

Qualitätsuntersuchung von Erdwärmesonden im Realmaßstab

Dipl.-Ing. Mathieu Riegger

Solites – Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische
Energiesysteme

Meitnerstr. 8, 70563 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711-673200050, Fax: +49 (0)711-673200099

riegger@solites.de

www.solites.de

1. Abstract

The research project EWSplus which is funded by the ministry of economics of Baden-Württemberg deals with the quality assurance of borehole heat exchangers (BHE) in terms of thermal efficiency and hydraulic sealing of the borehole.

A test site with four boreholes was built up in Crailsheim allowing the installation of real-size BHE that can be disassembled for detailed analysis.

This test set-up made it possible to use measurement methods for the detection of artificial discontinuities within the grouting of the BHE and to compare the results and interpretations gained with the real situation in the borehole.

2. Einführung

Im Rahmen des vom Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg geförderten Forschungsvorhabens EWSplus beschäftigt sich Solites in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Rehau AG & Co, GTC Kappelmeyer GmbH, Tewag GmbH, Frau Prof. Dr. Stober (Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung Umwelt) und den Firmen und Institutionen TU Darmstadt (Institut für Massivbau), André Voutta Grundwasserhydraulik, Terratec Geophysical Services und Müller VHF sowie zahlreichen Verfüllmaterialherstellern mit der Klärung bislang ungelöster Fragestellungen hinsichtlich der Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden (EWS).

Das Forschungsvorhaben wurde bereits in [1] vorgestellt. Erste Ergebnisse insbesondere zur thermischen Effizienz von EWS, zum Einfluss von Abstandshaltern und Zentrierhilfen auf die Position der Sondenrohre im Bohrloch aber auch zu einem möglichen Nachweis einer nicht vollständigen Verfüllung einer EWS sind in [2] und [3] veröffentlicht. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse von drei ausgewählten Messverfahren zum Nachweis einer nicht vollständigen Verfüllung vorgestellt. Die Abbildungen dieses Beitrags sind zusätzlich farbig und in hoher Auflösung auf dem Tagungsband beigefügten CD-ROM verfügbar.

3. Versuchsaufbau

Der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens EWSplus liegt auf der Durchführung von Realmaßstabexperimenten.

Hierzu wurde ein Versuchsgelände mit vier Bohrungen (Abbildung 1 links) eingerichtet, in die EWS mit einer Tiefe von ca. 30 m durch die Verwendung von zwei konzentrisch angeordneten Rohrtouren unter Baustellenbedingungen eingebaut und abschnittsweise zerstörungsfrei rückgebaut werden können. Das obere Ende dieses Versuchsaufbaus ist in Abbildung 1 rechts dargestellt.

Der Ringspalt zwischen den beiden Rohrtouren war bei allen durchgeführten Versuchen wassergefüllt.



Abbildung 1: Versuchsfeld (links) und oberes Ende des Versuchsaufbaus (rechts)

Die Entwicklung dieses Versuchsaufbaus ermöglicht es, die erstellten Bohrlöcher mehrfach zu nutzen und damit chargenweise zahlreiche verschiedene EWS-Konfigurationen (verschiedene/r Bohrlochdurchmesser, Verfüllmaterialien, Einsatz von Abstandshaltern/Zentrierhilfen) einzubauen. Bei einigen der 20 im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus untersuchten EWS wurden bewusst Fehlstellen (FS) in der Verfüllung (wasser-/luftgefüllte Bereiche) eingebaut. Damit ergibt sich die Möglichkeit verschiedene geophysikalische Messverfahren unter definierten Bedingungen auf ihre Aussagekraft hinsichtlich der Detektion von Fehlstellen zu untersuchen. Die Messungen und Interpretationen zur Verfüllqualität in den EWS wurden durch die beauftragten Firmen und Institutionen ohne Kenntnis des Einbauzustands durchgeführt. Nach Beendigung der Messungen wurden die EWS zerstörungsfrei rückgebaut und der tatsächliche Zustand im Bohrloch inklusive der Sondenrohrpositionen wurde detailliert aufgenommen, um diesen mit den Interpretationen vergleichen zu können. Diese Analyse wird durch die Verwendung von EWS mit vier verschiedenen farbigen Sondenrohren (siehe Abbildung 1 rechts) vereinfacht. Die beauftragten Firmen und Institutionen konnten anschließend durch die Rückmeldung über den tatsächlichen Zustand im Bohrloch ihr Mess- und Auswerteverfahren weiterentwickeln.

