

# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonse Tests (EGRT)

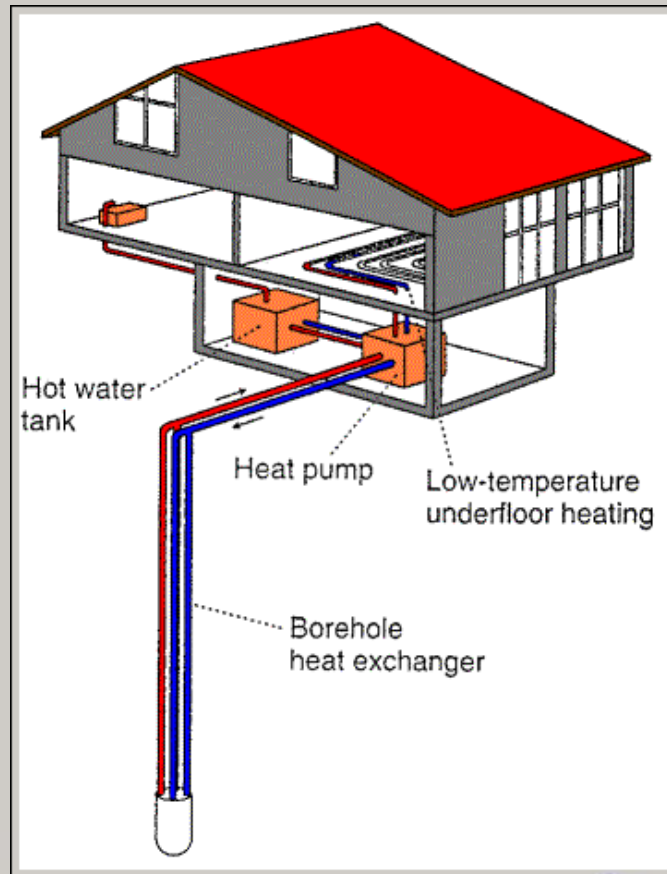
## Inhalt:

- Prinzipielle Unterschiede zw. TRT und EGRT
- Theorie EGRT
- Praxis EGRT
- Vergleich TRT und EGRT in der Praxis
- EGRT zur Qualitätskontrolle der Verfüllung

Jürgen Dornstädter, Philipp Heidinger

GTC-Kappelmeyer GmbH  
Heinrich-Wittmann-Str. 7a, D-76131 Karlsruhe, Germany  
Tel.: +49-721-60008 eMail: gtc@gtc-info.de

Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden  
- ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)



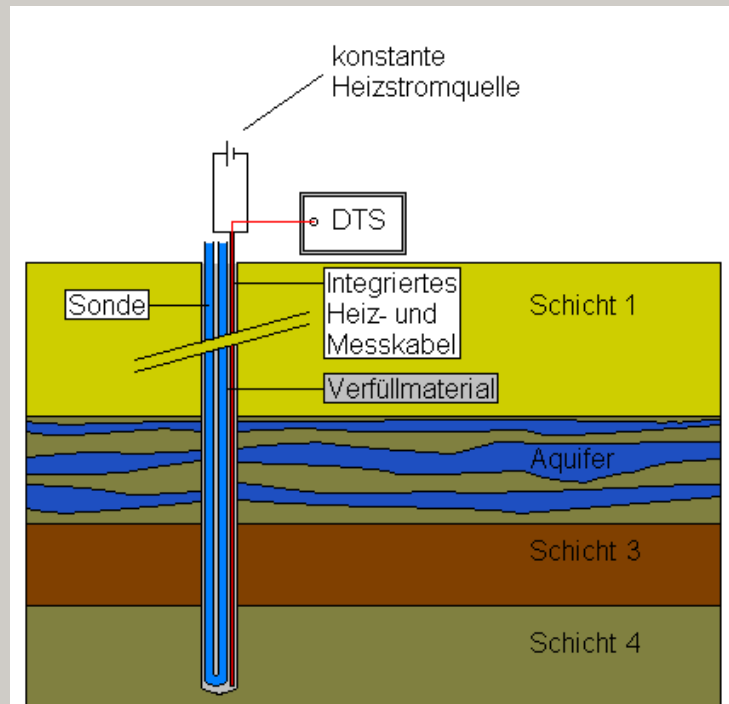
**TRT:**

Bestimmung der thermischen Parameter (Wärmeleitfähigkeit, Bohrlochwiderstand) des Gesamtsystems

**EGRT:**

Bestimmung der thermischen Parameter (Wärmeleitfähigkeit, Bohrlochwiderstand) tiefenabhängig

# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonse Tests (EGRT)



## EGRT:

- Integriertes Mess- und Heizkabel
- Aufheizen mit Konstantstromquelle
- Dauer 3 oder mehr Tage
- Registrierung von  $T_1, \dots, T_n$  und
- der Heizleistung

## EGRT

Bestimmung der thermischen Bodenparameter (Wärmeleitfähigkeit und thermischer Bohrlochwiderstand) für jede Tiefe über die ganze Länge der Sonde:

- In Verbindung mit der Geologie der Bohrung  
Bestimmung dieser Parameter für einzelne Schichten
- Identifizierung von Aquiferen
- Berechnung von Filtergeschwindigkeiten aus effektiven\* Wärmeleitfähigkeiten
- Durch Messen der Bodentemperaturen vor Heizbeginn kann überprüft werden, ob die Hydratationswärme abgeklungen ist (ggf. Korrektur der Daten)
- Kontrolle der Ringraumverfüllung

\* bei zusätzlichem konvektiven Wärmetransport (Fluidbewegung)

## Theorie

- Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit der Näherungslösung der Zylinderquellengleichung
- Bestimmung von Filtergeschwindigkeiten in hydraulisch aktiven Schichten durch die Pécletzahlanalyse
- Berechnung des Bohrlochwiderstandes aus der Wärmeleitfähigkeit des zeitlichen Nahfeldes (-> Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials und der Sonde), Extraktion der Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials und Bestimmung des Bohrlochwiderstandes aus der Geometrie der Erdwärmesonde

# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

## Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit nach dem Zylinderquellenverfahren

Für  $\frac{\kappa t}{a^2} \gg 1$  gilt:

$$T_i(t) = A \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) + B$$

wobei

$$A = \frac{q_L}{4\pi\lambda}$$

und

$$B = \text{konstant}$$

mit:

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit des homogenen Raumes [W/mK]

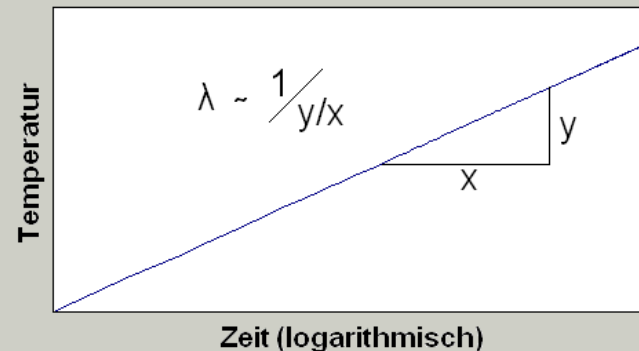
$q_L$  = Heizleistung pro Meter der Zylinderquelle [W/m]

$\kappa$  = Temperaturleitfähigkeit des homogenen Raumes [m<sup>2</sup>/s]

$t$  = Zeit seit Beginn des Heat-Pulses [s]

$t_0$  = 1 Zeiteinheit (1 sec.)

$a$  = Radius der Zylinderquelle [m]



## Pécletzahlanalyse

$$P_e = \frac{q_a}{q_c} = \frac{\rho c_p v_f \Delta T}{\lambda \left( \frac{\Delta T}{l} \right)}$$

$$v_f = \frac{P_e \lambda}{l \rho c_p}$$

$$v_f = \frac{\lambda_{\text{kond.} + \text{konv.}} - \lambda_{\text{kond.}}}{l \rho c_p}$$

mit:

$q_a$  = konvektiver (advektiver) Wärmestrom [W/m<sup>2</sup>]

$q_c$  = konduktiver Wärmestrom [W/m<sup>2</sup>]

$\rho$  = Dichte des Fluids [kg/m<sup>3</sup>]

$c_p$  = spezifische Wärmekapazität des Fluids bei konstantem Druck [J/kg/K]

$v_f$  = Filtergeschwindigkeit des Fluids [m/s]

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz [K]

$\lambda = \lambda_{\text{kond.}}$  = Wärmeleitfähigkeit des Bodens [W/m/K]

$l$  = charakteristische Länge [m]

# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

Einbau  
Erdwärmesonde  
und  
Hybridglasfaser-  
kabel



# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonse Tests (EGRT)

