

Thermal Response Tests und Temperaturtiefenprofile Erfahrungen aus Praxis und Forschung

**Markus Kübert⁽¹⁾, David Kuntz⁽¹⁾, Andre Voutta⁽³⁾, Simone Walker-Hertkorn⁽¹⁾
Philipp Blum⁽²⁾, Peter Bayer⁽²⁾**

⁽¹⁾systherma Planungsbüro für Erdwärmesysteme GmbH
Am Haag 12, 72181 Starzach-Felldorf

Tel.: (0049 -7483) 9 28 99-0, Fax: (0049 -7483) 9 28 99-25

⁽²⁾Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Universität Tübingen

⁽³⁾Andre Voutta Grundwasserhydraulik

Keywords: Thermal Response Test, Geothermie, Temperaturprofile,

Zusammenfassung

Zur Auswertung von Thermal Response Tests werden die Messkurven (Temperatur-Zeit-Kurven) im Hinblick auf die effektive Wärmeleitfähigkeit und den thermischen Bohrlochwiderstand üblicherweise analytisch mit Hilfe der Linienquellentheorie ausgewertet. Für die Anwendbarkeit der Linienquellentheorie wird jedoch eine konstante Leistungszufuhr während der gesamten Testdauer sowie ausschließlicher Wärmetransport aufgrund von Wärmeleitung (Konduktion) gefordert. Die Linienquellentheorie kann also bei starken Leistungsschwankungen oder Stromausfällen während des TRT nicht zur Auswertung herangezogen werden. Gleiches gilt bei einer starken Beeinflussung des Thermal Response Tests durch Grundwasserströmung (konvektiver Wärmetransport). In Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen wurden Methoden zur Auswertung von TRT mit numerischen Modellen, wie zum Beispiel SBM, näher betrachtet. Anhand von Praxisbeispielen sollen diese numerischen Methoden zur Auswertung von TRTs unter dem Einfluss von Stromausfällen bzw. Grundwasserströmung vorgestellt und diskutiert werden.

Mittels einer Befahrung von Erdwärmesonden mit einem Temperaturfühler ist zudem die Aufzeichnung von vertikalen Temperaturprofilen möglich. Die Temperaturmessungen können auch nach der Durchführung eines TRT beliebig oft durchgeführt werden. Neben Informationen zum geothermischen Tiefengradienten geben diese Messungen auch Hinweise auf die tiefenhorizontierte Regeneration des im Zuge des TRT erwärmten Untergrundes. Hierdurch ist z. B. die Lokalisierung und Qualifizierung von grundwasserführenden Schichten und Trennhorizonten möglich. Weiterhin ist eine Bewertung der Güte der Hinterfüllung der Erdwärmesonden gegeben. Insbesondere im Bereich von Trennhorizonten zwischen zwei Grundwasserstockwerken kann das Vorhandensein einer wirksamen Hinterfüllung bewertet werden. Die Möglichkeiten von Temperaturtiefenprofilmessungen sollen anhand einiger Praxisbeispiele diskutiert werden.

1. Einleitung

Thermal Response Tests (TRT) werden zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und des thermischen Bohrlochwiderstandes an vollständig ausgebauten Erdwärmesonden herangezogen. Weiterhin ist die Ermittlung der mittleren ungestörten Untergrundtemperatur über die gesamte Sondenlänge vor Inbetriebnahme der Anlage möglich.

Eine klassische TRT-Auswertung erlaubt keine vertikale Auflösung der Untergrundtemperatur. Solche Temperaturtiefenprofile können durch Befahrung einzelner Sondenstränge mit Temperaturfühlern aufgezeichnet werden. Grundsätzlich kann mit diesem Messverfahren die tiefenhorizontierte ungestörte Untergrundtemperatur und die Temperaturverteilung in der Sonde vor bzw. nach Durchführung eines TRT gemessen werden. Aus den gemessenen Temperatur-

tiefenprofilen lassen sich damit quantitative und qualitative Aussagen über den Grundwasserfluss an einem Standort und die Güte der Hinterfüllung ableiten. Im Folgenden werden Erfahrungen aus der Praxis und Forschung der beiden Messmethoden vorgestellt.