4. Aufbau der untersuchten Erdwärmesonden

Zur Beurteilung der in den Abschnitten 5 bis 7 folgenden Messergebnisse ist eine detaillierte Kenntnis des tatsächlichen Zustands der betrachteten EWS erforderlich. Die Art und Position der bewusst eingebauten sowie der ungeplant entstandenen wassergefüllten Fehlstellen in EWS 3-2 (Versuchsreihe 3, Bohrloch 2) und in EWS 5-4 (Versuchsreihe 5, Bohrloch 4) sind in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt. Auf die Darstellung kleiner Fehlstellen mit einer Länge von weniger als ca. 10 cm, die nicht den gesamten Ringraum erfassen, wird aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet. Die ebenfalls betrachtete EWS 2-2, deren Fehlstellen nicht in einem Diagramm dargestellt werden, hat einen Durchmesser von ca. 141 mm, Zentrierhilfen im Abstand von 1 bis 5 m und wurde mit einer Fertigmischung verpresst. Ein

vollständig unverfüllter, wassergefüllter Bereich zwischen ca. 28 und 29 m unter Oberkante Verfüllmaterial stellt die markanteste Fehlstelle dieser EWS dar.

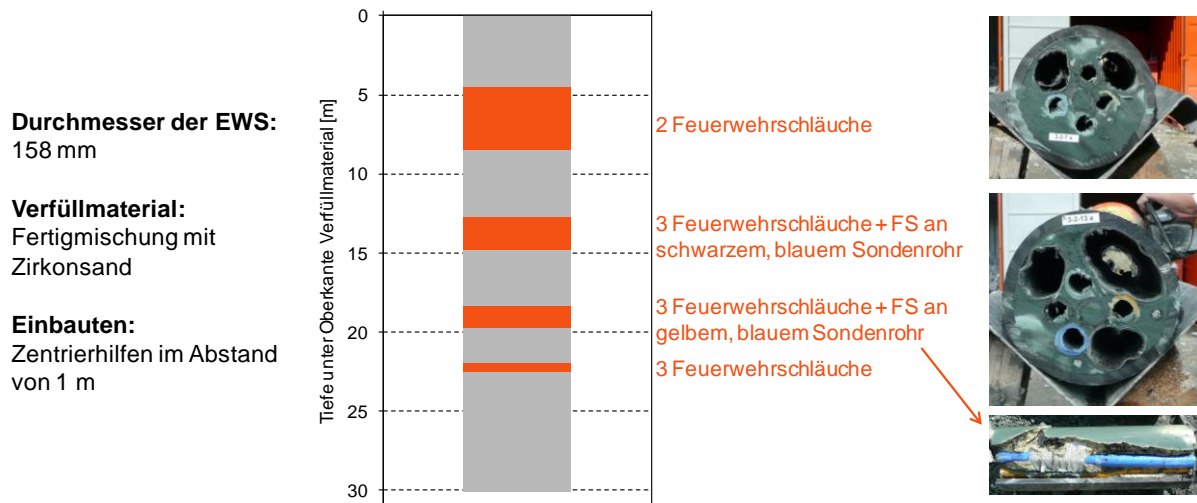


Abbildung 2: Fehlstellenübersicht in EWS 3-2

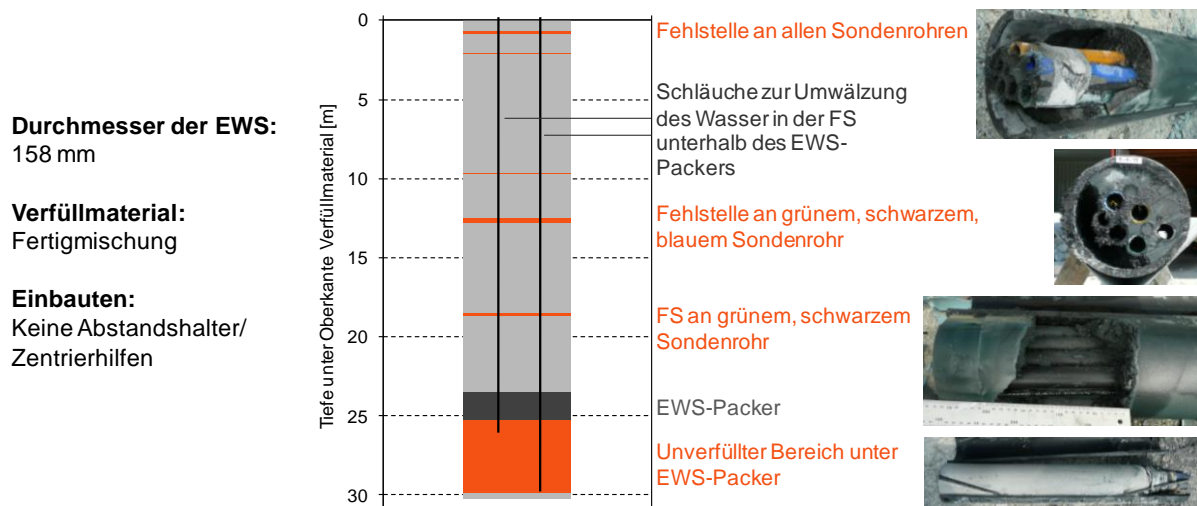


Abbildung 3: Fehlstellenübersicht in EWS 5-4

5. Enhanced Geothermal Response Test

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse von Enhanced Geothermal Response Tests, die durch die Firma GTC Kappelmeyer GmbH durchgeführt wurden.

Bei diesem Test wird mit Hilfe von Glasfaserkabeln, in die ein Heizdraht integriert ist und die gemeinsam mit der EWS ins Bohrloch eingebaut werden, eine konstante Heizleistung über die gesamte EWS-Länge eingebracht.