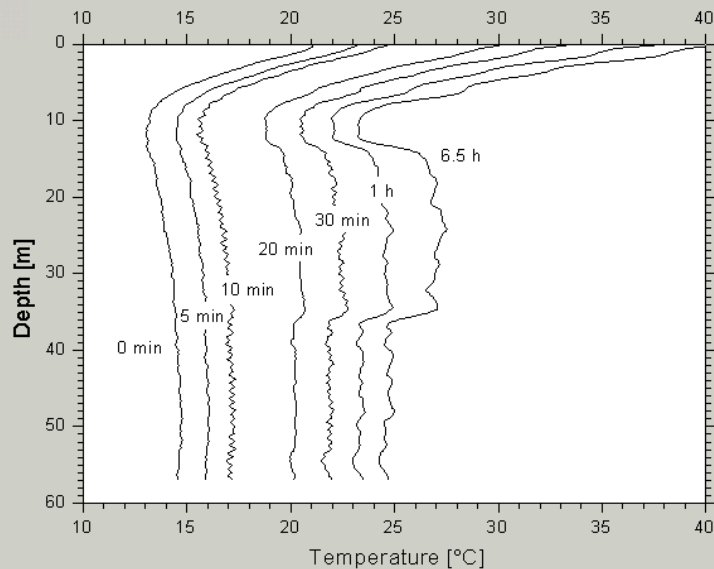
## Praxis

- 57m tiefe Grundwassermessstelle
- Schichtung:- Niederterrassenschotter
  - Kohleflöz
  - Glimmersandschicht
- 2 GWL: oberhalb, sowie unterhalb des Flöz
- die Filtergeschwindigkeit des oberen GWL beträgt 0,25m/Tag
- effektive Heizleistung von 24,5 W/m

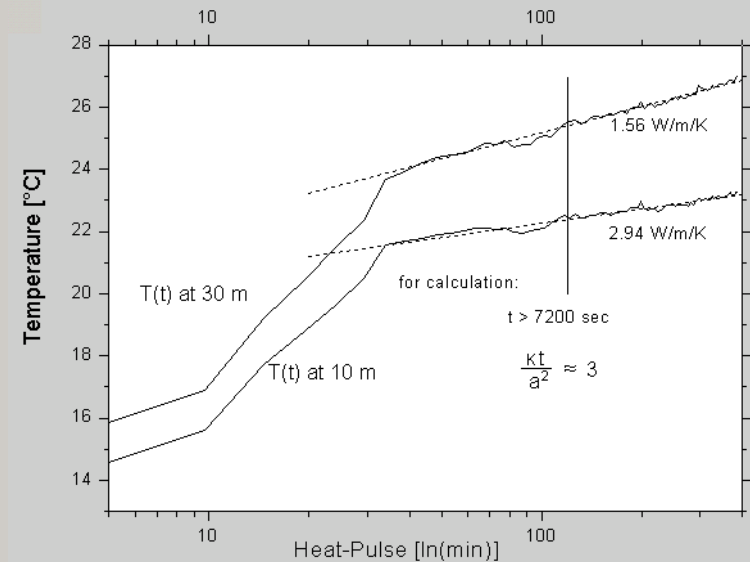


# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

## Auswertung



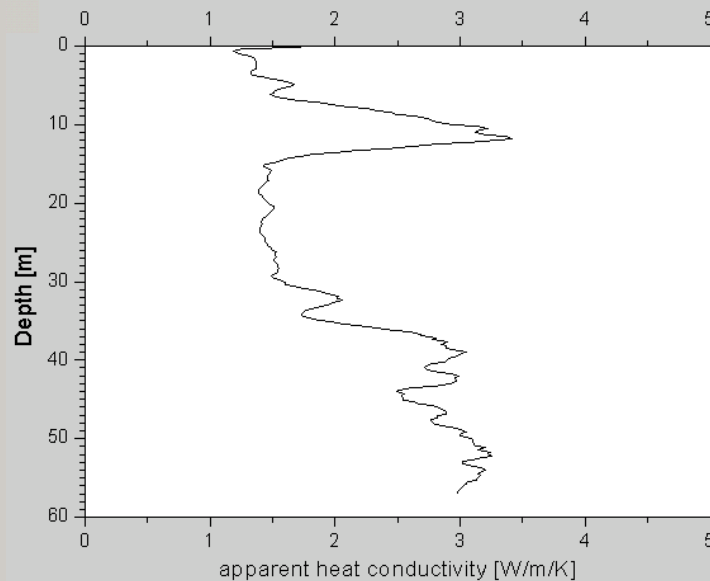
Temperatur-Tiefenprofile zu ausgewählten Zeiten



