

Energieeffizienzüberprüfung von Erdwärmesonden mit dem DeepDrifter®-System

Kriterien

Die Bewertung der Qualität von EWS sollte anhand der folgenden Kriterien erfolgen:

1. Ablenkung von der Vertikalen
2. Annäherung an benachbarte Erdwärmesonden
3. Güte der Hinterfüllung

Die Ablenkung von der Vertikalen beeinflusst die effektive Tiefenlage sowie den Abstand zwischen benachbarten Sonden.

1. Ablenkung von der Vertikalen

Die effektive Tiefe ergibt sich aus der Summe der einzelnen gemessenen und auf die Vertikale projizierten Tiefen und ist abhängig vom Verlauf des Bohrlochs (Abb. 1). Unsere bis jetzt erhobenen Messwerte ergeben bei einer Ablenkung von 5 m und einer angestrebten Bohrlochtiefe von 150 m eine um 1 m verkürzte Sonde (Abb. 2).

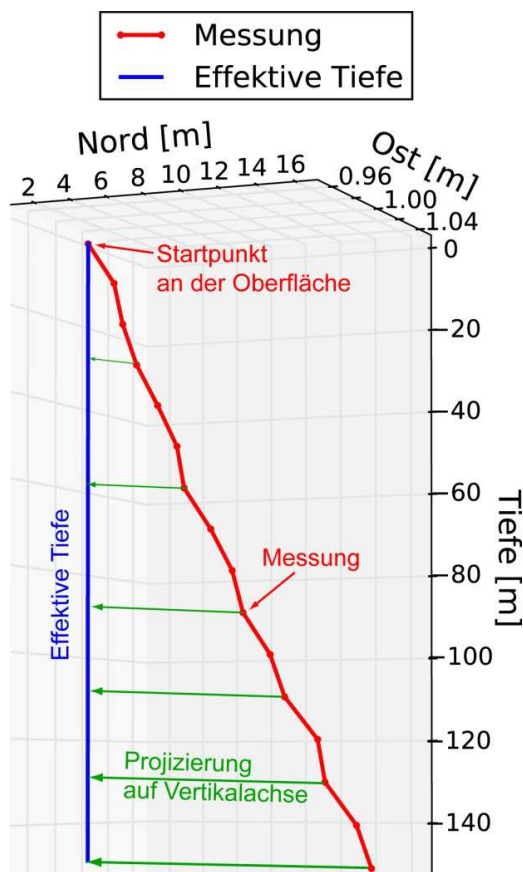


Abbildung 1: Erläuterungen zur Berechnung der effektiven Tiefe. Je nach geologischen Bedingungen kann der Bohrverlauf vom Startpunkt an der Oberfläche abweichen, darum entspricht die gemessene Endtiefe nicht der reellen, effektiven Tiefe. Um die effektive Tiefe zu berechnen, projiziert man den gemessenen Endtiefenpunkt auf eine vertikale Linie unter dem Startpunkt des Bohrlochs.

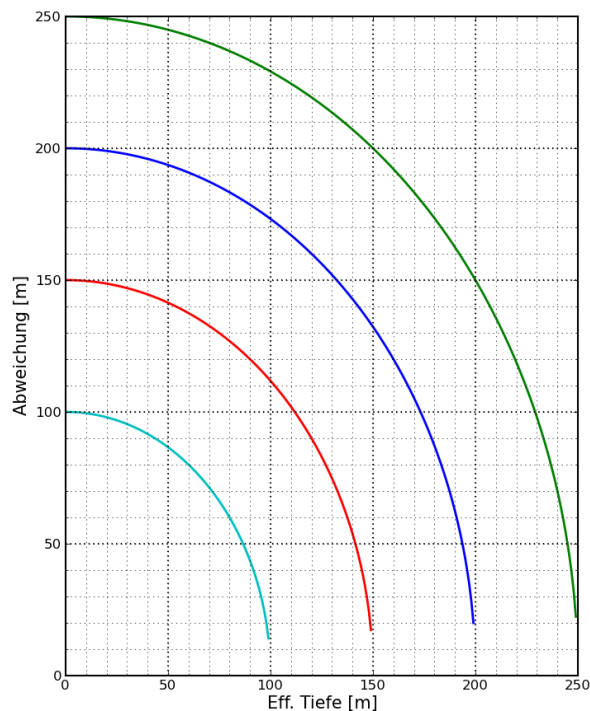


Abbildung 2: Abweichung vs. effektive Tiefe für die Bohrlochlänge von 100 m (hellblau), 150 m (rot), 200 m (blau), und 250 m (grün). Eine Abweichung von 50 m bei einer Bohrlochlänge von 100 m verursacht eine effektive Sondenverkürzung von 15 m (d.h. eff. Tiefe: 85 m).

Der Einfluss auf die Temperatur wird bei grossen Abweichungen kritisch. Um das zu quantifizieren, wurde eine EED Testsimulation durchgeführt. Acht Sonden (4x2 Sonden, angeordnet als geschlossenes Rechteck) sollten bis in eine Tiefe von 150 m verlegt werden, um ein Gebäude mit einem Wärmebedarf von 100 MWh pro Jahr zu versorgen (siehe Beilage 1 für Details). Die Geologie ist in unserem Beispiel sehr einfach: 15 m Quartär (Wärmeleitfähigkeit: 1.5 W(mK)^{-1} ; Wärmekapazität: $1.6 \text{ MJ/m}^3\text{K}$), danach Molasse Sandstein (Wärmeleitfähigkeit: 2.6 W(mK)^{-1} ; Wärmekapazität: $2.1 \text{ MJ/m}^3\text{K}$). Je nach Ablenkung der Sonde variiert die effektive Tiefe der Bohrung und damit wird die gewichtete Wärmeleitfähigkeit sowie die volumetrische Wärmekapazität verändert (Tabelle 1).

Effektive Tiefe [m]	Gewichtete Wärmeleitfähigkeit	Gewichtete Wärmekapazität
150-140	2.5	2.1
140-110	2.5	2.0
100	2.4	2.0

Tabelle 1: Variation der gewichteten Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität je nach effektiver Tiefe.

Mit dem EED wurde die Temperatur des Sondenfluids im 50. Jahr für verschiedene effektive Tiefen berechnet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 2 zusammengefasst, sie zeigen eine Temperaturabnahme pro m-Sondenverkürzung von 0.1°C . N.B.: Es wurde hier ein Standardfall betrachtet.

Effektive Tiefe [m]	Verkürzen [m]	Abweichung [m]	Temperatur des Fluids im 50sten Jahr [°C]
150	0	0	0.58
149	1	17	0.50
148	2	24	0.41
145	5	38	0.13
140	10	50	-0.43
130	20	70	-1.53
120	30	90	-2.68

Tabelle 2: Berechnete Temperatur des Sondenfluids in Bezug auf die effektive Tiefe des Bohrlochs. Unser Beispiel zeigt bei einer Verkürzung von 10 m eine Temperaturerabnahme von etwa 1°C. Geplante Tiefe war 150 m. Die roten Werte erfüllen die SIA Normen nicht.

Eine ähnliche Modellierung wurde mit nur einer Sonde durchgeführt, welche für die Beheizung eines Gebäudes mit einem jährlichen Wärmebedarf von 12.6 MWh dient. Auch in diesem Fall wurde pro Meter Sondenverkürzung eine Temperaturabnahme von etwa 0.1°C festgestellt.

Die Bewertung beruht zurzeit auf zwei Modellierungen. Sie muss künftig durch weitere ergänzt werden. Die Abweichungswerte wurden mathematisch auf der Basis von Abbildung 2 berechnet. Sie sollten als richtungweisende Messwerte betrachtet werden. Da ein linearer Zusammenhang zwischen dem Verkürzen (VK) und der Temperatur besteht, kann dies für die Bewertung herangezogen und in einer Skala von 1 bis 10 dargestellt werden.

Es ergibt sich folgende – auf den Verkürzungen (VK in m) basierende – Skala:

VK = 0:	10 Punkte	
1.5 > VK > 0:	9 Punkte	etwa 0.1 °C Verlust
3 > VK > 1.5:	8 Punkte	
4.5 > VK > 3:	7 Punkte	etwa 0.5 °C Verlust
7 > VK > 4.5:	6 Punkte	
10 > VK > 7:	5 Punkte	etwa 1 °C Verlust
15 > VK > 10:	4 Punkte	
20 > VK > 15:	3 Punkte	etwa 2 °C Verlust
25 > VK > 20:	2 Punkte	
VK > 25:	1 Punkte	≥ 2.5 °C Verlust

Grosse Abweichungen sind auf jeden Fall für die Planungssicherheit kritisch.

2. Annäherung an benachbarte Erdwärmesonden

Durch den Einfluss der Abweichung wird auch die Geometrie eines EWS-Feldes verändert und somit kann die Wärmeförderung bzw. Wärmerückführung an bzw. in den Untergrund stark von der ursprünglichen Planung abweichen. Durch das Näherliegen der Sonden im tiefen Untergrund beeinflussen sich die Sonden gegenseitig stärker. Annäherungen bis wenige Meter voneinander sind möglich. Dies wird die Temperaturen des Sondenfluids um 0.5 Grad und mehr senken.

$$R_A = \frac{\text{gemessener mittlerer Abstand [m]}}{\text{geplanter mittlerer Abstand [m]}}$$

Es ergibt sich folgende Skala:

$R_A > 1$:	10 Punkte
$0.95 < R_A < 1$:	9 Punkte
$0.9 < R_A < 0.95$:	8 Punkte
$0.85 < R_A < 0.9$:	7 Punkte
$0.8 < R_A < 0.85$:	6 Punkte
$0.7 < R_A < 0.8$:	5 Punkte
$0.6 < R_A < 0.7$:	4 Punkte
$0.5 < R_A < 0.6$:	3 Punkte
$0.4 < R_A < 0.5$:	2 Punkte
$R_A < 0.4$:	1 Punkte

Bei Werten unter 6 Punkten wird eine neue Simulation mit EED empfohlen; d.h. für Fälle wo eine Verkürzung grösser als 20% vorliegt.

3. Güte der Hinterfüllung

Die Güte der Hinterfüllung wird qualitativ bestimmt, indem man die Temperaturen im Profil zu verschiedenen Zeiten misst. Wird eine lineare Temperaturzunahme mit der Tiefe beobachtet, dann ist die Hinterfüllung homogen verteilt. N.B.: Die Temperaturen der Hinterfüllung müssen nach 24 Stunden kontinuierlich abnehmen, da die Abbindewärme des Zementanteils nach 24 Stunden ihr Maximum erreicht. Nach einigen Tagen sinken die Temperaturen nicht mehr weiter, da sich dann die Abbindewärme vollständig verflüchtigt hat.

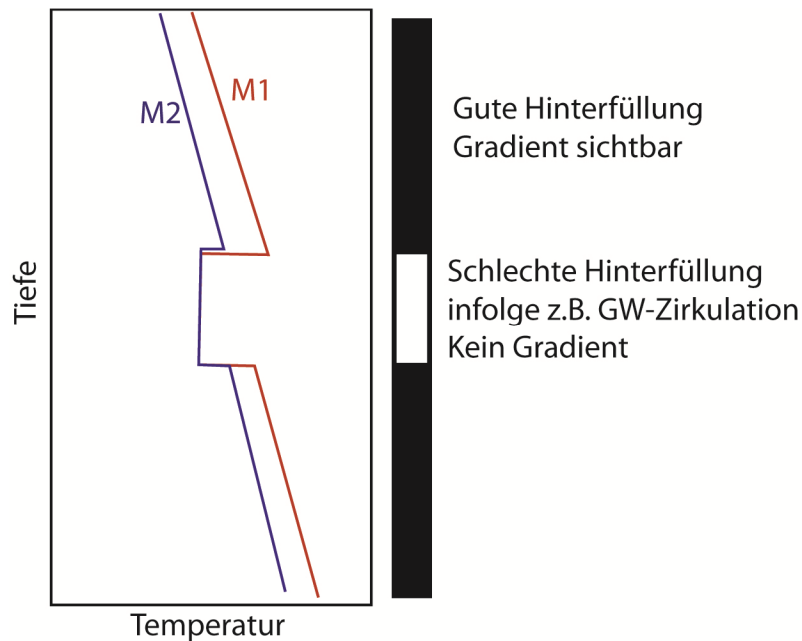


Abbildung 3: Theoretischer Temperaturverlauf einer guten und schlechten Hinterfüllung. In diesem Beispiel wurde die Messung M1 etwa 1 Tag nach der vollständigen Zementierung gemacht. Die Abbindewärme ist als erhöhte Temperatur im Vergleich zu Messung 2 (einige Wochen nach Zementierung) sichtbar. Siehe Text für Erläuterungen.

Bei einer guten Hinterfüllung wird die Temperatur zwischen M1 und M2 infolge der Verflüchtigung der Abbindewärme etwa linear abnehmen (Abb. 3, gute Hinterfüllung). Falls keine oder eine unvollständige Hinterfüllung vorliegt, nimmt die Temperatur mit der Tiefe kaum zu (Temperaturgradient $\rightarrow 0^\circ\text{C}/\text{m}$; Abb. 3, schlechte Hinterfüllung). Da nur wenig Abbindewärme entsteht, kann kaum ein Unterschied zwischen $T(\text{M1})$ und $T(\text{M2})$ in diesem Bereich festgestellt werden. Ein solcher Trend wird bei Grundwasser-Zirkulation gut sichtbar. In einem ersten Schritt ermittelt man die Temperaturunterschiede (ΔT) in unterschiedlichen Tiefen. Ist der Unterschied nahezu Null, dann ist die Hinterfüllung schlecht. Beobachtet man eine homogen abnehmende Temperatur zwischen M1 und M2, dann ist die Hinterfüllung gut verteilt (Abbildung 4).

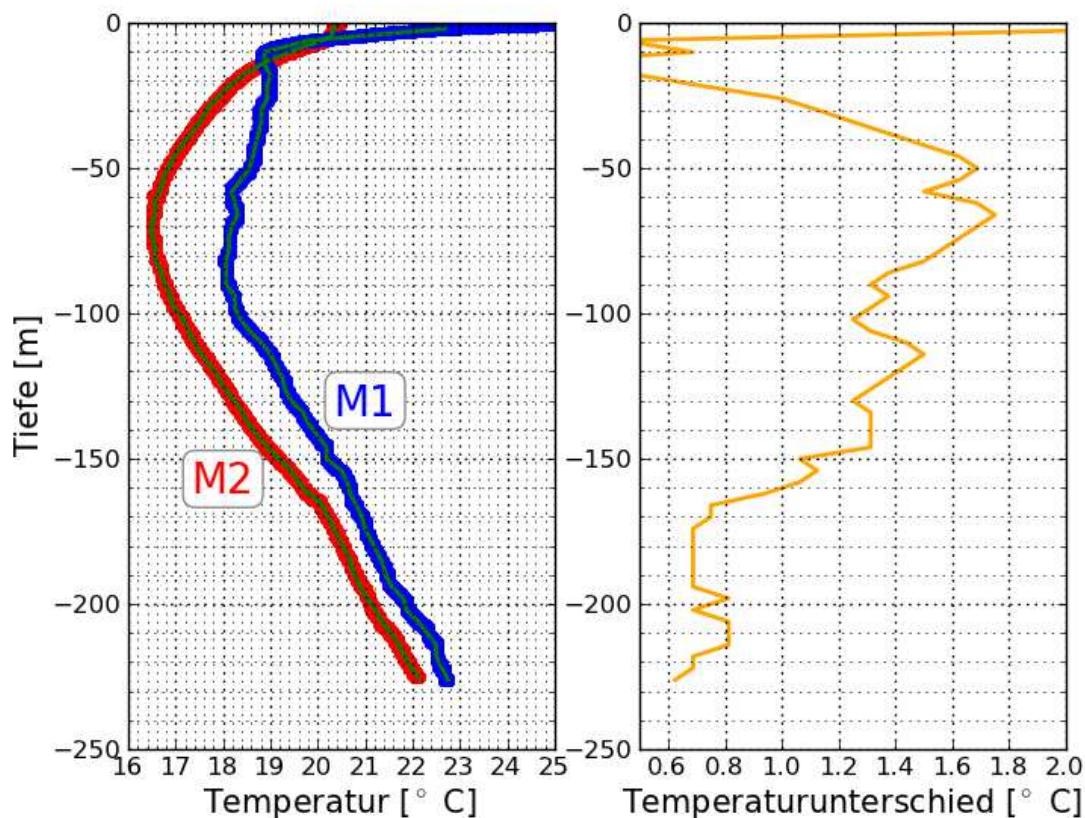


Abbildung 4: Temperaturmessungen (links) und ΔT zwischen M1 und M2 (rechts, gelbe Linie). Temperaturmessung: Die blaue Kurve stellt die Messung M1 nach 24 Stunden, die rote Kurve die Messung M2 nach 55 Tagen dar. Die grünen Linien repräsentieren interpolierte Werte und werden benutzt, um den Temperaturunterschied ΔT zu berechnen. Man beobachtet hier eine lineare Temperaturabnahme, welche als eine gute Qualität der Hinterfüllung interpretiert wird. Die lineare Zunahme der Temperatur mit der Tiefe weist auf einen positiven Gradienten hin, welcher ebenso eine gute Hinterfüllung aufzeigt.

Wurden Bereiche festgestellt, in welchen eine schlechte Hinterfüllung vorhanden ist, dann kann man das Verhältnis (R_H) Bereich der schlechten Hinterfüllung (m) / gesamter Sondenbereich (m) berechnen. Das Verhältnis gewichtet den Anteil der schlechten Hinterfüllung über den gesamten Sondenbereich.

$$R_H = \frac{\text{Bereich der schlechten Hinterfüllung [m]}}{\text{gesamter Sondenbereich [m]}}$$

Skala:

$R_H < 0.05$:	10 Punkte
$0.05 < R_H < 0.1$:	9 Punkte
$0.1 < R_H < 0.15$:	8 Punkte
$0.15 < R_H < 0.2$:	7 Punkte
$0.2 < R_H < 0.25$:	6 Punkte
$0.25 < R_H < 0.3$:	5 Punkte
$0.3 < R_H < 0.4$:	4 Punkte
$0.4 < R_H < 0.6$:	3 Punkte
$0.5 < R_H < 0.7$:	2 Punkte
$R_H > 0.7$:	1 Punkte

Zusammenfassung der Bewertungen

Eine Skala zur Gesamtbewertung der Sondenqualität wird in Abbildung 5 aufgezeigt. Ein Mittelwert aus den 3 zuvor ermittelten Bewertungen wird berechnet. Falls der Mittelwert zwischen 1 und 5 Punkten (rote Bereich in Abb. 5) liegt, wird eine neue EED Simulation vorgeschlagen. Kleine Anpassungen an der EED Simulation sollten durchgeführt werden, wenn der Mittelwert zwischen 5 und 7 Punkten liegt (oranger Bereich in Abb. 5). Falls der Mittelwert grösser als 7 Punkte ist, ist die Simulation noch gültig.

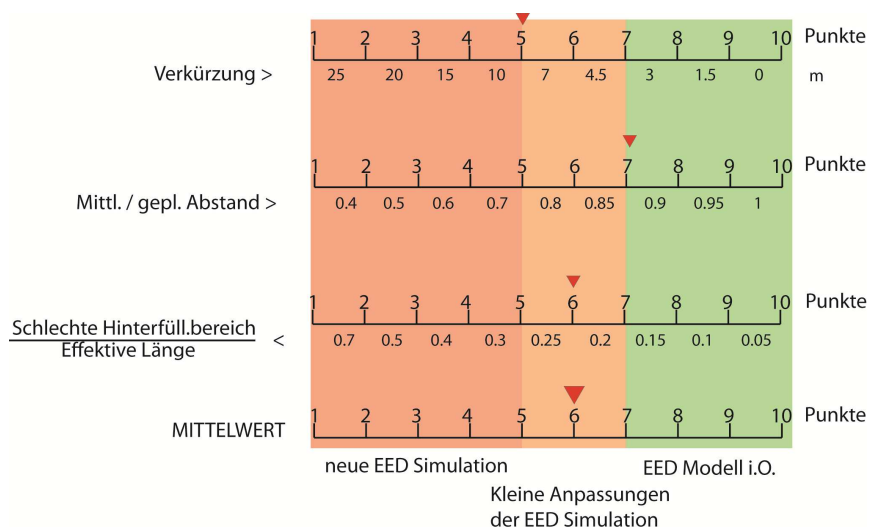


Abbildung 5: Skala für die Bewertung der Qualität von EWS. Im vorliegenden Fall konnte ein Mittelwert von 6 erzielt werden. Kleine Anpassungen der EED-Simulation sollten vorgenommen werden.