

Abschlussbericht

ENTWICKLUNG ÜBERPRÜFBARER QUALITÄTSKRITERIEN FÜR ERDWÄRMESONDEN-VERFÜLLUNGEN UNTER REALITÄTSNAHEN RANDBEDINGUNGEN

von

Solites (Projektkoordinator)
Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
Stuttgart

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)
Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe)
Karlsruhe
EIFER (European Institute for Energy Research)
Karlsruhe

Förderkennzeichen: L75 16008 bis 16011

Laufzeit: 01.04.16 – 31.12.19

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

Dezember 2020



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

FORSCHUNGSBERICHTSBLATT

EWS-tech II

ENTWICKLUNG ÜBERPRÜFBARER
QUALITÄTSKRITERIEN
FÜR
ERDWÄRMESONDEN-VERFÜLLUNGEN
UNTER REALITÄTSNAHEN
RANDBEDINGUNGEN

PROJEKTLAUFZEIT

März 2016 bis Dezember 2019

PROJEKTNUMMERN

L75 16008 bis 16011

GEFÖRDERT DURCH



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Das diesem Forschungsberichtsblatt zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Forschungsberichtsblatts liegt bei den Autoren.

Stuttgart, den 11.12.2020

AUTOREN DES FORSCHUNGSBERICHTSBLATTS ZUM VERBUNDFORSCHUNGSVORHA-
BEN EWS-TECH II



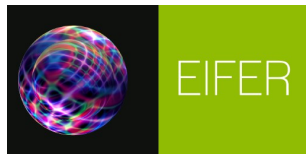
Solites (Projektkoordinator)
Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige
thermische Energiesysteme
Meitnerstr. 8
70563 Stuttgart



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)
Dr. Hagen Steger
Prof. Dr. Ingrid Stober
Adenauerring 20b, Geb. 50.40
76131 Karlsruhe



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA Karlsruhe)
Dr.-Ing. Nico Herrmann,
Dipl.-Geol. Dipl.- Min. Astrid Hirsch,
Dipl.-Geol. Petra Schlager
Gotthard-Franz-Str. 3
76131 Karlsruhe



EIFER (European Institute for Energy Research)
Dr. Roman Zorn,
Dr. Petra Huttenloch,
Dipl. Geol. Olaf Ukelis
Emmy-Noether-Str. 11
76131 Karlsruhe

Neben den aufgeführten Autoren haben die folgenden Personen bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens mitgewirkt: Dr.- Ing. Mathieu Riegger, M.Sc. Julian Rolker, Dipl.- Ing. Tim Lutz, M.Sc. Yannick Reduth, Max Ring (Solites), Linda Schindler, Simon Schüppler, Felix Voss, Alain Dimier (EIFER), Luisa Bienstein, Kevin Altinger, Heinz Vögele, Samuel Schär, Moritz Paul (KIT-AGW), Dr. Oliver Blask, Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn, Prof. Dr. Jörg-Detlef Eckhardt, Dipl.-Ing. Lutz Gerlach, Prof. Dr.-Ing. Michael Haist, M. Sc. Julian Link, Ute Kiefer, Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller, Dr. Moritz Zemann (KIT-IMB/MPA)

1. KURZBESCHREIBUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE

Das Verbundvorhaben EWS-tech II zielt auf Qualitätsverbesserungen bei der Erstellung von Erdwärmesonden ab, die im Zusammenhang mit den, bei der Erstellung von Erdwärmesonden, insbesondere in Baden-Württemberg, aufgetretenen Schadensfälle erforderlich sind.

Die Analyse der aufgetretenen Schadensfälle zeigte, dass stockwerksübergreifende Bohrungen, die Grundwasserleiter unterschiedlicher Druckpotentiale verbinden und die nicht durch eine adäquate Verfüllung abgedichtet werden, als besonders kritisch einzustufen sind. Daher bildeten Untersuchungen zum Einfluss von Grundwasserflüssen beim Verfüllen eines Bohrlochs und die dabei resultierende Qualität des Verfüllkörpers einen der Schwerpunkte des Forschungsvorhabens EWS-tech II.

Hierzu wurden drei sich ergänzende Versuchsaufbauten eingesetzt, so dass durch die Visualisierung und durch die quantifizierte Erfassung des Verfüll- und Aushärtvorgangs bei verschiedenen ausgeprägten Grundwasserströmungen sowie durch die Berücksichtigung der Bohrlochgeometrie und -rauigkeit und großmaßstäblich realistischer Grundwasserstockwerksverbindungen eine umfassende Bewertung möglich war.

