaben wurde auf dem Firmengelände der Firma Burkhardt GmbH eine Kernbohrung für eine detaillierte Untergrundcharakterisierung abgeteuft und eine Erdwärmesonde installiert, die für umfangreiche Messkampagnen zur Verfügung steht. Exemplarisch kann der Abb. 5 das schematische Profil der Bohrung und ein Vergleich von Ruhetemperaturmessungen mit verschiedener Messtechnik entnommen werden.

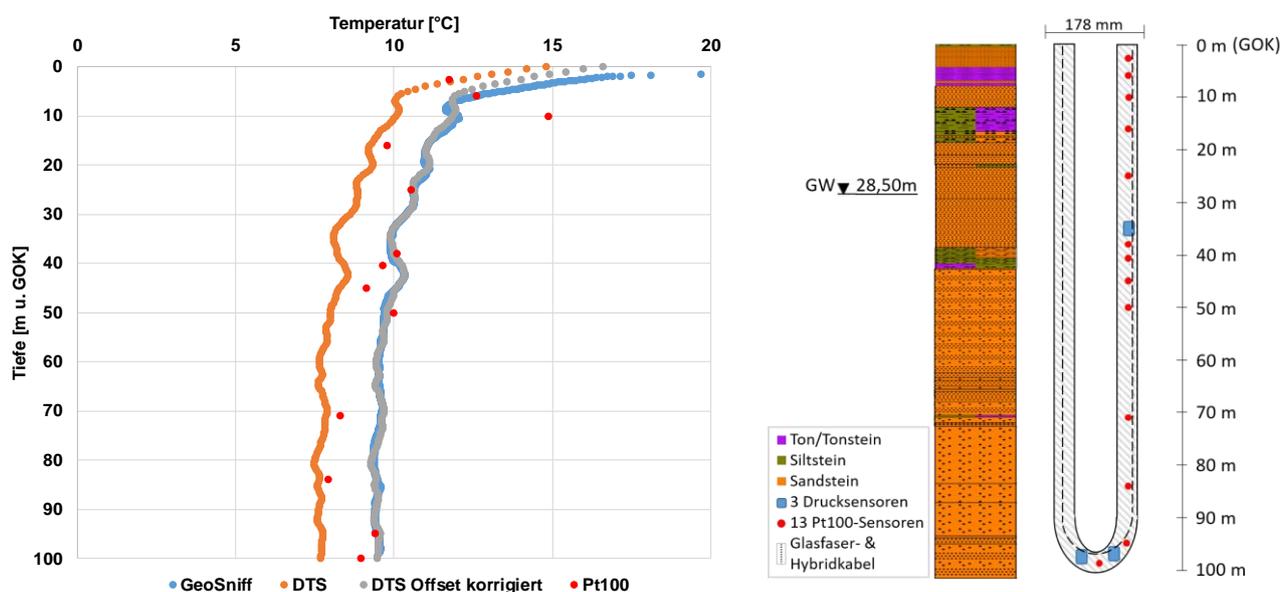


Abb. 5: rechts, Ruhetemperaturprofilmessungen mit dem Miniaturmessmodul (GEOsniff) im Vergleich mit faseroptischen DTS Messungen (Distributed Temperature Sensing) sowie fest verbauten Temperatursensoren.

Dabei zeigen die Offset-korrigierten DTS und GEOsniff Messungen eine sehr gute Übereinstimmung. Die PT100 Messungen weichen dagegen ab, möglicherweise aufgrund der Raumlage der Sensoren im Untergrund, heterogener Untergrundverhältnisse und/oder fehlerhafter Messungen. Im nächsten Schritt werden die Messtechniken in die TRT Anlage des ZAE Bayern integriert.

In der klassischen Tiefbohrtechnik wird über die elastischen Eigenschaften (Ultraschallmessungen) die Qualität der Zementation überprüft. Aufgrund der Dimensionierung im Bereich der EWS ist dies mit konventionellen Tools nicht möglich. Mit einem für EWS angepassten CBL (Cement Bond Log) wird die prinzipielle Machbarkeit einer Messsonde geprüft. In umfangreichen Voruntersuchungen mit verschiedenen Materialien wurden im Labor bereits erste Testexperimente durchgeführt, Auswertalgorithmen optimiert und getestet. Ein erster Prototyp einer auf Ultraschall basierenden Messsonde ist derzeit im Aufbau.