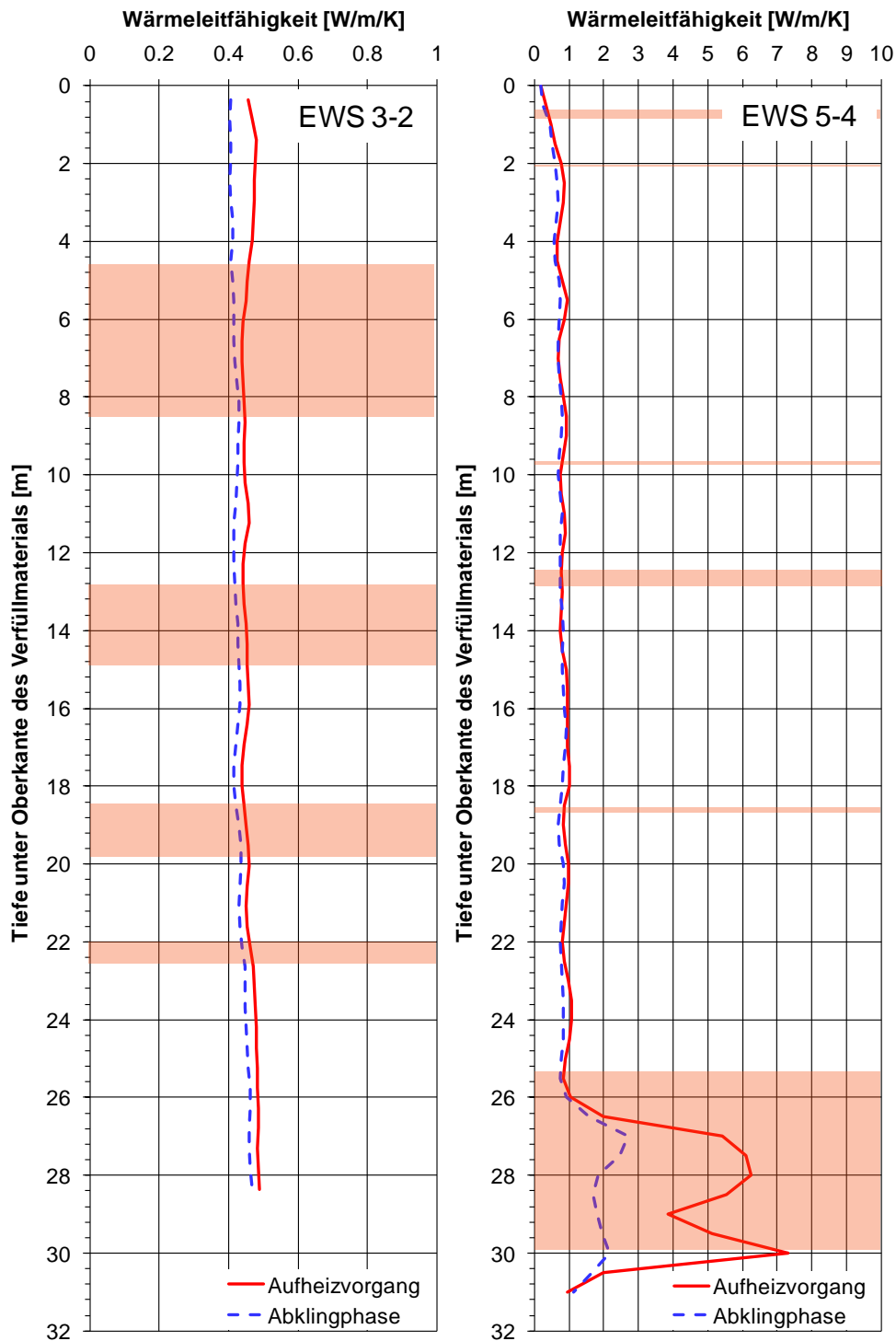


Abbildung 4: Wärmeleitfähigkeit aus dem zeitlichen Nahfeld (2-15 min) von Enhanced Geothermal Response Tests in EWS 3-2 und EWS 5-4 (Quelle: GTC Kappelmeyer GmbH)

Aus dem zeitlichen Temperaturverlauf zu Beginn der Aufheiz- und anschließenden Abklingphase werden Wärmeleitfähigkeiten berechnet, die eine Aussage über die im Bohrloch vorliegenden Materialien geben sollen. Das Mess- und Auswerteverfahren

ist ausführlich in [4] beschrieben. Neben den ermittelten Wärmeleitfähigkeiten sind in Abbildung 4 die Tiefen kenntlich gemacht, in denen sich die Fehlstellen befinden. Diese Darstellung der Fehlstellen findet sich analog in den Abbildungen 5 und 6.

Die Detektion von Fehlstellen, die kleiner als die derzeit mögliche Messauflösung von 0,5 m sind, ist mit diesem Messverfahren kaum möglich. Es wird allerdings deutlich, dass vollständig unverfüllte, wassergefüllte Bereiche mit einer Größe von 1 Meter oder mehr sicher durch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit auf Grund der sich im Wasser einstellenden Konvektion nachgewiesen werden können.

Zukünftig soll der Einsatz dieser Messmethode auch für Bestands-EWS untersucht werden, in die keine Messkabel eingebaut sind. Hierzu ist das Hineinschieben der Messkabel in die Sondenrohre vorgesehen.

6. Gamma-Log

Mit einem gemeinsam von den Firmen DMT GmbH & Co. KG und Terratec Geophysical Services entwickelten, miniaturisierten, drahtgebundenen Messgerät ist es möglich, Erdwärmesondenrohre der Dimension 32 x 2,9 mm – sofern diese nicht zu stark verdrillt oder geknickt sind - zu befahren und die natürliche Gammastrahlung aufzuzeichnen. Obwohl die Miniaturisierung eine sehr kleine Kristallgröße im Gamma-Messgerät erfordert, zeigte sich in offenen Bohrlöchern eine gute Übereinstimmung der miniaturisierten Messsonde mit einer kalibrierten, gewöhnlichen Messsonde zur Untersuchung von Bohrlöchern, die einen wesentlich größeren Kristall aufweist [5].