Die Annahmen der bei der Abdichtung des Grundwasserleiters zu Grunde liegenden physikalischen Vorgänge konnten mit Hilfe der großmaßstäblichen Technikumsversuche bestätigt werden. Es wurde deutlich, dass zur Abdichtung eines ins Bohrloch einströmenden Grundwasserleiters der Druck im Bohrloch auf Höhe der Anbohrtiefe größer sein muss als der Druck des ins Bohrloch einströmenden Grundwassers. Dabei ist die Annahme des Vorhandenseins eines hydrostatischen Druckes in der Verfüllsäule, basierend auf der zuvor gemessenen Suspensionsdichte, gerechtfertigt. Faktoren, die dazu führen, dass dieser angenommene hydrostatische Druck unterschritten wird, sind eine bereits zu Verfüllbeginn zu geringe Dichte des Verfüllbaustoffs oder eine sich in Folge des in das Bohrloch einströmenden Grundwassers ergebende zu geringe Mischdichte aus Grundwasser und Suspension. Mit der geeigneten Verfüllmethodik kann die ausreichend große Dichte erreicht werden.

Außerdem wurde ein Modell zur Berechnung und theoretischen Nachbildung weiterer Randbedingungen entwickelt und für die Dimensionen der Technikums- und Realmaßstabsversuche experimentell bestätigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Berechnungen nicht nur für die Größenverhältnisse der Versuche von 6 und 30 Meter Höhe gelten, sondern auch für reale Bohrloch-tiefen eingesetzt werden können.

Für einige Versuche wurden vier im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte, magnetisch dotierte Referenz-Verfüllbaustoffe mit individuellen rheologischen Eigenschaften eingesetzt, um den Zusammenhang zwischen den rheologischen Eigenschaften und der Verfüllqualität zu untersuchen und somit Kriterien für möglichst günstige Baustoffeigenschaften ableiten zu können.

Die magnetische Dotierung der eingesetzten Verfüllbaustoffe ermöglicht es, die verfügbaren miniaturisierten Suszeptibilitätsmesssonden auf ihre Eignung für eine automatische Abdichtungsüberwachung des Verfüllvorgangs sowie eine Nachmessung zur Bestimmung der Verfüllqualität zu untersuchen. Dabei wurde die Qualität der erzielbaren Messergebnisse, sowie Grenzen der Einsatzfähigkeit in einem eigens entwickelten Abdichtungskontrollprüfstand erarbeitet. Die Abdichtungskontrollqualität ist dabei abhängig von der Qualität und Quantität des eingesetzten Mag-

netits. Eine genaue Kenntnis darüber ermöglicht eine erfolgreiche Qualitätsüberwachung der Verfüllbaustoffe. Darüber hinaus besitzen unterschiedliche Verfüllbaustoffe unterschiedliche Ausgangssuszeptibilitäten. Die Angabe eines absoluten Grenzwertes muss überdacht werden, und sollte als materialspezifische Eigenschaft in die Datenblätter aufgenommen werden. Darüber hinaus sollte ein CemTrakker-Messwert von 2 nicht automatisch als vollständiger Füllstandsnachweis gelten. Das Prozedere sollte angepasst werden bzw. ein stabiler Plateau-Messwert abgewartet werden. Hier bleibt Raum für Weiterentwicklungen der Messtechnik. Außerdem wurde beobachtet, dass das Magnetitabsetzen nicht dem allgemeinen Absetzverhalten der Suspension folgt. Die Sensitivität von Absetzmaß und Magnetitabsetzen ist abhängig vom Standard W/F-Verhältnis. Die Aufnahme des Magnetitabsetzens als zusätzlicher Qualitätsparameter könnte angedacht werden.

Darüber hinaus wurden in dem Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech II Basiskennnisse zur Langzeitintegrität von EWS-Bohrungen in Gipskeuper-Quellbereichen erarbeitet. Allgemein zeigte sich, dass die Versuche als Langzeitversuche angelegt werden sollten, da sich erst nach mehreren Jahren deutliche Mengen an Thaumasit bilden und Schädigungen beobachtet werden können. Dabei spielt die Versuchstemperatur eine große Rolle, die bereits häufig beschriebene Thaumasitbildung bei niedrigen Temperaturen konnte bestätigt werden. Ob Gips- oder Anhydritdominiertes Umgebungsgestein vorliegt, hat auf die Neubildung von Thaumasit und Ettringit keinen nachweisbaren Einfluss. Die Rolle des verwendeten Verfüllbaustoffs konnte nur bedingt beurteilt werden, da die verwendeten Verfüllbaustoffe nicht in der gleichen und so vergleichbaren Form vorlagen. Diese Thematik sollte daher bei nachfolgenden Forschungsarbeiten nochmals aufgenommen werden. Eine starke Zersetzung der Zementsteinstruktur und Quellerscheinungen konnten bei einigen Proben festgestellt werden. In weiteren Forschungsarbeiten sollten zum einen die Reaktionsprodukte, zum anderen die zeitliche Entwicklung des Zerstörungsprozesses genauer untersucht werden.

