

Betrieb einer Erdwärmesonde im Grenzbereich

Giulia Giannelli, Jürgen Braun

IWS/VEGAS, Universität Stuttgart

Keywords: Frostfreier Betrieb einer Erdwärmesonde, Verfüllbaustoff, Frost-Tau-Wechsel, minimale Zulauftemperatur

Zusammenfassung

Frost-Tau-Wechsel beim Betrieb von Erdwärmesonden (EWS) kann zu einer Beschädigung des Verfüllmaterials der EWS und auch des umliegenden porösen Mediums führen. Um einer potentiellen Frostbildung in einer EWS vorzubeugen wird die minimale Zulauftemperatur der EWS oft basierend auf Erfahrungswerten und numerischen Modellrechnungen begrenzt. Es liegen jedoch keine detaillierten experimentellen Untersuchungen von Temperaturgradienten und Temperaturisothermen zur Ermittlung der Durchfrostung des Sondenraums vor, die diese Festlegungen wissenschaftlich untermauern (hinterfragen) könnten.

Der Durchfrostungsprozess unterschiedlicher Verfüllbaustoffe sowie Bodenmaterialien wurde auf kleiner Skala untersucht, um eine allgemeine Methode zur Ermittlung der Durchfrostung zu entwickeln und zu validieren. In Abhängigkeit verschiedener Lastfälle lieferte eine in einem künstlichen Aquifer aufgebaute EWS (Technikumsversuch im VEGAS-Großbehälter) durch eine hochaufgelöste Instrumentierung erstmals zeitlich und räumlich aufgelöste Temperaturgradienten und Profile innerhalb einer EWS. Weitere fehlende, aber wichtige Szenarien mit unterschiedlichen Anordnungen der Rohre im EWS-Querschnitt, realistischer Temperaturspreizung an kritischen Tiefen, sowie Abdichtungen mit unterschiedlichen Verfüllmaterialien wurden entwickelt und werden derzeit auf einer mittleren Skala durchgeführt.

Schwerpunkt der Untersuchungen ist es festzustellen, unter welchen allgemeinen Bedingungen eine Frostbildung im Sondenraum stattfindet und ggf. Nutzungsszenarien abzuleiten, die einen frostfreien Betrieb der EWS allgemein sicherstellen.

1. Einleitung

Die erlaubte Betriebstemperatur einer EWS hat einen direkten Einfluss auf Investitions- und Betriebskosten einer EWS. So führen Einschränkungen der minimal zulässigen Temperatur einerseits zu einer Erhöhung der erforderlichen Sondenlänge und steigern damit die Installationskosten; andererseits kann der Betrieb einer Erdwärmesonde in einem zu niedrigen Temperaturbereich zu erhöhten Betriebskosten durch einen geringeren Wirkungsgrad der Wärmepumpen führen. Insbesondere letzterer Faktor könnte verschärft werden, wenn der Untergrund nicht regeneriert wird und seine Temperatur im Laufe der Jahre sinkt.

Darüber hinaus muss die Qualitätssicherung einer Erdwärmesonde während ihrer gesamten Lebensdauer stets gewährleistet werden. Beim Betrieb von Erdwärmesonden im niedrigen Temperaturbereich kann es jedoch zu Wasserwegsamkeiten auf Grund von Frost-Tau-Wechsel und damit zu einer nachteiligen Veränderung des Ringraums der Erdwärmesonde kommen (Anbergen et al. 2014, Reuß et al. 2012). Zusätzlich sind aufgrund der temperaturinduzierten Dehnung des Verfüllmaterials Spaltbildungen zwischen Sondenrohren und Verfüllmaterial sowie zwischen Verfüllmaterial und dem umliegenden porösen Medium möglich.

In Anbetracht dessen ist es sinnvoll, für die kältesten Tage des Jahres Betriebstemperaturen unter 0 °C zu betrachten, solange diese nicht kontinuierlich oder so niedrig sind, dass sie die Effizienz der Wärmepumpe beeinträchtigen und solange ein frostfreier Betrieb der EWS gewährleistet bleibt.

