

Validate Frost
Vertiefte Evaluierung der Minus 3°C Grenze
beim Betrieb von Erdwärmesonden

Forschungsberichtsblatt

Jürgen Braun & Giulia Giannelli
Universität Stuttgart
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)

Christian Moormann & Mustafa Mustafa
Universität Stuttgart
Institut für Geotechnik (IGS)

Dirk Mangold & Yannick Reduth
Steinbeis Innovation gGmbH
Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige
thermische Energiesysteme (Solites)

Förderkennzeichen: L75 18008, L75 18009, L75 18010

Gesamtförderzeitraum: 01.10.2018 - 31.08.2021

Das Vorhaben wurde im Rahmen des Förderprojektes „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS) beim Projektträger Karlsruhe am Karlsruher Institut für Technologie mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Erdwärmesonden (EWS) können, bei unsachgemäßem Einbau und Betrieb, zu Kurzschlüssen zwischen Grundwasserleitern sowie zu unkontrolliertem Wasserzutritt und damit zum Schwellen von Anhydridschichten und damit zu mittel- und langfristigen Schäden führen. Um diese Schäden auszuschließen wurden vom Land Baden-Württemberg die Leitlinien „Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ [1] entwickelt. Darin wurde die Minimalzulauftemperatur von EWS aufgrund von Erfahrungswerten auf minus 3 °C festgelegt. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde diese minus 3 °C-Grenze wissenschaftlich untersucht und bewertet.

Ergebnisse der kleinskaligen Experimente (Kapitel 9.1):

- Die Frostbildung findet in der Übergangszone (ITZ) (Gefäß – Verfüllbaustoff) statt. Diese Frostbildung führt jedoch (bei den hier angelegten Temperaturen) noch nicht zur Durchfrostung der gesamten Probe. Die Nukleationstemperatur ist direkt von der ITZ und weiteren mikroskopischen Faktoren abhängig und ist nicht reproduzierbar.

Ergebnisse AP2 (Kapitel 9.2):

- Es wurde ein MultiPhysics-Modell für die Simulation der kleinskaligen Versuche aus AP1 entwickelt. Dieses numerische Modell erwies sich im Abgleich mit den Versuchsergebnissen als geeignet, die Wärmeübertragung zwischen dem Verfüllmaterial und der umgebenden Kühlflüssigkeit abzubilden. Ferner wurde ein Modellierungsansatz zur Berücksichtigung des Phasenwechsels im Verfüllbaustoff entwickelt, der es ermöglichte die Gefrier- und Tauprozesse physikalisch zutreffend abzubilden. Lediglich die in den Versuchen beobachtete, zufällige Auftreten der Nukleation, deren Prozesse noch der physikalischen Klärung bedürften, konnten noch nicht genau simuliert werden; hier ist weitere Grundlagenforschung zu diesem Phänomen erforderlich.

Ergebnisse AP3 (Kapitel 9.3 und 9.4):

- Zur Identifikation kritischer Sondenkonfigurationen hinsichtlich der minimal auftretenden Temperaturen in der Hinterfüllung und im Untergrund wurden in einer Simulationsstudie zahlreiche Parameter variiert (u.a. Sondenrohrpositionen, Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds/der Verfüllmaterialien, Temperaturspreizung der Erdwärmesonde etc.). Zunächst wurde ein Vergleich von 2D- und 3D-Modellen durchgeführt und nachgewiesen, dass sich 2D-Modelle für diese Parameterstudie eignen.
- Als Worst-Case-Szenario in der Hinterfüllung wurde die Kombination folgender Parameter ermittelt:
 - o hoher Volumenstrom in den Sonden
 - o geringe Wärmeleitfähigkeit im Untergrund
 - o geringe Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung
 - o geringe Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf
 - o hohe räumliche Entfernung von warmen und kalten Sondenrohren
- Als Worst-Case-Szenario an der Bohrlochwand und im angrenzenden Untergrund wurde die Kombination folgender Parameter ermittelt:
 - o hoher Volumenstrom in den Sonden
 - o geringe Wärmeleitfähigkeit im Untergrund
 - o hohe Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung
 - o geringe Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf

- hohe räumliche Entfernung zwischen warmen und kalten Sondenrohren
- Sonden liegen nah am Bohrlochrand

Ergebnisse der mittelskaligen Experimente in AP4 (Kapitel 9.5):