2. WELCHE FORTSCHRITTE ERGEBEN SICH FÜR DIE WISSENSCHAFT UND/ ODER TECHNIK DURCH DIE FORSCHUNGSERGEBNISSE

Mit Hilfe des Projektes konnten für Versuche im Labor-, Technikum und Feldmaßstab eine einzigartige Infrastruktur zur Messung magnetischer Signale aufgebaut werden, die in Folgeprojekten verwendet werden oder auch z.B. Baustoffherstellern bei der Entwicklung neuer optimierter Mischungen unterstützen kann. Erstmals wurden zudem in dem Vorhaben gezielt Referenz-Verfüllbaustoffe, bei Offenlegung der Rezeptur, mit definierten Eigenschaften entwickelt. Durch die Entwicklung der Referenz-Verfüllbaustoffe wird nunmehr die Durchführung und Interpretation weiterführender Versuche, wie z.B. die Systemdurchlässigkeit, das Filtrations- und Frosttauverhalten von Verfüllbaustoffen, erheblich erleichtert. Ebenso wurden etliche völlig neue Laborversuchsaufbauten für Verfüllbaustoffuntersuchungen generiert, die z.B. Umströmungs- und Quelldruckversuche, Langzeituntersuchungen (z.B. Stabilität Magnetit, Sulfatangriff) und Versuche unter Luftdruckeinfluss ermöglichen. Für den Einfluss von Druckluftbohrverfahren auf die Verfüllqualität von EWS-Bohrungen wurde zudem eine erste Basis für ein komplexes numerisches Simulationstool geschaffen.

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Prüfstand zur Verfüllstandskontrolle für Erdwärmesonden aufgebaut, der nicht nur für die hier im Projekt adressierten auf Basis von magnetisch dotierten Baustoffen basierenden Methoden, sondern auch zur Prüfung und Bewertung vorhandener sowie neuer Verfahren eingesetzt werden kann. Mit dem aufgebauten Prüfstand und den durchgeführten Versuchen konnten reproduzierbare und aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden, die eine hervorragende Basis für weitere vertiefende und angepasste Füllstandkontrollversuche darstellen (z.B. Brunnenbau, Tonpellets, Dichtwände, etc.). Neben diverser Säulversuche wurde erstmals in einem selbst entwickelten Bohrlochsimulator Erdwärmesonden eingebaut und verfüllt. Dadurch können zukünftig weitere wichtige Fragestellungen, wie z. B. die Rauigkeit oder auch Klüftigkeit, gezielt nachgebildet und bewertet werden.

Mit Hilfe des entwickelten Berechnungstools und bestätigt durch die durchgeführten Technikumsversuche konnte gezeigt werden, dass die erfolgreiche Abdichtung eines Grundwasserleiters mit nach oben gerichtetem Potential in kritischen hydrogeologischen Situation ein sensibler und komplexer Vorgang ist, bei dem schon geringe Abweichungen zu einer Veränderung des Gleichgewichts im System führen können. Es konnte bestätigt werden, dass ein Grundwasserzufluss ins Bohrloch gestoppt werden kann, wenn der dort herrschende Druck höher ist als in der umgebenden Formation. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass für eine Bewertung der Verfüllqualität, insbesondere in Bereichen des Bohrlochs in einer wasserdurchlässigen Formation, dieser umgebende Untergrund in den Versuchsaufbau mit integriert werden muss, um belastbare und realitätsnahe Aussagen zur Verfüllqualität erzielen zu können.