Die Definition des frostfreien Betriebs einer EWS ist jedoch aus Praxissicht oft unklar und wird in den verschiedenen Bundesländern unterschiedlich gehandhabt (Abbildung 1). In Sachsen-Anhalt wird zum Beispiel eine minimale „mittlere Temperatur in der Sonde“ bei Spitzenlast gefordert, statt eine „Eintrittstemperatur“ wie in den Vorgaben der VDI 4640. In Hessen ist ein frostfreier Betrieb nur in wasserwirtschaftlich sowie hydrogeologisch ungünstigen Gebieten erforderlich und dies ist laut Vorgaben gewährleistet, wenn die minimale Temperatur $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht unterschreitet. In Baden-Württemberg wird allgemein eine Minimalaustrittstemperatur der Wärmepumpe von $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ zur Sicherstellung eines frostfreien Betriebs vorgeschrieben (LQS-EWS BW 2015).

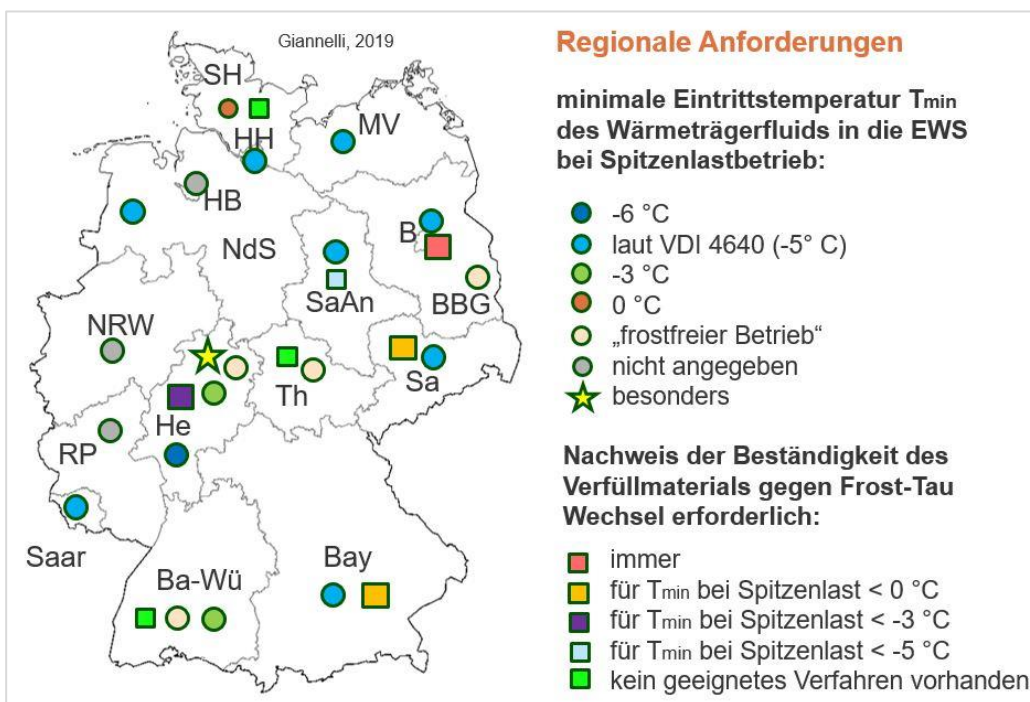


Abb. 1 Darstellung der in regionalen Leitlinien angegebene Anforderungen für EWS-Verfüllbaustoffe (Braun et al. 2019).

In diesem Zusammenhang gibt es zwei verschiedene Ansätze, die von verschiedenen Forschungsgruppen behandelt werden.