2. Grundsätzliches zu Thermal Response Tests

Die Durchführung eines TRT erfolgt an einer vollständig ausgebauten Sonde in Form eines In-Situ Tests. Bei einem TRT wird eine genau definierte Wärmeleistung an die Erdwärmesonde angelegt und der sich daraus ergebende Verlauf der Ein- und Austrittstemperatur aufgezeichnet (Temperaturantwort: „Response“). Aus diesen Messkurven können über entsprechende Auswerteverfahren folgende für die Sondenlänge repräsentative Untergrundparameter bzw. Eigenschaften der Erdwärmesonde bestimmt werden:

- Effektive Wärmeleitfähigkeit
- Thermischer Bohrlochwiderstand
- Mittlere ungestörte Untergrundtemperatur
- Sondenlänge

Üblicherweise werden die Messkurven (Temperatur-Zeit-Kurven) im Hinblick auf die effektive Wärmeleitfähigkeit und den thermischen Bohrlochwiderstand analytisch mit Hilfe der Linienquellentheorie ausgewertet. Für die Anwendbarkeit der Linienquellentheorie sind gewisse Randbedingungen zu beachten:

- Konstante Leistungszufuhr während der gesamten Testdauer
- Wärmetransport aufgrund von Wärmeleitung (Konduktion)

Die Linienquellentheorie kann also bei starken Leistungsschwankungen oder Stromausfällen während des TRT nicht zur Auswertung herangezogen werden. Gleiches gilt bei einer starken Beeinflussung des Thermal Response Tests durch Grundwasserströmung (konvektivem Wärmetransport). Unter solchen Bedingungen sind die Temperaturkurven nicht auswertbar und somit wertlos.

Um die Messkurven eines TRT bei diesen Testbedingungen dennoch auswerten zu können, wurden numerische Methoden zur Auswertung von TRTs entwickelt. Anhand von Praxisbeispielen sollen Ergebnisse dieser Untersuchungen näher vorgestellt werden.

2.1 Stromausfälle bei Thermal Response Tests

Wie oben beschrieben sind TRTs bei Stromausfällen und starken Leistungsschwankungen nicht mehr sinnvoll über die Linienquellentheorie auswertbar. Um die Messwerte dennoch interpretieren zu können, besteht die Möglichkeit den TRT unter Berücksichtigung der Leistungsschwankungen mit numerischen Modellen zu simulieren. Die effektive Wärmeleitfähigkeit sowie die thermischen Bohrlochwiderstände dienen dabei als Eingabeparameter für das Modell und werden gezielt kalibriert, bis die gemessene und die simulierte Temperatur-Zeit-Kurve übereinstimmen (Parameteranpassung).