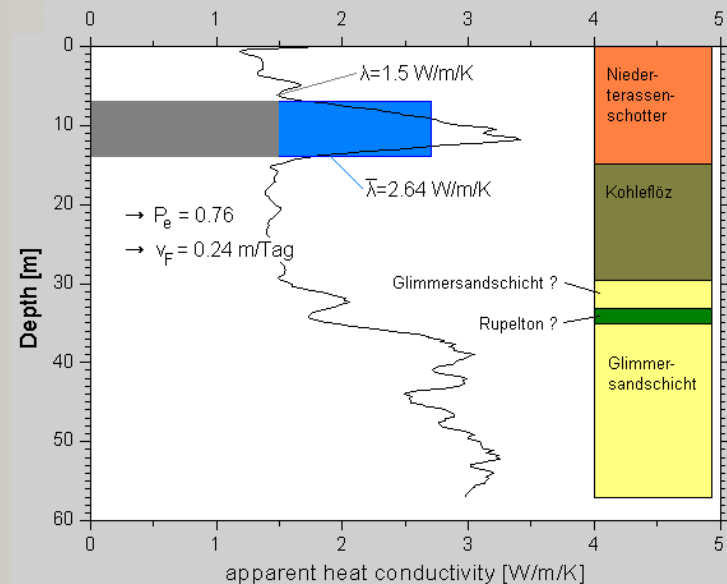
Logarithmische Darstellung der Aufheizkurve für zwei ausgewählte Tiefen

# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

## Wärmeleitfähigkeit



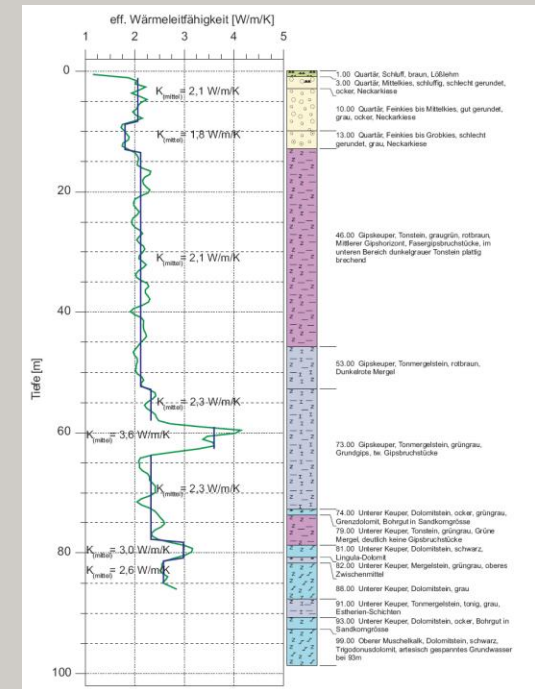
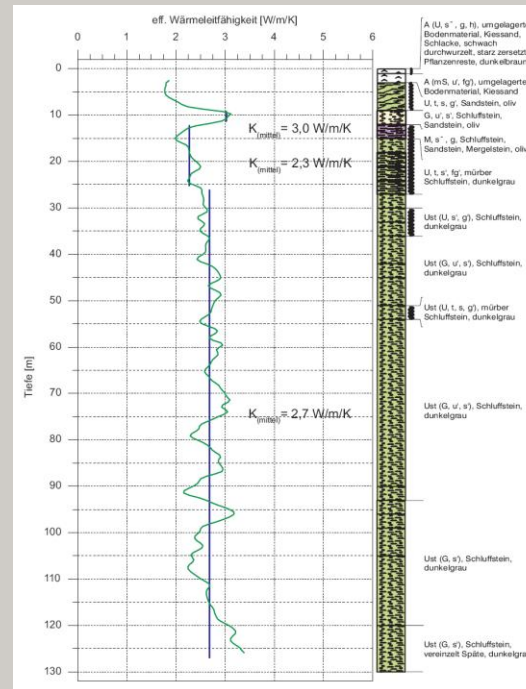
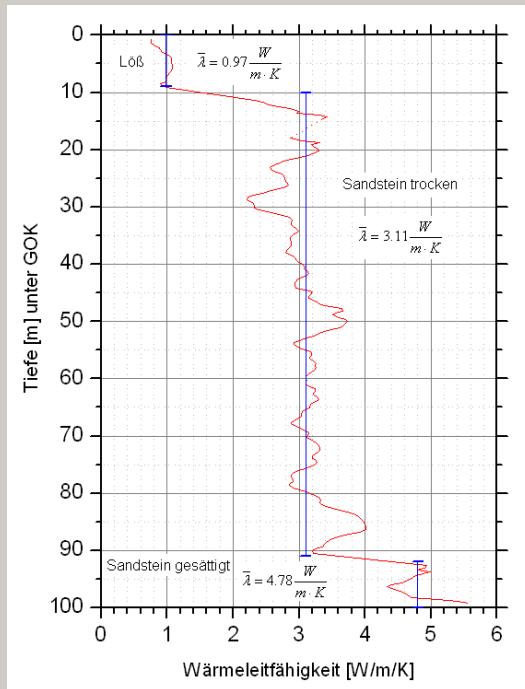
Effektive Wärmeleitfähigkeit über die Tiefe  
( $\bar{\lambda} = 2,24 \text{ W/m/K}$ )