Ein Ansatz besteht darin, eine Vorrichtung zu entwickeln, die es ermöglicht, die Frost-Tau-Wechsel Beständigkeit jedes Verfüllbaustoffes, d.h. jeder Mischung, durch Randbedingungen zu überprüfen, die für eine geothermische Anwendung geeignet sind. Mit dem Anhang E der aktuellen VDI-Richtlinie 4640 (VDI 4640 2019) beginnt man, die Grundlagen für solch ein standardisiertes Verfahren zu legen.

Ein vom Land Baden-Württemberg gewählter Ansatz besteht darin, zu überprüfen, bzw. zu validieren, ob/dass die hier geltende Grenze von $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ als minimale EWS-Zulaufstemperatur einen frostfreien Betrieb gewährleistet. Dazu wird eine Reihe von realistischen ungünstigen Szenarien experimentell durchgeführt. Im Rahmen dieses zweiten Ansatzes ist die vorliegende Arbeit einzuordnen.

2. Methode und experimentelle Untersuchungen

Parallele Temperatur- und TDR-Messungen an einem Betonkörper aus dem für den Technikumversuch ausgewählten Verfüllbaustoff zeigten eine direkte Korrelation des Beginns der Eisbildung (Keimbildung) mit einem lokalen, kurzzeitigen Temperaturanstieg (Temperaturspitze). Somit konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen eine Methode entwickelt werden, mit Hilfe derer erstmals die Eisbildung innerhalb einer EWS für verschiedene Szenarien experimentell nachgewiesen werden kann. Die allgemeine Gültigkeit der Methode wurde auf kleiner Skala für andere Verfüllbaustoffe sowie Bodenproben untermauert.

Die Experimente wurden auf verschiedenen Skalen durchgeführt. Insbesondere kleine Experimente haben Vorteile, darunter Wiederholbarkeit und Vielseitigkeit, obwohl deren Randbedingungen nicht direkt übertragbar sind. Sie ermöglichen es, die Faktoren zu identifizieren, die den Gefrierprozess am stärksten beeinflussen und aufzuzeigen, wie Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften unterschiedlich reagieren.

Die im technischen Großversuch durchgeführten Untersuchungen sowie die Bewertung der beobachteten Prozesse gestalten sich oftmals anspruchsvoller. Hierbei handelt es sich um einen einmaligen Versuchsaufbau, so dass, sobald eine Sondenkonfiguration und ein Verfüllmaterial im Ringraum verwendet wurden, diese Parameter nicht mehr geändert werden können.

In diesen Experimenten ist es jedoch möglich, die Betriebsparameter der Sonde, wie minimale Zulauftemperatur und Turbulenz in den PE-Rohren, zu variieren und die aufgebaute Sonde unter realistischeren Randbedingungen zu untersuchen, wie z.B. Anbindung der Sonde an das umliegende poröse Medium, Durchfluss durch den Aquifer und radiale Gefrierichtung aus dem Wärmeträgerfluid in den Rohren nach außen. Der Einfluss von Geometrie, der Anordnung der Rohre im EWS-Querschnitt und unterschiedlicher Verfüllbaustoffe auf den Gefrierprozess wird im Rahmen mittelskaliger Versuche untersucht.

2.1 Kleinskalige Untersuchungen

In kleinskaligen Versuchen wurde der Frostprozess sowohl in ausgehärteten Verfüllbaustoffen als auch in Bodenproben mittels Temperaturmessungen und teilweise mit Messungen der Dielektrizitätskonstante untersucht. Die Eignung verschiedener Arten von Temperatursensoren für die Aufzeichnung von Gefrier- und Tauvorgängen wurde verglichen. Die Proben wurden in geschlossenen Gefäßen vorbereitet. Ein Teil der Proben wurde zur Bestimmung des Porenwassergehalts mithilfe von Tauchwägung und Trocknung verwendet, während die übrigen Proben mit Pt100-Sensoren oder verschiedenen Thermoelementsensoren sowie TDR-Sonden ausgestattet wurden. Die Proben wurden in einem Behälter durch ein umströmendes Wärmeträgerfluid unter zyklischer Abkühlung beaufschlagt, dabei wurden zwei unterschiedliche Abkühlungsprogramme mit Minimaltemperaturen von -3 °C bzw. von -5 °C verwendet.