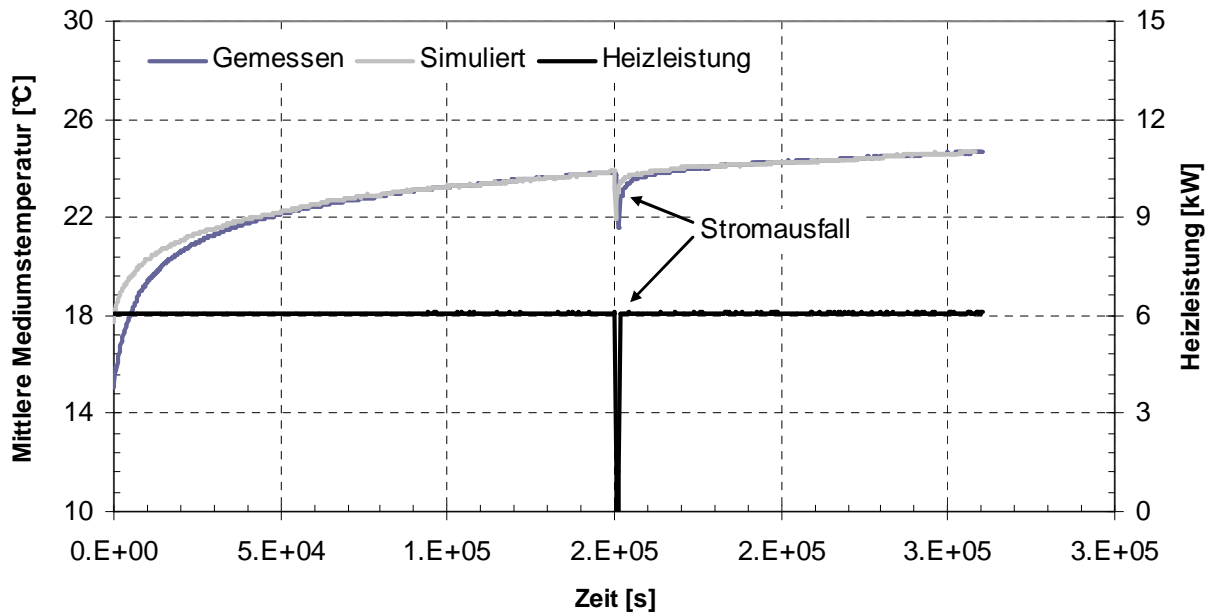


Abbildung 1: Ergebnis einer numerischen Auswertung eines Thermal Response Tests über Parameteranpassung bei Stromausfall.

Abbildung 1 zeigt das Ergebnis einer solchen Parameteranpassung. Wie der Verlauf der Heizleistung (rote Kurve) zeigt, ist nach etwa der Hälfte der Messdauer ein Stromausfall aufgetreten. Über die Kalibrierung mit dem numerischen Modell SBM (Superposition Borehole Model) konnte der Test dennoch ausgewertet werden. Die blaue Kurve in Abbildung 1 stellt die gemessene mittlere Mediumstemperatur dar und die grüne Kurve die simulierte Mediumstemperatur für die beste Übereinstimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und des thermischen Bohrlochwiderstandes.

2.2 Thermal Response Tests unter Grundwassereinfluss

Eine weitere Schwierigkeit bei der Standardauswertung von TRTs mithilfe der Linienquellentheorie tritt bei Beeinflussung des TRT durch Grundwasserströmung auf. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Temperatur-Zeit-Kurve eines TRTs bei Vorhandensein von strömendem Grundwasser. Nur zu Beginn des Tests folgt die Messkurve dem typischen Verlauf unter rein konvektiven Verhältnissen. Ab ungefähr einer Messdauer von 5 Stunden bleibt die Temperatur im Wärmeträgermedium konstant und zeigt nicht den typischen Anstieg, da die zugeführte Wärme durch das strömende Grundwasser abtransportiert wird. Nach einer Testdauer von ungefähr 16 Stunden wurde die Heizleistung von 3,5 kW auf 5,5 kW erhöht. Infolge dieser Erhöhung zeigt die Temperatur-Zeit-Kurve für wenige Stunden den typischen Verlauf, bevor sie sich wieder auf ein konstantes Niveau einpendelt. Somit wird auch die zugeführte Leistung von 5,5 kW durch den Grundwasserstrom abgeführt.

