

André Voutta (Dipl.-Geol.)
Grundwasserhydraulik

Hinterfüllung von Erdwärmesonden

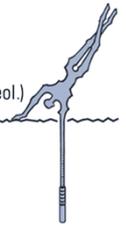
Chancen und Grenzen der Gamma-Gamma-Dichte-Messung sowie ergänzende Messmethoden

Autoren: Dr. Heike Voelker, André Voutta

Fachgespräch Erdwärmenutzung in Hessen, Idstein 2012

Der Vortrag zeigt Ihnen

- Wie die Zementationsgüte im Ringraum von Erdwärmesonden gemessen werden kann.
- Welche messtechnischen Möglichkeiten es gibt.
- Zu welchen Schlüssen man dabei gelangt.
- Praxisbeispiele veranschaulichen die Möglichkeiten der vorgestellten Messtechnik.



Anforderungen an die Zementation

● Material

- Vollständig
- Quasi wasserundurchlässig ($k_f < 10^{-9}$ m/s)
- Homogene Dichte ($> 1,3$ g/cm³)
- Frost/Tau beständige Materialeigenschaften
- Gegebenenfalls sulfatbeständig

● Grundwasserschutz

- Grundwasserstockwerke bleiben nachhaltig hydraulisch getrennt
- Unterbinden von neuen Wasserwegsamkeiten im Gebirge

● Effizienz der Erdwärmesonde

- Optimaler Wärmeübertrag aus dem Gebirge auf das Wärmeträgerfluid

Eine kurze Verständigung auf das gemeinsame Ziel, nämlich eine intakte Hinterfüllung

Fehlstellen:

Wie entstehen Fehlstellen in der Hinterfüllung und wann sind sie funktionsrelevant?

Die Zement-Bentonit-Suspension wird entsprechend den Angaben des Herstellers angemischt, damit auf eine vorgegebene Dichte eingestellt und in den Hohlraum ausgehend von der Bohrlochsohle mit dem Kontraktorverfahren eingebracht. Idealerweise wird dabei die Suspension solange von unten nach oben verpresst bis an der Oberfläche die Suspension mit der gleichen Dichte austritt wie sie eingebracht wird.

Schwierigkeiten treten auf, wenn über das offene Bohrloch zwei Grundwasserleiter mit unterschiedlichen Potentialen verbunden sind, so dass eine bohrlochinterne vertikale Grundwasserströmung entsteht: Die injizierte Zementsuspension wird mit dem strömenden Grundwasser abtransportiert. Auch bei erbohrten Klüftzonen tritt durch die Verlagerung der Zementsuspension in die Hohlräume ein Massenverlust ein. Ist mit der Bohrung eine Zone mit starker Grundwasserströmung erbohrt worden, wird die Zementsuspension durch die horizontale Grundwasserströmung verdünnt oder gar abgeführt. Oftmals gelingt es, die unkontrollierten Massenverluste lokal durch das Einbringen von „Stopfmaterial“ wie Sand und/oder Feinsplitt Einhalt zu gebieten. Anschließend wird mit einem neuen Injektionsschlauch, der direkt über der Sandplombe endet, wieder weitere Zementsuspension verpresst. Die Erfahrung hat gezeigt, dass unter diesen Verfüllumständen die Ringraumhinterfüllung nicht immer ihre abdichtende Wirkung und damit Grundwasserschutzfunktion entfaltet.

Die beschriebenen Szenarien sind mögliche Ursachen für die Entstehung von Fehlstellen in der Hinterfüllung, die funktionsrelevant werden, wenn sie zwei hydraulisch getrennte Grundwasserstockwerke miteinander kurzschließen oder sich geotechnisch auswirken. Spätestens dann ist es bedeutsam, dass diese funktionsrelevanten Fehlstellen in der Hinterfüllung auch erkannt werden können.

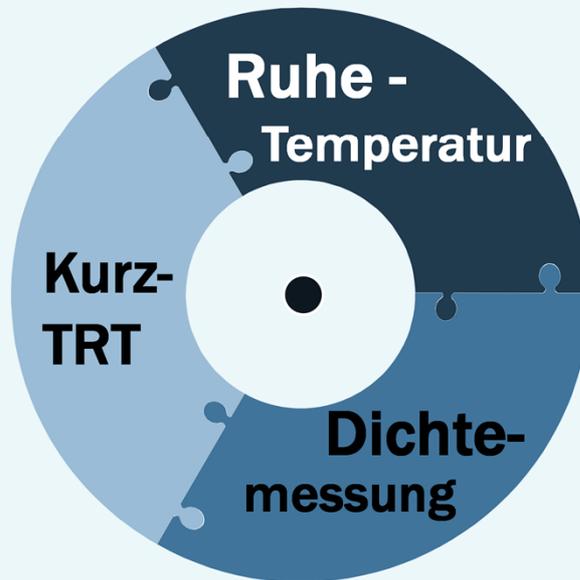
Wann ist eine Fehlstelle relevant? – Aus Sicht des Grundwasserschutzes, wenn es zu einem hydraulischen Kurzschluss zwischen zwei von Haus aus getrennten Grundwasserstockwerken kommt. Oder aber auch geotechnische Prozesse angestoßen werden, die zu Geländehebungen, oder –senkungen führen.

Wie können diese Fehlstellen erkannt werden ?? Welche Methoden stehen aktuell zur Verfügung.?



Messtechnische - Verfahren

Messergebnisse
von drei Verfahren
verdichten gegenseitig
ihre jeweilige
Aussagekraft



Auf der Suche nach den naheliegenden physikalisch messbaren Effekten haben sich letztendlich zwei Parameter herauskristallisiert:

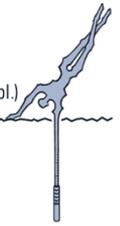
- **Dichte**
- **Temperatur**

Als weitere Parameter für alternative Messmethoden werden u. a. die Schallgeschwindigkeit (Ultraschall), der Wassergehalt (Neutron-Neutron-Sonde) überprüft.