3. NUTZEN, INSBESONDERE PRAKTISCHE VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE UND ERFAHRUNGEN

Aus den Untersuchungsaspekten wurden Anforderungskriterien an EWS-Verfüllbaustoffe abgeleitet, die in einem Empfehlungskatalog zusammengeführt wurden. Die Anforderungskriterien, die im Rahmen des Vorläuferprojektes EWS- Tech ausgearbeitet wurden, sollten dabei weiterhin gelten. Darüber hinaus werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts auch im Rahmen der Überarbeitung der VDI 4640-Richtlinie berücksichtigt. Somit werden sicherer Rahmenbedingungen für die Planung und technische Umsetzung von oberflächennahen Geothermieranlagen geschaffen, die einen Beitrag zu einer nachhaltigen Energiewende leisten können.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand konnten auf Basis der Projektergebnisse keine allgemein gültigen, notwendigen spezifischen magnetischen Suszeptibilitätswertebereiche (Mindest- und Höchstwerte) für die Baustoffe definiert und festgelegt werden. Den Baustoffherstellern wurden eine Eingangskontrolle der zugesetzten Magnetite sowie eine Ausgangskontrolle der Baustoffchargen unter Angabe einer individuellen Signalstärke empfohlen, da sich die magnetischen Suszeptibilitäten in den untersuchten Baustoffen zum Teil sehr stark unterscheiden. Zudem ist von einer maximalen Eindringtiefe des Signals des Cemtrekkers von ca. 2 cm auszugehen. Jenseits dieser Entfernung konnte keine belastbare Aussage bzgl. einer vollständigen Hinterfüllung getroffen werden. Allgemein wurde den Baustoffherstellern empfohlen, eine Bewertung ihres Baustoffes hinsichtlich der Verwendung mit dem CemTrakker zu treffen. Dies ist aus Sicht des Pro-

jekt-konsortiums notwendig, um individuelle Werte einer baustoffangepassten Signalstärke definieren zu können, ab welcher von einem vollständigen Vorhandensein von Hinterfüllmaterial auszugehen ist.

Die durchgeführten Technikums- und Realmaßstabsversuche und ein hierzu entwickeltes Berechnungsmodell haben bestätigt, dass für eine erfolgreiche Abdichtung eine abgestimmte bzw. voneinander abhängige Kombination der Parameter Druckpotential und Volumenstrom des angebohrten Grundwasserleiters, Dichte der eingebrachten Verfüllsuspension und Verfüllgeschwindigkeit entscheidend sind. Mit Hilfe des Berechnungsmodells können in kritischen hydrogeologischen Situationen so bereits in der Planungsphase Vorbereitungen für eine erfolgreiche Verfüllung getroffen werden.

Hinsichtlich der Parameter Druckpotential und insbesondere Volumenstrom des angebohrten GW-Leiters besteht bei real erstellten Erdwärmesonden aktuell die Herausforderung einer ökonomisch tragbaren und dennoch hinreichend genauen Bestimmung. Es wurde daher vorgeschlagen, die Notwendigkeit sowie die Methoden und Randbedingungen zur Bestimmung dieser Parameter unter Einbezug der relevanten Akteure (Bohrunternehmen, Messtechnikanbieter, Wissenschaft, Behörden/ UM) zu diskutieren und einheitlich festzulegen. Hierbei ist zu beachten, dass für eine Messung der Parameter des unteren Grundwasserleiters der obere Grundwasserleiter von diesem abgesperrt sein muss (z.B. durch eine Verrohrung im Bereich des oberen Grundwasserleiters).

4. KONZEPT ZUM ERGEBNIS- UND FORSCHUNGSTRANSFER AUCH IN PROJEKTFREMDE ANWENDUNGEN UND BRANCHEN

Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgten zahlreiche Vorträge und Veröffentlichungen zur zielgruppenorientierten Ergebnisvermittlung. Dies betrifft Fachveranstaltungen und Messen (z.B. Geotherm, Geothermiekongress, etc.), Information von Behördenmitarbeitern (jährliche Vorträge bei den Dienstbesprechungen Geothermie, Statuskolloquium) und weitere Veröffentlichungen (z.B. Unterstützung von Zeitungsbeiträgen). Außerdem erfolgte die vom Land Baden-Württemberg vorgeschriebene Schulung für Sachverständige im Sinne der LQS-EWS durch das Projektkonsortium. Die Ergebnisse finden zusätzlich auch Eingang in die VDI-4640-Richtlinie (hier besonders in das in statu nascendi befindliche Blatt 6) und tragen damit zu einem sicheren, ökologischen und ökonomischen Betrieb von Geothermieranlagen bei. Darüber hinaus finden die gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen des Projekts auch Eingang in Vorlesungen, studentischen Seminaren und Praktika wodurch qualifizierte Fachleute im Bereich der Geothermie ausgebildet werden.