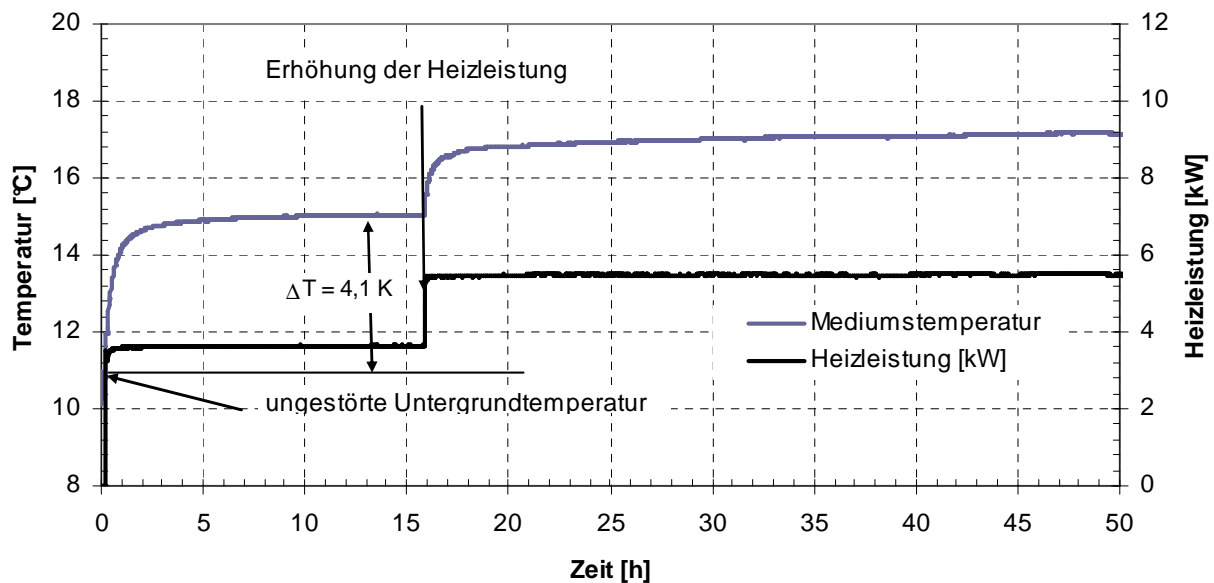


Abbildung 2: Temperatur-Zeit-Kurve eines TRTs bei Vorhandensein von strömendem Grundwasser

Aufgrund der Dominanz des Wärmetransports durch Grundwasserströmung (konvektiver Wärmetransport) ist diese Temperatur-Zeit-Kurve nicht mehr über die Linienquellentheorie auswertbar. Über eine geeignete Parameteranpassung mit numerischen Strömungs- und Wärmetransportmodellen können diese grundwasserbeeinflussten Messkurven dennoch ausgewertet werden. Als Fittingparameter dient in diesem Fall nicht die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, sondern die mittlere Filtergeschwindigkeit des Grundwassers über die gesamte Sondenlänge. Aus der Messkurve des TRT alleine kann nicht auf eine tiefenhorizontierte Fließgeschwindigkeit bzw. auf die Lage grundwasserführenden Schichten geschlossen werden. Dies ist nur über eine entsprechende Interpretation zusätzlicher Temperaturtiefenprofilmessungen vor und nach Durchführung des TRT möglich.

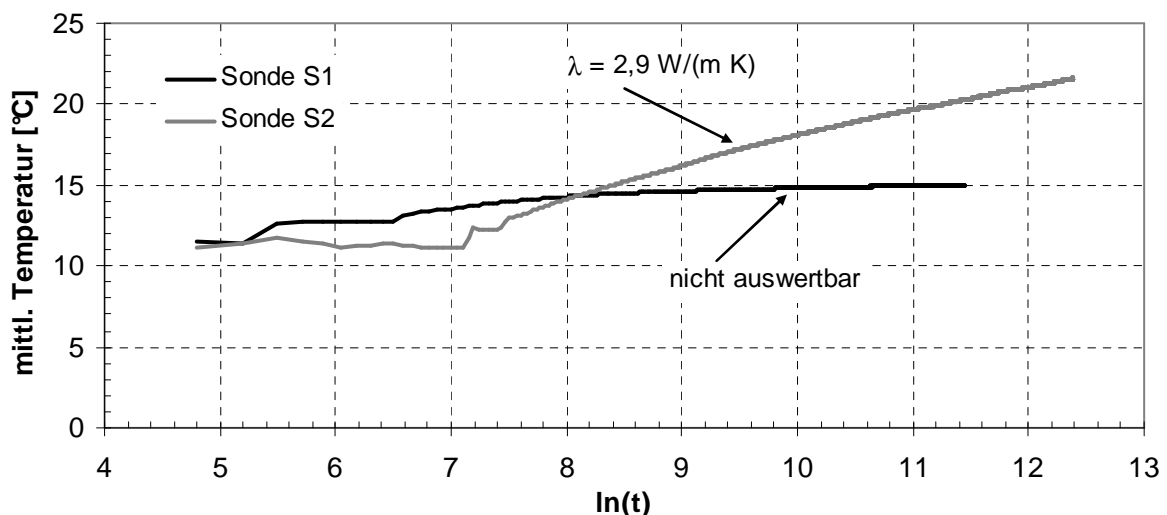


Abbildung 3: Temperatur-Zeit-Kurven von zwei TRTs am gleichen Standort

Grundsätzlich ist die Ableitung von Filtergeschwindigkeiten aus Temperatur-Zeit-Kurven ohne zusätzliche Informationen bzw. Messungen am Standort mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