Weitergehende Auswertung in Verbindung mit der Geologie

# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

## Beispiele: Wärmeleitfähigkeit



# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

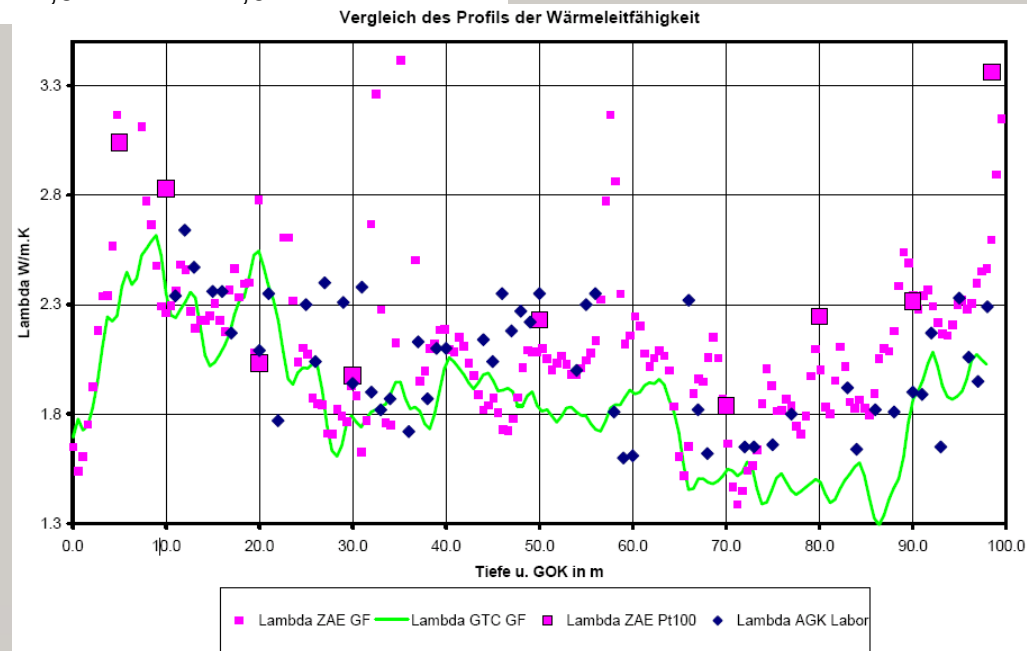
Durchführung eines TRT und EGRT in der gleichen Erdwärmesonde. Fall 1:

Gesamtsystem:	TRT	EGRT	Labor (Proben)
$\lambda$ [W/m/K]	2,3	1,9	2,0

tiefenverteilt:

**Geologie sehr heterogen,  
grob vereinfacht:**

- bis ~ 20 m: Sande und Kiese  
(jeweils Fein-, Mittel-, Grob-)
- bis ~ 67 m: Feinsande
- bis ~ 87 m: Tone
- ab ~ 87 m: Tone, Feinsande, Schluff



# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

Insgesamt fünf Erdwärmesonden mit TRT und EGRT sind geplant, mit insgesamt folgenden prinzipiellen Unterschieden:

**Fall1:** heterogene Schichtung von Sedimenten, komplett im GW-Leiter, Franksonde, Thermocem (normal)

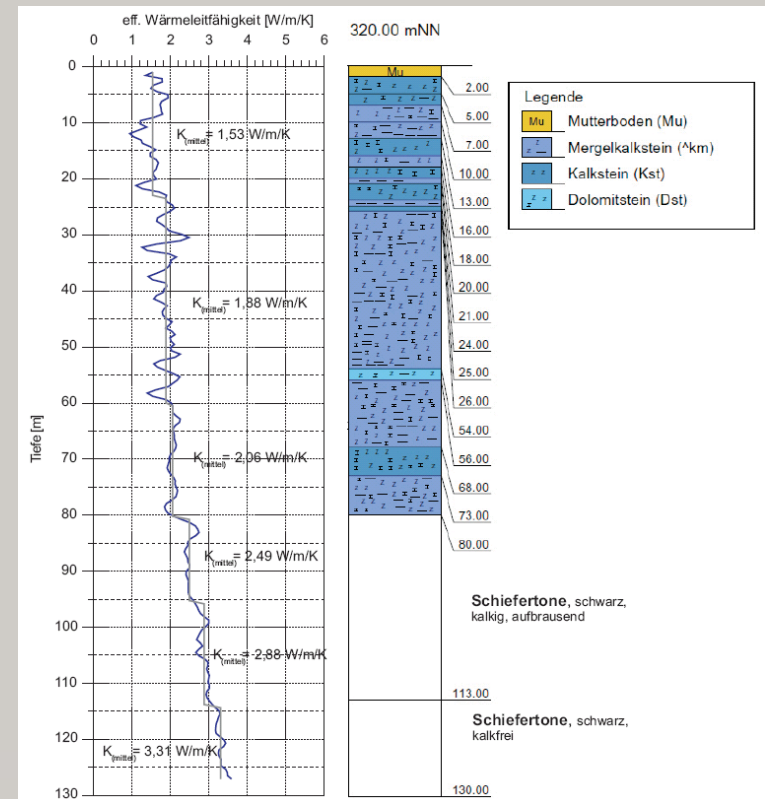
**Fall2:** karbonathaltiges, klüftiges Gestein, GW ab 60 m Tiefe, Tonpellets

**Fall3:** Molasse, kiesig, sandig, Pexsonde, Thermocem (frostsicher)

**Fall4:** Kiese, komplett im GW-Leiter mit Pumpmöglichkeiten in angrenzenden Brunnen (erzwungene Konvektion)

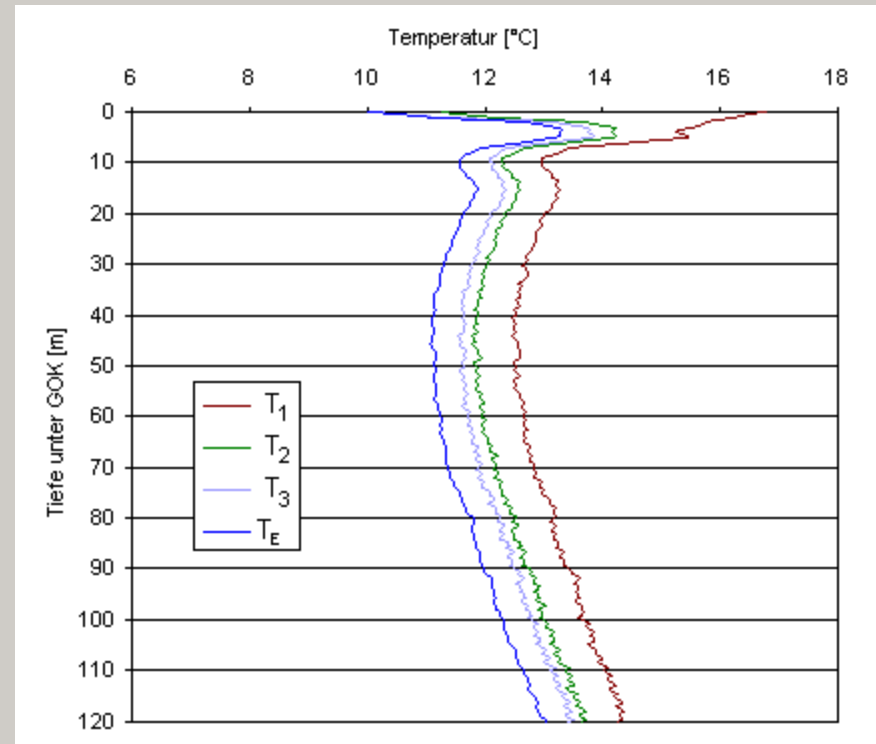
**Fall5:** kristallines Festgestein (höhere konduktive Wärmeleitfähigkeit), homogener Untergrund, gute Proben