In Abbildung 5 werden eine Nullmessung, die im luftgefüllten Innenrohr von Bohrloch 2 durchgeführt wurde und die zur Bestimmung der natürlichen Gammastrahlung des Untergrunds dient, und Messungen jeweils in einem Sondenrohr der EWS 2-2 und EWS 3-2 gegenübergestellt. Die Messwerte wurden in Intervallen von 1-2 cm bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 2 m/min aufgezeichnet und es wurden anschließend gleitende Mittelwerte über Tiefenbereiche von 50 cm gebildet.

Die Kurve „Strahlung EWS“ gibt jeweils die Differenz der beiden Gammamessungen wieder.

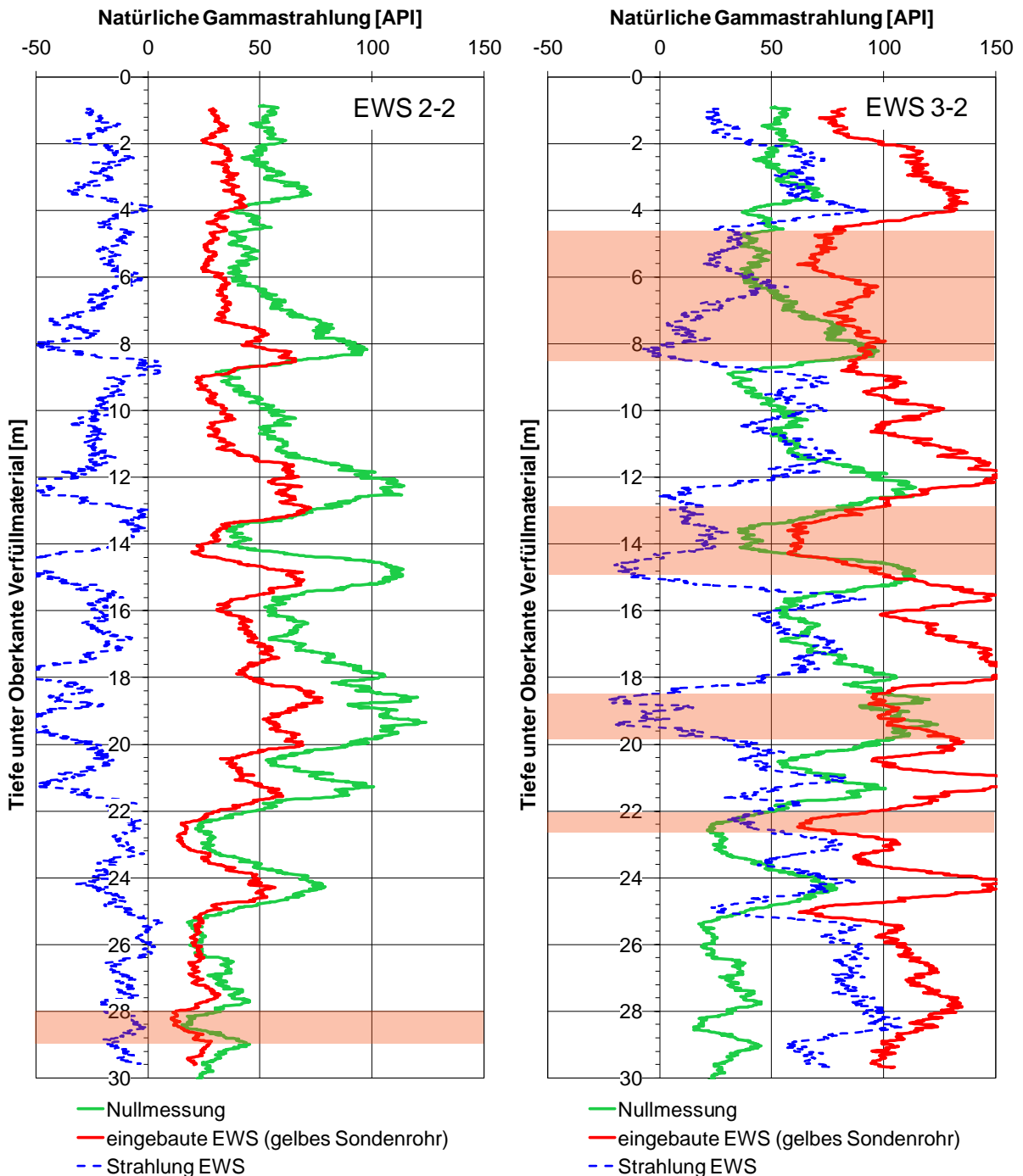


Abbildung 5: Ergebnisse der Gamma-Logs in EWS 2-2 und EWS 3-2 (Quelle: Terratec Geophysical Services)

