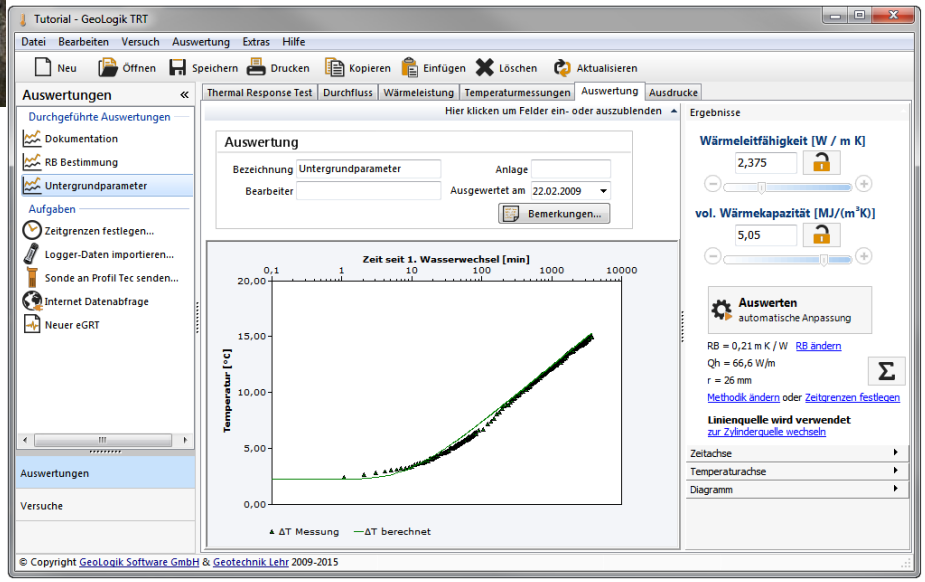
Geothermal Response Test

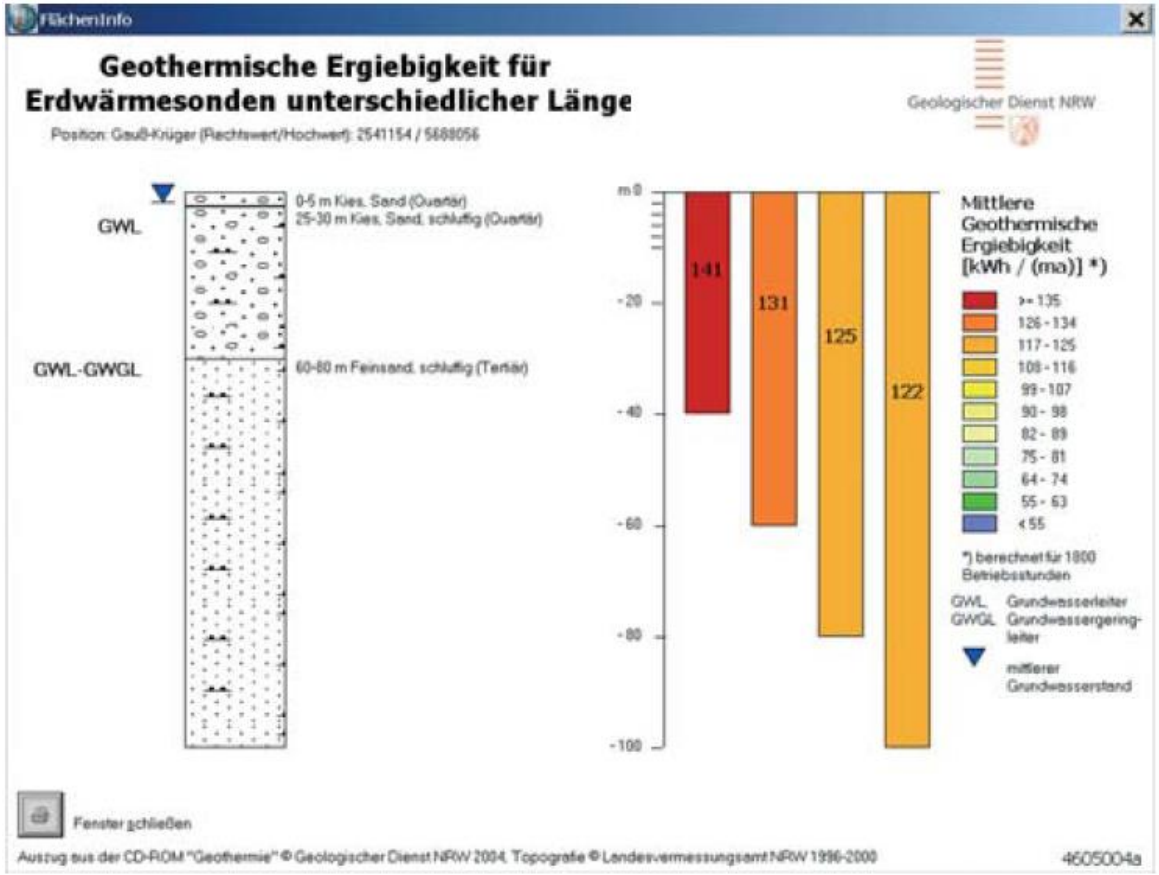


Das ist keine Planung!

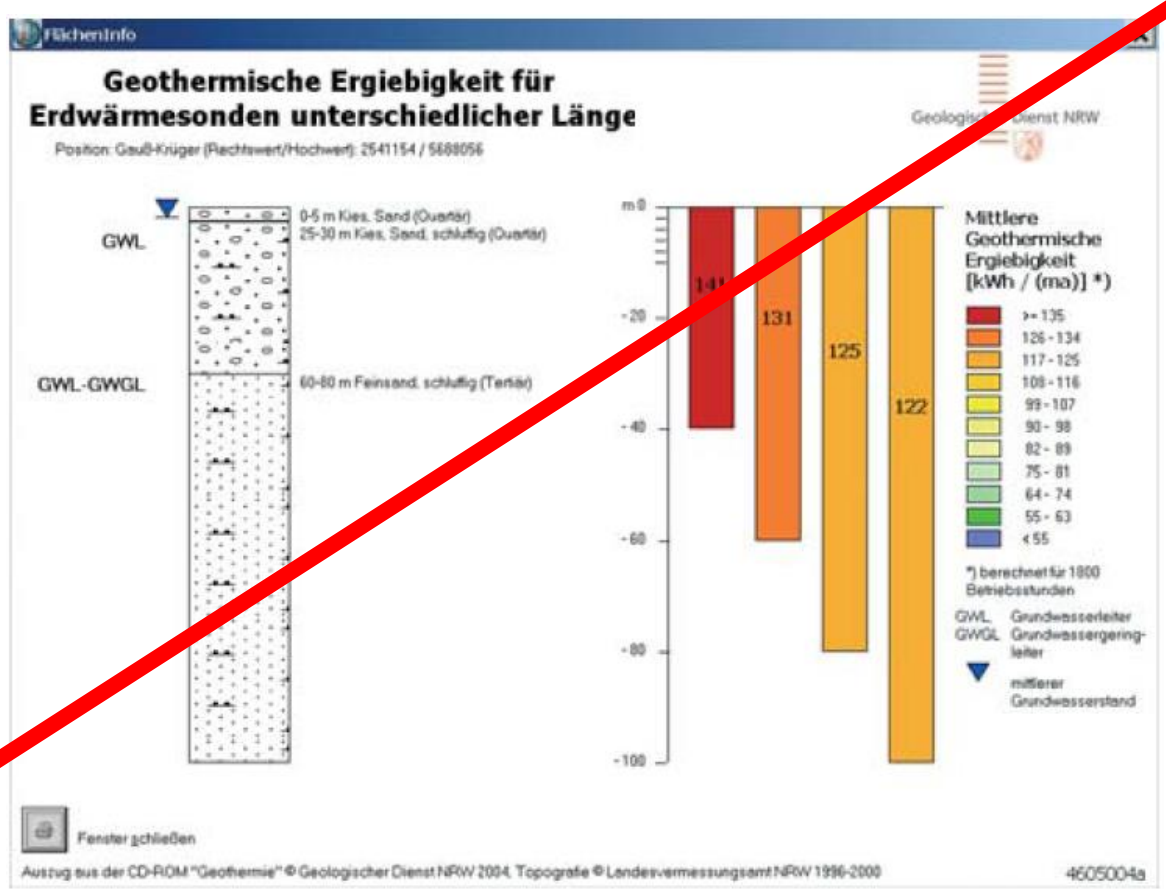
Angaben in der geophysikalisch
(als Materialkonstante) nicht existenten Einheit W/m sind falsch.
Der Boden ist keine Steckdose!

~~50 W/m~~

Das ist keine Planung!

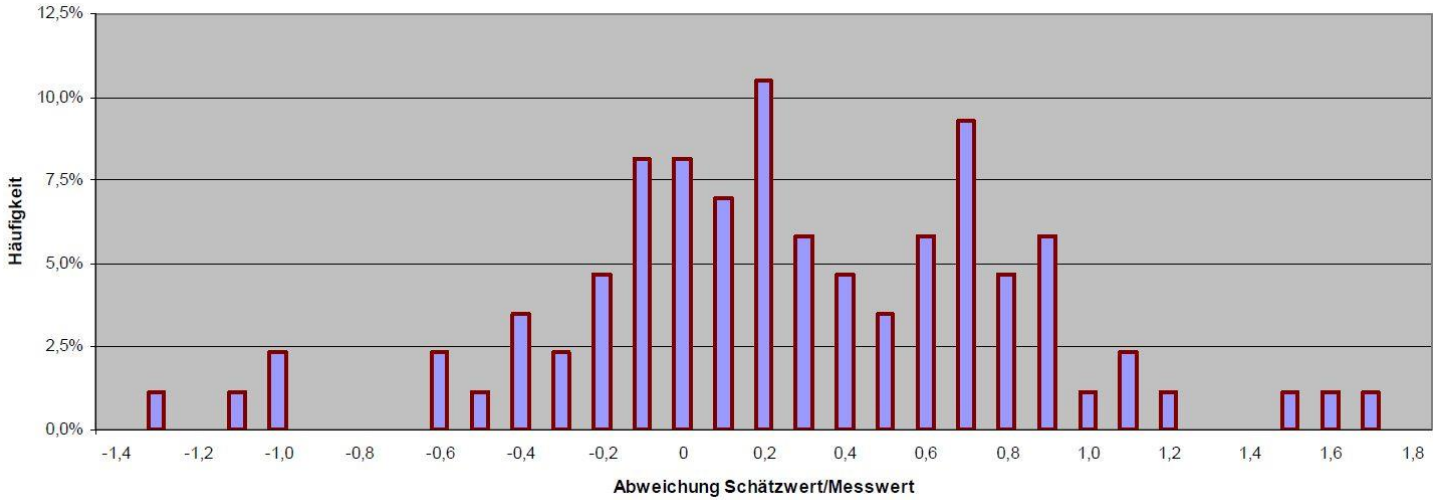


Das ist keine Planung!



Untergrundparameter – woher?