- Die Nukleationsphänomene treten nur in unmittelbarer Nähe der kälteren Zulaufrohre auf, da hier die niedrigsten Temperaturen herrschen und in der Übergangszone zwischen PE-Rohr und Verfüllbaustoff auf, da hier die günstigsten thermodynamischen Bedingungen herrschen.
- Der Temperaturbereich, in dem eine Nukleation stattfindet, ändert sich in Abhängigkeit des Verfüllbaustoffs und der ITZ.
- Bei sorgfältig hergestelltem Verfüllmaterial dringt die Gefrierzone nicht in die poröse Struktur des Verfüllmaterials ein, sondern bleibt auf die ITZ beschränkt.
- Extern gefertigte EWS-Kerne sind mechanisch schwächer, da beim Aushärten in einem PVC-Rohr zwei ITZs entstehen, d.h. zwei Übergangszonen mit kritischer Porosität, einer internen zwischen HDPE-Rohren und Verfüllmaterial und einer externen zwischen dem Schalungsrohr aus PVC und dem Verfüllmaterial. Die äußere ITZ zeigte nach Versuchsende die größten Schäden. (Surface Scaling).
- Für die in der Anwendung der oberflächennahen Geothermie erreichten Temperaturen (hier ist der Worst Case dargestellt: Zulauftemperatur: -3 °C ; Rücklauftemperatur: 0 °C) waren die praxisnah gebauten EWS-Abschnitte nukleationsbeständig, eine „Durchfrostung“ (also eine Eisbildung) blieb auf die ITZ beschränkt. Im Feldfall wird der passive Erddruck die Stabilität einer sachgemäß hergestellten EWS weiter verbessern.

Ergebnisse AP5 (Kapitel 9.6, 9.7 und 9.9)

- Im AP5a wurden die mittelskaligen Frostexperimente des AP4 mit numerischen 2D-Modellen nachgebildet und die thermischen Verhältnisse betrachtet. Dabei wurde eine hinreichend gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen erreicht. Abweichungen wurden auf die Versuchsrandbedingungen und Variabilitäten in den verwendeten Versuchsmaterialien zurückgeführt. Die besten Ergebnisse wurden mit einer reduzierten Wärmeleitfähigkeit des PE-Sondenrohrmaterials erzielt.
- Im AP5b wurde das Multiphysics-Modell für eine gekoppelte thermisch-mechanisch-hydraulische Modellierung (THM-Simulation) erweitert. Mit diesem gekoppelten Simulationsmodell konnten die mittelskaligen Frost-Experimente des AP4 in guter Übereinstimmung numerisch simuliert werden. Es wurden einige geringfügige Unterschiede zwischen Modell- und Versuchsergebnissen festgestellt, die jedoch auf Versuchsrandbedingungen und die Variabilität des Bodens in den Versuchen zurückgeführt werden können.
- Im AP5c wurden eigene physikalische Modellversuche zur experimentellen Untersuchung der Temperaturverteilung in einem durchströmten porösen Medium während einer starken Abkühlungsphase durchgeführt; dabei galt es auch, orientiert an einer Erdwärmesonde, Wärmeübergangsprozesse zwischen einer gefrierenden Oberfläche und dem porösen durchströmten Versuchsboden zu untersuchen.

Es wurde festgestellt, dass in den simulierten porösen Medien selbst bei einem relativ hohen Grundwasserdurchfluss von $1,3\text{ m/d}$ ein Phasenwechsel auftrat, was zeigt, dass es andere Faktoren gibt, die zur Bildung von Eislinsen in realen porösen Medien beitragen, wie Porosität und Porendruck, die gesondert untersucht werden müssen.

Ergebnisse AP6 (Kapitel 9.10):

- Die Simulationen des AP6 betrachteten Worst-Case-Szenarien für das Auftreten von Frostbedingungen im Bohrloch nach einem Dauerbetrieb der EWS über 8 Wochen mit ungünstigen Sondenkonfigurationen. Die Temperatur für eine Frostgefahr wurde hier auf Basis der kleinskaligen Experimente des AP1 bestimmt, in denen allerdings keine reproduzierbare Frosttemperatur ermittelt werden konnte. Dennoch wurde folgendes festgestellt:
 - Liegt eine ungünstige Sondengeometrie vor, entspricht die Temperatur an der Kontaktlinie der beiden kalten Zulaufrohre ohne signifikante Abweichung der Zulauftemperatur des Wärmeträgerfluides.
 - Die Zulauftemperatur des Wärmeträgers kann deutlich reduziert werden, wenn sich die Sondenrohre zentriert im Bohrloch befinden und die Baustofftemperatur nahe der Bohrlochwand als Grenzkriterium betrachtet wird.
 - Die Zulauftemperatur des Wärmeträgers kann reduziert werden ohne eine Frostgefahr zu erzeugen, wenn von den in AP3 ermittelten ungünstigen Parameterkombinationen abgewichen wird.