In EWS 2-2 kommt es bei der Messung im Sondenrohr durch die Dämpfung des Wasserringspalts zwischen Innen- und Außenrohr und evtl. auch durch die Dämpfung des Verfüllmaterials zu einer Absenkung der gemessenen Gammastrahlung. Es wird deutlich, dass bei einem Verfüllmaterial, das keine erhöhte Gammaaktivität aufweist,

selbst Fehlstellen wie der 1 m große, vollständig unverfüllte, wassergefüllte Bereich in einer Tiefe von ca. 28 – 29 m unter Oberkante Verfüllmaterial nicht nachweisbar sind. Daher wurde in EWS 3-2 dem Verfüllmaterial Zirkonsand beigemischt (15 Gewichtsprozent der Trockenmasse des Fertigbaustoffs), der eine hohe natürliche Gammaaktivität besitzt. Durch den Vergleich mit der Nullmessung zeigt sich bei dieser Messung eine Strahlungserhöhung, wobei ein auffälliger Abfall der errechneten Strahlungskurve der EWS in drei der vier teilweise unverfüllten Bereiche zu beobachten ist. Für eine vollständige Betrachtung des Bohrlochs müssten allerdings auch die weiteren Sondenrohre dargestellt werden.

Die Messung der natürlichen Gammastrahlung ist nicht zur Untersuchung von Bestands-EWS geeignet und erfordert den Einsatz von gammaaktiven Verfüllmaterialien sowie einer zusätzlichen Nullmessung.

7. Gamma-Gamma-Messverfahren

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus eingesetzte Gamma-Gamma-Sonde wurde von André Voutta Grundwasserhydraulik entwickelt und eingesetzt.

Die zentralen Komponenten der miniaturisierten, drahtgebundenen und zur Befahrung von – nicht zu stark verdrillten oder geknickten – Erdwärmesonden der Dimension 32 x 2,9 mm geeigneten Gamma-Gamma-Sonde sind eine Cäsium 137 Quelle und ein Detektor in Form eines Geiger-Müller-Zählers. Zu beachten ist daher bei diesem Messverfahren das Handling mit einer gammaaktiven Messsonde und das nicht vollständig auszuschließende Verlustrisiko einer aktiven Gamma-Strahlenquelle in einer EWS. Mit dem Messverfahren wird die Dichte einer Matrix ermittelt, die im Fall einer Wasser- oder Luftfahlstelle geringer ist als im Verfüllmaterial. Eine detaillierte Beschreibung des Messprinzips und der zu Grunde liegenden physikalischen Vorgänge ist in [6] zu finden.

Die Messwerte wurden bei den vorliegenden Messungen in einem Intervall von 1 cm mit einer Fahrgeschwindigkeit von 0,5 m/min aufgezeichnet und es wurden anschließend gleitende Mittelwerte über Tiefenbereiche von 8 cm gebildet. Bei der Auswertung kann zusätzlich zu den Kurvenverläufen in den einzelnen Sondenrohren der Mittelwert aller Sondenrohre betrachtet werden.

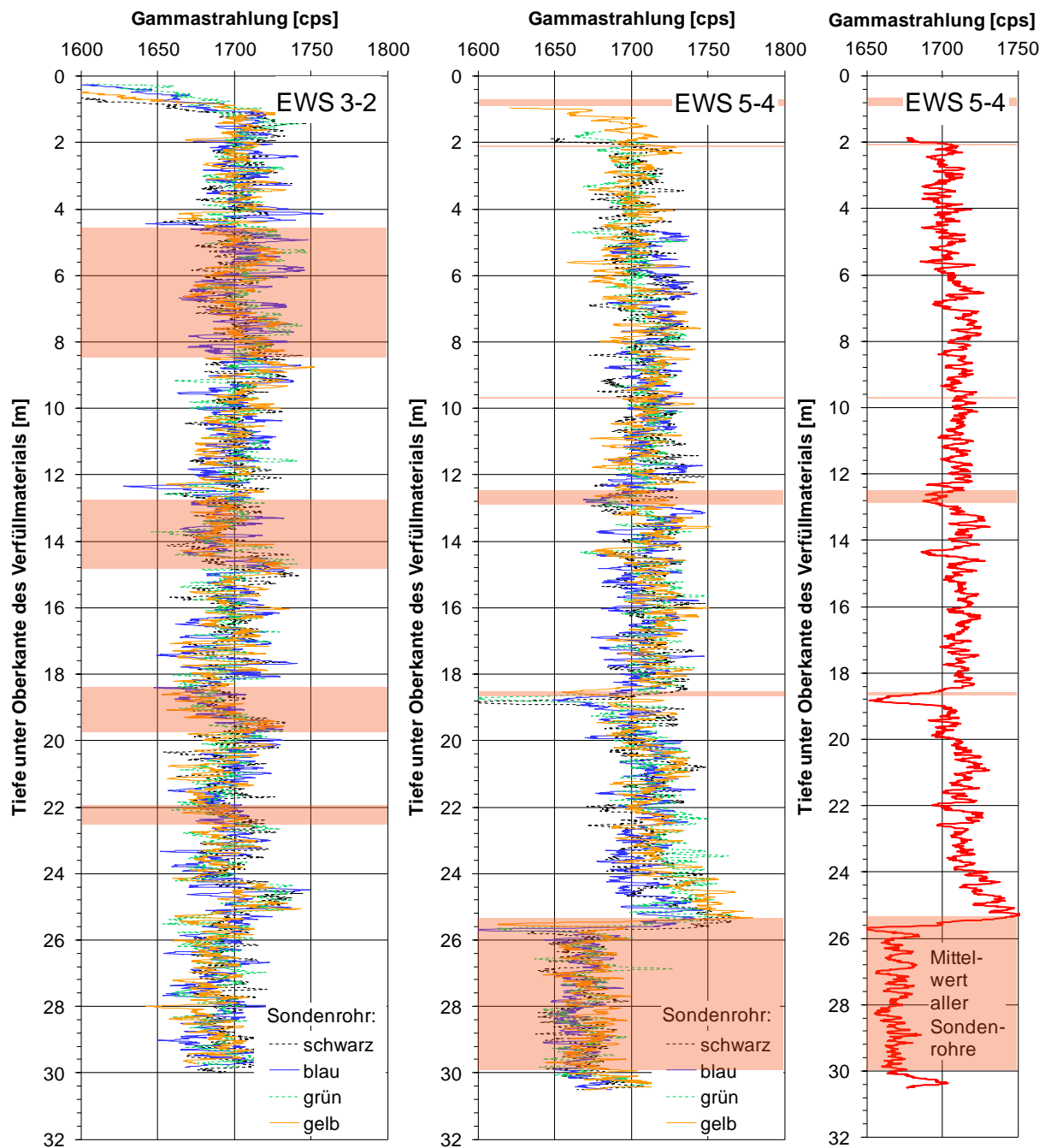


Abbildung 6: Ergebnisse der Gamma-Gamma-Messung in EWS 3-2 und EWS 5-4 (Quelle: André Voutta Grundwasserhydraulik)

Abbildung 6 zeigt, dass mit der Gamma-Gamma-Messung in EWS 5-4 mit Ausnahme der sehr oberflächennah befindlichen Fehlstelle in ca. 1 m Tiefe, alle Fehlstellen mit einer Größe von mehr als 10 cm detektiert werden können. Dazu gehört neben der großen vollständig wassergefüllten Fehlstelle oberhalb des Sondenfußes auch eine Fehlstelle mit einer Größe von lediglich ca. 15 cm, die sich zwischen dem schwarzen

und grünen Sondenrohr sowie der „Bohrlochwand“ befand. In einer Tiefe von ca. 14,5 m unter Oberkante Verfüllmaterial wurde allerdings auch eine Fehlstelle vermutet, die dort nicht vorlag.