Aus GRT- oder eGRT-Messung



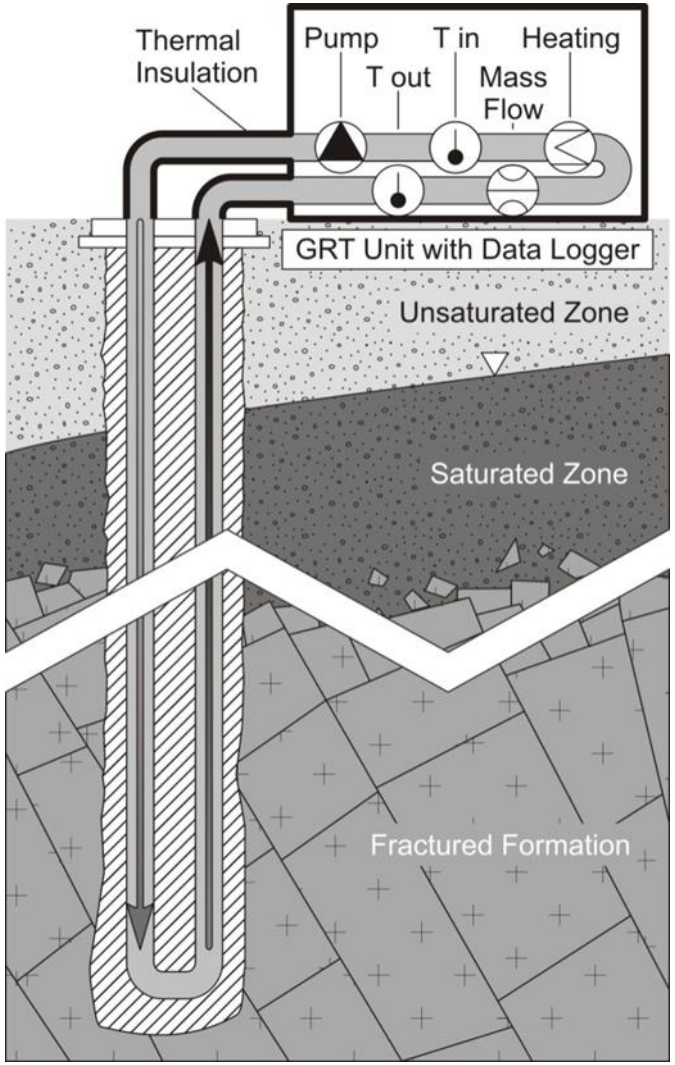
Abweichung zwischen Schätzwert und Messung für λ_{Eff} (n=86 Messungen, n. Sauer et.al, 2007)

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 λeff
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: $MJ/(m^3K)$

Thermische Kontaktwiderstände

R_S ungestörtes Gebirge – Skinzone
R_1 Skinzone – Bohrlochhinterfüllung
R_3 Bohrlochhinterfüllung – Sondenrohr

Thermische Übergangswiderstände (dynamisch)

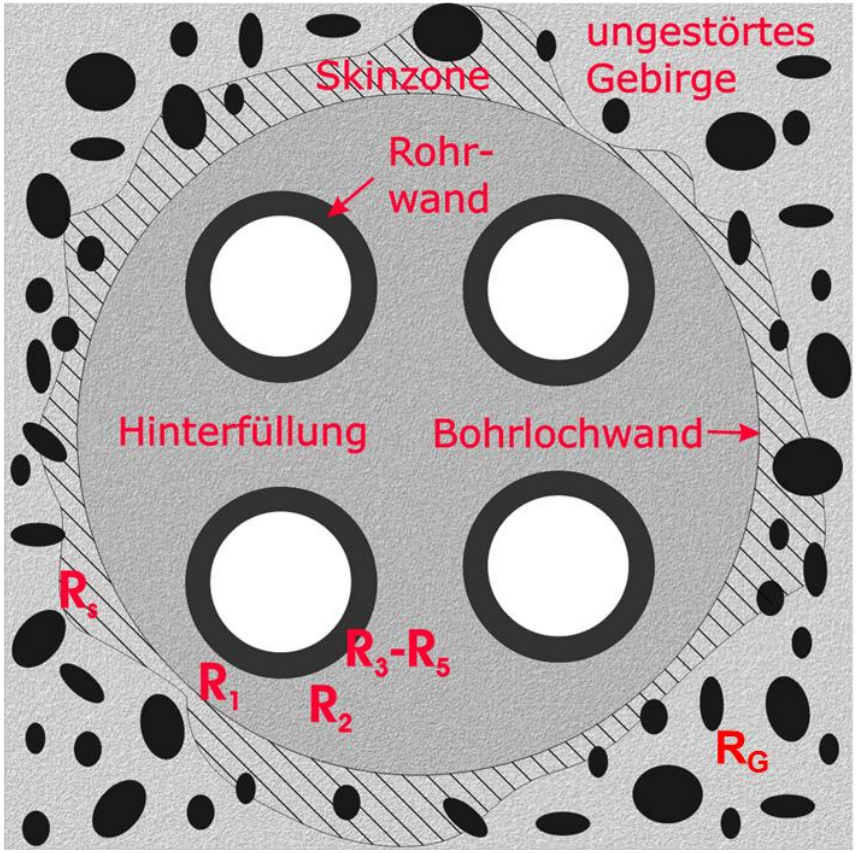
R_5 Wärmeträgerfluid – Sondenrohr
R_G ungestörtes Gebirge - Grundwasser

Thermische Durchgangswiderstände

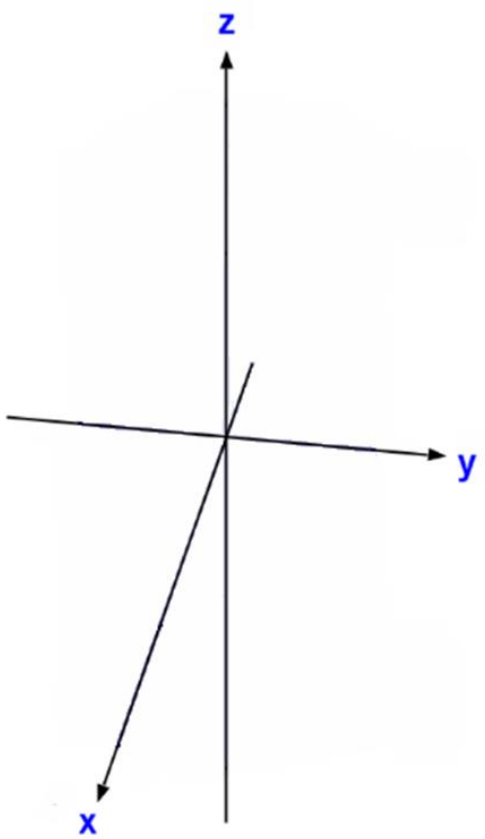
R_2 Hinterfüllmaterial
R_4 Sondenrohrmaterial

Effektiver Thermischer Bohrlochwiderstand

$$R_{Beff}=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_S+R_G$$

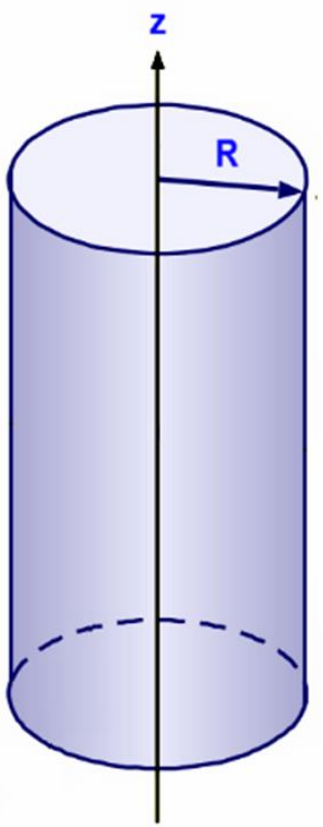


n. Sass, 2012



Vollraumquelle

Linienquelle



Zylinderquelle

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

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

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

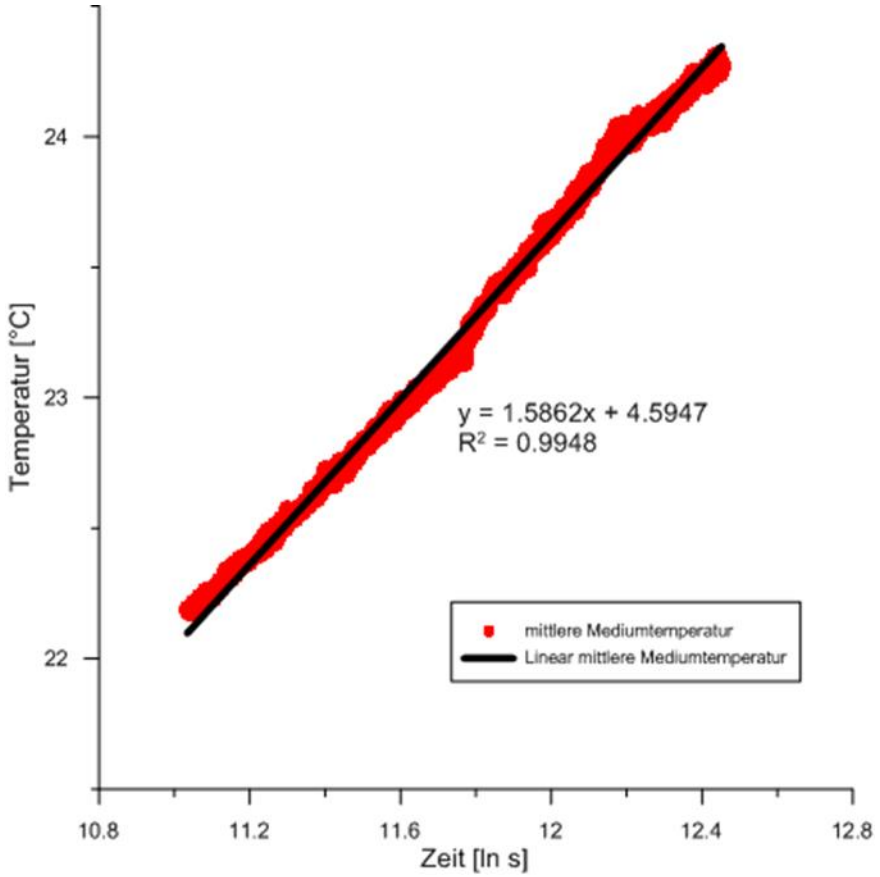
$$\lambda_{eff} = \frac{q}{4 \cdot \pi} \frac{\ln\left(\frac{4 \cdot \alpha_{eff}}{r_B^2}\right) + \tau(t) - \gamma}{T_f(t) - T_0 - q \cdot R_B}$$

Eskilson, 1987

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

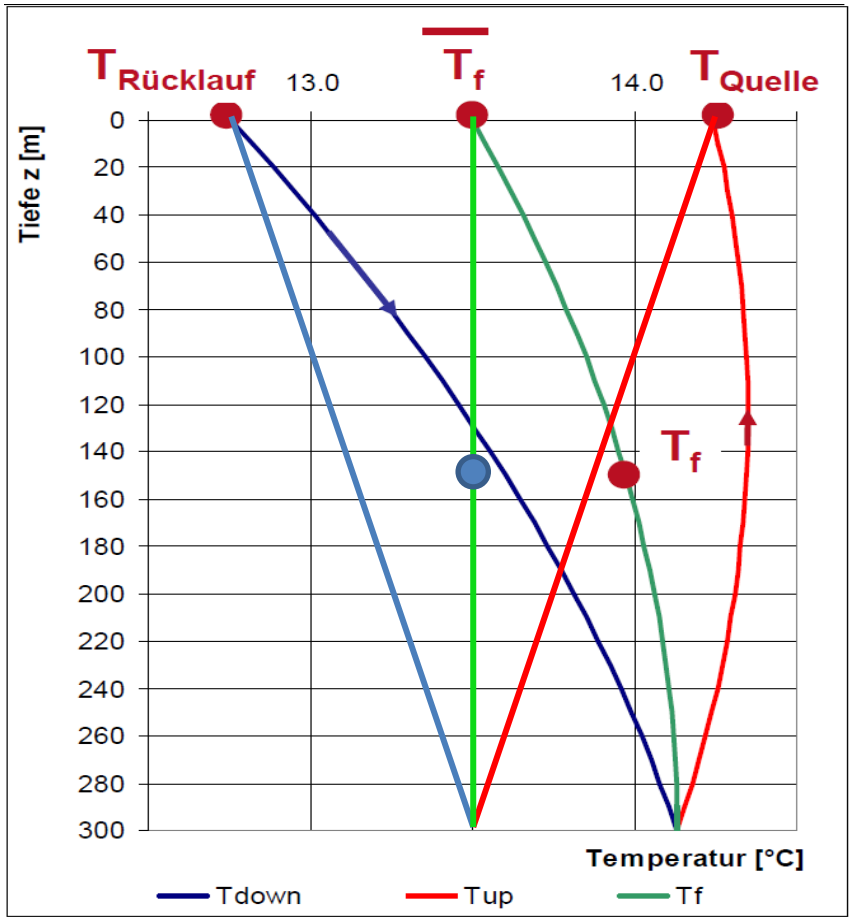
$$\lambda_{eff} = \frac{\dot{Q}_H}{4 \cdot \pi \cdot \varphi}$$

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



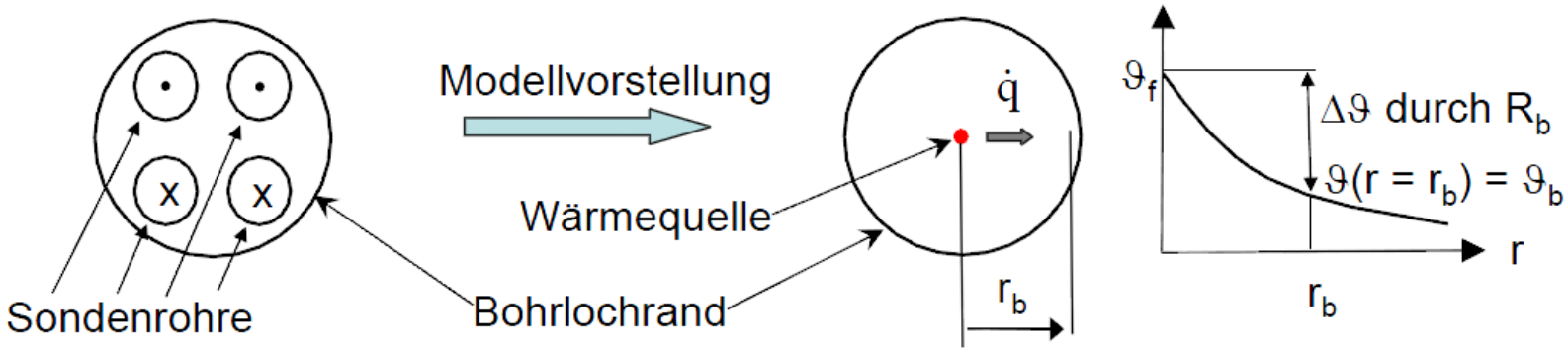
Grafik: Büro boden & grundwasser, 2010

Mitteltemperatur



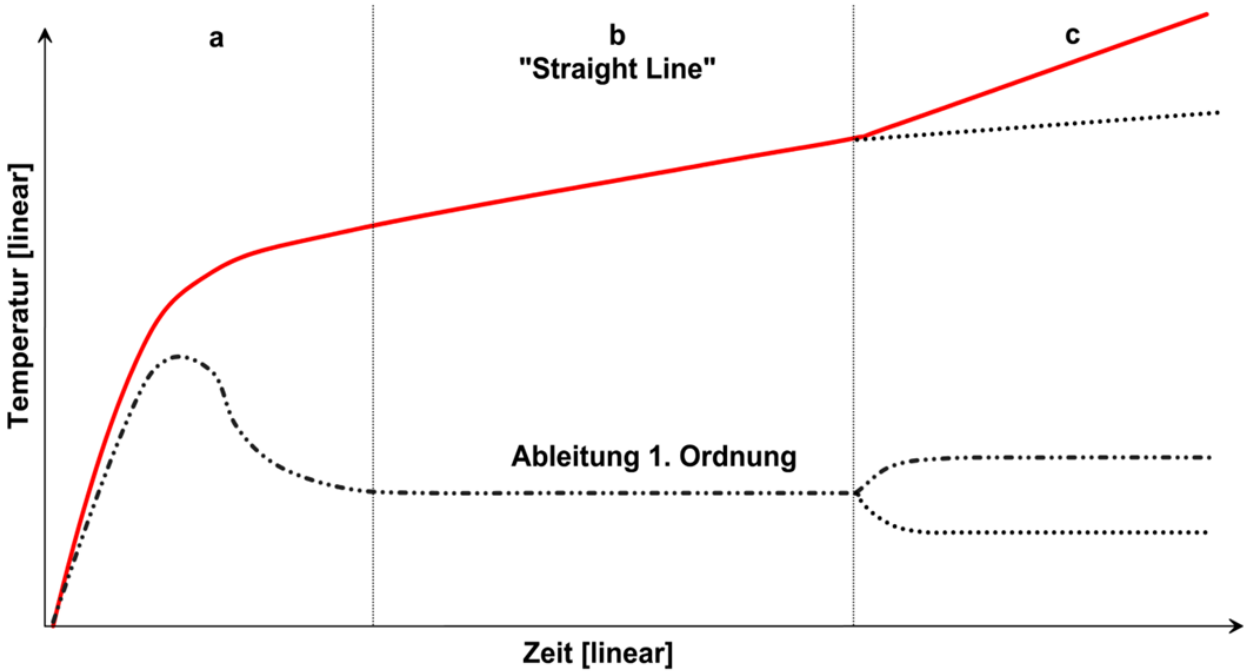
$$\Delta\vartheta_{\log} = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{ln\left(\frac{\vartheta_V - \vartheta_U}{\vartheta_R - \vartheta_U}\right)}$$

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



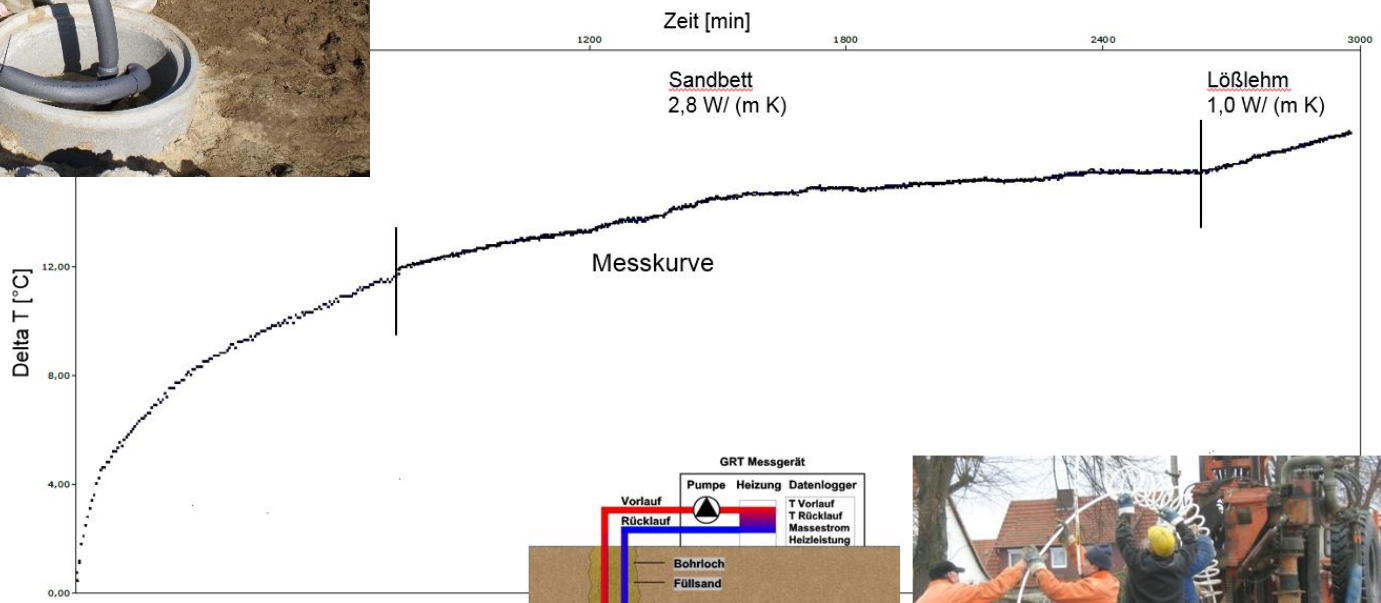
$$\cancel{\Delta\vartheta = R_b \cdot \dot{q}}$$

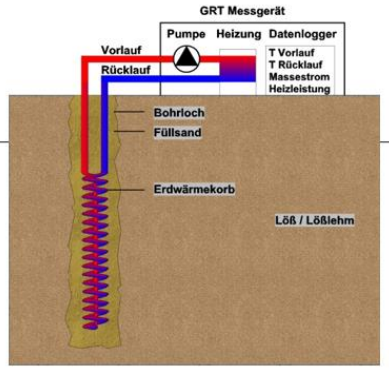
$$\Delta\vartheta_{log} = \frac{R_B \dot{Q}_H}{2\pi}$$

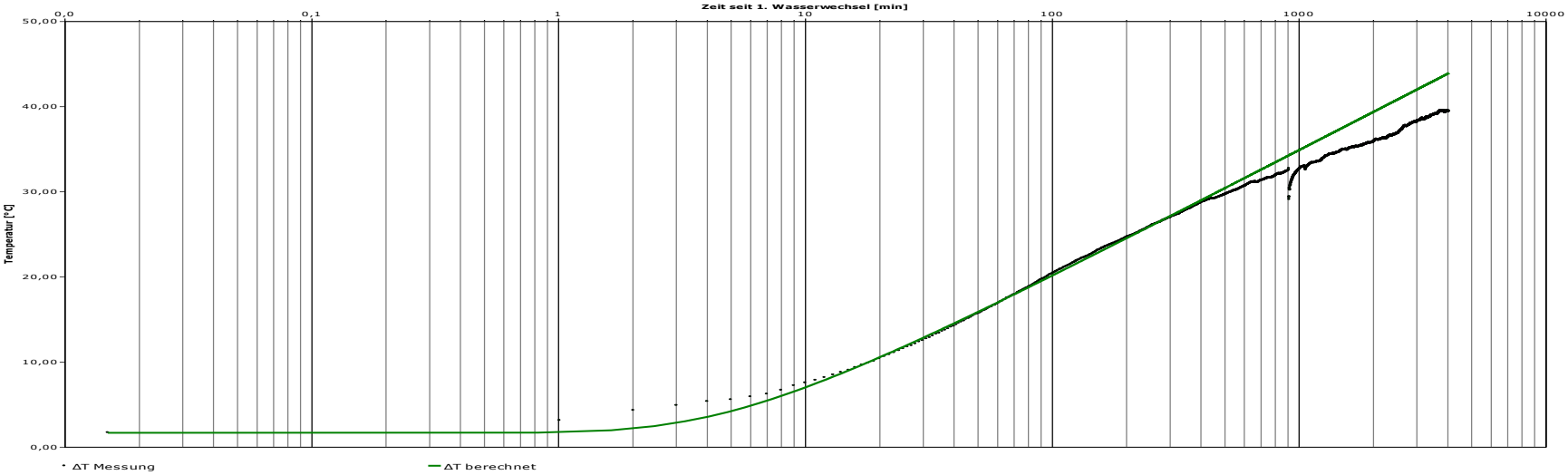


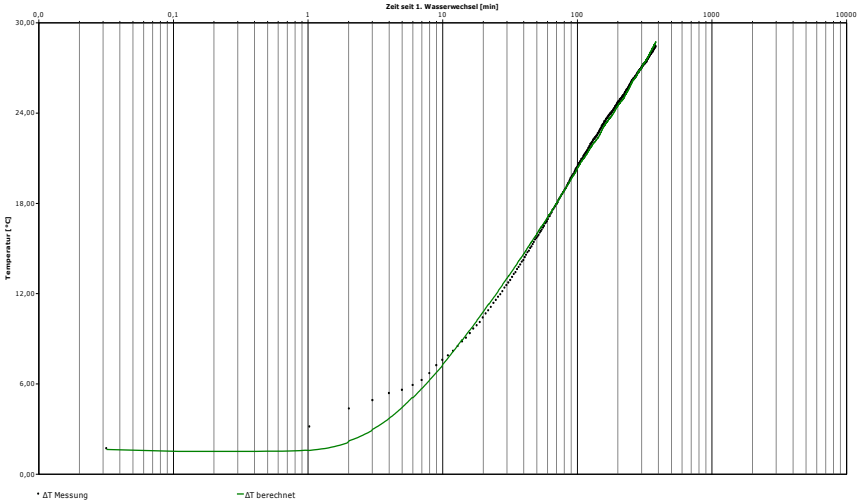
Darstellung einer typischen TRT-Messkurve und ihrer Ableitung erster Ordnung.
Der thermische Verlauf kann in

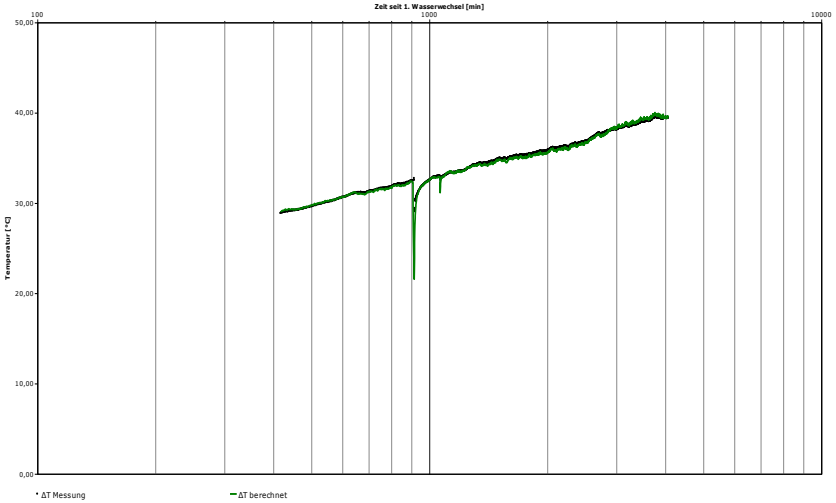
a) Wärmeleitung nach Beginn eines TRT
b) radiale Wärmeleitung (IARF [Infinite Acting Radial Flow]; "Geradlinien-Bereich") und
c) wechselnde thermische Wärmeleitung durch veränderte Randbedingungen der umgebenden Formation untergliedert werden.

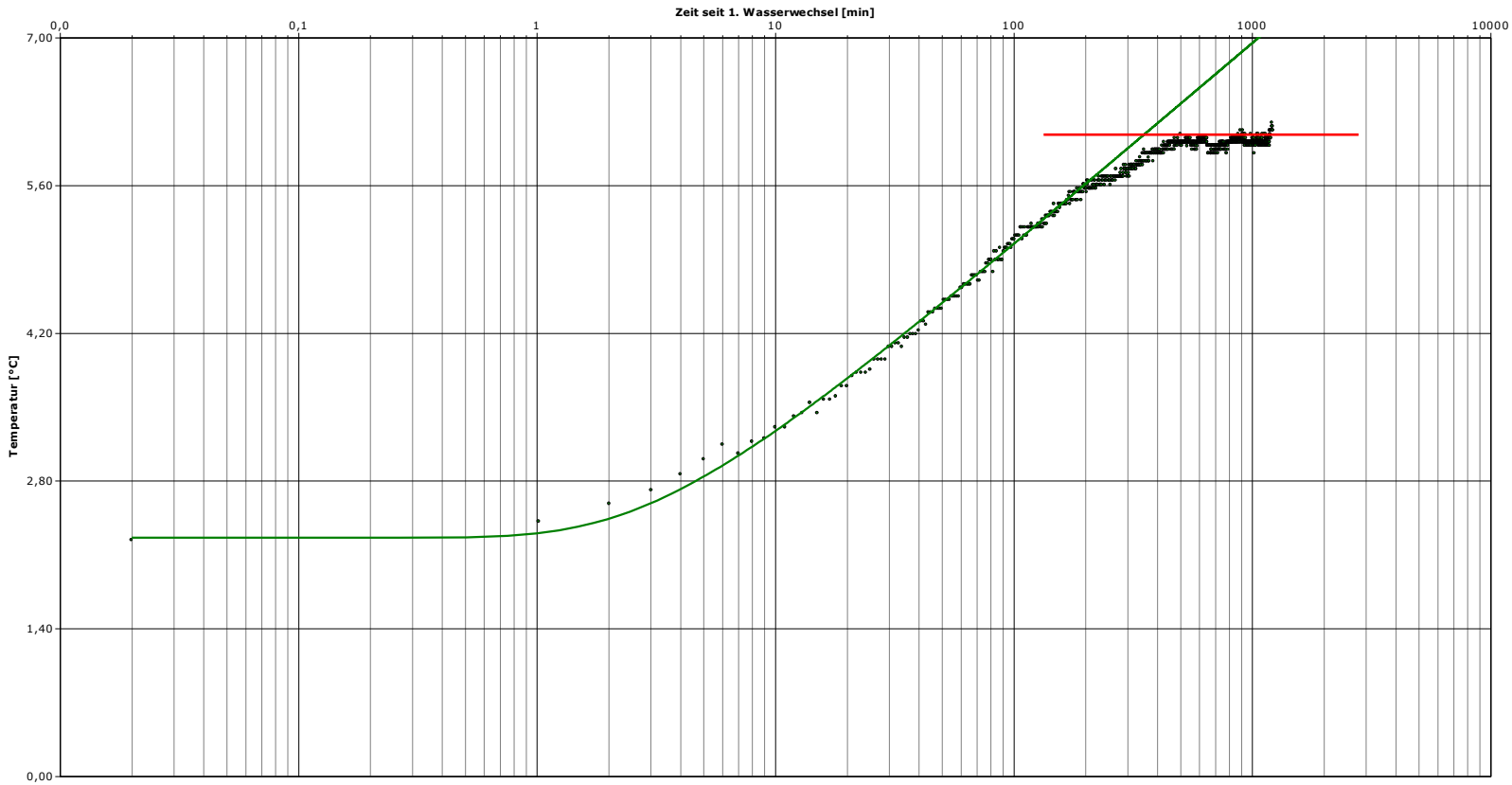

Zeit [min]
1200
1800
2400
3000
Sandbett
2,8 W/ (m K)
Lößlehm
1,0 W/ (m K)
Messkurve
Delta T [°C]
12,00
8,00
4,00
0,00

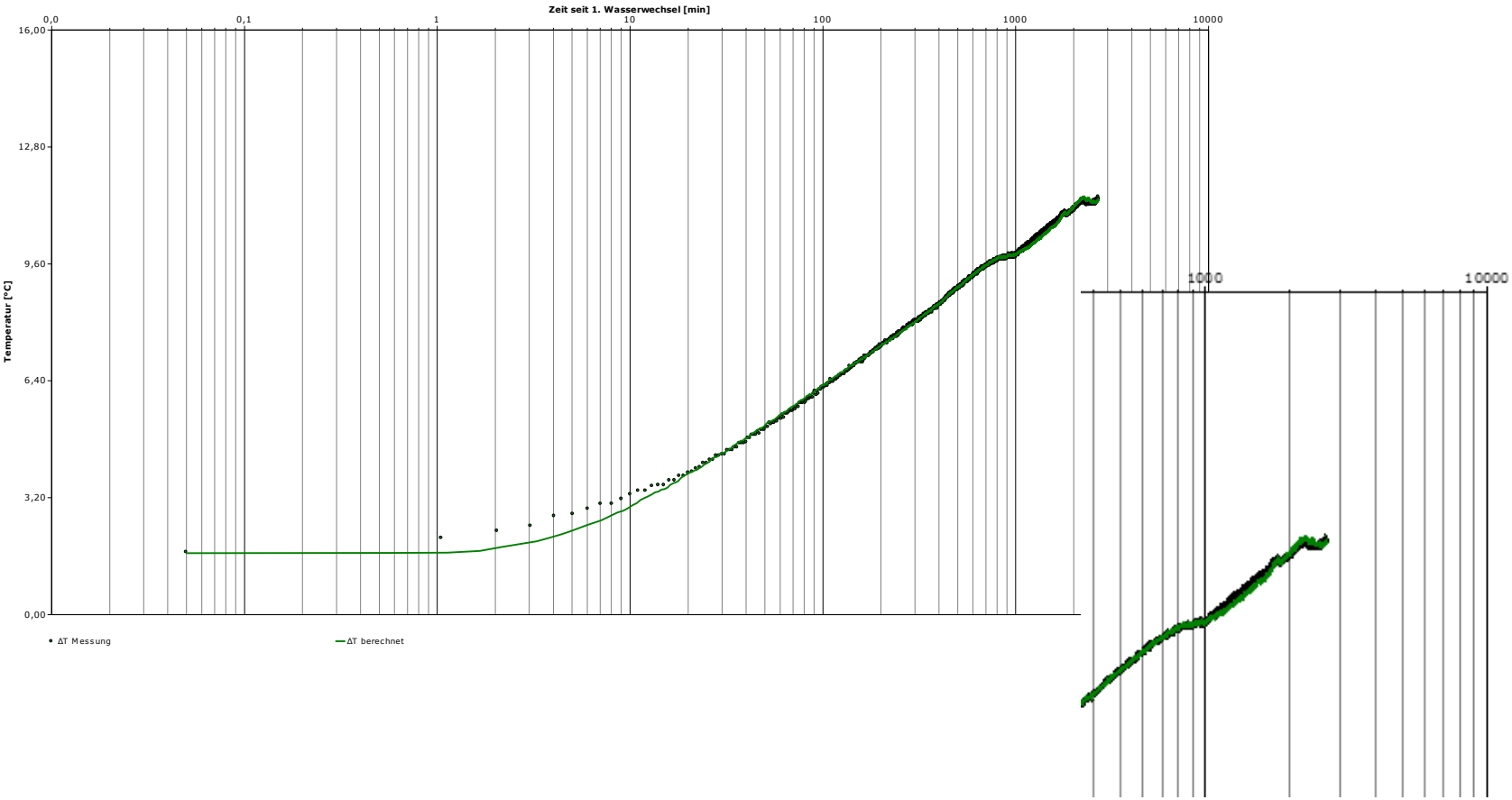

GRT Messgerät
Pumpe
Heizung
Datenlogger
T Vorlauf
T Rücklauf
Massestrom
Heizleistung
Vorlauf
Rücklauf
Bohrloch
Füllsand
Erdwärmekorb
Löß / Lößlehm

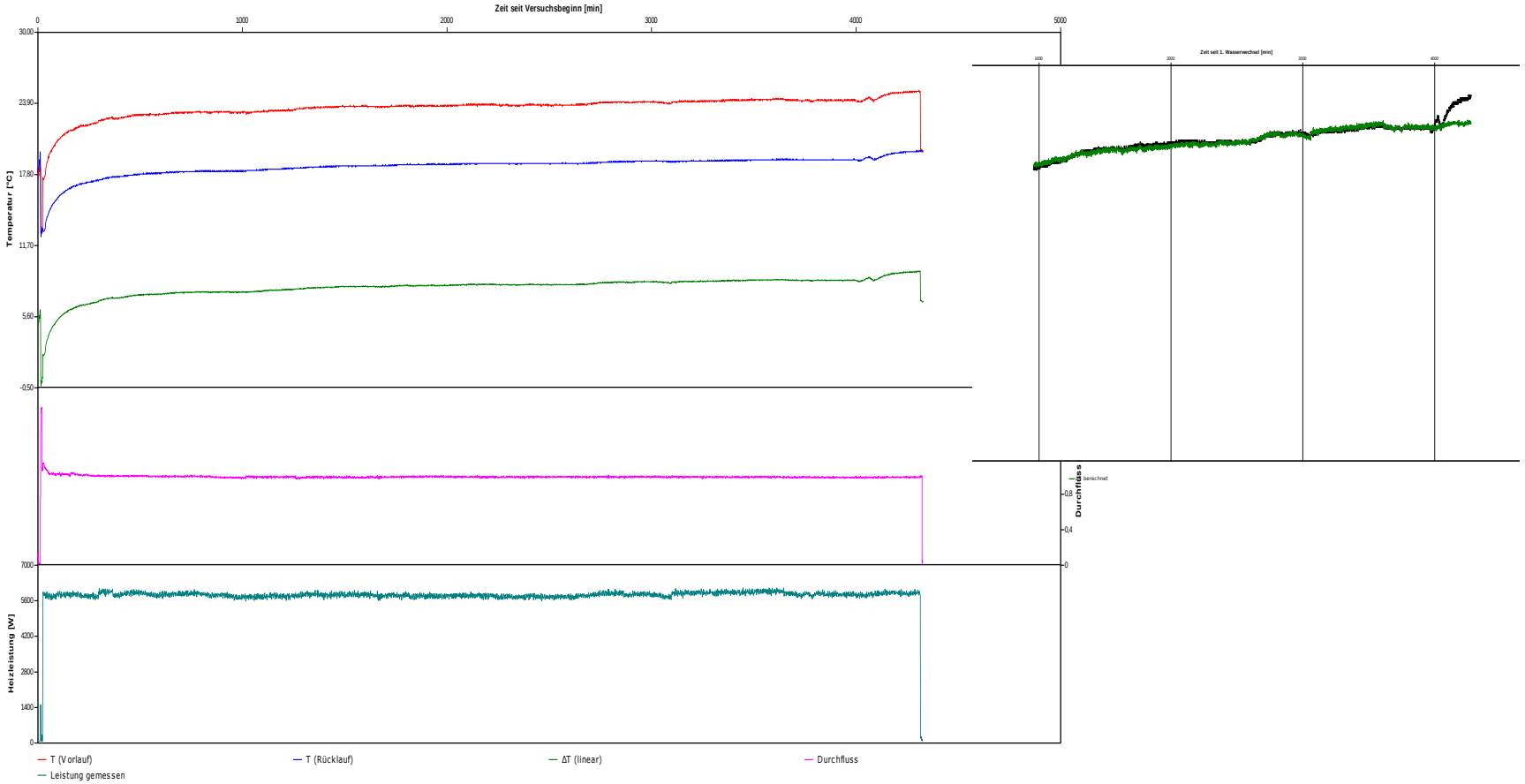

Zeit seit 1. Wasserwechsel [min]
0,0
0,1
1
10
100
1000
10000
Temperatur [°C]
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
ΔT Messung
ΔT berechnet

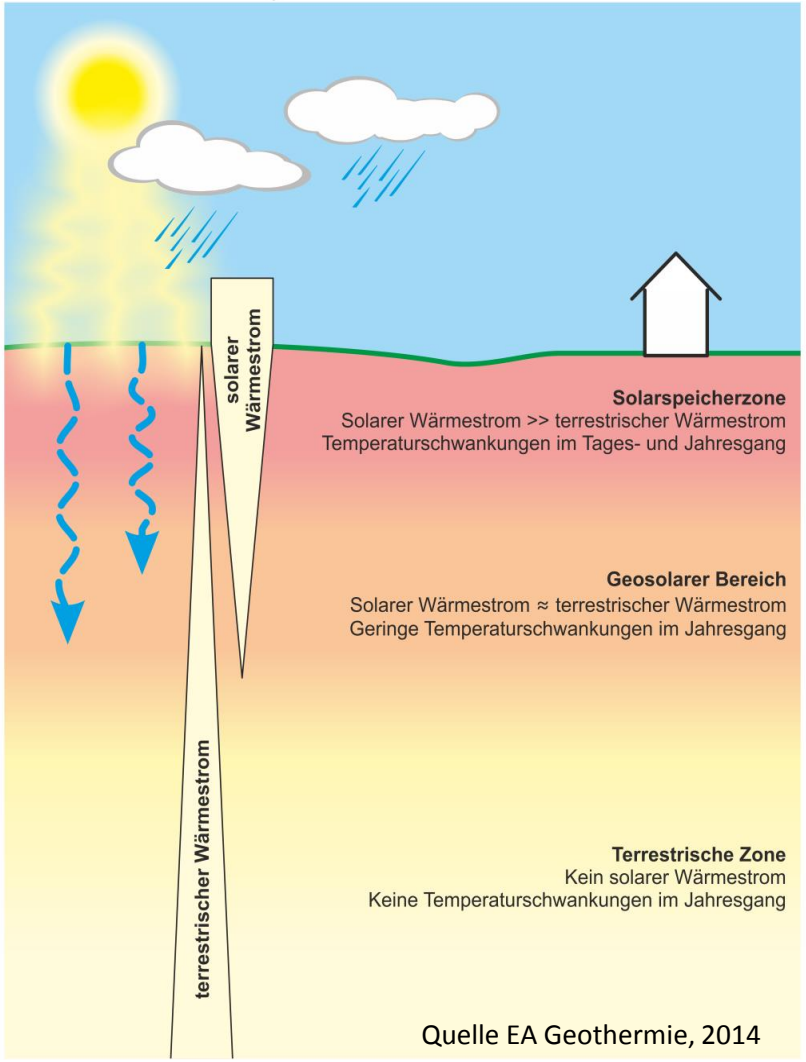

Zeit seit 1. Wasserwechsel [min]
0,0
0,1
1
10
100
1000
10000
Temperatur [°C]
30,00
24,00
18,00
12,00
6,00
0,00
ΔT Messung
ΔT berechnet


Zeit seit 1. Wasserwechsel [min]
100
1000
10000
Temperatur [°C]
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
ΔT Messung
ΔT berechnet


Zeit seit 1. Wasserwechsel [min]
0,0
0,1
1
10
100
1000
10000
7,00
5,60
4,20
2,80
1,40
0,00
Temperatur [°C]


Zeit seit 1. Wasserwechsel [min]
0,0
0,1
1
10
100
1000
10000
16,00
12,80
9,60
6,40
3,20
0,00
Temperatur [°C]
ΔT Messung
ΔT berechnet
1000
10000


Zeit seit Versuchsbeginn [min]
0
1000
2000
3000
4000
5000
Temperatur [°C]
30,00
23,90
17,80
11,70
5,60
-0,50
Heizleistung [W]
7000
5600
4200
2800
1400
0
Durchfluss
berechnet
0,8
0,4
0
Zeit seit 1. Wasserwechsel [min]
T (Vorlauf)
T (Rücklauf)
ΔT (linear)
Durchfluss
Leistung gemessen

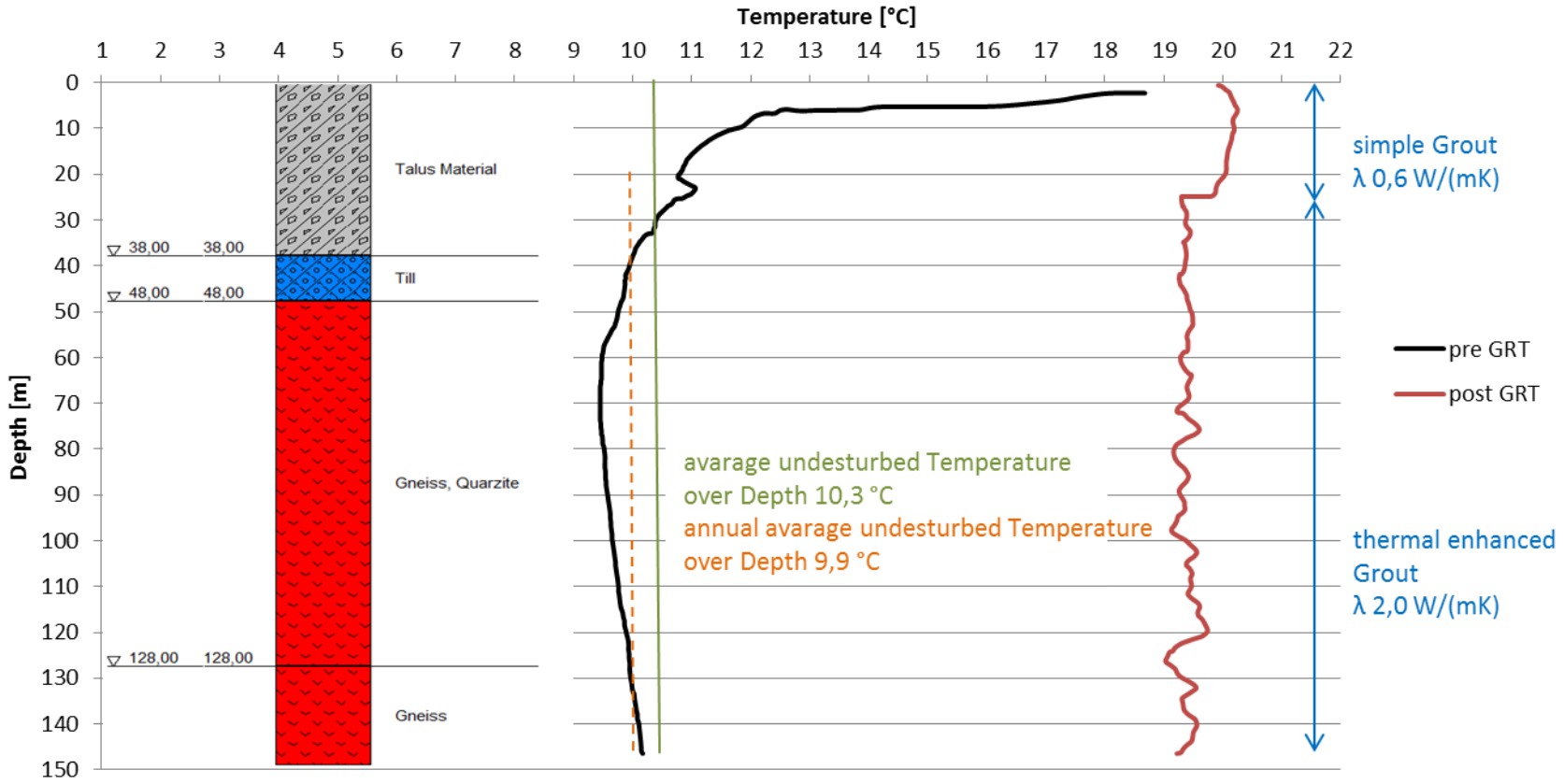


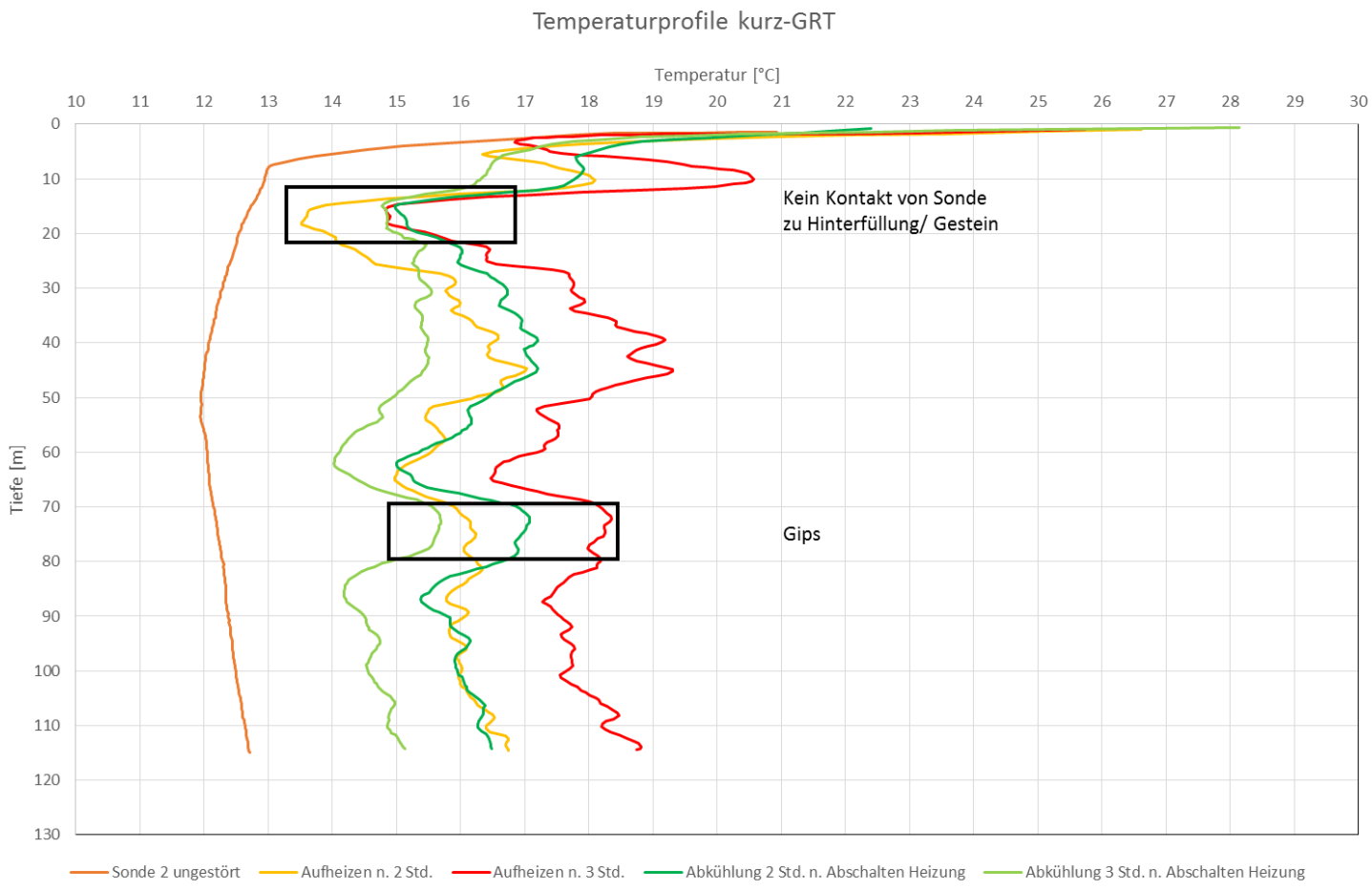
Quelle EA Geothermie, 2014

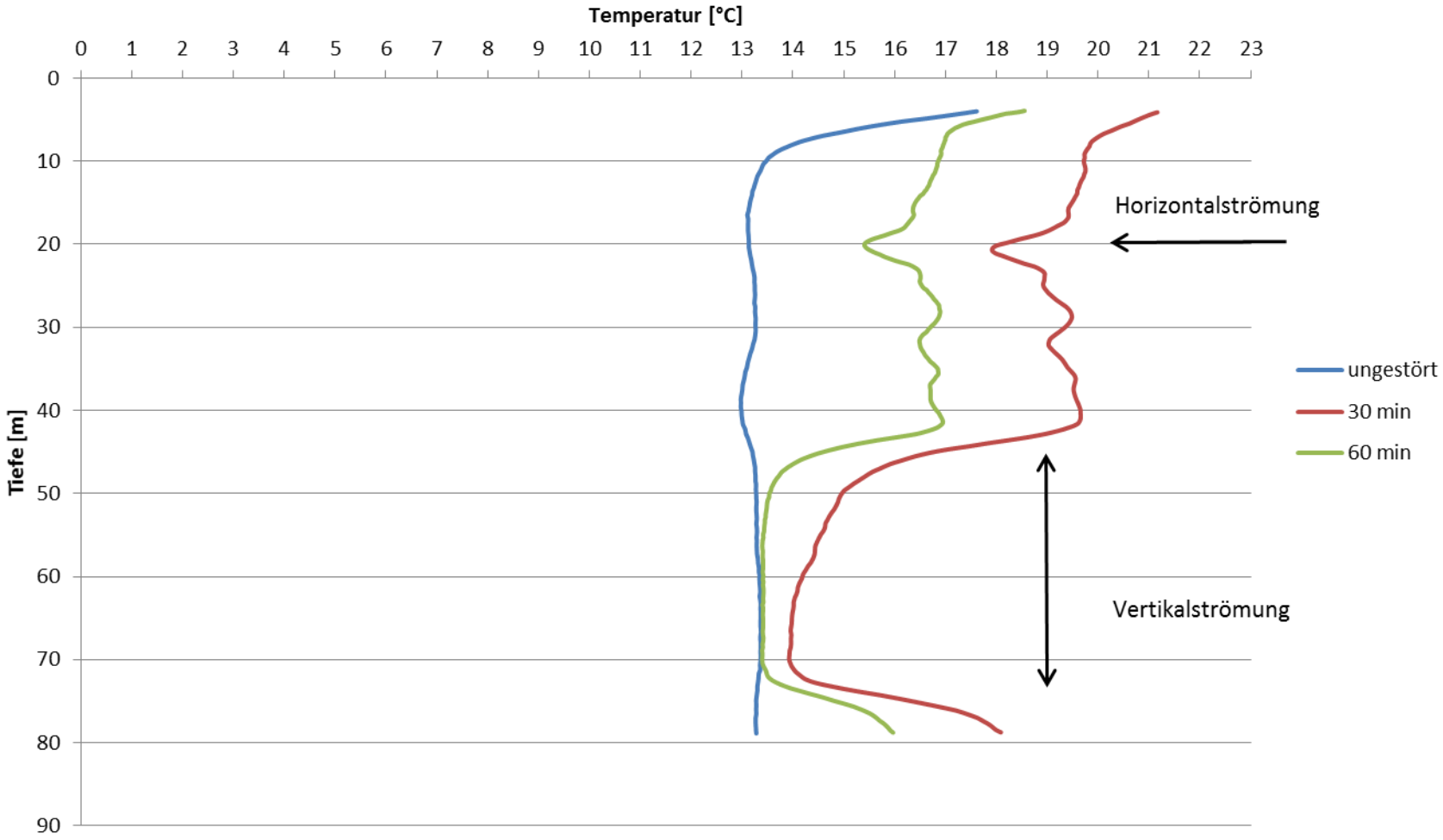
Solare Gewinne bis
1370 W/m²
minus Evaporationsverluste
ca. 400 W/m² (Verdunstung)

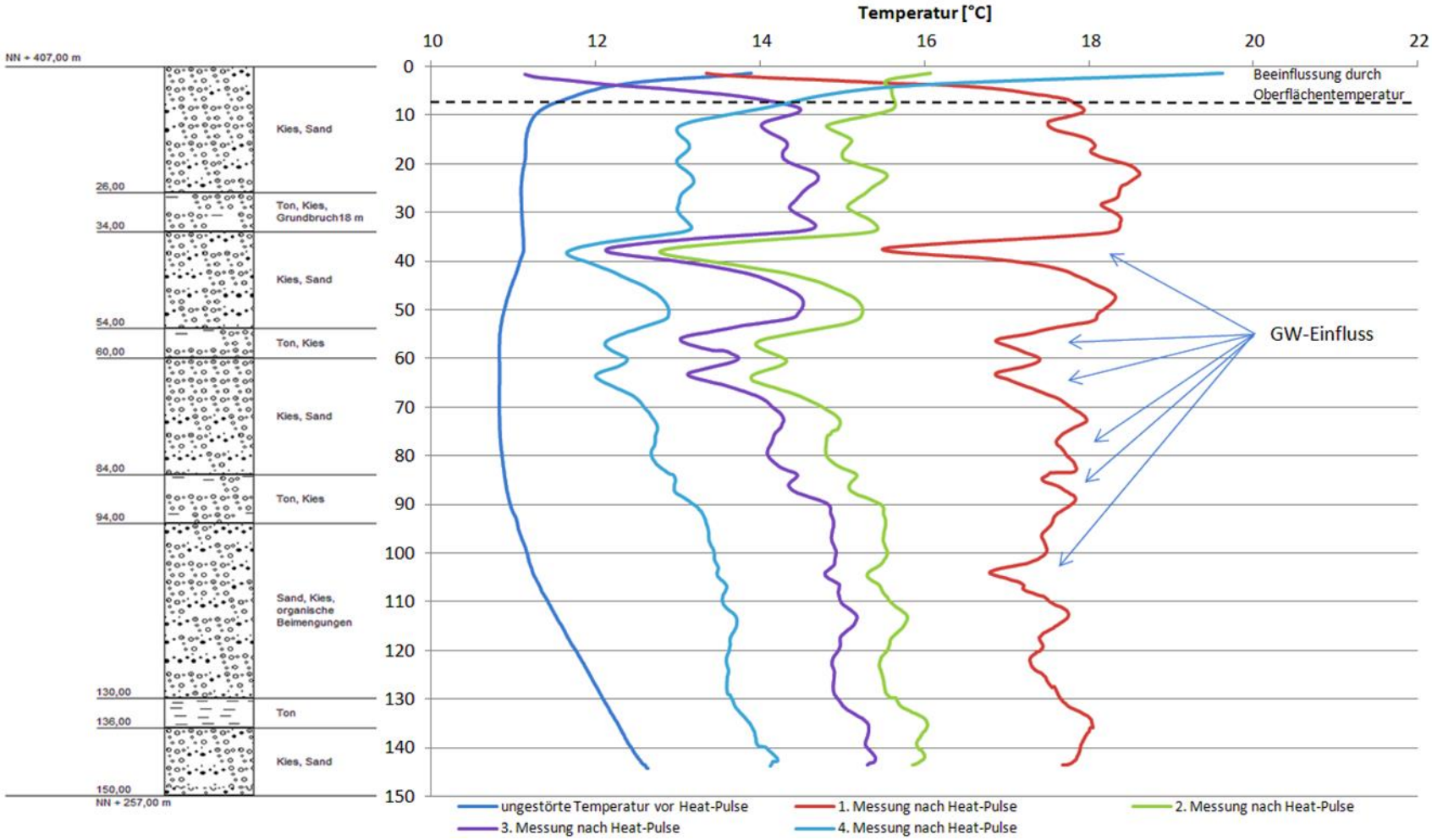
Gewinne durch
Niederschläge

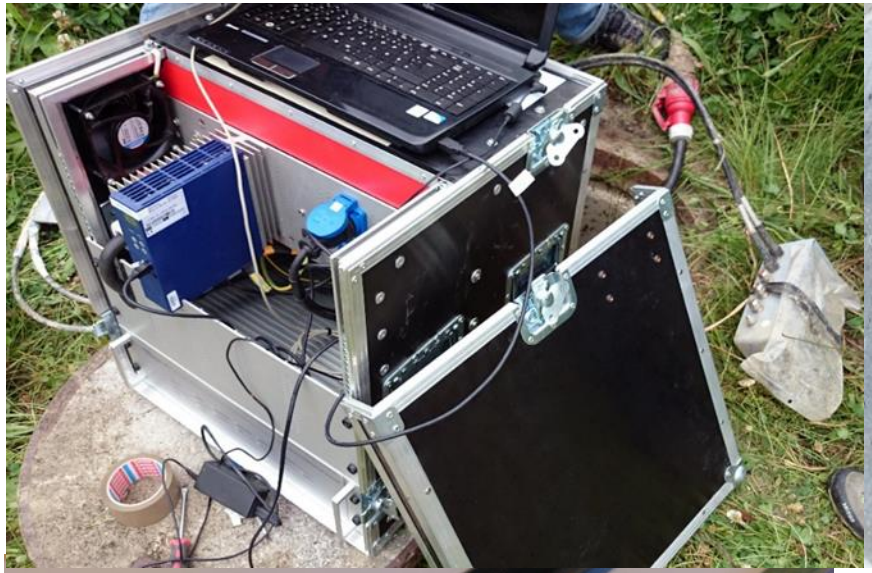
Geothermischer Fluss
um 70 mW/m²


Temperature [°C]
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
Depth [m]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150
38,00 38,00
48,00 48,00
128,00 128,00
Talus Material
Till
Gneiss, Quarzite
Gneiss
avarage undesturbed Temperature
over Depth 10,3 °C
annual avarage undesturbed Temperature
over Depth 9,9 °C
simple Grout
λ 0,6 W/(mK)
thermal enhanced
Grout
λ 2,0 W/(mK)
pre GRT
post GRT

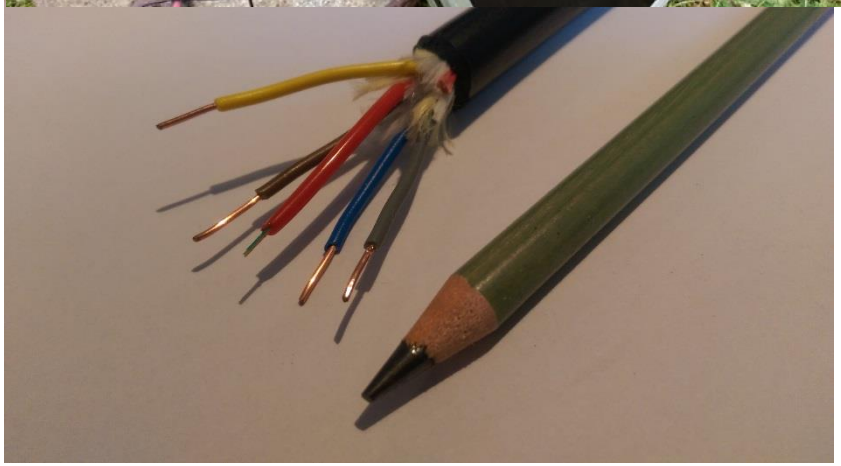

Temperaturprofile kurz-GRT
Temperatur [°C]
10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Tiefe [m]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130
Kein Kontakt von Sonde
zu Hinterfüllung/ Gestein
Gips
Sonde 2 ungestört
Aufheizen n. 2 Std.
Aufheizen n. 3 Std.
Abkühlung 2 Std. n. Abschalten Heizung
Abkühlung 3 Std. n. Abschalten Heizung

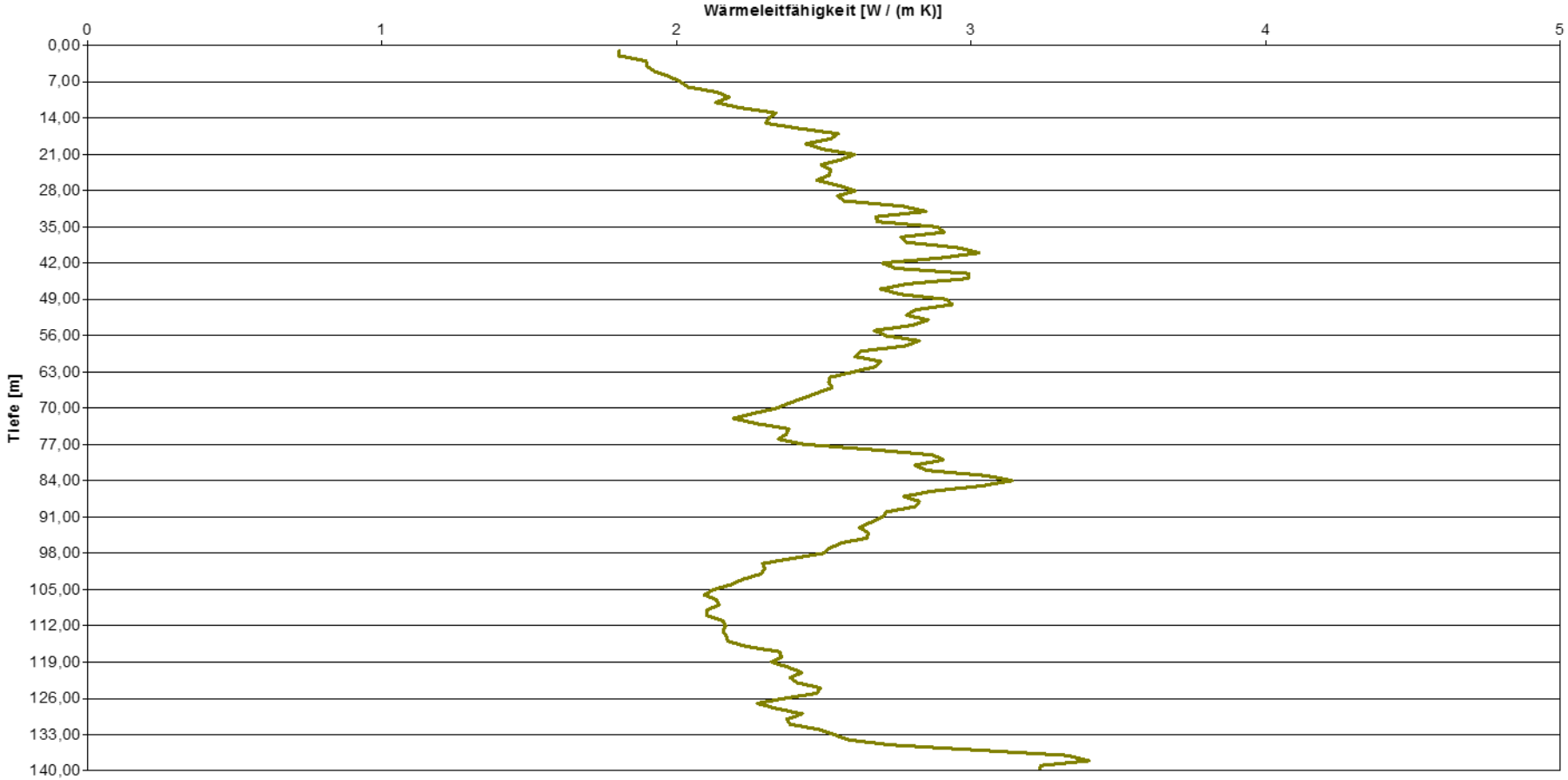

Temperatur [°C]
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
Tiefe [m]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
Horizontalströmung
Vertikalströmung
ungestört
30 min
60 min

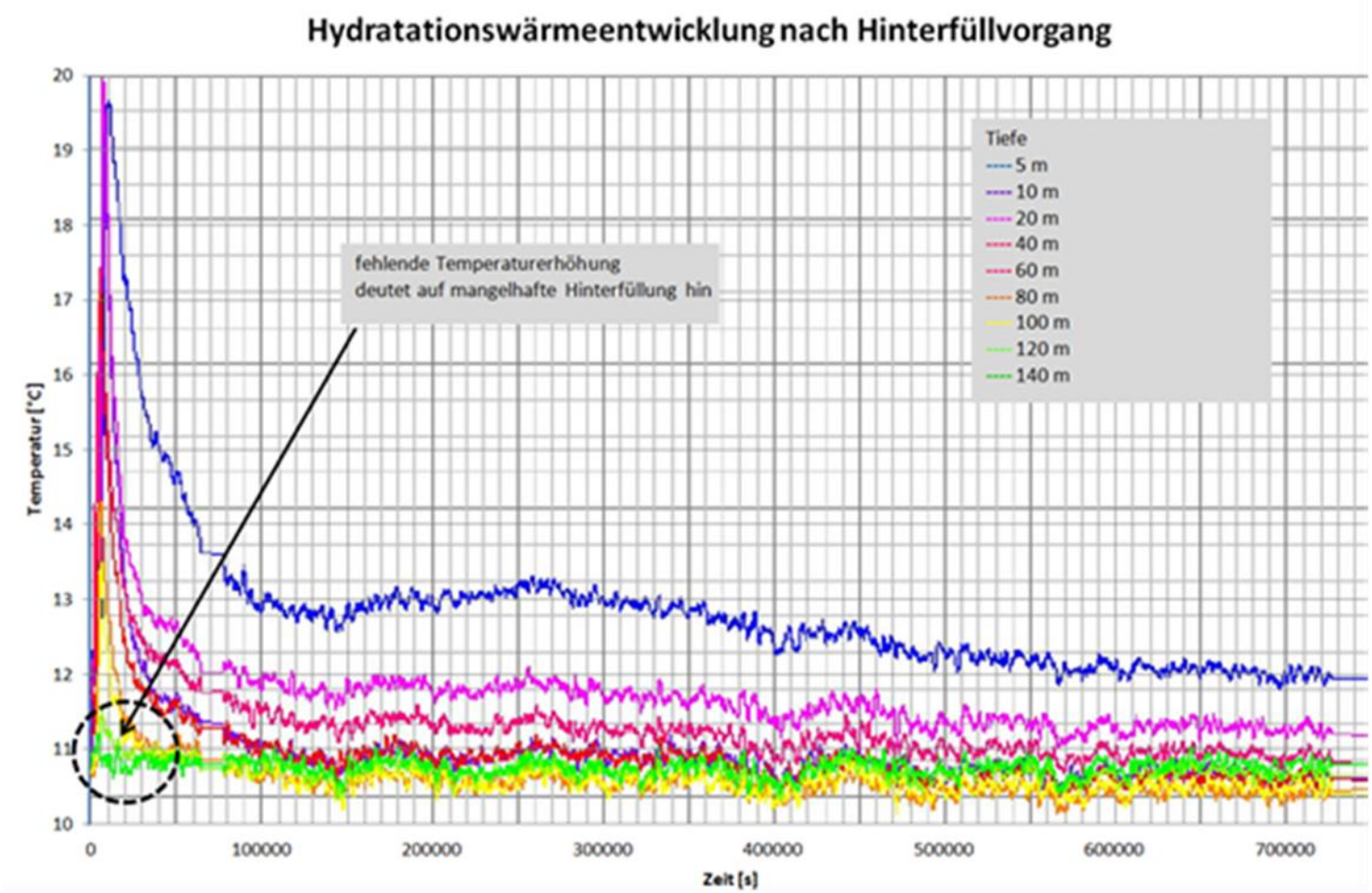

Temperatur [°C]
10
12
14
16
18
20
22
NN + 407,00 m
Kies, Sand
26,00
Ton, Kies, Grundbruch18 m
34,00
Kies, Sand
54,00
Ton, Kies
60,00
Kies, Sand
84,00
Ton, Kies
94,00
Sand, Kies, organische Beimengungen
130,00
Ton
136,00
Kies, Sand
150,00
NN + 257,00 m
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150
Beeinflussung durch Oberflächentemperatur
GW-Einfluss
ungestörte Temperatur vor Heat-Pulse
1. Messung nach Heat-Pulse
2. Messung nach Heat-Pulse
3. Messung nach Heat-Pulse
4. Messung nach Heat-Pulse

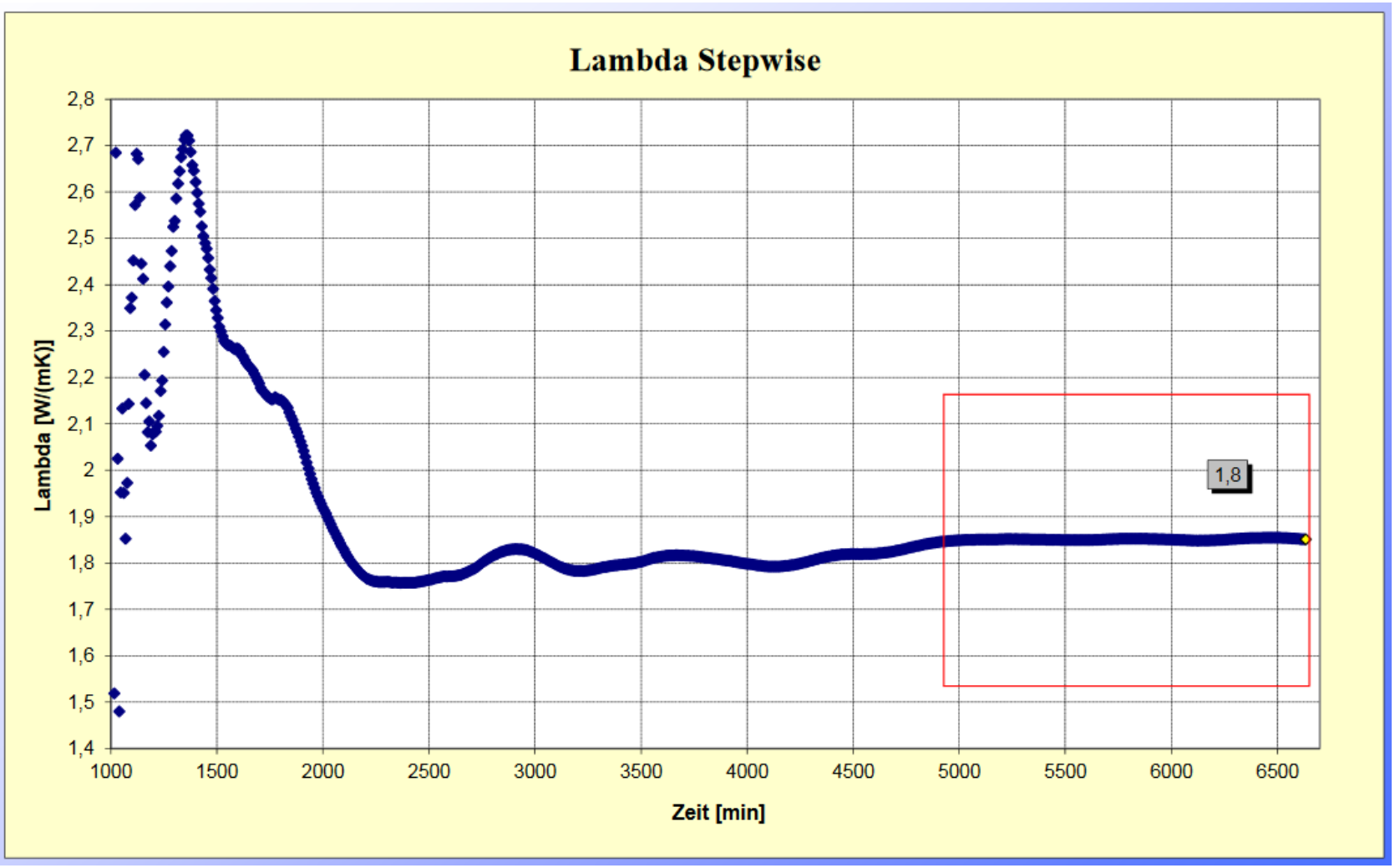


3
1
2




Wärmeleitfähigkeit [W / (m K)]
0
1
2
3
4
5
Tiefe [m]
0,00
7,00
14,00
21,00
28,00
35,00
42,00
49,00
56,00
63,00
70,00
77,00
84,00
91,00
98,00
105,00
112,00
119,00
126,00
133,00
140,00


Hydratationswärmeentwicklung nach Hinterfüllvorgang
Temperatur [°C]
Zeit [s]
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
0
100000
200000
300000
400000
500000
600000
700000
fehlende Temperaturerhöhung
deutet auf mangelhafte Hinterfüllung hin
Tiefe
5 m
10 m
20 m
40 m
60 m
80 m
100 m
120 m
140 m



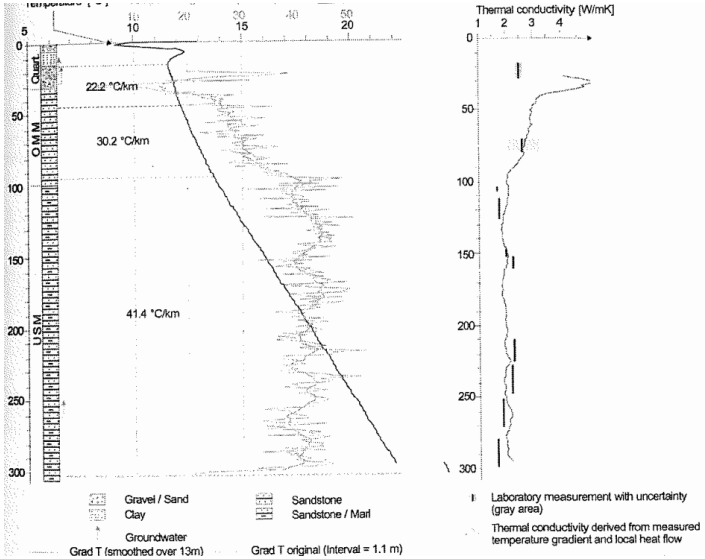
Quelle: HGC GmbH

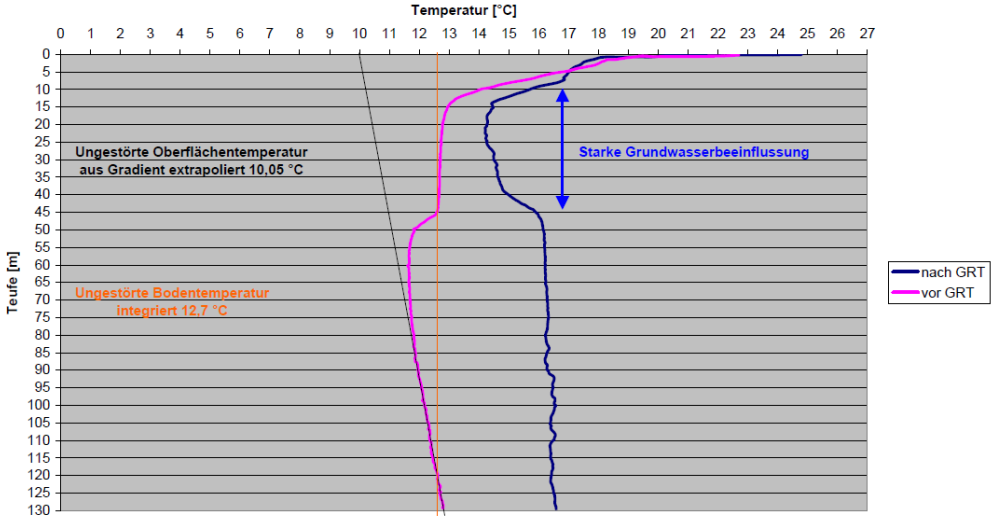
$$\nabla T_{G,i} = \frac{T_{o,i} - T_{u,i}}{z_{o,i} - z_{u,i}} \qquad \lambda_i = \frac{q_{loc}}{\nabla T_i}$$

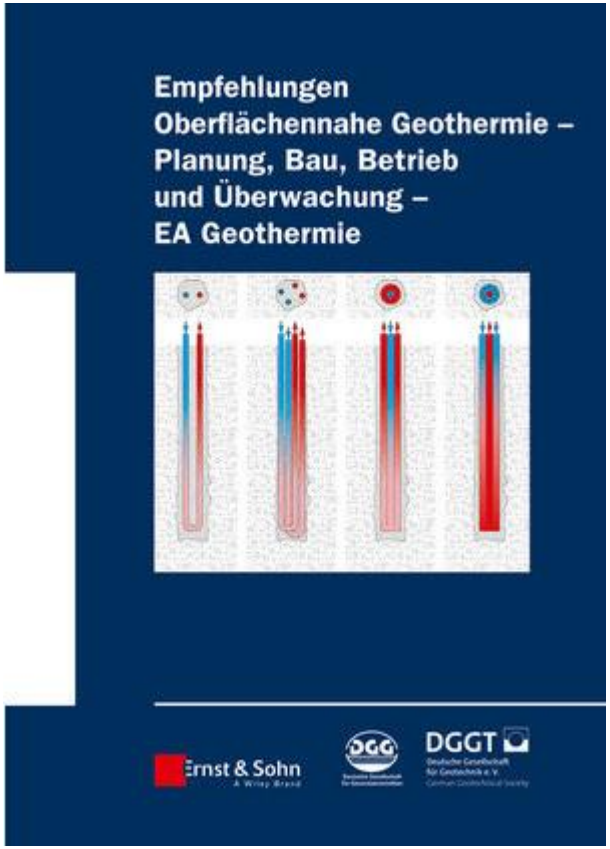
$\nabla T_{G,i}$ = Temperaturgradient des betrachteten Tiefenabschnittes i [°C/m]

$T_{o,i}$ = gemessene Temperatur [°C] an der Oberkante, ($z = z_{o,i}$ [m]) des betrachteten Tiefenabschnitts i

$T_{u,i}$ = gemessene Temperatur [°C] an der Basis ($z = z_{u,i}$ [m]) des betrachteten Tiefenabschnitts i



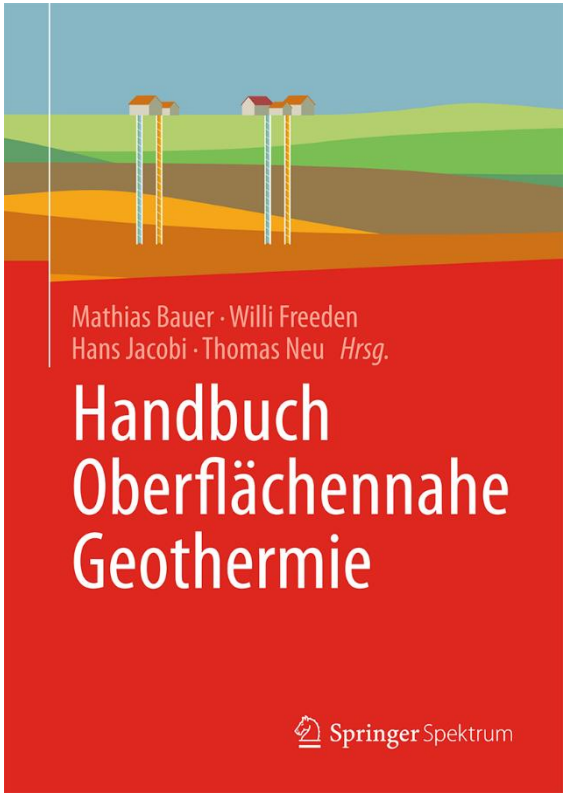




Empfehlung Oberflächennahe Geothermie: Planung, Bau, Betrieb und Überwachung - EA Geothermie

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 !