2.2 Technikumversuch im Großmaßstab

Für die experimentellen Untersuchungen des frostfreien Betriebs einer Erdwärmesonde im Grenzbereich in einem Technikumversuch im Großmaßstab wurde ein thermisch verbesserter dotierter Verfüllbaustoff und eine symmetrische Anordnung der PE-Rohre im Ringraum betrachtet. Dazu wurde eine mit dem oben genannten Verfüllbaustoff verpresste Doppel-U-Erdwärmesonde ($D=0,15\text{ m}$, $L=4,5\text{ m}$) in einem künstlichen Sandgrundwasserleiter ($L=9\text{ m}$ x $B=6\text{ m}$ x $H=5\text{ m}$) aufgebaut und unter unterschiedlichen Randbedingungen, z.B. unterschiedlichen Zulauftemperaturen oder wechselnden Reynolds-Zahlen (Turbulenzen) kontinuierlich sowie intermittierend betrieben. Dabei wurden die Durchfrostung des EWS-Ringraums und die Abkühlung des umliegenden porösen Mediums basierend auf den gemessenen Temperaturverläufen untersucht.

2.3 Mittelskalige Versuche (2D-Versuche)

Um die Informationslücke aus dem Technikumversuch zu schließen, wurden in VEGAS mittelskalige Versuche, repräsentativ für den Abschnitt einer von einem porösen Material umgebenen Erdwärmesonde entwickelt.

Die Versuche erlauben unter unterschiedlichen Randbedingungen (Szenarien) die Temperaturuntersuchungen innerhalb des EWS-Ringraums sowie im direkten Nahfeld (15 cm) der Sonde. Im COMSOL wird eine EWS für unterschiedliche geologische und hydraulische Bedingungen mit einer Zulauftemperatur von -3°C beaufschlagt und die Temperatur entlang der Sonde (in Zulauf und Rücklaufrohr) berechnet. Die Ergebnisse für bestimmte ausgewählte Tiefen dienen als Randbedingungen für die mittelskaligen Versuche.

Der 1,4 m lange Abschnitt der EWS und das umliegende poröse Medium können sich aufgrund der Festigkeit des mittelskaligen Versuchsbehälters sowie der oberen Abdichtungsschicht und des Deckels nicht verformen. Trotzdem entspricht der auf die Sonde ausgeübte Druck in den Versuchen nicht vollständig dem teilweise höherem in-situ Druck, der sich eventuell positiv auf die Sondenstabilität auswirken und somit möglicherweise eine Rissbildung vermindern könnte. Dieser Aspekt ist jedoch für das betrachtete Ziel, frostfreie Betriebsbedingungen einer EWS zu ermitteln, im Vergleich zur Anbindung des EWS-Ringraums am porösen Medium vernachlässigbar.

Folgende Parameter sind im Versuchsaufbau einstellbar: Geometrie des Bohrlochs und der Sondenrohre (symmetrisch, asymmetrisch innerhalb sowie am Rand des Bohrlochs), Materialien für Verfüllbaustoffe und Sondenrohre, Strömungsgeschwindigkeit in den Sondenrohren, Art und Initialtemperatur des Untergrunds, Betriebsarten der EWS und Temperaturspreizung zwischen Zulauf- und Rücklaufrohr. Die Experimente bilden die Grundlage für begleitende numerische Simulationen durch die Projektpartner IGS und Solites. Hierbei werden thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Phänomene betrachtet, um die Grenzen der Laborexperimente zu überwinden und allgemeingültige Aussagen zu minimalen EWS-Zulauftemperaturen und zur Risikoabschätzung von EWS-Schäden im Grenzbetrieb zu treffen.