Hierzu zeigt Abbildung 3 die Temperatur-Zeit-Kurven von zwei TRTs, welche am gleichen Standort in einer Entfernung von ca. 200 m zueinander durchgeführt wurden. Die beiden Testsonden binden beide in den Schilfsandstein des Keupers ein, zeigen jedoch einen völlig unterschiedlichen Verlauf. Während die Messkurve an der Sonde S2 einem typischen Trend folgt und die mittels Linienquellentheorie ermittelte Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Erwartungen liegt, zeigt der Verlauf der Messkurve an der Sonde S1 klar das Vorhandensein einer starken Grundwasserströmung. Während die Sonde S1 offensichtlich eine grundwasserführende Kluft bzw. mehrere Klüfte durchteuft, ist die Sonde 2 weitgehend unbeeinflusst von Grundwasserströmungen. Bei der Ableitung von Filtergeschwindigkeiten aus Temperatur-Zeit-Kurven muss also die Plausibilität der Ergebnisse sowie die Übertragbarkeit auf den gesamten Standort anhand vorhandener bzw. weiterer Messergebnisse am Standort und anhand von Kartenwerken überprüft werden.

3. Temperaturtiefenprofilmessungen

Temperaturtiefenprofile in Erdwärmesondenrohren können mit einer Messsonde, welche über ein Messkabel die Sonde befährt, aufgezeichnet werden. Typischerweise kann mit diesem Messsystem eine Auflösung von 1 cm erreicht werden. Die Toleranz der Messfühler beträgt 0,1 K.

3.1 Identifizierung von Grundwasserströmungen

Wie in Abschnitt 2 aufgezeigt, kann aus den Ergebnissen eines TRT auf das Vorhandensein einer Grundwasserströmung geschlossen, und bezogen auf die gesamte Sondenlänge, diese auch quantifiziert werden. Eine tiefenhorizontierte Charakterisierung von grundwasserführenden Horizonten und die Quantifizierung der entsprechenden Filtergeschwindigkeit aus den Messergebnissen eines TRT ist allerdings nicht möglich. Zur Ableitung dieser Parameter können Temperaturtiefenprofilmessungen herangezogen werden. Abbildung 4 (linke Seite) zeigt hierzu Temperaturtiefenprofile, welche vor und nach Durchführung eines TRT in einer Testsonde in Nordrhein-Westfalen aufgezeichnet wurden. Die nach Durchführung des TRT aufgezeichneten Profile geben Hinweise auf die Lage der einzelnen Grundwasserstockwerke am Standort. So indizieren die Profile im Bereich des quartären Grundwasserstockwerkes wesentlich höhere Fließgeschwindigkeiten als im Bereich des tertiären Grundwasserstockwerkes. Zudem kann durch die Tiefenprofile die Tiefenlage des Trennhorizontes im Bereich von ca. 20 m u. GOK lokalisiert werden.

In Abbildung 4 (rechte Seite) sind drei Tiefenprofile dargestellt, welche nach Durchführung eines TRT (nach 0,5 h, 1 h und 24 h) in einer Testsonde in Mainz aufgezeichnet wurden. Im Zuge der Durchführung des TRT zeigten Vorauswertungen über die Onlineerfassung der Messwerte hohe effektive Wärmeleitfähigkeiten für den Standort. Ein Abgleich dieser gemessenen scheinbaren Wärmeleitfähigkeiten mit dem von der Bohrfirma zur Verfügung gestellten Schichtenprofil zeigte, dass die Messwerte deutlich über den Erwartungen aufgrund der geologischen Abfolge liegen. Die Bohrdaten an diesem Standort sind zudem lückenhaft: Wegen bohrtechnischer Schwierigkeiten gibt es keine Aufzeichnung der geologischen Abfolge ab einer Tiefe von 50 m u. GOK und auch keine gesicherten Hinweise auf lokale Grundwasserführungen. Mit Hilfe der Tiefenprofilmessungen konnte ab einer Tiefe von ca. 40 bis 45 m ein Grundwasserleiter identifiziert werden. Die Messungen ergaben auch einen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmender Tiefe und somit eine Erklärung für die hohen Messwerte zur scheinbaren Wärmeleitfähigkeit am Standort. Eine solche Charakterisierung ist essentiell für eine verlässliche Planung: Aufgrund der Ergebnisse ist für den Standort eine Bohrtiefe von > 60 m zu empfehlen.