## Fall 2: (TRT steht noch aus)



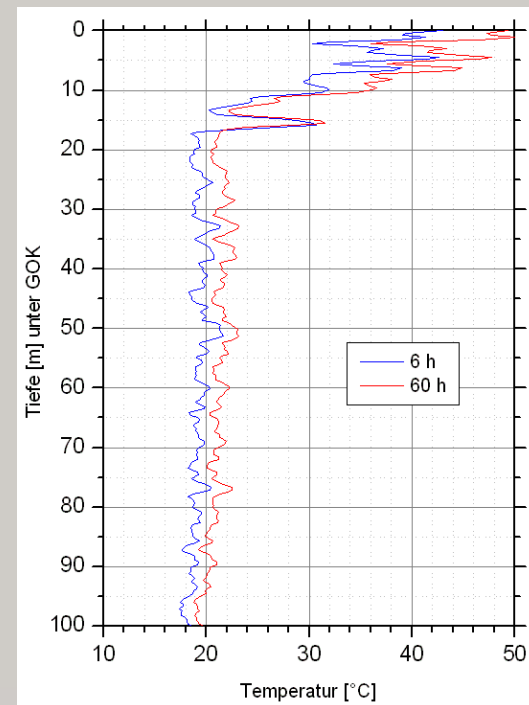
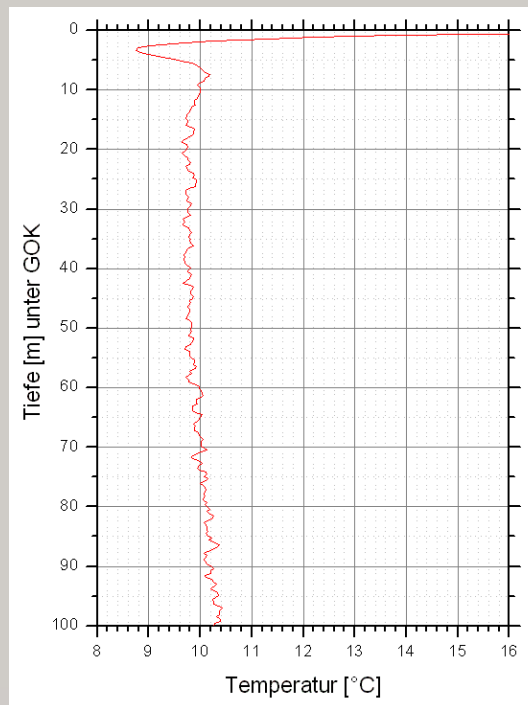
# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

## Qualitätskontrolle: Beispiel Hydratationswärme



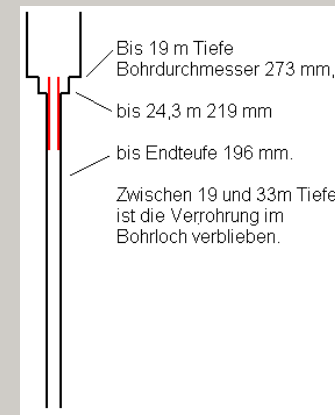
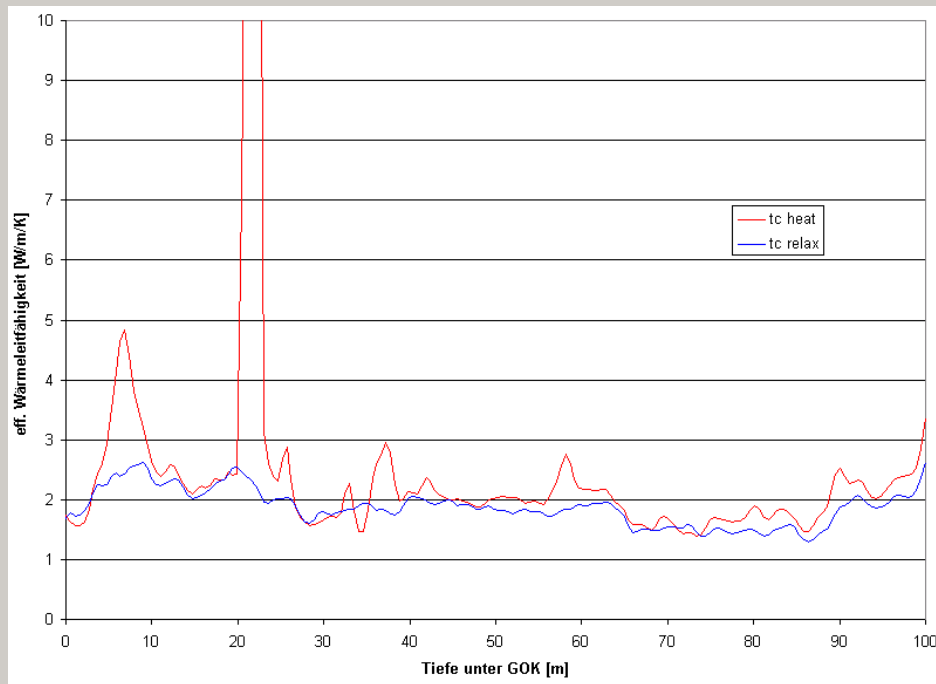
# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