Das Hauptproblem besteht darin, die Messverfahren so zu miniaturisieren, dass die Messgeräte in eine Erdwärmesonde passen. Das ist bisher nur bei der Temperatur und bei der Dichtemesssonde gelungen. An der Ultraschallsonde wird noch an der Neutronensonde wird noch nicht gearbeitet. Elektrische Verfahren scheiden aus, weil kein Kontakt zum Gebirge besteht.

Der Vortrag geht auf die **Dichte-Messungen** ein. Und stellt den **K-TRT** vor, der die Aussagetiefe zur Zementationsgüte merklich steigert, wenn es darum geht, Wasserwegsamkeiten innerhalb der Hinterfüllung aufzuspüren.

Soll es einmal schnell gehen, kann vorab als erste Maßnahme ein **Ruhe-Temperaturprofil** weiterhelfen. Allerdings ist seine Aussagekraft nicht immer sichergestellt.



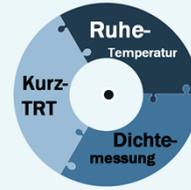
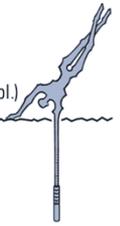
Einsatz



- ✓ Bauabnahme
- ✓ Qualitätsüberprüfung
- ✓ Sanierungserkundung
- ✓ bei Leistungsdefiziten in Alt-Sonden
- ✓ Verlängerung der wasserrechtlichen Genehmigung

Die vorgestellten Mess-Methoden sind

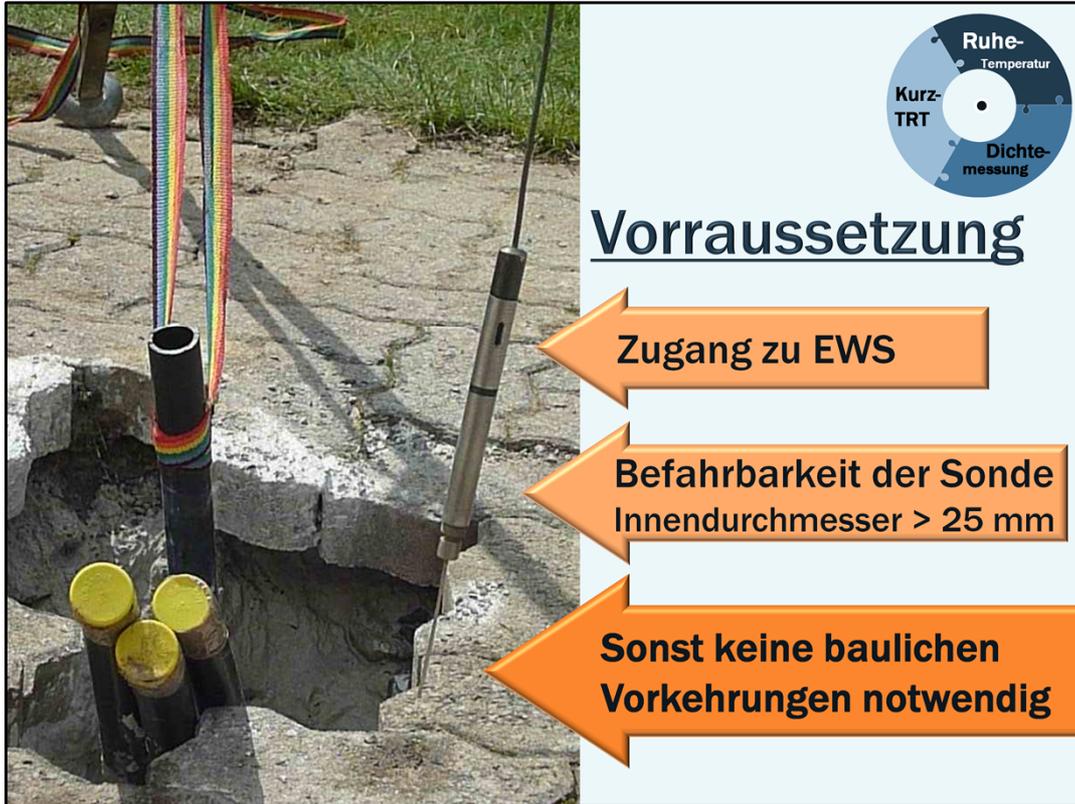
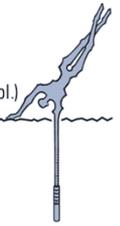
- bei der Bauabnahme denkbar,
- bei der Qualitätsüberprüfung sinnvoll,
- Überprüfung von „Alt“-Sonden, die inzwischen merkliche Leistungsdefizite aufweisen und/oder Frost-Tau-Wechsel-Prozessen unterzogen wurden
- Für Voruntersuchungen zur Sanierung von Erdwärmesonden und Kontrolle des Sanierungserfolges unverzichtbar.