Ergebnisse AP7 (Kapitel 9.11 und 9.12):

- Im AP7a wurden statt des 8-wöchigen Dauerbetriebs aus AP6 verschiedene Taktungen der Wärmepumpe betrachtet:
 - Für das Nahfeld um die kalten Sondenrohre herum wirkt sich die Taktung der Wärmepumpe bzw. die Dauer des täglichen Wärmepumpenbetriebs kaum auf die im Hinterfüllmaterial auftretenden Minimaltemperaturen aus.
 - Für weiter von den Sondenrohren entfernte Bereiche führt der Taktbetrieb zu höheren Temperaturen als im Dauerbetrieb, der in AP6 simuliert wurde. Der Einfluss der Sondengeometrie ist bei einem Taktbetrieb somit groß. Bei im Bohrloch zentrierten Sondenrohren kann die Zulauftemperatur weiter reduziert werden, wenn die Baustofftemperatur nahe der Bohrlochwand als Grenzkriterium betrachtet wird.
- Im AP7b wurden drei verschiedene Erdwärmesondenmodelle mit realistischen Szenarien und Betriebszeiten vorgestellt, das erste Modell mit einem Grundwasserfluss von 0,1 m/d, das zweite mit einer Grundwasserströmung von 1 m/d und das letzte ohne Grundwasserströmung. Die Ergebnisse aller Modelle zeigen, dass in den die Erdwärmesonden umgebenden Bodenschichten kein Gefrieren auftritt, obwohl die Temperatur im Verfüllmaterial in allen Modellen unter die Gefriertemperatur sinkt. Jedoch waren die Modelle aufgrund der Unterkühlungs- und Nukleationseffekte (zuvor in AP2 diskutiert) nicht in der Lage, den Phasenwechsel im Verfüllmaterial zuverlässig vorherzusagen.

Ergebnisse AP8 (Kapitel 9.13):

- Im AP8a wurde eine 30 m lange, mit zahlreichen Temperatursensoren ausgestattete EWS im Realversuch nachgebildet und mit einer konstanten Zulauftemperatur von -3 °C betrieben, bis sich quasistatische Temperaturbedingungen eingestelltten. Die experimentellen Ergebnisse werden in AP8b mit einem numerischen Modell verglichen.
- Im AP8b wurde ein numerisches Modell entwickelt, um das in AP8a durchgeführte Experiment realitätsnah zu simulieren. Allerdings konnten im Rahmen des AP8a bei weitem nicht alle geplanten Temperaturmesswerte gewonnen werden, so dass ein weitergehender Abgleich zwischen Simulation und dem realen Verhalten nicht möglich war. Außerdem ist zu beachten, dass die Lage der Sondenrohre im Querschnitt über die Tiefe variiert so

dass es auch aus diesem Grund zu Abweichungen zwischen Simulation und Messung kommen kann.

2 Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

Beim Betrieb von Erdwärmesonden (EWS) können Frost-Tau-Wechsel zu einer nachteiligen Veränderung der Ringraumverfüllung der EWS und des umliegenden porösen Mediums (Boden, Fels) führen. Dabei sind insbesondere folgende Vorgänge zu berücksichtigen:

- Während des Normalbetriebs können temperaturinduzierte Dehnungen und Schrumpfungen zu Spaltbildung an der Bohrlochwandung und zu Ringspaltbildung um die Erdwärmesonden und damit zu ungewollten Wegsamkeiten für Wasser führen. Es ist derzeit nicht bekannt, welche Temperaturspreizungen zu Spaltbildung führen.
- Wasser dehnt sich beim Gefrieren um 9 Vol.-% aus. Dies liegt weit über der Bruchdehnung eines (wassergesättigten) EWS-Verfüllbaustoffs. Frost-Tau-Wechsel können zu einer deutlichen Erhöhung der Systemdurchlässigkeit [2] [3] von Erdwärmesonden führen.
- Für im Bohrloch exzentrisch liegende Sondenrohre kann es bereits beim ersten Frost-Tau-Zyklus zu Frosteinwirkungen auf den umgebenden Baugrund und, insbesondere bei bindigen Böden, zu einer nachteiligen Veränderung der Bodenstruktur kommen.