3. Ergebnisse

3.1 Kleinskalige Untersuchungen

Die Hydratationsbedingungen, d.h. die Aushärtungstemperatur und die Luftfeuchtigkeit, beeinflussen den Wassergehalt der Betonproben. Betonproben, die mit zyklischen Abkühlungen bis zu -3°C beaufschlagt wurden, blieben frostfrei. Bei den Proben, die bis -5°C abgekühlt wurden, wurde ein Frost-Tau-Wechsel Prozess beobachtet. Im Gegensatz dazu fand die Durchfrostung in reinen Sandproben bereits bei Abkühlungen über -3°C statt. Abgesehen von wenigen Ausnahmen ergeben sich für Verfüllbaustoffe Unterkühlungstemperaturwerte im Bereich von -5°C für den ersten Nukleationsprozess und Gefrierungstemperaturwerte im Bereich -0.9 bis -0.3°C , je nach betrachtetem Verfüllbaustoff. Für gesättigte Sandproben liegt die Nukleationstemperatur über -3°C und die Gefrierungstemperatur entspricht der von reinem Wasser in freier Phase und beträgt 0°C .

Wenn die Proben nicht vollständig regeneriert sind, wird die Nukleation in den Poren erleichtert und findet schon bei Temperaturen über -3°C statt. Gefrierendes Kapillarwasser stellt sich als wahrscheinliche Ursache für aufgezeichnete Temperatureffekte heraus. Die Ergebnisse sind ausführlich in der Poster-Session (Giannelli und Adams, 2019) vorgestellt.

3.2 Technikumversuch

Im Technikumversuch wurde gezeigt, dass die Keimbildung im Zentrum der Sonde (zwischen den Sondenrohren) stattfindet. Ob diese Eisbildung zu Schäden an der EWS führt, und wenn ja, wie diese Schäden aussehen, konnte im Rahmen der Experimente nicht nachgewiesen werden, da dies einen Ausbau der Sonde erfordert hätte. Im Nahbereich der Sonde konnte bei keinem der durchgeführten Szenarien Frostbildung nachgewiesen werden.

Ergebnisse des Forschungsvorhabens „EWS-Frost“ (Giannelli und Braun 2018) zeigen, dass auch unter Berücksichtigung der „Minus 3°C“-Regel bei gewissen Betriebszuständen Frostgefährdung in einer EWS besteht. Während bei Zulufttemperaturen von -3 °C und transienten Strömungsbedingungen in der Sonde eine Frostbildung erst nach 100 Stunden Dauerbetrieb nachgewiesen wurde, konnte bei Zulufttemperaturen von -3 °C und turbulenter Strömungsbedingungen in der Sonde bereits nach 5 bzw. 13 Stunden Dauerbetrieb unter Grundwasserströmung bzw. stagnierendem Grundwasser Frostbildung beobachtet werden. Wenn die EWS bei den beschriebenen Bedingungen intermittierend betrieben wurde, gefror die Verfüllung ähnlich wie im Dauerbetrieb, dies hing jedoch stark von der Dauer der Stillstandphase ab. Bei intermittierendem Betrieb mit Zulufttemperatur von -2,5 °C bleibt die Sonde frostfrei.

3.3 2D-Versuche

Zur weiteren Bewertung der „Minus 3°C“-Regel werden derzeit bei VEGAS im Verbund mit den Partnern Solites und IGS im Rahmen des Vorhabens „Validate Frost“ weitere experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt.