Zudem wird im Rahmen des Teilprojektes an der Machbarkeit von neuen automatischen Abdichtungskontrolltechniken mittels in situ Druckmessungen und Glasfaserkabelmessungen gearbeitet.

## 2.4 Teilprojekt 4: Verfahren zur Verbesserung der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden

Mit diesem Teilprojekt sollen zum einen grundlegende Erkenntnisse zur Entstehung von Mängeln in der Verfüllung von Erdwärmesonden erarbeitet und verfahrenstechnische Methoden zur Verbesserung der Verfüllqualität auf ihre Eignung untersucht werden. Zum anderen soll mit diesem Teilprojekt die Basis dafür geschaffen werden, Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe und Verfüllmethoden zukünftig wesentlich einfacher, schneller und kostengünstiger auf ihre Eignung zur Erreichung einer definierten Verfüllqualität untersuchen zu können. Da Verfüllqualitätsmängel in Abhängigkeit von deren Ausprägung sowie der geologischen/hydrogeologischen Situation von entscheidender Bedeutung für die korrekte Abdichtung von Erdwärmesonden-Bohrungen sein können, ist es wichtig, deren Entstehungsmechanismen zu ermitteln, um darauf basierend Lösungsansätze zu deren Vermeidung erarbeiten zu können. Die Untersuchungen in diesem Teilprojekt bauen diesbezüglich auf den abgeschlossenen Forschungsvorhaben EWSplus und EWS-tech sowie dem laufenden Forschungsvorhaben EWS-tech II auf.

Für die Untersuchungen im Forschungsvorhaben QEWS II wurde der aus dem Forschungsvorhaben EWS-tech vorhandene 6 m hohe Technikumsversuchsaufbau so weiterentwickelt, dass das Filtrationsverhalten von Erdwärmesondenverfüllsuspensionen bei verschiedenen durchlässigen Untergründen unter dem Einfluss des im verfüllten Bohrloch vorliegenden Drucks untersucht werden kann. Details zum Versuchsaufbau und den hierin durchgeführten Versuchen können Lutz et al. (2018) entnommen werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Teilprojekts liegt auf der Eignungsuntersuchung von Verfahren zur Verdichtung der Bohrlochverfüllung. Hierbei stehen speziell Untersuchungen zur Rütteltechnik im Blickpunkt. Vorbild ist das Verdichten beim Gießen von Beton, mit dessen Hilfe die Bildung von Einschlüssen und Lunkern im Beton vermieden wird.

Zunächst wurde eine Grundlagenrecherche zu Verdichtungs-/Rütteltechnik durchgeführt, mit deren Hilfe potentiell geeignete Methoden zur Verdichtung von Erdwärmesonden-Verfüllungen, die aus der Betontechnologie abgeleitet werden können, identifiziert wurden. Grundsätzlich kommen Hochfrequenz-Innenrüttler in Frage, allerdings könnte es hier zu einem unerwünschten Entmischen der Verfüllsuspension kommen. Alternativ ist das Stochern eine Möglichkeit, da hier die Gefahr des Entmischens erheblich geringer ist. Die praktische Anwendbarkeit und die Auswirkungen dieser verschiedenen intensiven Verdichtungsmethoden auf die Verfüllqualität von Erdwärmesonden wurden in der Folge mit grundlegenden Untersuchungen in einfachen Versuchsaufbauten (s. z.B. Abb. 6 links), mit Vorversuchen (s. Abb. 6 Mitte) und schließlich 10 Technikumsversuchen (s. Abb. 6 rechts) in 5 m hohen transparenten Rohren unter verschiedenen Randbedingungen (z.B. mit/ohne Rütteln/Stochern, verschiedene Ziehgeschwindigkeiten des Rüttlers, verschiedene Rüttelfrequenzen, verschiedene Verfüllbaustoffe, Rüttler direkt im Baustoff oder in PE-Rohr, Bohrloch mit/ohne Sondenrohre) untersucht.



Abb. 6: links: Hochfrequenz-Innenrüttler in PE-Sondenrohr der Maße 40 x 3,7 mm; Mitte: Vorversuche zur Rütteltechnik in 1 m hohen transparenten Rohren; rechts: Technikumsversuche zur Rütteltechnik in 5 m hohen transparenten Rohren.

Die verschiedenen Versuche zur Rütteltechnik wurden insbesondere im Hinblick auf eine mögliche, durch die Rüttelmethode erzwungene Separierung / Entmischung des Verfüllbaustoffs analysiert. Der Schwerpunkt der Analysen lag daher vor allem in der tiefenaufgelösten Ermittlung der Dichte, der magnetischen Suszeptibilität (bei Untersuchung magnetisch dotierter Verfüllbaustoffe), der Wärmeleitfähigkeit und der Porengrößenverteilung. Exemplarische Ergebnisse der Analysen der Technikumsversuche sind in Abb. 7 dargestellt.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass mit den durchgeführten Versuchen keine signifikante Auswirkung der Rütteltechnik auf die untersuchten Parameter und die Verfüllqualität festgestellt werden konnte.

In einem weiteren Arbeitspaket ist geplant auf Basis der aus diesem und anderen Projekten vorliegenden breiten Datenbasis zu Verfüllsuspensionen erste numerische Simulationsmodelle zur Nachbildung des Verfüll- und Aushärtevorgangs von Erdwärmesonden aufzubauen und durch Vergleich mit durchgeführten Versuchen auf ihre Eignung zu überprüfen. Da die Verfüllqualität von Erdwärmesonden durch zahlreiche Einflussparameter (Art der Verfüllmethode, Art des Verfüllmaterials, W/F-Wert der Verfüllsuspension, Anmischintensität, Strömungsgeschwindigkeit im Bohrloch, Art der Erdwärmesonde etc.) beeinflusst ist, könnten numerische Simulationen des Verfüll- und Aushärtevorgangs eine wesentlich einfachere und kostengünstigere Eignungsüberprüfung von EWS-Verfüllbaustoffen und Einbauverfahren ermöglichen als die heute hierzu erforderlichen Großversuche. Das Fernziel hierbei ist, dass zukünftig für die Eignungsüberprüfung von EWS-Verfüllbaustoffen lediglich die rheologischen Eigenschaften der Verfüllsuspensionen bestimmt werden müssen, die dann gemeinsam mit den Randbedingungen eines Bohrlochs in ein Simulationsmodell implementiert werden können.

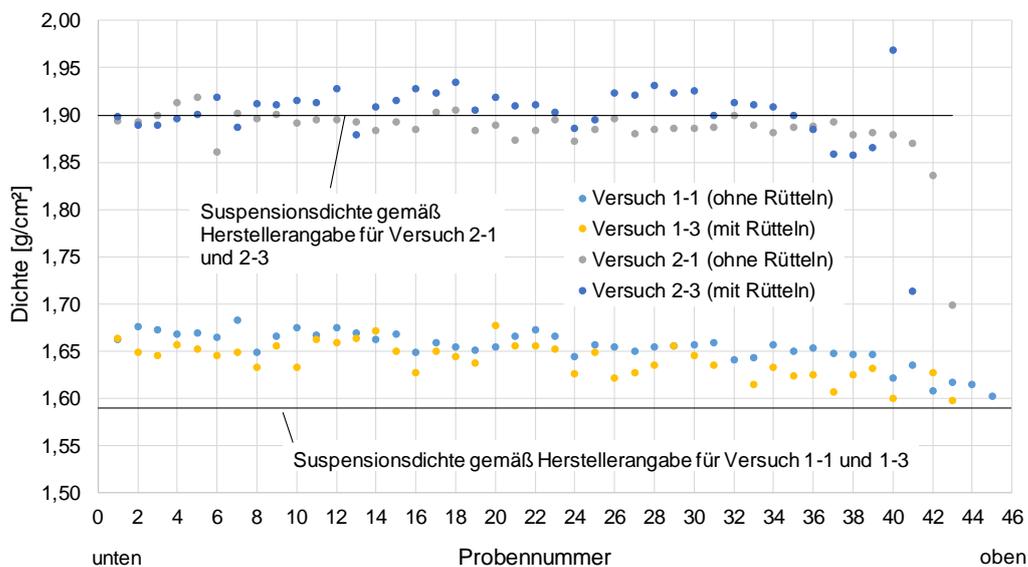


Abb. 7: Exemplarische, tiefenaufgelöste Analyse der 5 m hohen Technikumsversuche zur Untersuchung des Einflusses der Rütteltechnik

## 2.5 Teilprojekt 5: Entwicklung und Implementierung konsistenter Auslegungsmodelle für oberflächennahe geothermische Anlagensysteme (GEO-SYST+)

Das strategische Entwicklungsziel im Teilprojekt fünf „Entwicklung und Implementierung konsistenter Auslegungsmodelle für oberflächennahe geothermische Anlagensysteme (GEO-SYST+)“ ist die Überwindung von Defiziten durch die Schaffung einer durchgängig konsistenten Modellbasis für oberflächennahe geothermische Quellensysteme, sodass Auslegungs- und damit auch Wirtschaftlichkeitsberechnungen für alle Typen von Erdwärmesonden und anderen geothermischen Wärmequellen inkl. zugehöriger Systemkombinationen miteinander kompatibel und vergleichbar sind. Denn am Markt existiert eine Vielfalt an Auslegungsprogrammen für oberflächennahe geothermische Quellensysteme. Diese Programme greifen auf unterschiedliche Modell- und Rechenansätze zurück, jeweils mit entsprechenden Annahmen und Vereinfachungen. Diese Vereinfachungen sind breit gefächert und variieren sowohl je nach Quellensystem als auch je nach Implementierung in den Auslegungs- bzw. Simulationsprogrammen (Modell- und Implementierungsunterschiede). Es ist daher nicht sichergestellt, dass Unterschiede in den Auslegungsergebnissen für unterschiedliche Systeme nicht zumindest zum Teil von den Modellen und Rechenverfahren herrühren (und nicht von den Systemen selbst). Notwendig ist deshalb eine konsistente Modellbildung für die verschiedenen Systeme. Zur Gewährleistung der Konsistenz der Modellbildung wurde in (Van de Ven et al. 2018) die im Folgenden wiedergegebene Vorgehensweise präsentiert, welche möglichst weitgehend auf analytischen Ansätzen fußt und unterschiedliche Quellensysteme einheitlich abbilden kann:

Hierfür wurde analog zur Auslegung und Simulation von Erdwärmesonden, welche am weitesten fortgeschritten ist, vorgegangen. Bei den zugrundeliegenden Modellen wird unterschieden zwischen dem Wärmetransport im Erdwärmesonden-Bohrloch und dem Wärmetransport im umgebenden Erdreich, das z. T. in bohrlochnahe und fernere Bereiche unterteilt wird. Für die Planungspraxis sind Programme basierend auf diesen einfachen, i. d. R. ganz oder teilweise auf analytischen Ansätzen beruhenden Modellen weit verbreitet (z.B. EED, EWS, GEO-HAND<sup>light</sup>).

Im Bohrloch wird der Wärmetransport bei Erdwärmesonden i. d. R. mit einem Widerstandsmodell beschrieben, welches alle Wärmetransportvorgänge im Bohrloch in einem effektiven Bohrlochwiderstand  $R_{b,eff}$  zusammenfasst. Häufig wird der innere Bereich des geothermischen

Quellensystems (Bohrloch) lediglich stationär abgebildet, detailliertere Ansätze berücksichtigen jedoch auch die thermische Trägheit (Koenigsdorff et al., 2016).

Der Wärmetransport im Erdreich um die Erdwärmesonde(n) ist dagegen stets instationär zu betrachten. Ein weit verbreiteter und etablierter Ansatz ist die Verwendung von Sprungantwort-Funktionen (*g-functions*). Diese können als Kennlinien aus numerischen Simulationen oder analytischen Lösungen gewonnen werden (Eskilson, 1987).

Analytische thermische Modelle des Erdreichs um Erdwärmesonden basieren i. d. R. auf Erweiterungen der Lösung für die Temperaturentwicklung um eine momentane punktförmige Wärmequelle in einem unendlich ausgedehnten, homogenen Medium. Durch Integration der Punktquelle über der Zeit können kontinuierliche Wärmequellen abgebildet werden und eine räumliche Integration ermöglicht grundsätzlich die Darstellung beliebiger Geometrien (Linien, Flächen, Volumenkörper usw.). Für oberflächennahe Wärmequellen ist der Übergang vom unendlichen auf einen halbusendlichen Körper erforderlich. Die Erdoberfläche wird dabei z. B. vereinfacht als adiabate oder isotherme Randbedingung abgebildet, welche z.B. durch eine zur Erdoberfläche spiegelsymmetrische Quelle (Method of image) erreicht wird (Carslaw et al., 2011). Im Falle ausschließlicher Wärmeleitung ohne konvektiven Einfluss durch strömendes Grundwasser wird die Wärmequelle als ruhend betrachtet, während der Einfluss einer Grundwasserströmung durch eine entsprechende Bewegung der Quelle abgebildet werden kann.

Das Teilprojekt fünf hat zum Ziel, diese Modellierungsmethodik auf eine möglichst große Bandbreite oberflächennaher geothermischer Quellensysteme folgendermaßen anzuwenden:

- Unterteilung des Berechnungsgebietes in grundsätzlich zwei Bereiche: das Quellensystem selbst (Wärmeübertrager ggf. inkl. Einbausituation) und umliegender Untergrund (Erdreich) inklusive des Einflusses der Erdoberfläche (siehe Abb. 8).
- Abbildung des Wärmetransports im Quellensystem mit analytischen Widerstandsmodellen und ggf. Kapazitäten (Abb. 8, links).
- Abbildung des Erdreichs mithilfe ggf. superponierter analytischer Lösungen für ruhende bzw. bewegte Wärmequellen im (halb-)unendlichen Medium (Abb. 8, rechts).
- Soweit relevant, zusätzlich Abbildung von Sondereffekten (z. B. Phasenwechsel, Anbindeleitungen), beispielsweise durch Näherungslösungen.
- Lastzerlegung: Für Auslegungssimulationen ist es i. d. R. hinreichend, den gebäude- bzw. anlagenseitigen Lastverlauf in die folgenden drei Lastfälle zu zerlegen (Koenigsdorff, 2011):
  - I. konstante Grundlast,
  - II. Spitzenlasten,
  - III. periodische Lastanteile.

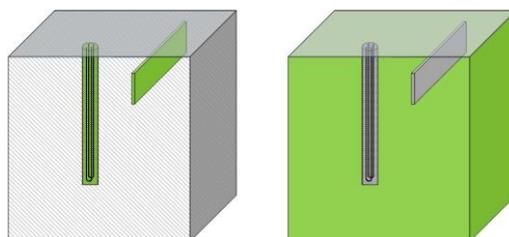


Abb. 8: Unterteilung des Rechengebiets: links: das Quellensystem selbst; rechts: der umliegende Untergrund (Van de Ven et al., 2018)

Die einheitliche Festlegung dieses Vorgehens für alle untersuchten Quellensysteme ermöglicht eine konsistente Modellbildung, was die Voraussetzung für einen korrekten rechnerischen Vergleich der unterschiedlichen Quellensysteme ist. Die verwendeten analytischen Modelle und Näherungslösungen werden jeweils mit numerischen Simulationsmodellen in COMSOL Multiphysics® validiert und ggf. erweitert oder korrigiert (Van de Ven et al., 2018). Darüber hinaus werden derzeit Messdaten erhoben zum Abgleich der entwickelten Modelle mit realen Anlagen. Hierbei werden sowohl Anlagen im regulären Heiz- und Kühlbetrieb untersucht als auch definierte Versuche an einer Testfeldanlage durchgeführt.

## **2.6 Teilprojekt 6: IEA ECES Annex 27 – Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems**

Dieses Teilprojekt beinhaltet die Leitung und Mitarbeit im Annex 27, einer Arbeitsgruppe im Technical Collaboration Program ECES (Energy Conservation through Energy Storage) der Internationalen Energie Agentur IEA. Hier werden von einem internationalen Expertenteam Aspekte der Qualitätssicherung in den drei wesentlichen Projektphasen – Planung, Bau und Betrieb sowie die Problemanalyse einschließlich Problemlösung und Umweltaspekte von Erdwärmesonden-Anlagen für erdgekoppelte Wärmepumpen und Erdwärmesonden-Speicher zusammengestellt und wissenschaftlich aufbereitet.