Um einer potentiellen Frostbildung in einer EWS vorzubeugen, wird in Baden-Württemberg in den „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ [1] die minimale Zulauftemperatur in die EWS, basierend auf Erfahrungswerten, auf minus 3 °C begrenzt. Großversuche im Nachgang zu der Festlegung zeigten, dass unter Verwendung der „Minus 3°C“-Regel bei gewissen Betriebszuständen der EWS eine Frostgefährdung vorliegt. Für eine fundierte Bewertung der „Minus 3 °C“ Regel waren daher weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Untersuchungen von unterschiedlichen geometrischen sowie material- und betriebsbedingten Randbedingungen einer Erdwärmesonde sind für die Ermittlung der minimal zulässigen EWS-Zulauftemperatur, für welche eine ausreichend geringe Systemdurchlässigkeit gewährleistet ist, notwendig. Dabei ergeben sich aus der Überlagerung unterschiedlicher Parameter verschiedenste Szenarien. Eine experimentelle Untersuchung aller möglichen Szenarien und Parameterkombinationen ist weder ökonomisch noch in einem annehmbaren zeitlichen Rahmen durchführbar, weshalb im Forschungsvorhaben mittels numerischer Simulationen die Grenzen klein- und mittelskaliger Laborexperimente überwunden und allgemeingültige Aussagen zu minimalen Zulauftemperaturen getroffen werden sollten.

Die physikalischen Prozesse des Frost-Tauwechsels sollten hierbei durch die Entwicklung eines Modellierungsansatzes zur Berücksichtigung des Phasenwechsels im Verfüllbaustoff erfasst werden. Mit den so gewonnenen Erkenntnissen waren im Anschluss Berechnungen unter Variation der geotechnischen und hydrogeologischen Randbedingungen durchzuführen, um abschließende Aussagen zur minimalen Zulauftemperatur zu erhalten, unter denen im Sinne eines intakten Baugrunds/Verfüllungssystems ein sicherer Betrieb einer Erdwärmesonde möglich ist.

3 Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Erdwärmesonden können einen signifikanten Beitrag zur Energiewende liefern. Im Gegensatz zu manch anderen regenerativen Energiequellen sind sie weitestgehend unabhängig von tages- oder jahreszeitlichen Klimaganglinien (Temperatur, Albedo, Wind, ...). Dies macht sie insbesondere zur Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden ökonomisch und ökologisch einsetzbar. Ein vermehrter Einsatz von Erdwärmesonden in Verbindung mit effizienten Wärmepumpen auf der Gebäudeseite führen zu signifikanten Reduktionen der CO₂-Emissionen gegenüber konventionell beheizten oder gekühlten Gebäuden.

Durch verschiedene Schadensfälle im Land Baden-Württemberg besteht eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Langzeit-Standsicherheit von Erdwärmesonden. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Bereitschaft von potentiellen Nutzern eine solche Anlage installieren zu lassen. In Baden-Württemberg wurde in den Leitlinien „Qualitätssicherung Erdwärmesonden“ des Landes Baden-Württemberg [1] daher die minimale Zulauftemperatur der EWS auf minus 3°C limitiert.

Die durchgeführten Experimente und die Ergebnisse des simulierten numerischen Modells zeigen, dass die Bodenschichten beim Betrieb der Erdwärmesonde bei einer Temperatur von minus 3 °C keinen Phasenwechsel erfahren, wodurch schädigende Strukturänderungen und damit negative Auswirkungen auf die hydraulische Barrierewirkung bindiger Bodenschichten zwischen getrennten Grundwasserleitern nicht zu besorgen sind.

Wenn die Zulauftemperatur jedoch für einige Stunden unter 0°C bleibt, kann es im Verfüllmaterial der Erdwärmesonde zu einem Phasenwechsel kommen, der zu Schäden im Verfüllmaterial führen kann. Da sich bei praxisnah hergestellten EWS die Sondenrohrpositionen zueinander über die Bohrlochtiefe stetig ändern, ist von folgendem Sachverhalt auszugehen: Die für eine Frostgefahr detektierten Worst-Case-Bedingungen (hohe räumliche Entfernungen von kalten und warmen Sondenrohren) treten nur streckenweise über die Bohrlochtiefe auf. Eine mögliche Frostbildung wird daher nur in kleineren Abschnitten der Bohrlochtiefe beginnen.