Ablauf

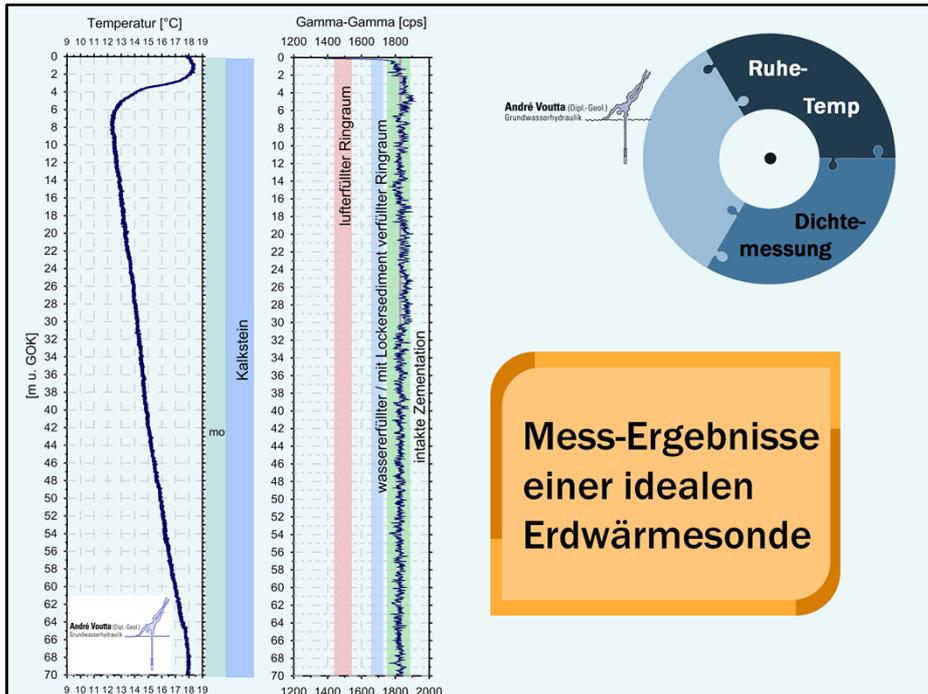
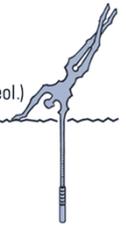


- Zugang zur EWS heißt, dass die Sonde **nicht unter dem Gebäude** liegt. Die Erreichbarkeit mit einem Fahrzeug ist hilfreich, aber nicht zwingend.
- Im ersten Schritt wird der Sondenkopf freigelegt.
- Wenn der Standort in kritischer Geologie liegt, ist gegebenenfalls ein dauerhafter Zugang zu empfehlen, den man als T-Stück in der Verrohrung ausführen kann und der über eine tagwasserdichte Kappe zu erreichen ist



Ein Problem kann der **Verlauf der EWS im Bohrloch** sein. Wenn die **Spiralität** der Sonde zu stark ausgeprägt ist, dann kann die **Reibung des Messkabels** an der Sondeninnenwand so groß werden, dass es nur noch mit großen Schwierigkeiten gelingt, den Sensor aus der EWS herauszuziehen. In der Praxis werden deshalb ab einer bestimmten Tiefe **Zugversuche** gemacht, bei der man diese innere Reibung abschätzen kann. Es gab Fälle, in denen die Messungen in einer bestimmten Sondentiefe abgebrochen wurden, weil die Zugkraft zu groß wurde.

In den letzten Wochen gelang es, die Temperatursonde weiter zu verkleinern, so dass es jetzt auch möglich ist, in bislang nicht befahrbaren EWS-Sonden zumindest Temperaturprofile für das Ruhe-Temperatur-Log und den später näher erläuterten K-TRT zu erhalten. Die weiter verkleinerte Temperaturmesssonde hat sich bereits in der Praxis in bis dato nicht befahrbaren Erdwärmesonden bewährt.



Ruhetemperaturprofil

Bis ca. 8 m u. GOK zeigen sich die jahreszeitlichen Einflüsse

Es folgt ein sehr kleiner Übergangsbereich

Unterhalb 10 m u. GOK folgt die Temperaturkurve dem ungestörten geothermischen Gradient.

Dichtemessung in einer gelungenen Erdwärmesonde mit intakter Zementation

Dichtesonde wurde vorab geeicht, um die Messsignalbereiche für

- Intakte Zementation – **grüner** Balken
- Wassererfüllter oder mit Lockersediment verfüllter Ringraum – **blauer** Balken
- Luftegefüllter Ringraum – **roter** Balken

zu lokalisieren.

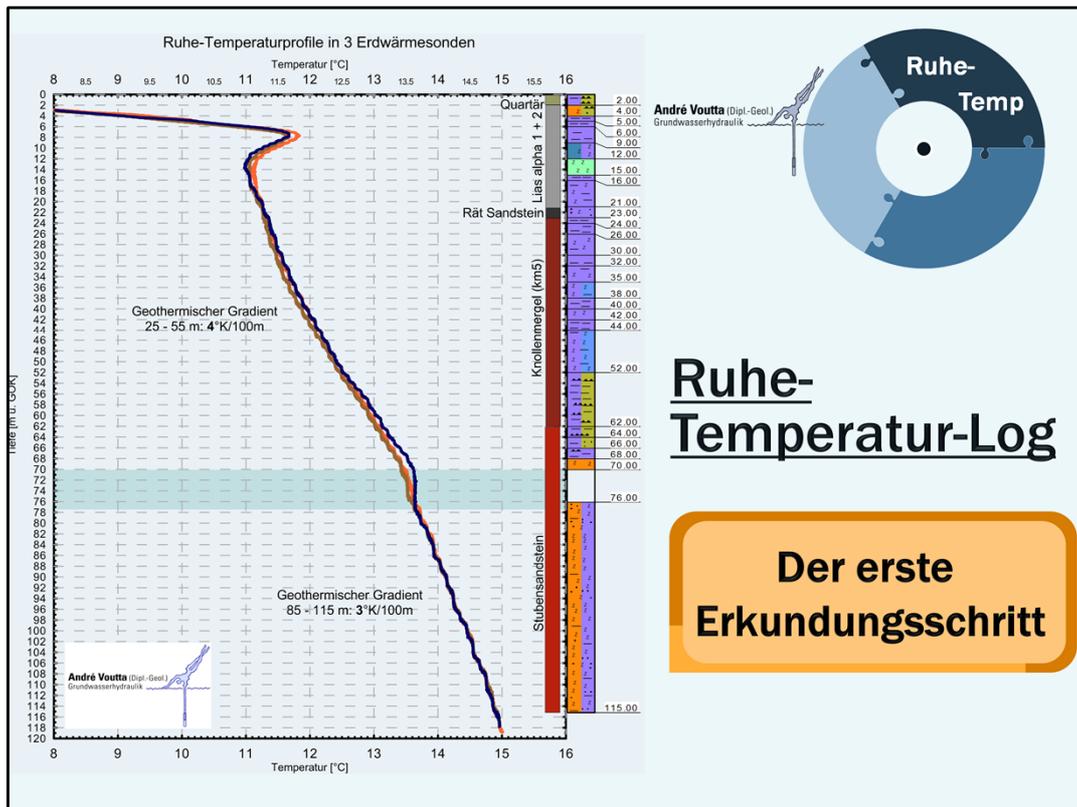
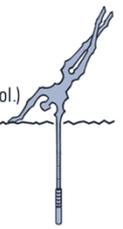
Ruhe-Temperatur-Profil:

- Bis ca. 8 m u. GOK zeigen sich die jahreszeitlichen Einflüsse
- Kleiner Übergangsbereich von ca. 2m
- Unterhalb 10 m u. GOK folgt die Temperaturkurve dem ungestörten geothermischen Gradient.

Gamma-Gamm-Dichte-Messung

Die Signale der Gamma-Gamma-Dichtesonde zeigt eine intakte Zementation im Ringraum an.

Für die Auswertung der Messergebnisse ist die Gamma-Gamma-Messsonde an einem Eichstand geeicht worden. Auf der nebenstehenden Abbildung sind die Messbereiche für den luftegefüllten Ringraum rot, den wassererfüllten oder mit verstärkter Erde bzw. Lockersediment verfüllter Ringraum blau hinterlegt. Zwischen dem blauen und grünen Balken ist die Signalantwort aus variierenden Anteilen luft-/wassererfüllten Porenraum und Lockergesteinsmatrix lokalisiert. Der grüne Bereich zeigt die zu erwartenden Messsignale bei einer intakten Hinterfüllung an. So zeigt die Abbildung die Messergebnisse aus einer Erdwärmesonde mit wassergefüllten Doppel-U-Rohren und einer intakten Zementation.



Für den ersten Erkundungsschritt empfehlen sich **Ruhe-Temperatur-Logs**:
 Ihr Vorteil ist, dass sie

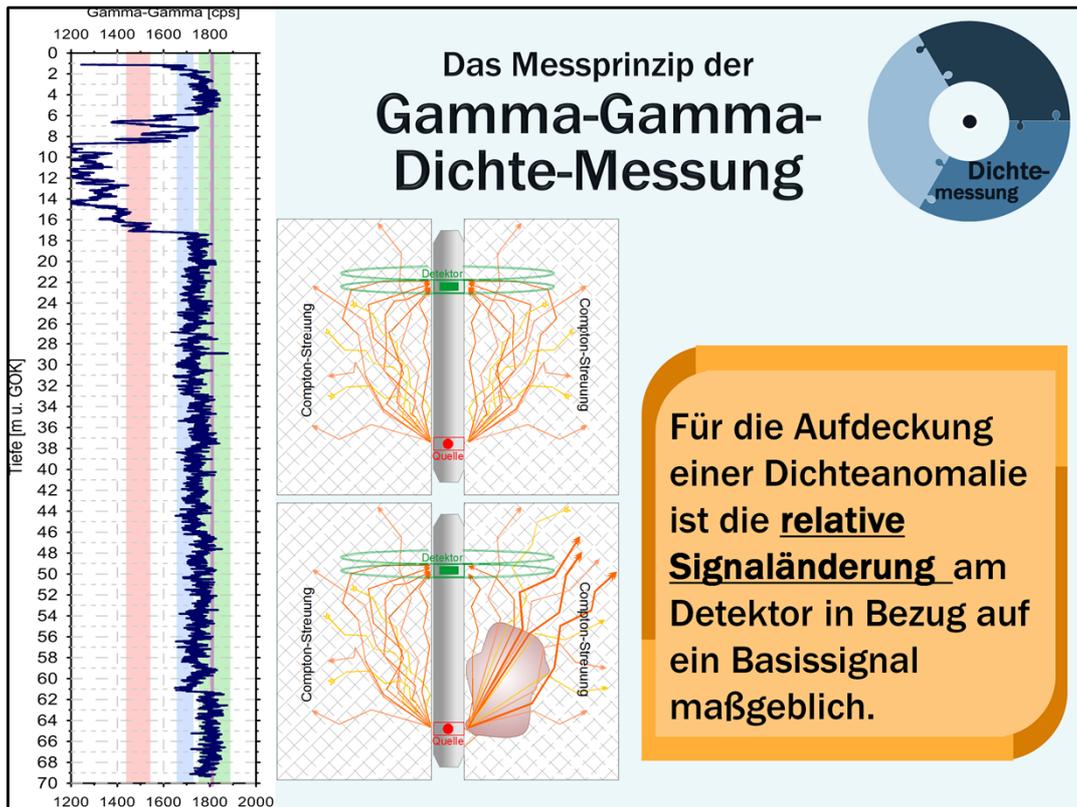
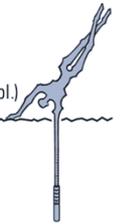
- Rasch realisiert werden können und
- Unkompliziert für die Auswertung sind.

Bei einer intakten Hinterfüllung wird erwartet, dass entsprechend dem geothermischen Gradienten am Standort die Temperatur kontinuierlich über die Tiefe zunimmt.

Sprünge im Ruhe-Temperaturprofil sind erste Hinweise auf Grundwassereinfluss und möglicherweise auf Unstimmigkeiten in der Zementation der Hinterfüllung. Ob diese dann auch tatsächlich funktionsrelevant sind, ist damit aber nicht gesagt. Dazu sind weitere Erkundungsschritte erforderlich.

Später wird an einem Beispiel gezeigt, dass der fehlende geothermische Gradient in einem Ruhetemperaturprofil nicht zwingend bedeutet, dass keine intakte Zementation im Ringraum besteht.