Qualitätskontrolle über Absoluttemperaturen:  
Beispiel mangelhafte Ringraumverfüllung in 15 m Tiefe



# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

Qualitätskontrolle über Vergleich der Ergebnisse aus Auswertung der Aufheizkurve und der Abkühlkurve: Beispiel Hohlräume

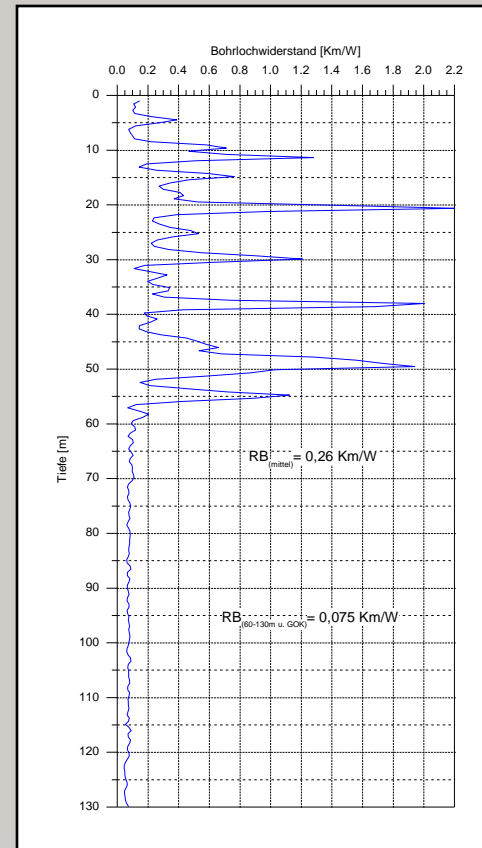


=> Konvektionszellen, die nicht durch Grundwasserströmungen erklärt werden können, sind Hinweise auf mangelhafte Verfüllung

# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

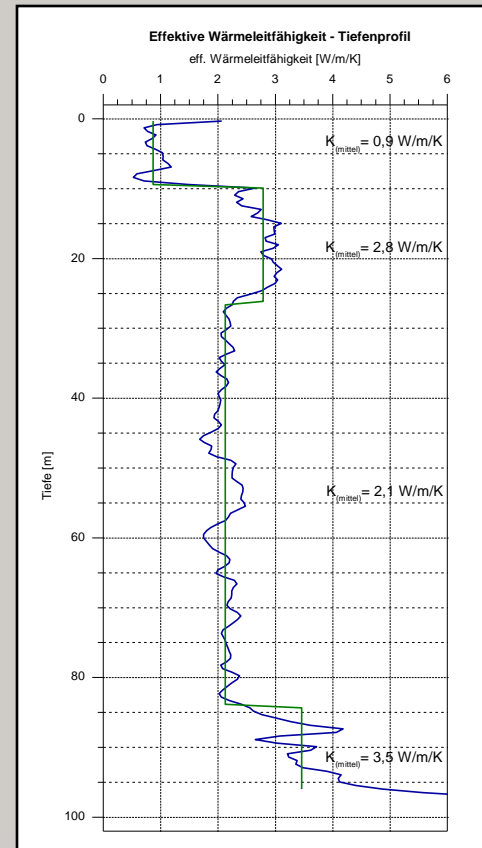
Qualitätskontrolle über  
Bohrlochwiderstand -  
Tiefenprofil:

Mangelhafte  
Ringraumverfüllung



# Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden - ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonance Tests (EGRT)

Aquiferidentifikation über  
effektive Wärmeleitfähigkeiten:



## Zusammenfassung

- Die thermischen Bodenparameter (Wärmeleitfähigkeit, Bohrlochwiderstand) werden tiefenabhängig bestimmt
  - Hydraulisch aktive Aquifere sind identifizierbar
  - Aussagen über die Filtergeschwindigkeit sind möglich
  - Korrektur von Störeffekten auf die Bodentemperaturen (Hydratationswärme)
  - Qualitätsüberprüfung der Ringraumverfüllung
  - Weitere Messungen sind jederzeit möglich
- Erdwärmesondenanlagen können optimaler geplant und überwacht werden

Qualitätskontrolle der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden  
- ein hilfreiches Nebenergebnis des Enhanced Geothermal Resonse Tests (EGRT)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !