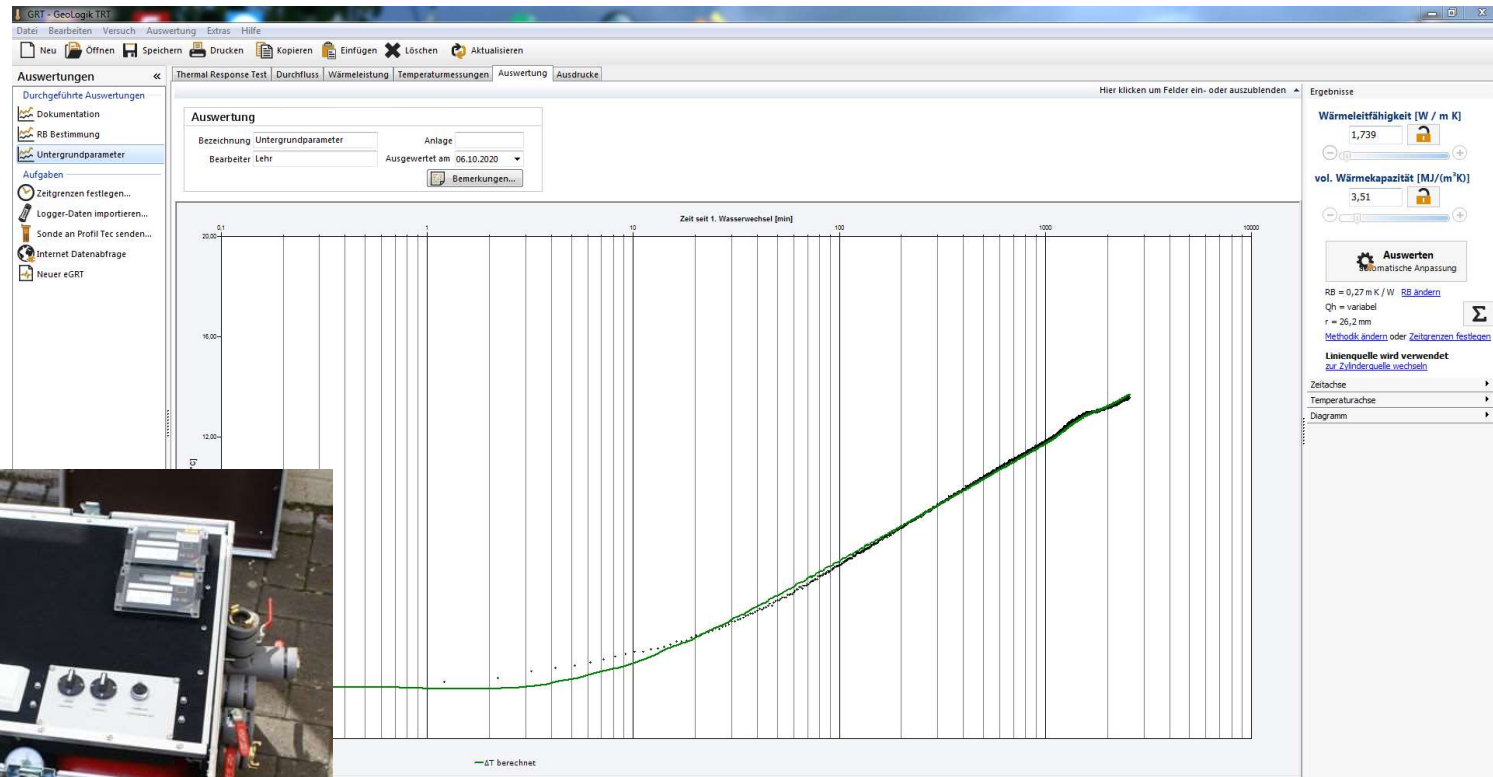


Geothermal Response Test

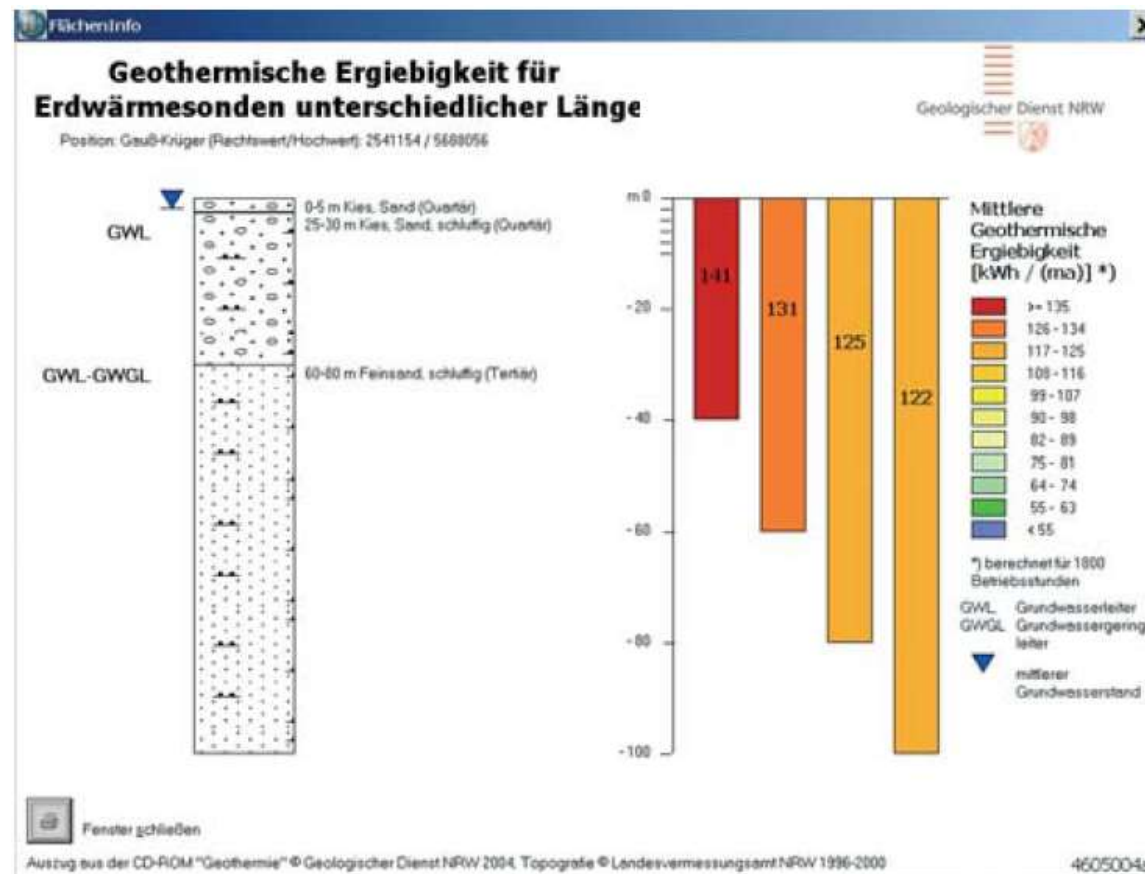


Das ist keine Planung!

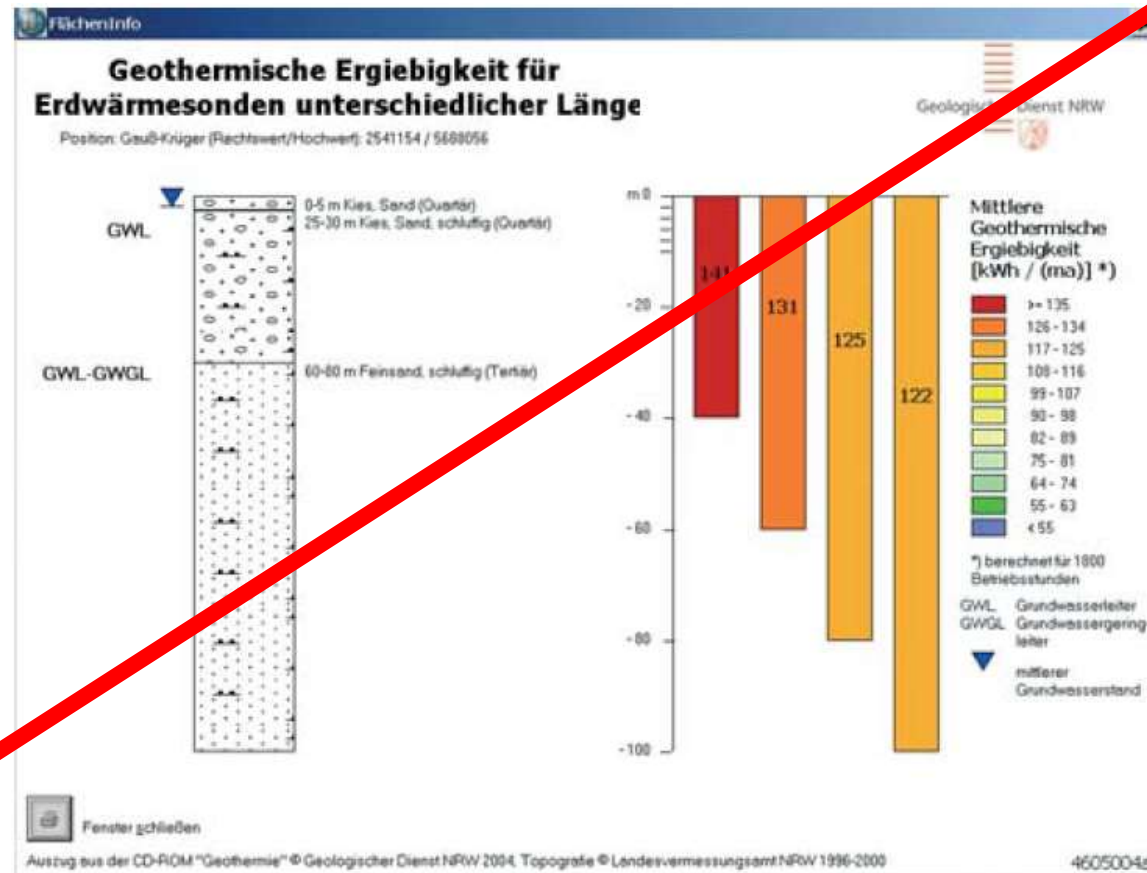
Angaben in der geophysikalisch
(als Materialkonstante) nicht existenten Einheit W/m sind falsch.
Der Boden ist keine Steckdose!

~~50 W/m~~

Das ist keine Planung!

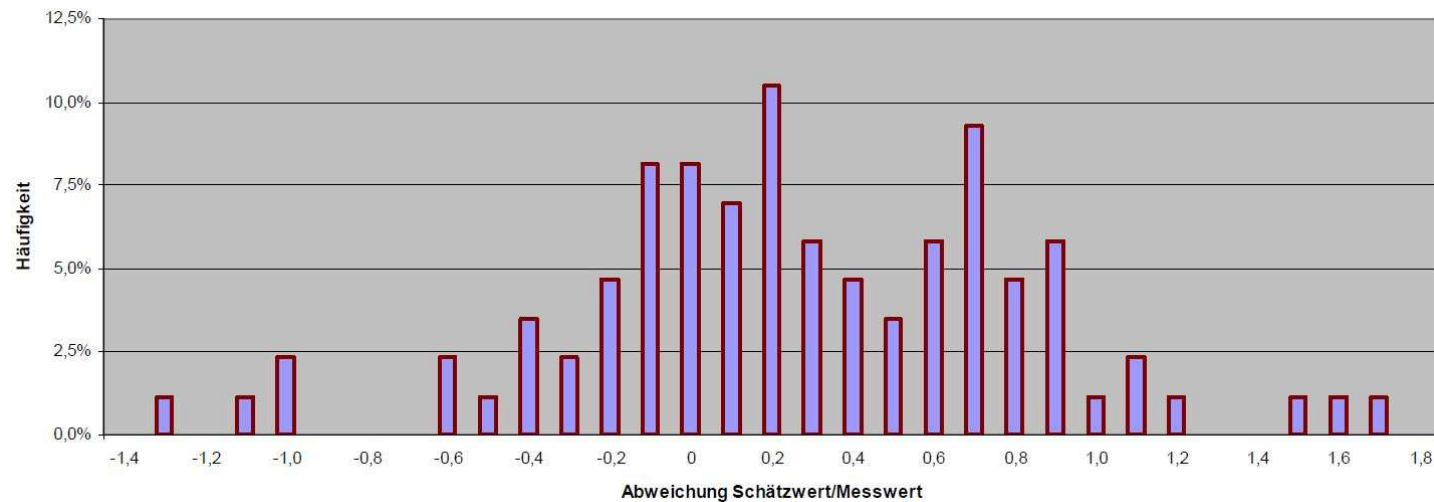


Das ist keine Planung!



Untergrundparameter – woher?

Aus GRT- oder eGRT-Messung



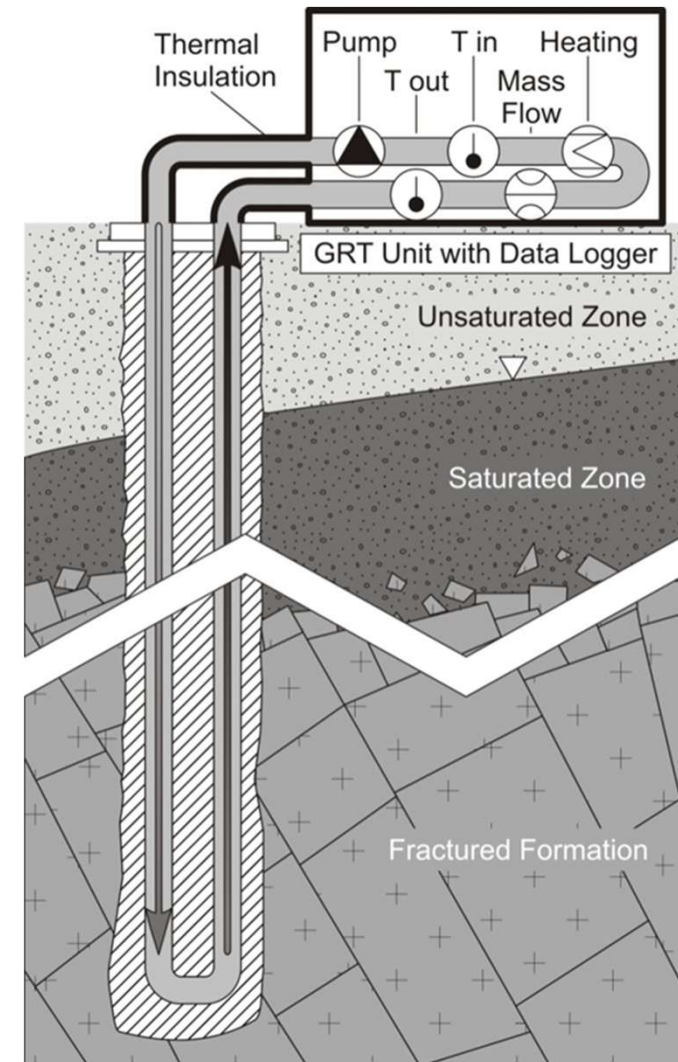
Abweichung zwischen Schätzwert und Messung für λ_{eff} (n=86 Messungen, n. Sauer et.al, 2007)

Während eines TRT werden

die Temperaturen an der Quelle,
(Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur)
der Massestrom und die
(Volumenstrom des Fluids)
die Heizleistung gemessen sowie
zeitabhängig aufgezeichnet.

**Das Ergebnis der Auswertung nach
einer Quellentheorie ist**

die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff}
die effektive volumetrische Wärmekapazität
des Untergrundes und
der effektive Wärmeübergangswiderstand
vom Fluid an das Gestein, der so genannte
effektive thermische Bohrlochwiderstand R_{Beff} .



Wärme und Wärmeleitfähigkeit

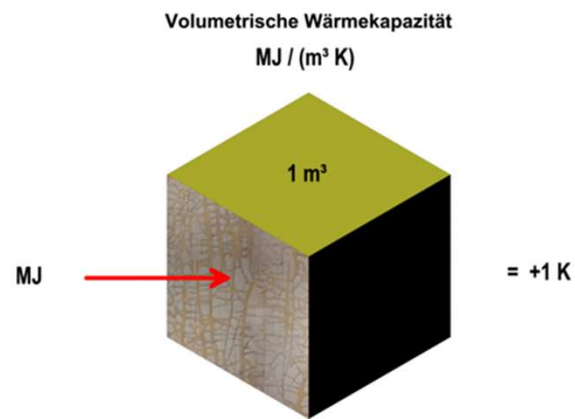
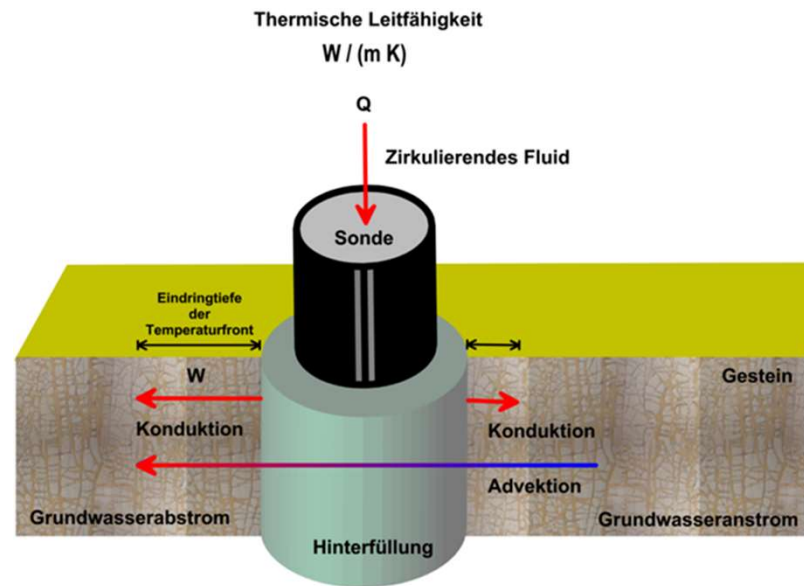
- Je höher die Temperatur, desto stärker ist die brownsche Bewegung der Teilchen.
- Benachbarte Teilchen stoßen gegeneinander und geben so ihre kinetische Energie weiter.
- Die kinetische Energie der Teilchen ist die Wärmeenergie des Mediums.

Wärme und Wärmeleitfähigkeit

- Die Energie wandert von den “bewegteren” (wärmeren) zu den “ruhigeren” (kälteren) Teilchen, und folgt somit dem **negativen Temperaturgradienten!**
- Die Fähigkeit, die Energie weiterzuleiten, ist die thermische Leitfähigkeit **Einheit: $W/(mK)$**

Wärmekapazität

- Menge an Wärmeenergie, die zugeführt werden muss, um ein bestimmtes Material um ein Grad zu erwärmen.
- Die Energiemenge kann pro Masse oder pro Volumen angegeben werden.
- Bezogen auf das Volumen:
volumetrische Wärmekapazität **Einheit: MJ/(m³K)**



Quelle: Handbuch oberflächennahe Geothermie, 2017

Linienquelle

Carslow&Jäger, 1956

$$T(r,t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \int_{\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} E\left(\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}\right)$$

Ingersoll&Plass, 1948

$$E\left(\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}\right) = \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r^2}\right) - \gamma$$

$$T_f(t) - T_0 = \frac{\dot{Q}_H}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln\left(\frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r^2}\right) - \gamma \right] + \dot{Q}_H \cdot R_B$$

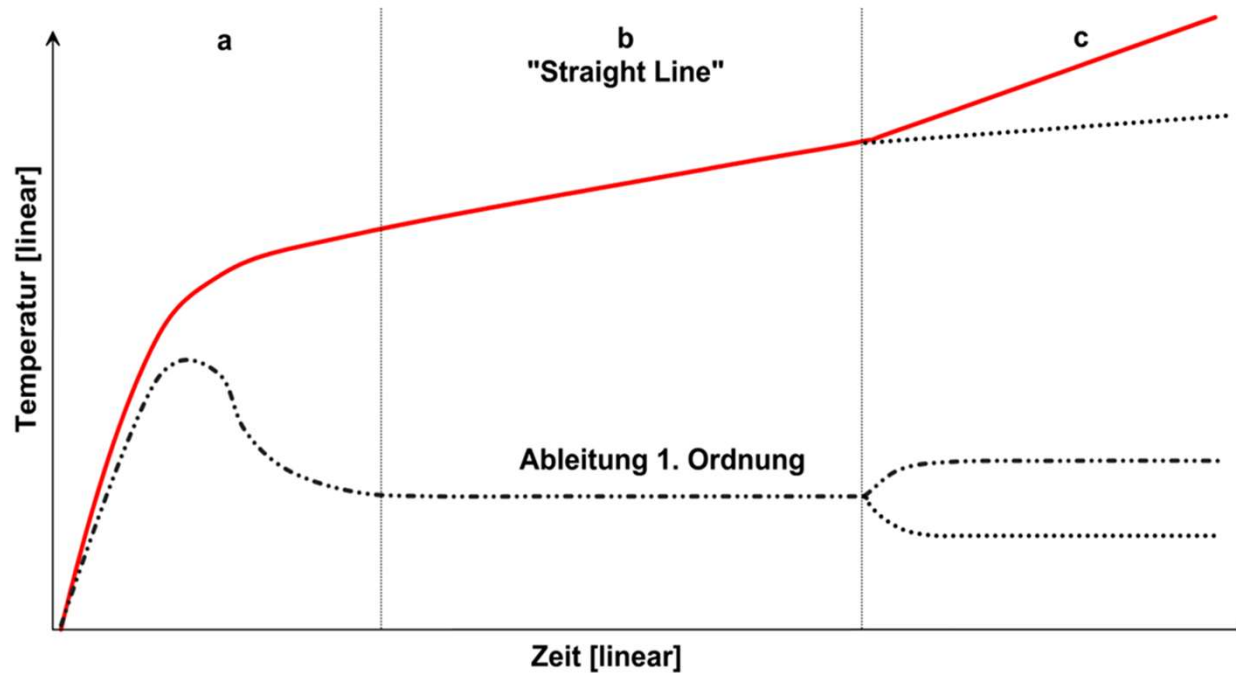
$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{q}{4 \cdot \pi} \frac{\ln\left(\frac{4 \cdot \alpha_{\text{eff}}}{r_B^2}\right) + \tau(t) - \gamma}{T_f(t) - T_0 - q \cdot R_B}$$

Eskilson, 1987

$$\phi = \frac{T_f(t) - T_0 - q \cdot R_B}{\tau(t) + \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha_{\text{eff}}}{r_B^2}\right) - \gamma}$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\dot{Q}_H}{4 \cdot \pi \cdot \phi}$$

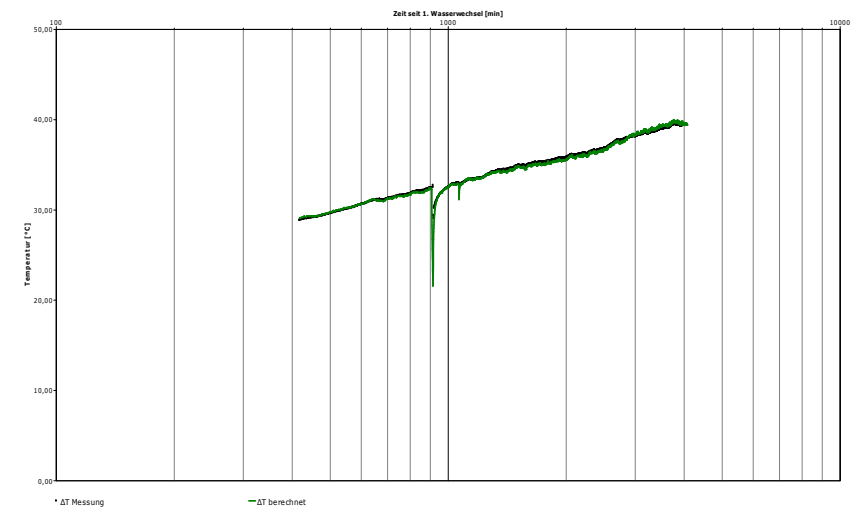
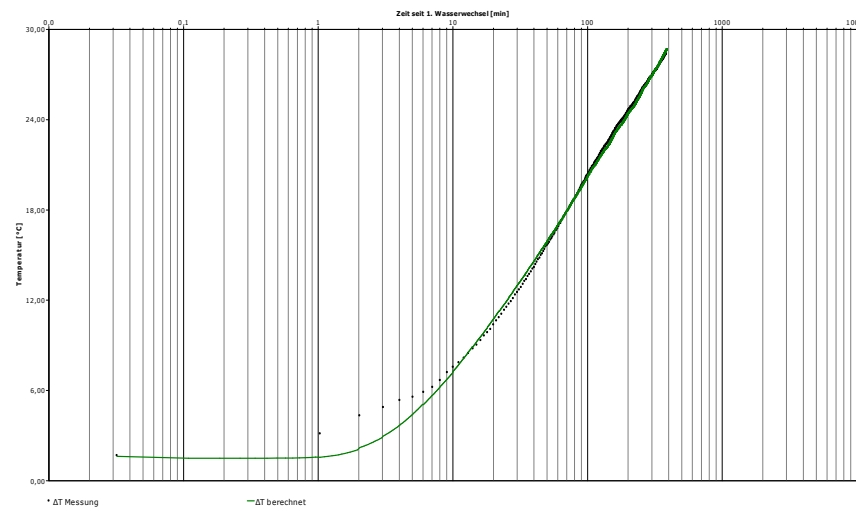
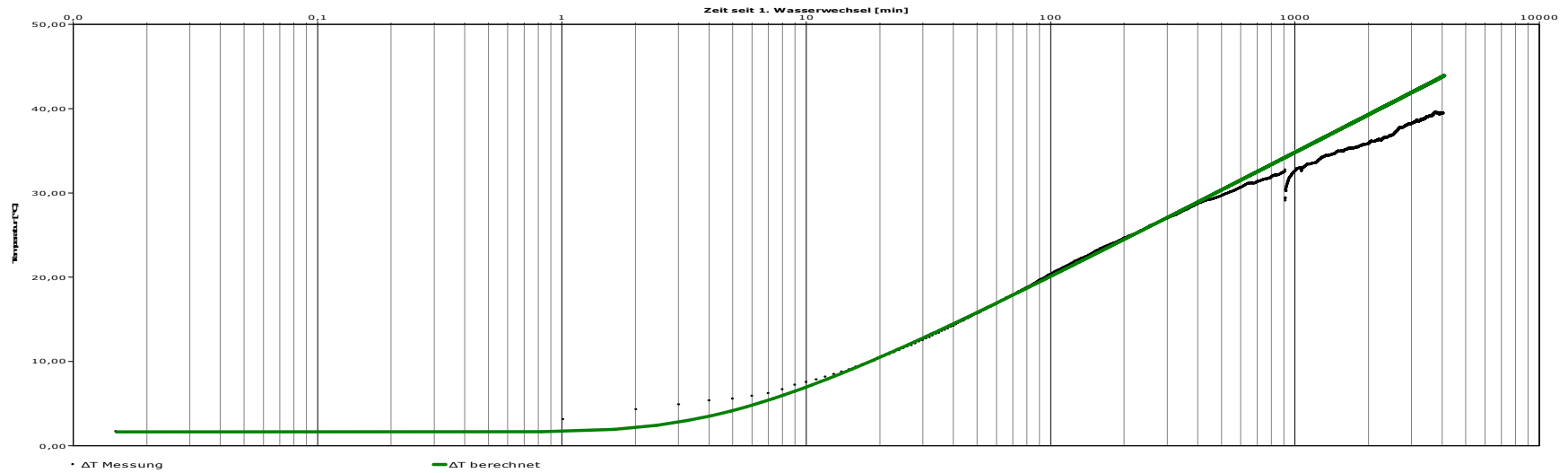
$T(r,t)$	=	Untergrundtemperatur im Abstand r zum Zeitpunkt t (K)
\dot{Q}_H	=	spezifische konstante Heizleistung (W/m)
λ	=	Wärmeleitfähigkeit ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
r	=	Entfernung des Beobachtungspunktes von der Linienquelle als Mittelpunkt(m)
α	=	Thermische Diffusivität ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
t	=	Zeit (s)
E	=	Exponential-Integral
γ	=	Euler-Mascheroni-Konstante 0,57722
ϕ	=	Steigung der Regressionsgeraden

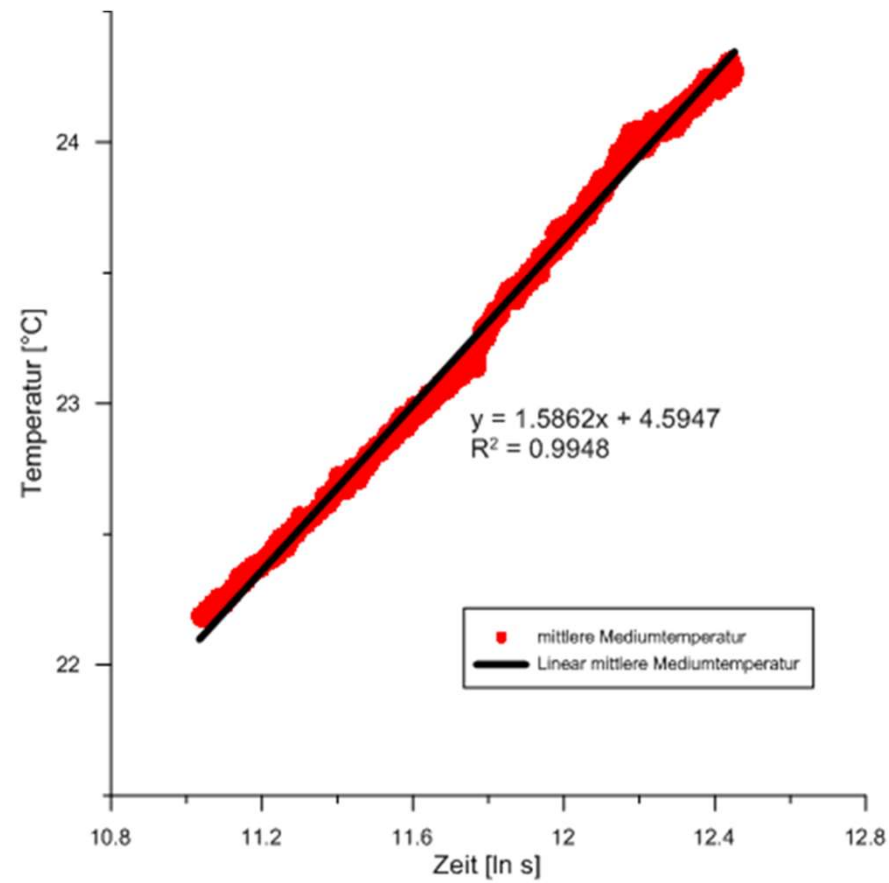


Darstellung einer typischen TRT-Messkurve und ihrer Ableitung erster Ordnung.

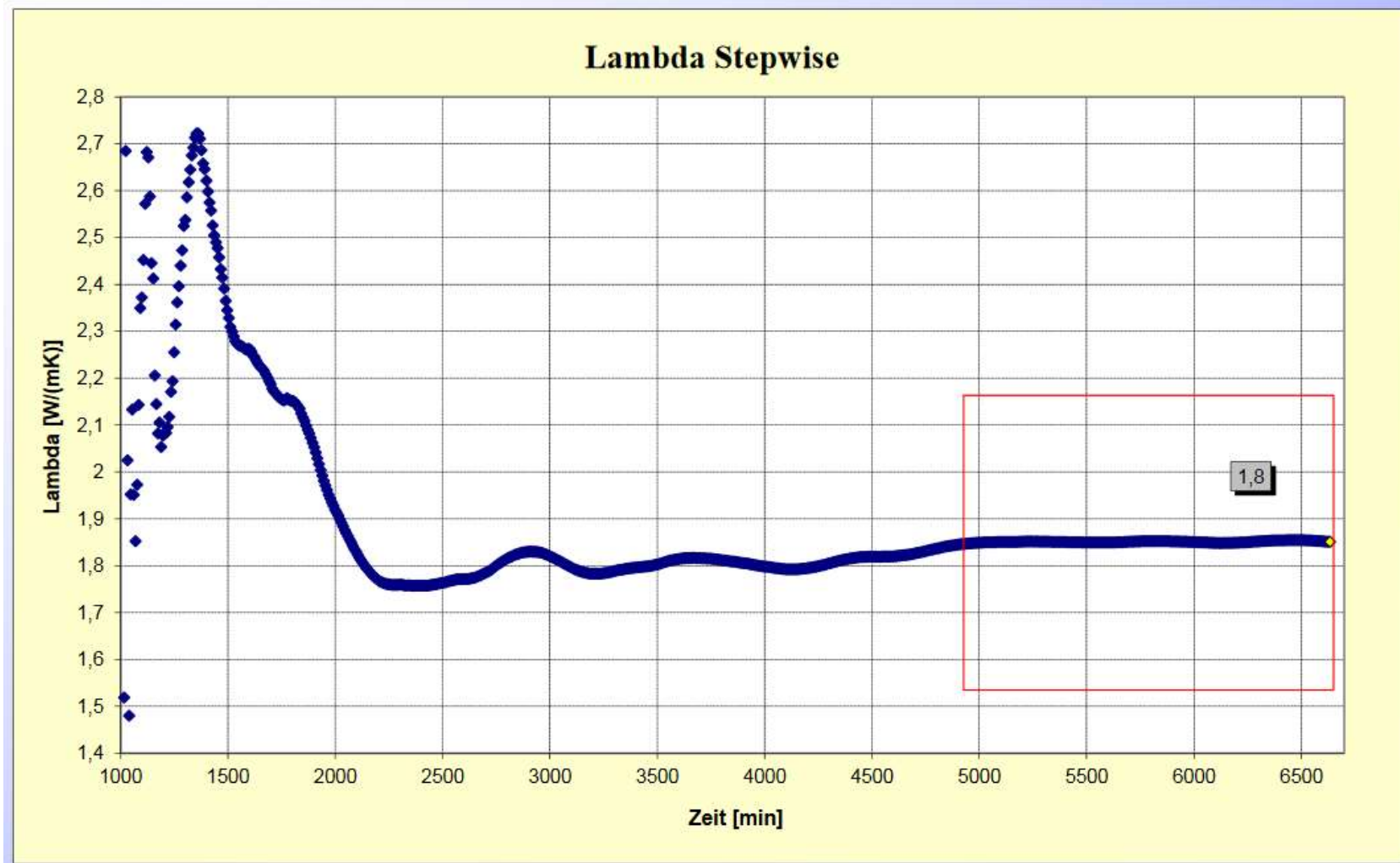
Der thermische Verlauf kann in

- Wärmeleitung nach Beginn eines TRT
- radiale Wärmeleitung (IARF [Infinite Acting Radial Flow]; "Geradlinien-Bereich") und
- wechselnde thermische Wärmeleitung durch veränderte Randbedingungen der umgebenden Formation untergliedert werden.





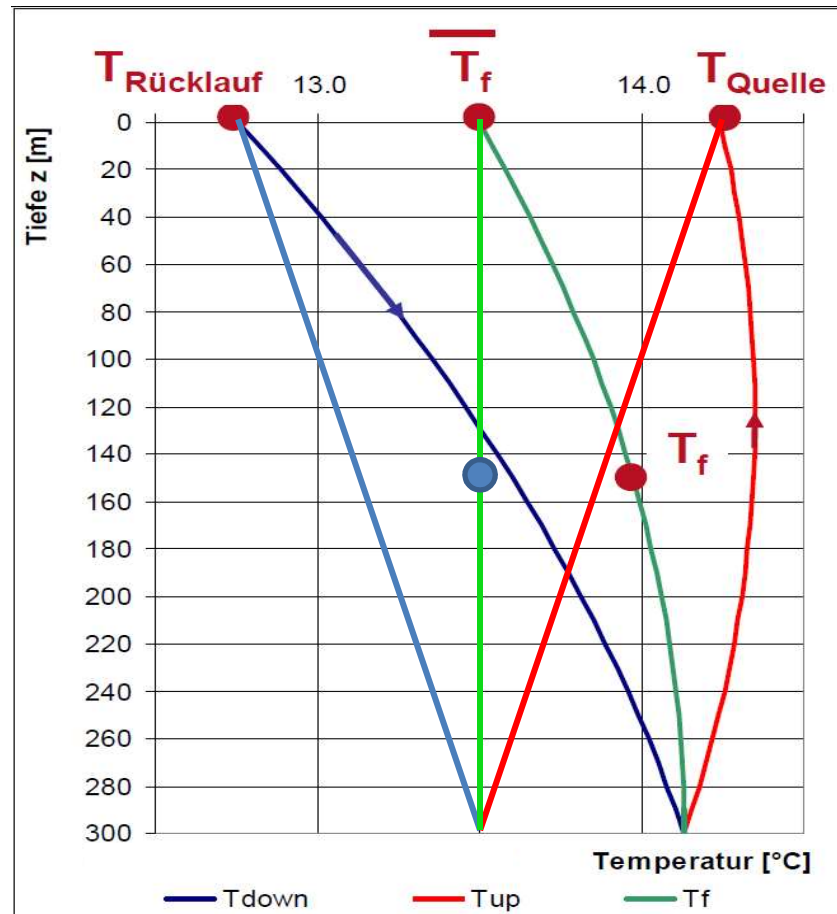
Grafik: Büro boden & grundwasser, 2010



Quelle: HGC GmbH

Mitteltemperatur

$$\Delta\vartheta_{\log} = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln\left(\frac{\vartheta_V - \vartheta_U}{\vartheta_R - \vartheta_U}\right)}$$



Thermische Kontaktwiderstände

- R_5 ungestörtes Gebirge – Skinzone
- R_1 Skinzone - Bohrlochhinterfüllung
- R_3 Bohrlochhinterfüllung - Sondenrohr

Thermische Übergangswiderstände (Phasenwechsel) dynamisch - strömungsabhängig

- R_5 Wärmeträgerfluid - Sondenrohr
- R_G ungestörtes Gebirge - Grundwasser

Thermische Durchgangswiderstände

- R_2 Hinterfüllmaterial
- R_4 Sondenrohrmaterial

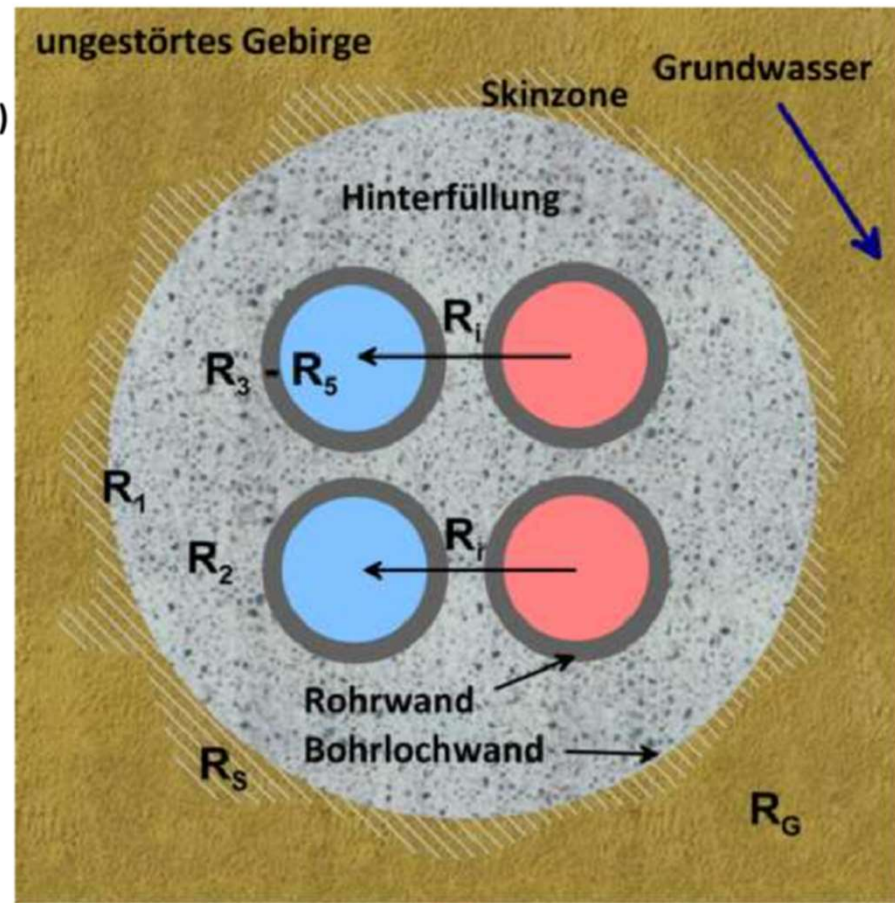
Thermischer Kurzschluss

- R_i Wärmeübergang von Fluid zu Fluid – warmer zu kaltem Sondenschenkel

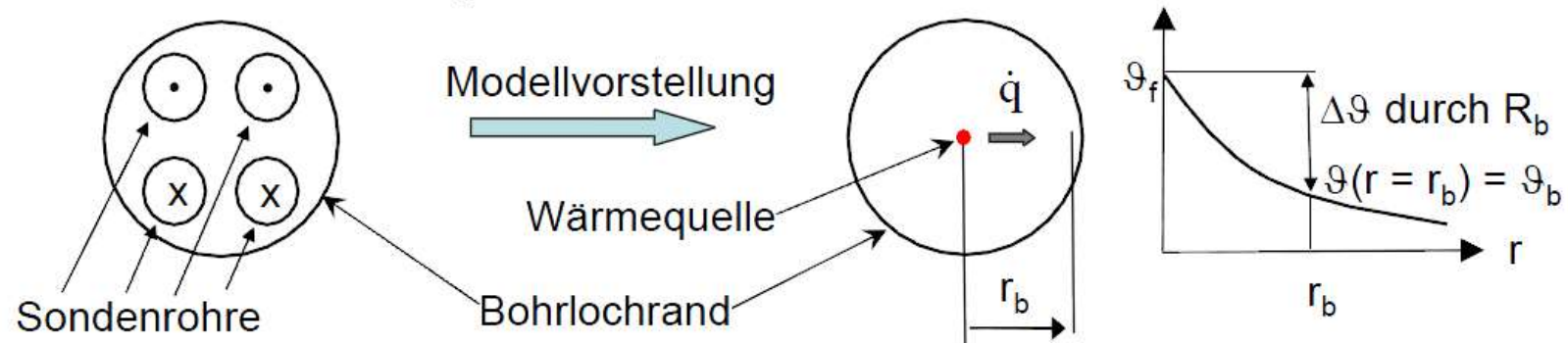
Die Berücksichtigung des internen Wärmeübergangs, wird durch die Bezeichnung „effektiv“ gekennzeichnet.

Effektiver Thermischer Bohrlochwiderstand

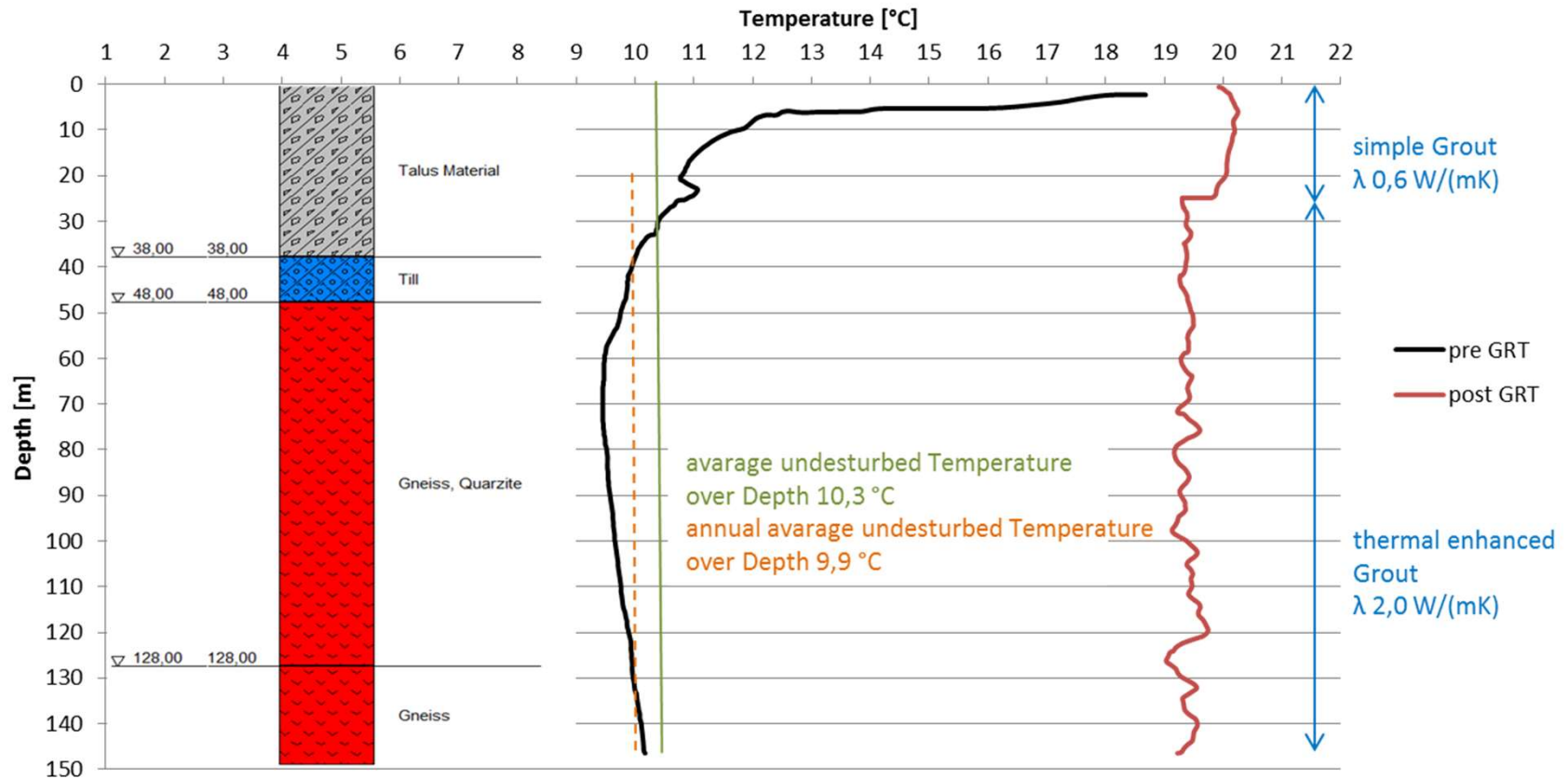
$$R_{\text{Beff}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_5 + R_G + R_i$$



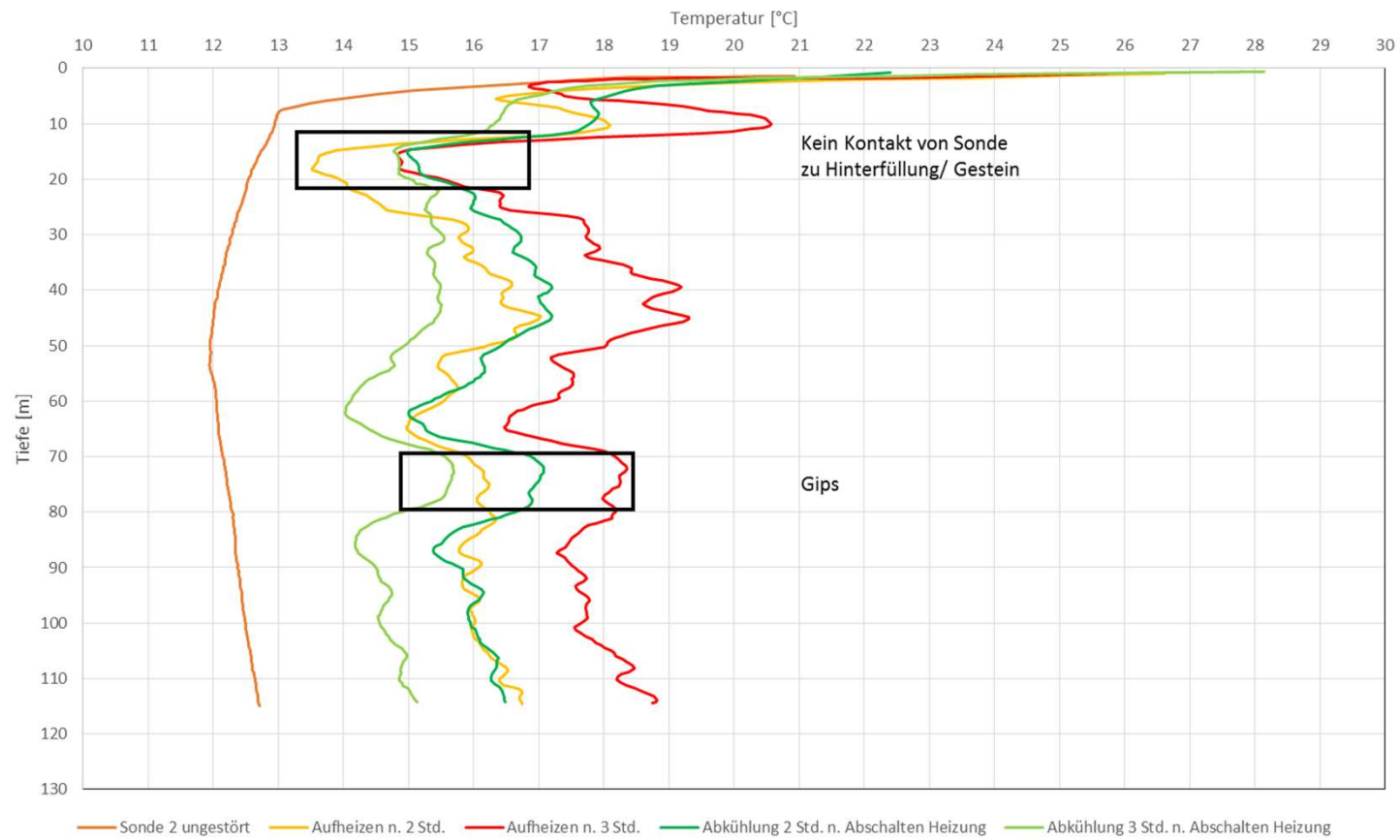
Die einzelnen Teilvorgänge der Wärmeübertragung vom Fluid in einer Erdwärmesonde (EWS) bis zum Erdreich (Bohrlochrand) werden im Bohrlochwiderstand R_b [$m \cdot K/W$] zusammengefasst :

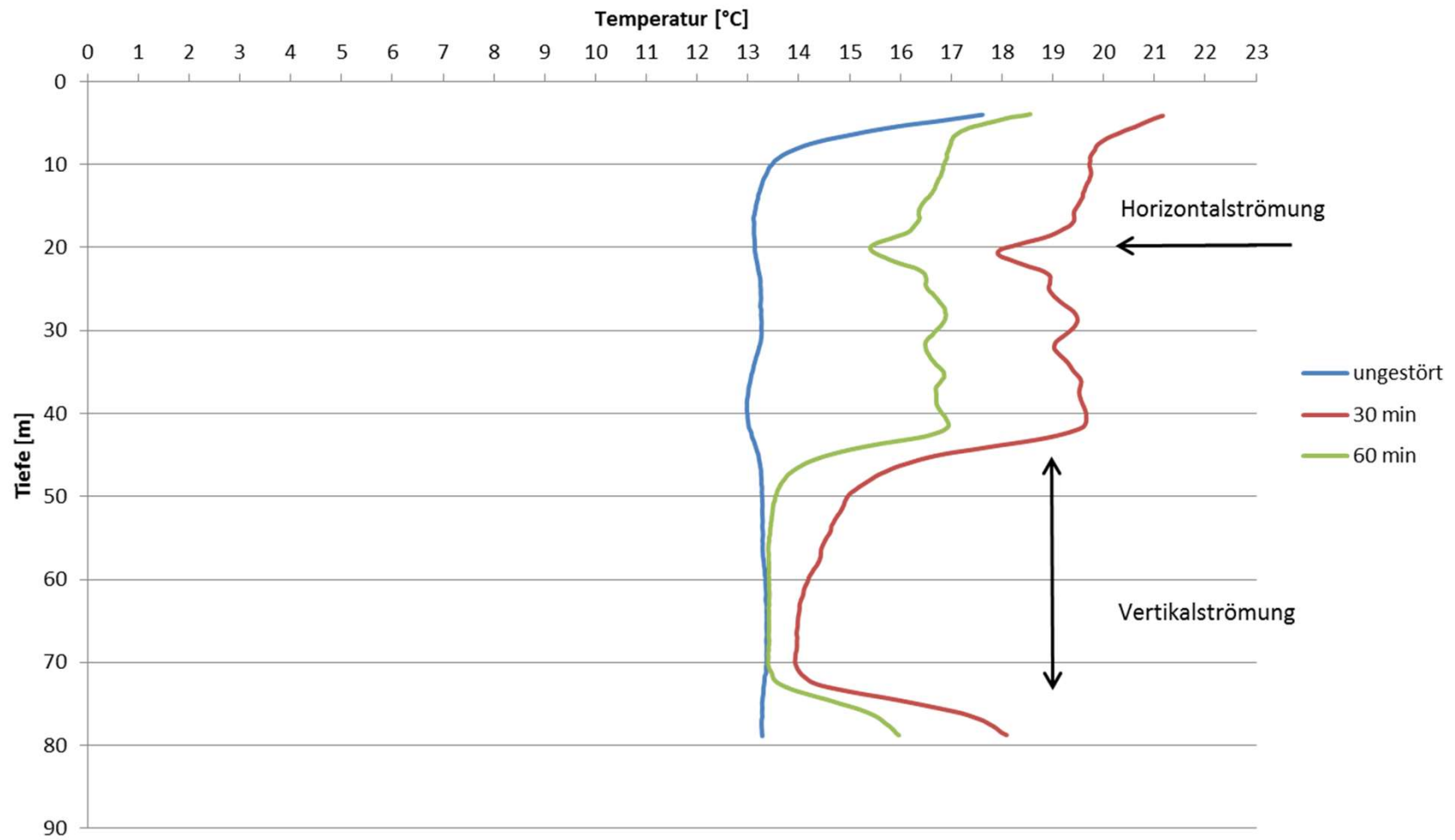


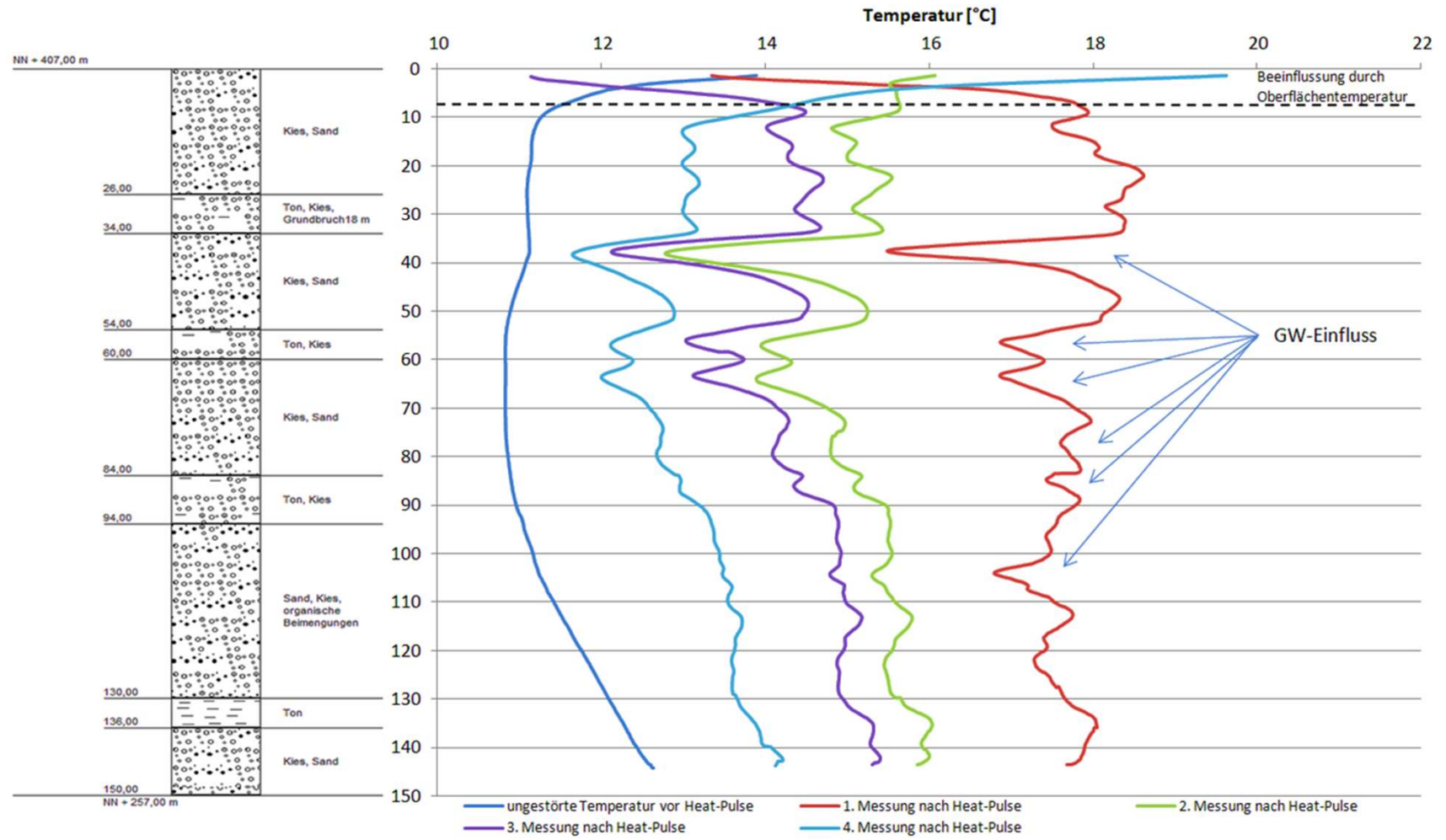
~~$\Delta\vartheta = R_b \cdot \dot{q}$~~ $\Delta\vartheta_{log} = \frac{R_B \dot{Q}_H}{2\pi}$

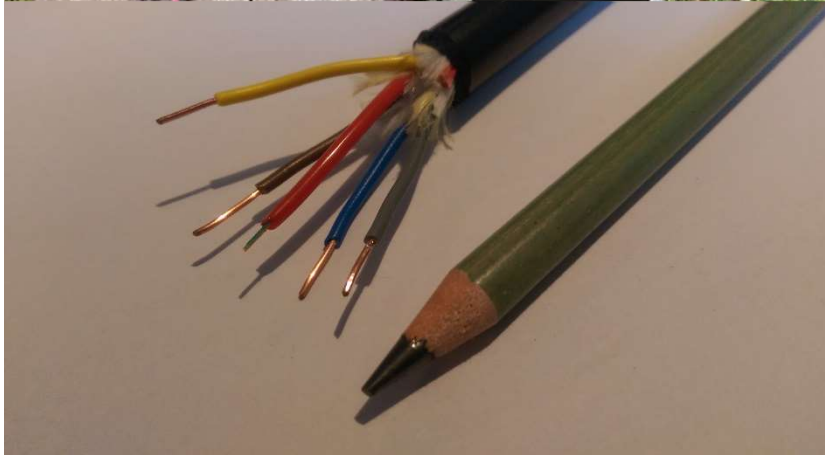
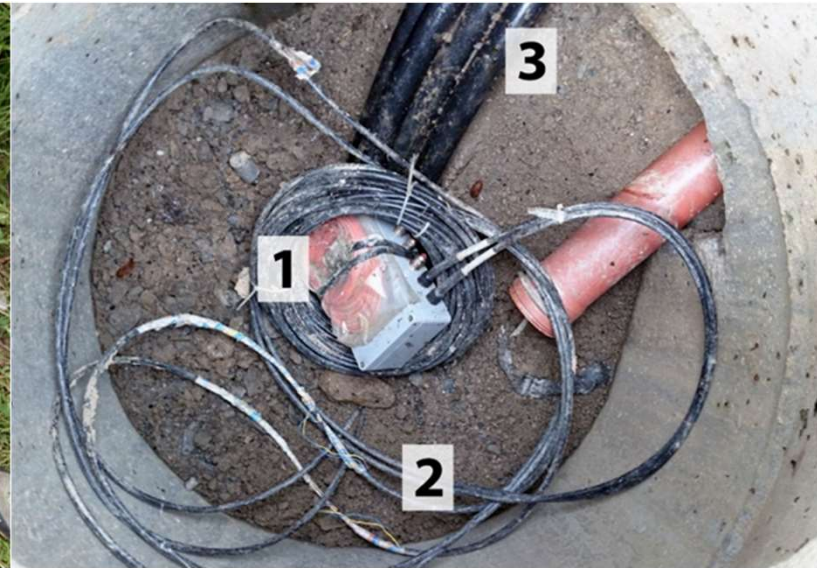
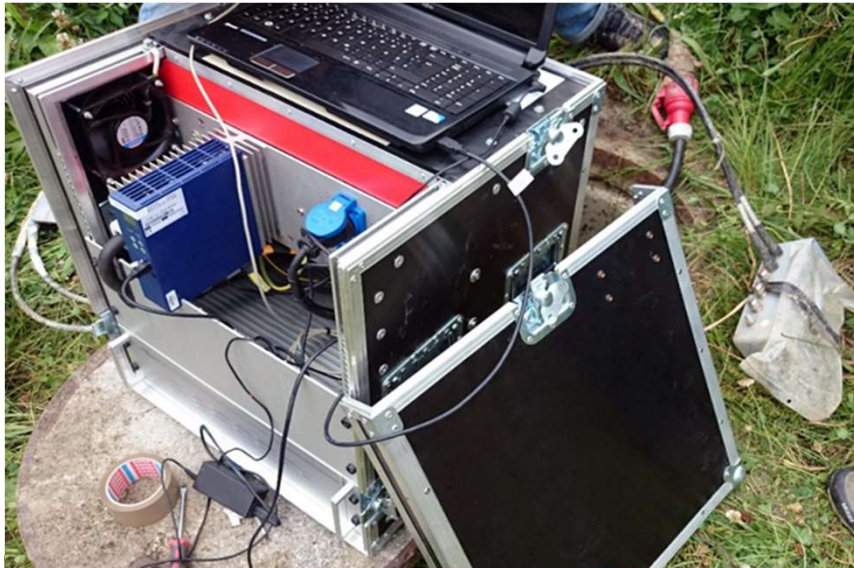