Beachte: An Hand eines Ruhe-Temperatur-Logs alleine kann nicht zwingend auf eine funktionsrelevante Beeinträchtigung im Ringraum der Erdwärmesonde geschlossen werden.



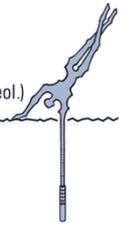
Für die Aufdeckung einer Dichteanomalie ist die relative Signaländerung am Detektor in Bezug auf ein Basissignal maßgeblich.

Das Messprinzip der Gamma-Gamma-Dichtemessung:

Eine Gamma-Strahlenquelle (Cs137) im Messtool sendet radialsymmetrisch Gamma-Photonen in die umgebende Formation. Treffen die energiereichen Photonen der Gammastrahlung auf ein Atom, kommt es zu einer Wechselwirkung mit dessen Elektronen wobei die Gamma-Photonen abgelenkt werden. Die Anteile der gestreuten Gamma-Strahlung werden mit einem oberhalb der Strahlenquelle angeordneten Detektor – einem Geiger-Zähler – gemessen. Die am Detektor registrierte Zählrate [cps counts per second] ist ein über einen Winkel von 360° integrierter Wert.

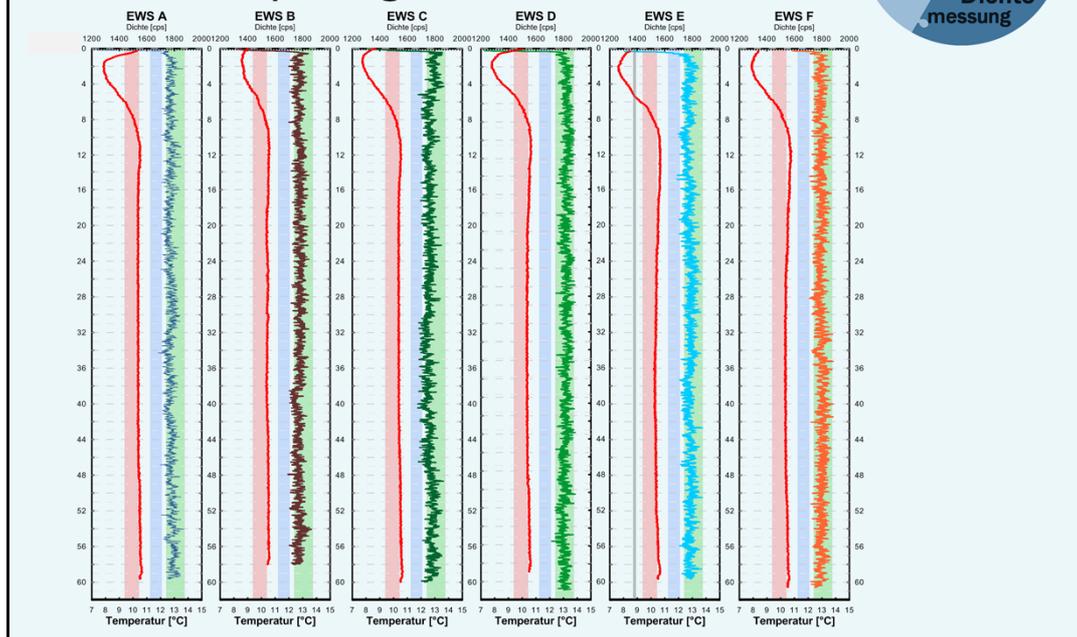
Wird eine Formation mit geringer Dichte bestrahlt kommt, es wegen der vergleichsweise geringen Anzahl freier Elektronen in der Matrix nur zu einem schwachen Streueffekt und der überwiegende Anteil der Gamma-Strahlung durchdringt die Formation. Am Detektor selbst werden folglich nun geringere Gamma-Strahlimpulse gezählt.

Für die Aufdeckung einer Dichteanomalie ist die relative Signaländerung am Detektor in Bezug auf ein Basissignal maßgeblich.



Gamma-Gamma-Messung

- EWS- Überprüfung in einem Sondenfeld



Interpretation der Gamma-Gamma-Dichte-Messung

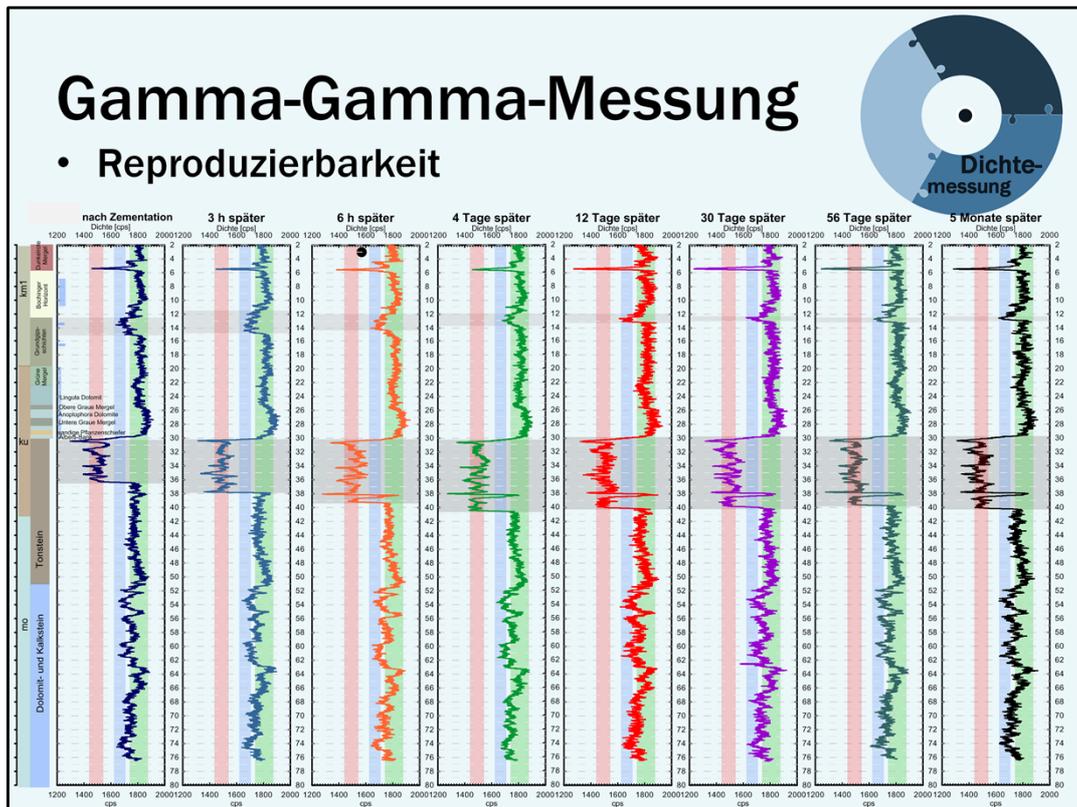
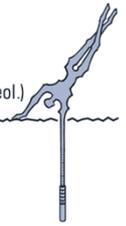
Die Signale der Gamma-Gamma-Messungen in cps (**c**ounts **p**er **s**econd) sind das Ergebnis, das sich aus wechselnden Anteilen Zementmatrix, luftgefüllter Porenraum und/oder wassererfüllter Porenraum in der Zementmatrix bzw. bei fehlender Zementation mit variierenden Anteilen luft- und/oder wasser- erfülltem und/oder Lockergestein verfülltem Ringraum ergeben.

Gezeigtes Beispiel:

Trotz fehlendem geothermischen Temperaturgradient zeigen die Dichtemessungen in 6 Erdwärmesonden eines Erdwärmesondenfeldes in allen 6 EWS eine intakte Zementation als Hinterfüllung. Besonders gut gelungen ist die Zementation in der EWS F und EWS D.

Beachte:

An diesem Standort zeigen die Ruhe-Temperatur-Profile (rote Linie) quasi keinen geothermischen Gradienten – trotzdem ist nach den Dichtemessungen die Zementation der Hinterfüllung in gutem Zustand und zeigen keine markanten Fehlstellen.



Ausgangslage: Grundwasser floss über mehrere Tage im offenen Bohrloch vom oberen in das untere Grundwasserstockwerk – Ergebnis waren erhebliche Setzungen an der Geländeoberfläche mit massiven Gebäudeschäden
 Messreihe zeigt die Ergebnisse der Dichtemessungen nach der Zementation zu mehreren Zeitpunkten:

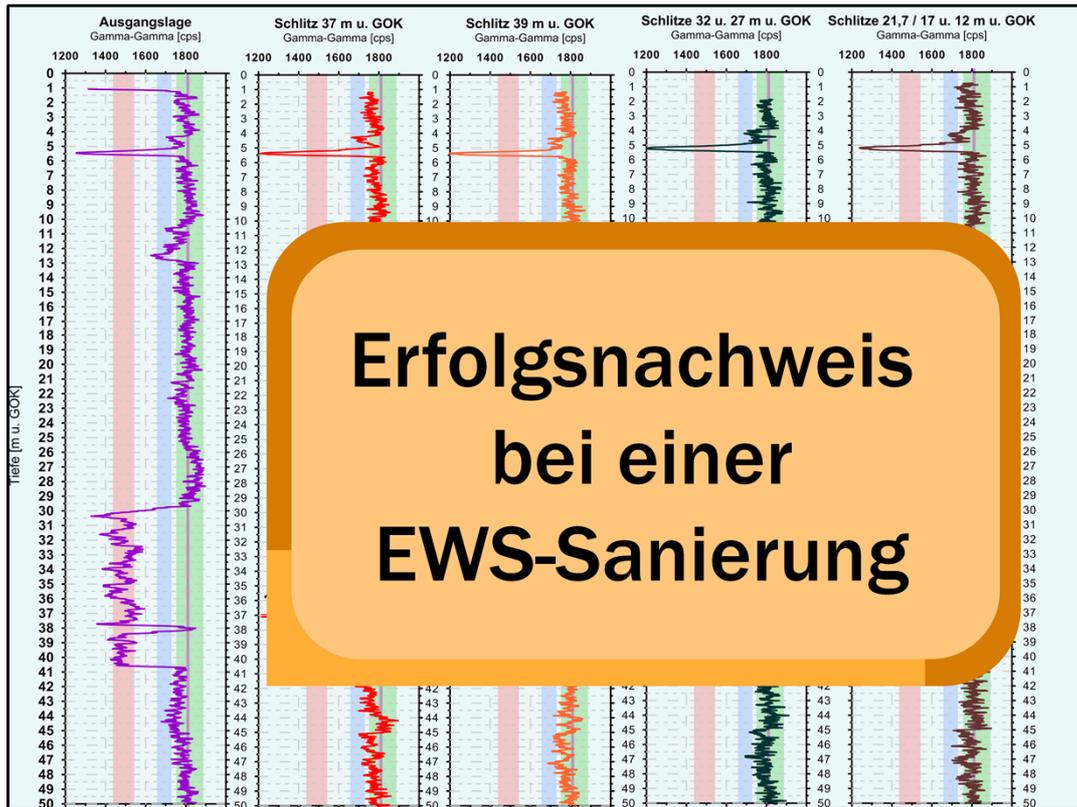
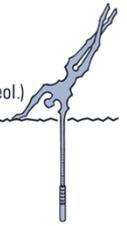
30 – 40 m u. GOK: Erweiterung des Hohlräume in den ersten 4 Tagen, Danach bei 5 weiteren Wiederholungsmessungen im Abstand von 12, 30 und 56 Tagen sowie 5 und 12 Monaten keine weiteren Veränderungen

12 – 15 m u. GOK: Verkleinerung des Hohlräume durch Sedimentationsvorgänge innerhalb von 12 Tagen (Anstieg der Hohlraumsohle) - danach Stabilisierung

Der Zementations-Blombe zwischen 26- 28 m u. GOK unterbindet den nach unten gerichteten Grundwasserabfluss

Die gute Reproduzierbarkeit der Dichtemessung zeigt sich exemplarisch:

- Die bei „6 Stunden“ verbliebene markante lokale Hinterfüllungsplombe bei 38 m u. GOK zeigt sich stets bei allen späteren Messungen.
- Aber auch die Signal-Landschaft in den anderen Tiefenabschnitten ist zu den verschiedenen Messzeitpunkten stets vergleichbar.