Zur Bestimmung möglicher Frostbildung und daraus resultierenden Beschädigungen der Ringraumabdichtung durch Frost-Tau-Wechsel werden unterschiedliche Doppel-U-Erdwärmesonden in PVC-Rohre eingebaut, mit Temperatursensoren auf zwei Messebenen (40 cm Abstand) versehen und verpresst. Nach mindestens 28 Tagen wird das PVC-Rohr entfernt, die Sonde wird in einen zylindrischen Behälter (L = 140 cm, ID = 50 cm) eingebaut und der umliegende Raum des Versuchsbehälters durch poröses Material befüllt, von unten aufgesättigt und mit Bentonit nach oben abgeschlossen, so dass eine Umlagerung des porösen Mediums im Ringraum während des Versuchs verhindert wird. Während der Befüllung des Ringraums werden weitere Temperatursensoren installiert. Insgesamt werden je Ebene 10 Sensoren eingebaut, vier im Sand und sechs im Ringraum; weitere Sensoren sind im Zu- und Ablauf der Sonde eingebaut. Die Experimente werden unter kontrollierten Außentemperaturen durchgeführt, zusätzlich werden die Säulen nach Einstellung der Initialtemperatur (8-12°C) isoliert. Die Zu- und Rücklaufrohre der EWS werden an jeweils separate Thermostate angeschlossen ($Re > 4000$), damit eine vorab definierte Temperaturspreizung sichergestellt werden kann. Nach einer festgelegten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln mit entsprechender Temperaturaufzeichnung, wird der Aquifer drainiert, die Wandung des Versuchsbehälters geöffnet und das Füllmaterial der EWS visuell auf Schadstellen untersucht.

Zur Bestimmung von Läufigkeiten entlang der Bohrlochwandung und der Sondenrohre aufgrund von Temperaturschrumpfungen in Sonde und Gebirge, wird danach der Versuchsaufbau modifiziert. Der Ringraum zwischen EWS und Versuchsbehälter wird durch Flüssigboden (mit einer Steifigkeit ähnlich eines Tons in einer vorab festgelegten Tiefe) verfüllt und dadurch ein Aquitard gebildet. An der Unter- und an der Oberseite des Zylinders wird der Raum zwischen Zylinderboden bzw. -deckel durch eine Grobsandschicht und Bentonitabdichtung gebildet und jeweils mit einem Festpotentialbehälter verbunden, so dass der gesamte Zylinder als Permeameter betrieben werden kann. Veränderung der Durchlässigkeiten sowie visuell strukturelle Veränderungen in der EWS und im umgebenden Boden können somit festgestellt werden.

Quellenangaben

ANBERGEN, H., FRANK, J., MÜLLER, L. und SASS, I.: Freeze-Thaw-Cycles on Borehole Heat Exchanger Grouts: Impact on the Hydraulic Properties, *Geotechnical Testing Journal*, 37, Issue 4, (2014).

GIANNELLI, G. und BRAUN, J.: Einfluss des Betriebs von Wärmepumpen auf potentielle Durchfrostung einer Erdwärmesonde - EWS-Frost - (L75 14 011), Technischer Bericht VEGAS, TB02/2016 (VEG 71), (2018).

BRAUN, J., GIANNELLI G., RIEGGER, M., MOORMANN, C., BUHMANN, P., MUSTAFA, M.: Vertiefte Evaluierung der „Minus 3 °C Grenze“ beim Betrieb von Erdwärmesonden - (L75 180 08/09/10), *Statuskolloquium Umweltforschung Baden-Württemberg*, Vortragsfolien, (2019).

GIANNELLI, G., ADAMS, V.: Untersuchungen von Frost-Tau-Wechsel auf Verpressmaterial, *Der Geothermiekongress DGK 2919*, Poster, (2019).

REUß, M. et al.: Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden und Erdreichkollektoren, Technischer Bericht Bayerisches Zentrums für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), FKZ 0327453A, (2012).

UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG: Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS BW), (2015).

VDI Gesellschaft Energie und Umwelt: Titel VDI 4640 „Thermische Nutzung des Untergrunds“ - Blatt 2 „Erdgekoppelte Wärmepumpeanlage“, *Richtlinie*, 29, (2019).

Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart, Deutschland
Giulia.giannelli@iws.uni-stuttgart.de