In EWS 3-2 hingegen, bei der das Verfüllmaterial im Hinblick auf den Einsatz des Gamma-Logs (s. Abschnitt 6) mit gammaaktivem Zirkonsand dotiert wurde, konnten Fehlstellen mit einer Größe von 1 m und mehr nicht detektiert werden. Daher ist zu vermuten, dass die Gamma-Gamma-Messung durch das dotierte Verfüllmaterial gestört wird.

Bei allen Gamma-Gamma-Messungen zeigte sich, dass die Fahrtgeschwindigkeit sehr gering zu wählen ist, um ein starkes Rauschen des Messsignals zu verhindern. Vorteilhaft an diesem Messverfahren ist die Möglichkeit auch Bestands-EWS untersuchen zu können.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens EWSplus wurden zahlreiche Messverfahren, die sich potenziell zum Nachweis einer vollständigen EWS-Verfüllung eignen, unter definierten Bedingungen auf ihre Aussagekraft untersucht.

Neben den hier vorgestellten Mess- und Auswerteverfahren wurden auch ein Ultraschall-Bohrlochsensor (TU Darmstadt), der drahtlose Temperatur-Minidatenlogger NIMO-T und der Kurz-Thermal-Response-Test [7] eingesetzt.

Zum Jahresende 2011 werden die umfangreichen Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben in einem Abschlussbericht zusammengefasst, der auf der Internetseite www.solites.de verfügbar sein wird. Darin werden auch die Messergebnisse aus zwei direkt im Untergrund eingebauten und mit Fehlstellen „ausgestatteten“ Erdwärmesonden vorgestellt. Darüber hinaus werden auch die Resultate der messtechnischen Untersuchungen zur Hydratationswärmeentwicklung während des Abbindevorgangs des im Verfüllmaterial enthaltenen Zements und zum Nachweis vertikaler Umläufigkeiten im Ringraum von EWS vorgestellt.

Es bleibt festzuhalten, dass die Versuche und Rückmeldungen aus dem Forschungsprojekt EWSplus in zahlreichen Fällen zu einer Weiterentwicklung der

Mess- und Auswerteverfahren beitragen konnten. Diese positive Entwicklung soll zukünftig mit weiteren Forschungsarbeiten fortgesetzt werden.

Denn die Verfügbarkeit zuverlässiger und genauer geophysikalischer Messmethoden kann bei Schadensfällen helfen, Schlimmeres zu vermeiden und sie kann durch die Möglichkeit einer Überprüfbarkeit von EWS zu einer besseren Ausführungsqualität beitragen.

Das Forschungsprojekt EWSplus wird durch das Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg gefördert. Der Autor dankt für diese Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt beim Autor.

9. Literatur

- [1] Riegger, M.: Das Forschungsprojekt EWSplus – Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden; Fachbeitrag zum Otti-Symposium Oberflächennahe Geothermie 2009; Bad Staffelstein
- [2] Riegger, M.: EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden) – Erste Ergebnisse; Tagungsband Geothermiekongress 2010; Karlsruhe
- [3] Riegger, M.: Realmaßstabexperimente zur Qualitätsuntersuchung von Erdwärmesonden, Fachbeitrag zur Messe Geotherm 2011; Offenburg
- [4] Heske, C. et al.: Der Enhanced Geothermal Response Test als Auslegungsgrundlage und Optimierungstool; bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie 2011
- [5] Rübel, A. et al.: Extrem dünne Bohrlochsonden zum Einsatz in oberflächennahen Erdwärmesonden; Tagungsband Geothermiekongress 2009; Bochum
- [6] www.avoutta.de (Geothermische Dienstleistungen → Geothermische Untersuchungen → Gamma-Gamma-Messung)
- [7] Walker-Hertkorn, S. et al.: Temperaturprofile stärken die Aussagekraft von Thermal-Response-Tests; bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau; Ausgabe September 2009