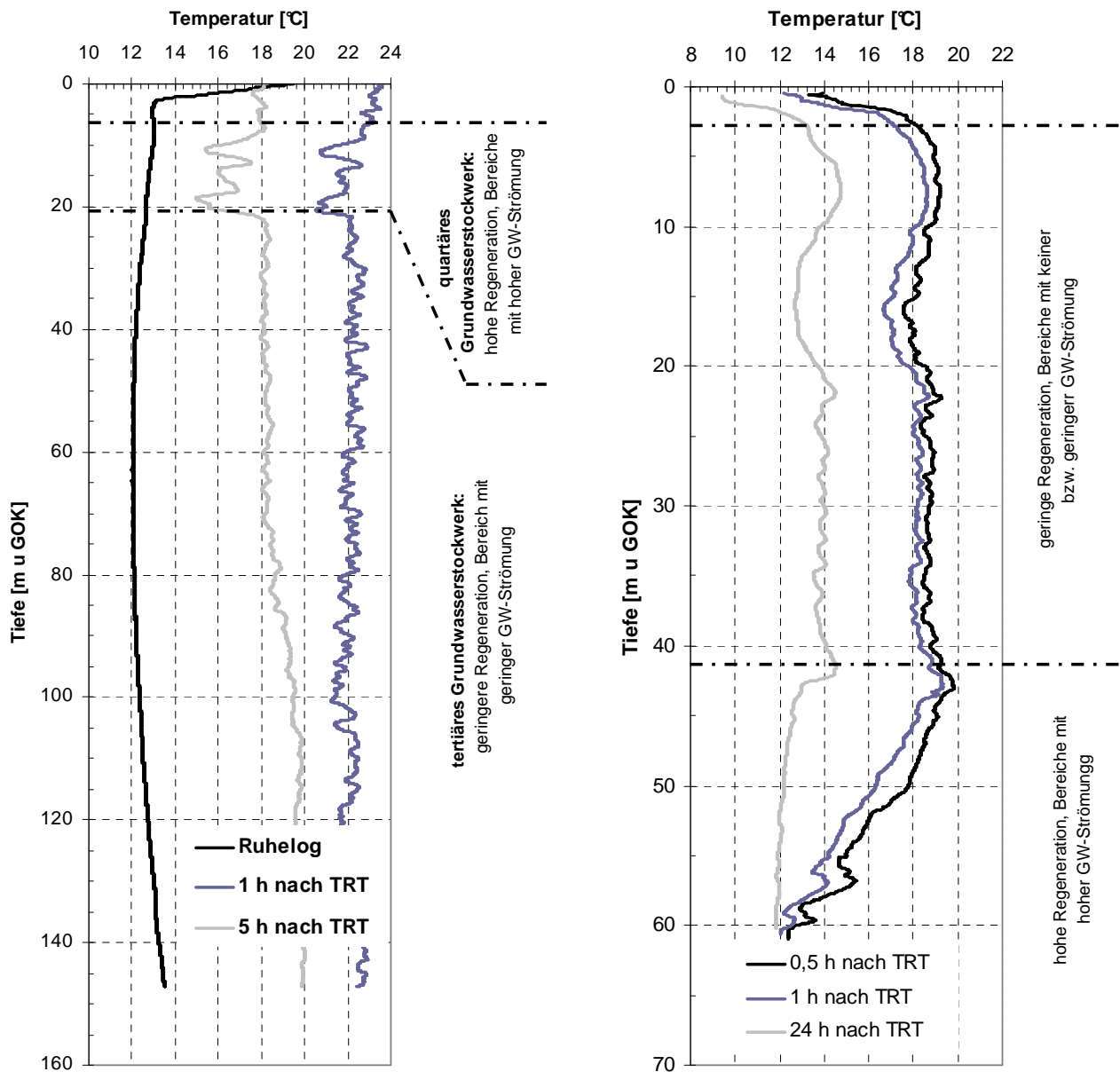


Abbildung 4: Temperaturtiefenprofile vor und nach Durchführung des TRT bei einem Bauvorhaben in Nordrhein-Westfalen (linke Seite) und Mainz (rechte Seite)