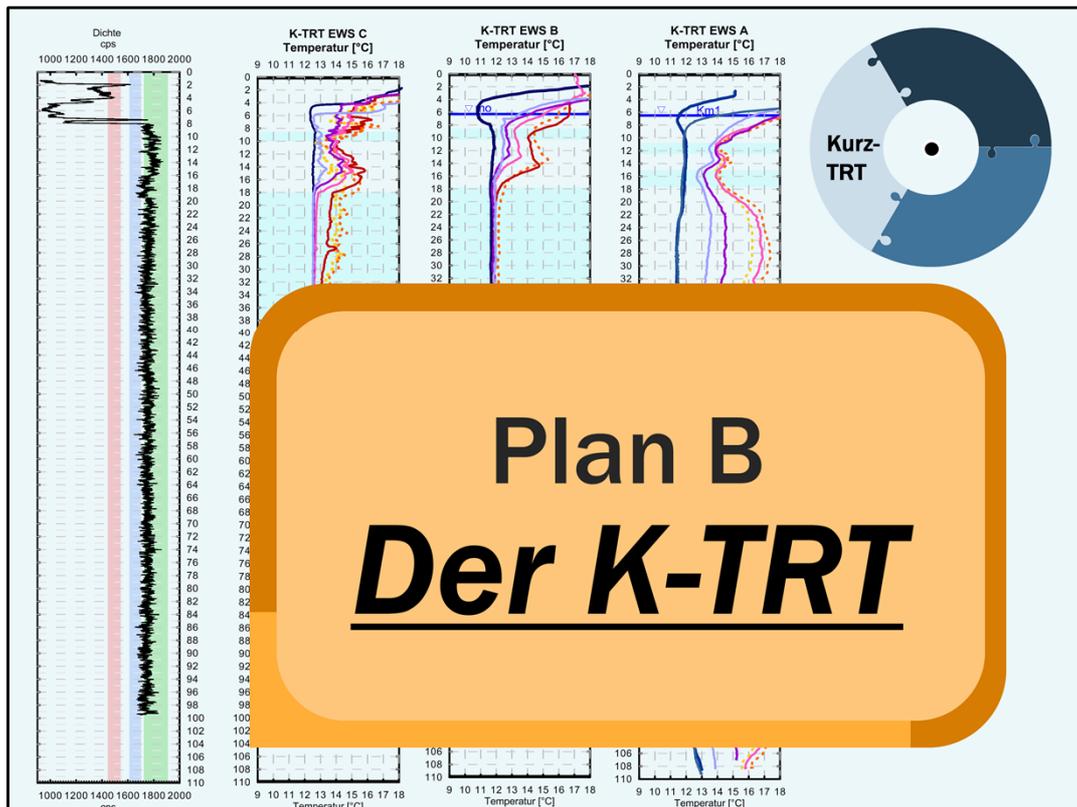
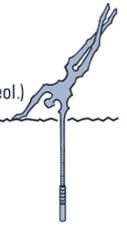
Erdwärmesondensanierung

Ausgangslage ist identisch mit den Messungen 12 Monate zuvor (siehe Folie 11):

Die Sanierung der Erdwärmesonde erfolgt in mehreren Schritten, in dem gezielt in ausgewählten Tiefen die Sonde von Innen mit einem Messer aufgeschlitzt und über diesen Zugang Zementsuspension in den Ringraum verpresst wurde:

1. Schritt: Schlitz sitzt bei 37 m u. GOK – Ringraum zwischen 30 und 38 m u. GOK wird verfüllt (190 l Zementsuspension)
2. Schritt: Schlitz sitzt bei 39 m u. GOK – Ringraum zwischen 38 und 40 m u. GOK wird verfüllt (100 l Zementsuspension)
3. Schritt: Schlitz sitzt bei 12 m u. GOK – Ringraum zwischen 12 und 13 m wird verpresst (140 l Zementsuspension)
4. In Tiefen, in denen nach der Dichtemessung Hinterfüllung im Ringraum vorliegt (32, 27, 21,7 und 17 m u. GOK), kann über dort gesetzte Schlitze keine Zementsuspension verpresst werden.