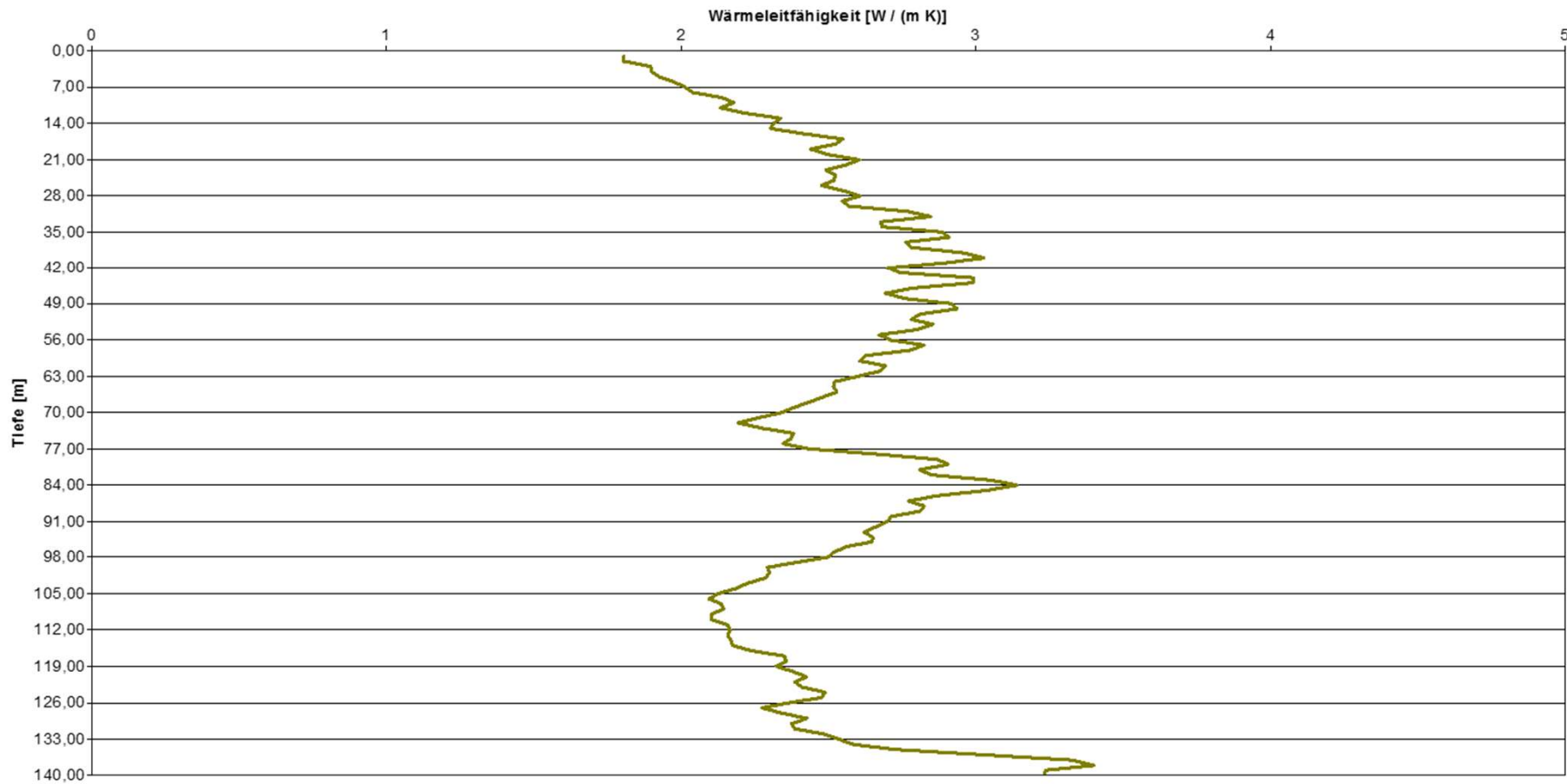
Temperaturprofile kurz-GRT



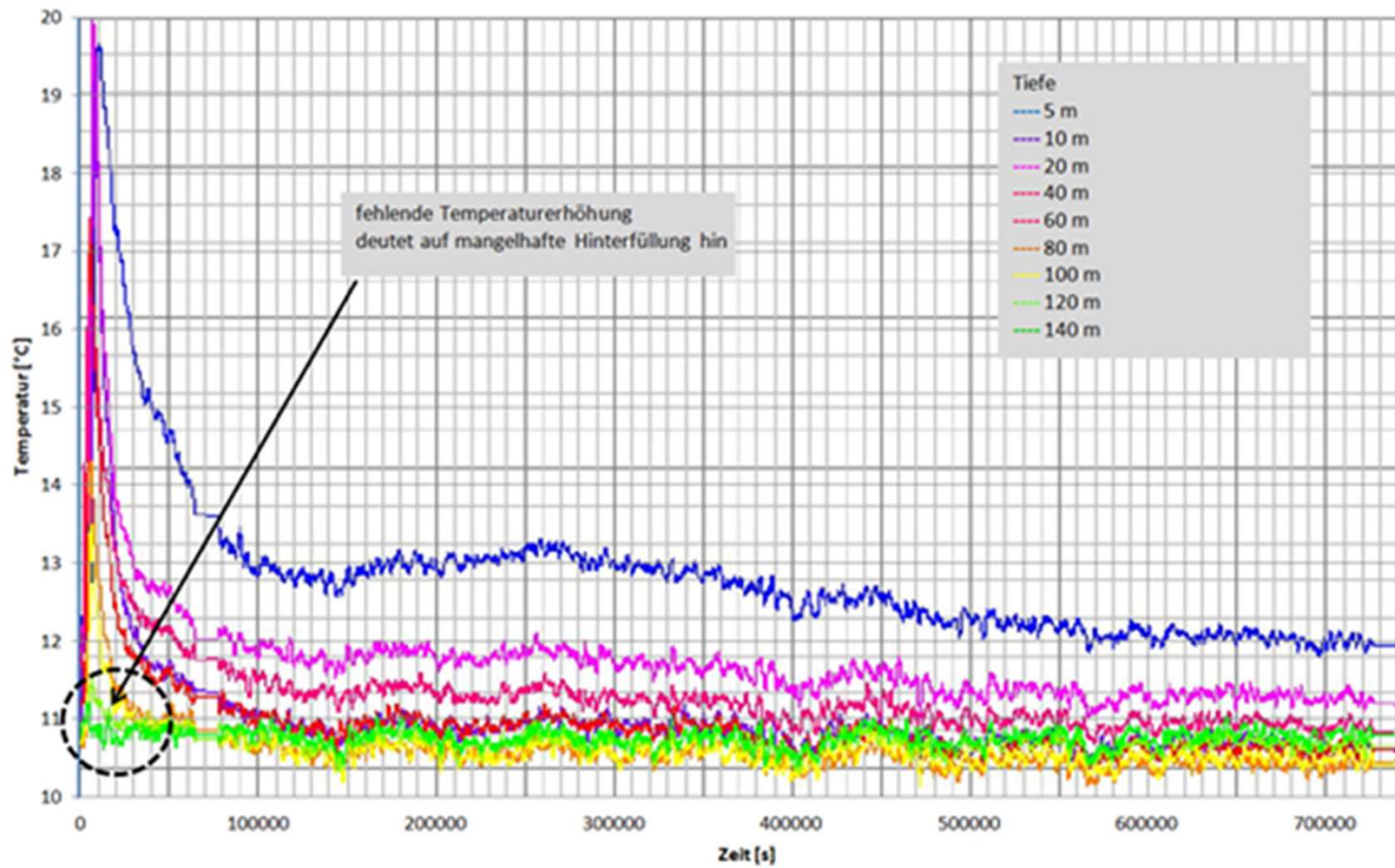


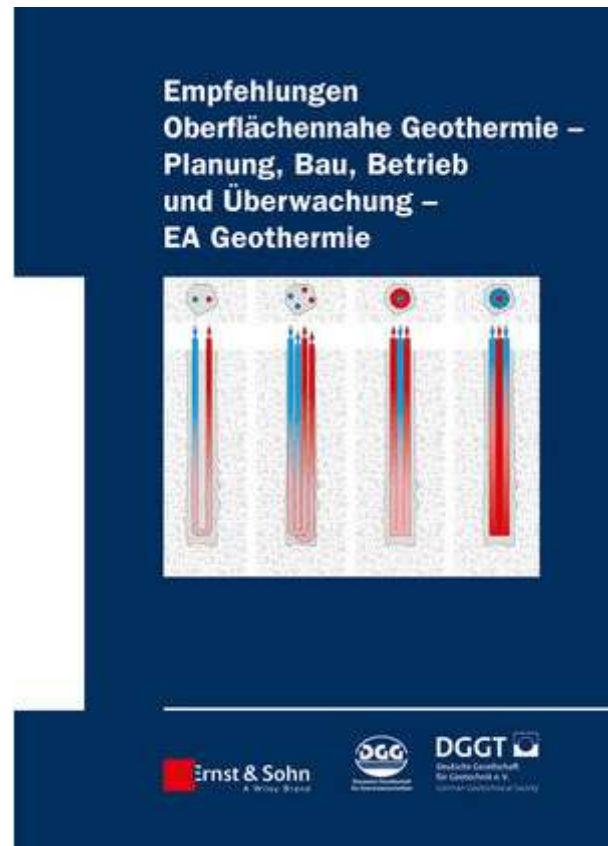






Hydratationswärmeentwicklung nach Hinterfüllvorgang

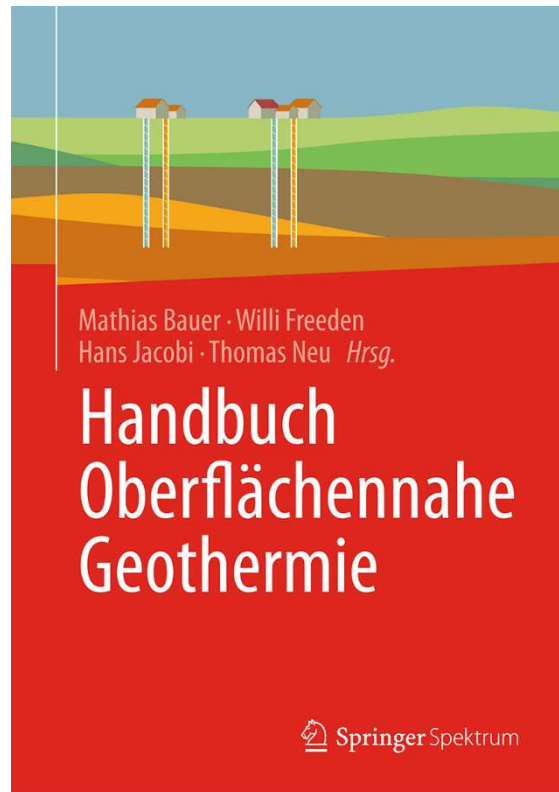




Empfehlung Oberflächennahe Geothermie: Planung, Bau, Betrieb und Überwachung - EA Geothermie

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. /
German Geotechnical Society (Editor),
Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften
(Editor)

336 pages
November 2014



Erscheinungstermin:
25. Dezember 2017
1. Aufl. 880 S. 390 Abb. in Farbe.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