3.2 Bewertung der Hinterfüllung

Mit Hilfe von Temperaturtiefenprofilmessungen ist es möglich, die Güte der Hinterfüllung und die Dichtwirkung zwischen einzelnen Trennhorizonten zu bewerten. Dieses Qualitätsmerkmal ist insbesondere vor dem Hintergrund der Umweltauswirkungen von hohem Interesse. Ein Beispiel zur Identifikation des Trennhorizontes zwischen dem quartären und dem tertiären Grundwasserleiter wurde bereits in Abbildung 4 (linke Seite) aufgezeigt. Über das Temperaturtiefenprofil konnte bei diesem Bauvorhaben gleichzeitig die Dichtwirkung der Hinterfüllung im Bereich des Trennhorizontes nachgewiesen werden. Zum Vergleich ist in Abbildung 5 das Temperaturtiefenprofil einer Sonde mit unzureichender Hinterfüllung dargestellt. So zeigt der Bereich zwischen 40 und 80 m unter GOK

einen weitgehend geglätteten Verlauf des Temperaturtiefenprofils gegenüber den typischen Schwankungen in Abbildung 4. Dieser Verlauf deutet auf vertikal strömendes Grundwasser im Bereich des Ringraums (sog. Ringraumumläufigkeiten) und damit auf eine unzureichende Dichtwirkung der Hinterfüllung hin.

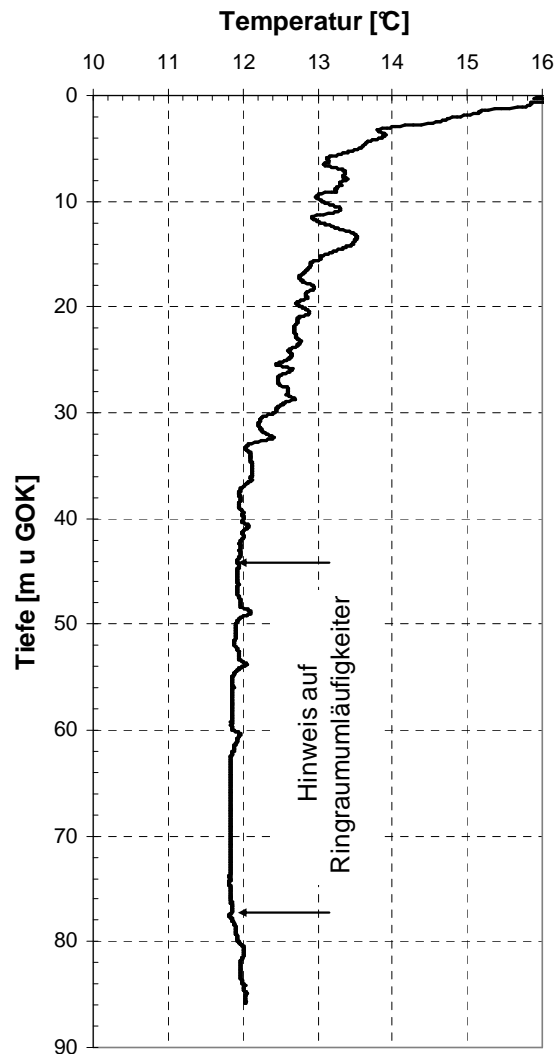


Abbildung 5: Temperaturtiefenprofil nach Durchführung eines TRT zur Bewertung der Hinterfüllung

systemtherma Planungsbüro für Erdwärmesysteme GmbH, Am Haag 12, 72181 Starzach-Felldorf
 markus.kuebert@systemtherma.de