Das Ausmaß der Schäden im Verfüllmaterial wurde in AP5 mit Hilfe der Prüfung der hydraulischen Durchlässigkeit untersucht. Das Ergebnis zeigt eine sehr geringe Änderung der hydraulischen Durchlässigkeit aufgrund der Temperaturänderung. Untersuchungen von Sahin et al. (2021) zu den Auswirkungen des Gefrierens von Beton zeigen jedoch, dass strukturelle Schäden in Betonproben mit hohem Wasser-Zement-Wert auftraten, aber auch, dass dieses Phänomen durch eine Minimierung der Zeit, in der die Erdwärmesonde bei einer Temperatur unter 0 °C betrieben wird, verhindert werden kann; je nach Wasser-Zement-Verhältnis des Materials kann diese Zeit zwischen einigen Minuten und mehreren Stunden liegen.

Der Feldversuch konnte belegen, dass die niedrigsten Temperaturen im horizontalen Bohrungsquerschnitt nahe der Oberfläche auftreten.

Zusammenfassend zeigen die Experimente in AP4 und AP8 sowie die numerischen Simulationen in AP5b, AP7 und AP8b, dass in den porösen Medien, die die Erdwärmesonde umgeben, kein Gefrieren auftritt, wenn die Zulauftemperatur auf -3 °C sinkt. Die Untersuchungen ergaben auch keine irreversiblen Schäden am Verfüllmaterial, allerdings wurden die langfristigen Auswirkungen von Gefrier-Tau-Zyklen auf das Verfüllmaterial nicht untersucht.

4 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projekt-fremde Anwendungen und Branchen

Bereits bei der Erstellung des Realmaßstabsversuchs in AP 8 fand eine enge Zusammenarbeit mit André Voutta – Grundwasserhydraulik statt. Dies geschah in Form von fachlicher Beratung zur Temperaturmesstechnik sowie der Bereitstellung von geeignetem Aufzeichnungs- und Auswertungs-equipment. Am KIT wurden vom Institut für angewandte Geowissenschaften (Ingenieur-geologie) von Dr. Hagen Steger Parameterbestimmungen zur Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Materialien durchgeführt.

Für den Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg wurden von Seiten des Forschungsvorhabens regelmäßig Seminare organisiert mittels derer die Forschungsergebnisse direkt in die Anwendung des Landes Baden-Württemberg transferiert wurden. Weiter Vorträge und Poster sind in nachfolgender Liste dargestellt:

- Mustafa, M., P. Buhmann, C. Moormann „Effect of free convection flow in water on frozen soil - an experimental and numerical study.“ in *12. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 21.-22. January 2020, Ostfildern, 2020.*
- Giannelli, G. und J. Braun, „Betrieb einer Erdwärmesonde im Grenzbereich,“ in *Der Geothermiekongress (DGK) - 19.-21. November 2019, München, 2019.*
- Giannelli, G. und J. Braun, „Betrieb einer Erdwärmesonde im Grenzbereich,“ in *12. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 21.-22. January 2020, Ostfildern, 2020.*
- Giannelli, Qualifying Exam: Frost-free operation of geothermal probes, Stuttgart: ENWAT – International Doctoral Program Environment Water, 2020.
- Giannelli, G. und J. Braun, „Vertiefte Evaluierung der „Minus 3 °C Grenze“ beim Betrieb von Erdwärmesonden,“ in Fortbildungsverband Boden und Altlasten: Oberflächennahe Geothermie, 3. Dezember 2020.
- Braun, J. und G. Giannelli: Fachgespräch: „Durchlässigkeitsveränderungen durch Erdwärmesonden – Auswirkungen auf die Genehmigungssituation“ (13. Februar 2019, Offenburg)
- Braun, J., G. Giannelli, M. Riegger, C. Moormann, P. Buhmann, M. Mustafa: „Vertiefte Evaluierung der „Minus 3 °C Grenze“ beim Betrieb von Erdwärmesonden – Validate Frost (L75 180 08/09/10)“, Statuskolloquium Umweltforschung Baden-Württemberg (19.-20. April 2019, Fellbach).
- Giannelli, G. und V. Adams, „Einfluss von Frost-Tau-Wechseln auf Verpressmaterial (Poster),“ in *Der Geothermiekongress (DGK) 2019, 19.-21. November 2019, München, 2019.*