In der Planungsphase werden die einzelnen Projektschritte und Werkzeuge wie Machbarkeit, Vorplanung, Standortuntersuchung, Auslegungstools, Sondenmaterialien, Bohrlochverfüllung, Wärmeträgermedien und Betriebsaspekte zusammengestellt und relevante Qualitätsaspekte diskutiert. Analog ist die Vorgehensweise für die Bau- und Betriebsphase. Hier wird die Standortvorbereitung und Baustelleneinrichtung, das Bohren, der Einbau der Erdwärmesonden-Rohre, das Verfüllen sowie Anlagentests (Leckage, ...) betrachtet. Für die Qualitätssicherung im Betrieb ist vor allem eine messtechnische Überwachung relevant, da mit ihr Veränderungen im Anlagenbetrieb häufig bereits in der Anfangsphase identifiziert werden können ehe es zu gravierenden Schäden kommt. Auch die Auswirkungen auf die Umwelt und die Erarbeitung von Problemlösungen werden im Rahmen von Annex 27 betrachtet.

Auf Grund des unterschiedlichen technischen Entwicklungsstandes und der unterschiedlichen geologischen Situationen in den Teilnehmerländern wird eine Vielfalt an möglichen Fehlern erwartet. Somit kann ein internationaler Erfahrungsaustausch und eine intensive Zusammenarbeit in einer derartigen Expertengruppe helfen, die Anlagenqualität signifikant zu verbessern und Lösungen für aufgetretene Probleme und Schäden zu finden.

Die hier erarbeiteten Informationen fließen in nationale und internationale Richtlinien und Normen ein wie z.B. in die aktuell in Arbeit befindliche CEN TC451 Norm. Darüber hinaus sollen die Informationen in Aus- und Weiterbildung von Planern und Mitarbeitern ausführender Firmen von geothermischen Anlagen einfließen.

## **3. FAZIT**

Die einzelnen Teilprojekte dieses Verbundvorhabens liefern jeweils wichtige Beiträge zur Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden, sei es in der Auslegung, dem Bau, der Überwachung oder durch Transfer der Ergebnisse in internationale Kreise. Mit den Ergebnissen können die Qualität der Thermal Response Test Geräte, die hydraulische Dichtheit des Systems Erdwärmesonde, der Hinterfüllprozess sowie die Überwachung der Erdwärmesonde während des Betriebs verbessert werden. Zudem wird die Auslegung von Erdwärmesondenfeldern und anderen oberflächennahen geothermischen Quellensystemen verbessert. Ebenso wird in all diesen Teilprojekten deutlich, wie

wichtig die Qualität jedes einzelnen Schrittes ist, um ein gutes und den Anforderungen entsprechendes System zu errichten.

## QUELLENANGABEN

CARSLAW, H.S., JAEGER, J.C.: Conduction of heat in solids, 2. ed., reprinted, Clarendon Press, Oxford Great Britain (2011).

ESKILSON, P.: Thermal analysis of heat extraction boreholes, Dissertation, University of Lund Sweden (1987).

KOENIGSDORFF, R., FEUERSTEIN, P., VAN DE VEN, A.: Anwendung und Adaption von an Erdwärmesonden in situ gemessenen Parametern in Auslegungsberechnungen sowie zugehörigen Berechnungs- und Simulations-programmen. Teilbericht AP 4 im Abschluss-bericht zum LFZG-Verbundvorhaben "Nachhaltige Nutzung von Erdwärmesonden", Okt. 2016, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de>, 14.08.2018.

LUTZ, T., RIEGGER, M. ROLKER, J., REDUTH, Y., WEINMANN, A.: Untersuchung der Filtrationsprozesse zwischen Verfüllsuspension und Untergrund in Erdwärmesondenbohrungen, *Der Geothermiekongress DGK 2018*, Essen (2018)

VAN DE VEN, A., KOENIGSDORFF, R., HOFMANN, S.: Entwicklung konsistenter Auslegungsmodelle für oberflächennahe geothermische Quellsysteme, BauSIM 2018. 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz. Karlsruhe (26 – 28.09.2018), 508-515.

VDI 4640 Blatt 5 - Entwurf: Thermische Nutzung des Untergrundes – Thermal Response Test, Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth Verlag, Düsseldorf (2016)

ZAE Bayern, Hanne Karrer, Walther-Meißner-Str. 6, 85748 Garching  
[hanne.karrer@zae-bayern.de](mailto:hanne.karrer@zae-bayern.de)