Messabstand zwischen „Ausgangslage“ und letzter Messung: 8 Tage

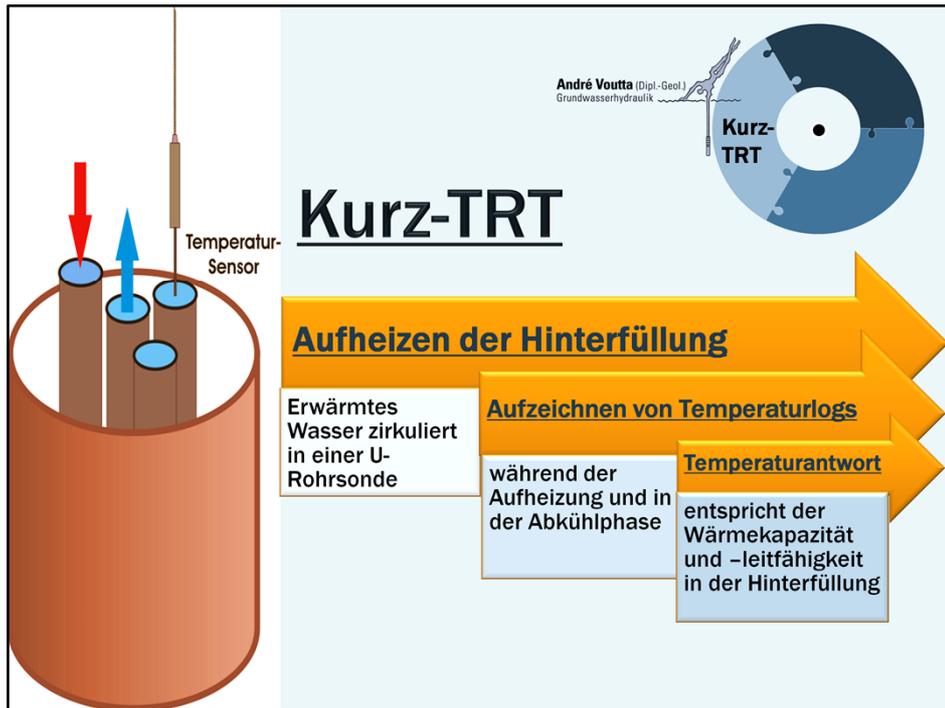


Interpretationsgrenzen bei der Dichtemessung:

- Bis 8 m u. GOK sind Hohlräume zu erkennen, darunter folgen bis zur Endtiefe Signale, die eine mäßige Dichte anzeigen. Sie sind das Resultat aus wechselnden Anteilen Zementmatrix bzw. verstütztes, entfestigtes Gestein, luffertfüllten und/oder wassererfüllten Porenraum im Ringraum. Ob eine wirksame Wasserwegsamkeit innerhalb der Hinterfüllung besteht, über die dann tatsächlich Grundwasser fließt, ist an Hand der Dichtemessung nicht erkennbar.

In dieser Situation gibt es den **Plan B: der K-TRT!**

- Dieser zeigt die Abschnitte an, innerhalb denen sich Grundwasser bewegt. Im konkreten Fall tritt bei 52 m u. GOK Grundwasser in den Ringraum und steigt auf bis 18m u. GOK. Hier verlässt das Grundwasser den Ringraum wieder und tritt in die angrenzende Gesteinsmatrix über.
- Bei einer weiteren EWS am Standort bestätigt sich dieses Phänomen. In der dritten EWS sind keine vergleichbaren Auffälligkeiten zu beobachten.



Verfahren des K-TRTs

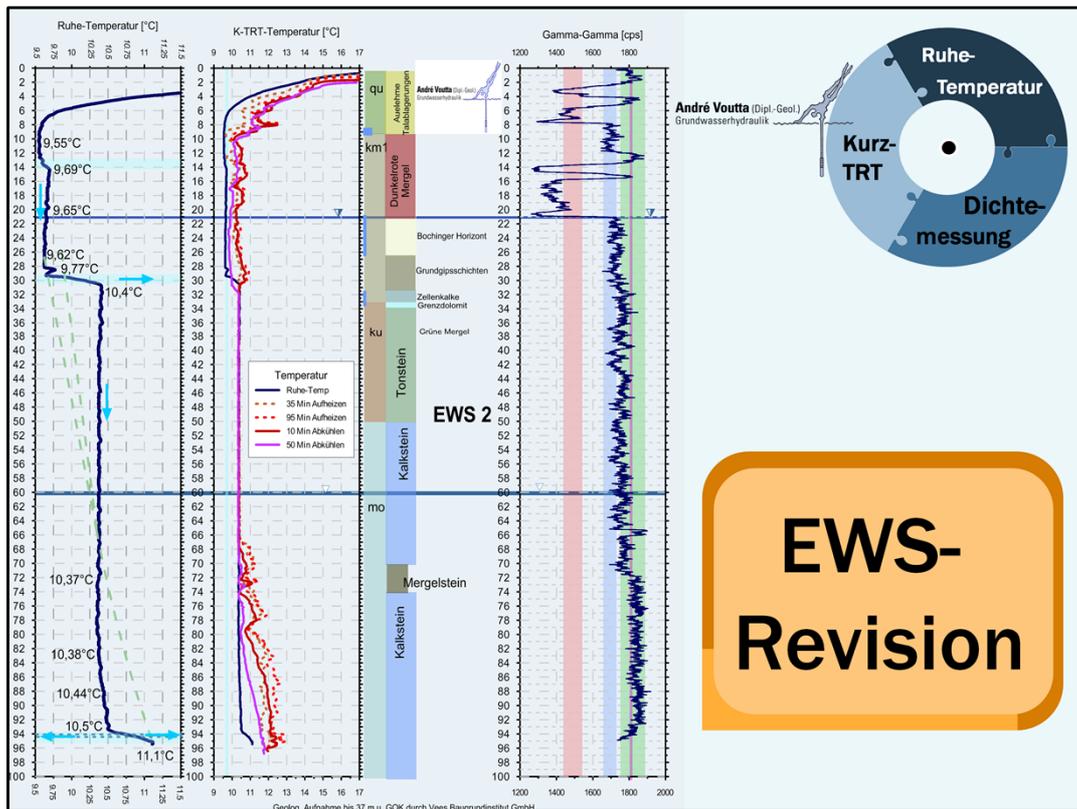
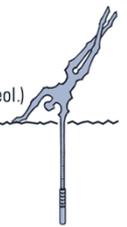
Durch kurzes aber intensives Aufheizen der Hinterfüllung wird die Temperaturreaktion in der Erdwärmesonde überprüft. Dazu wird in einem der zwei U-Rohre erwärmtes Wasser zirkuliert. Multitemporale Temperaturprofilmessungen im zweiten U-Rohr der Erdwärmesonde in der Aufheiz- und Abkühlphase beobachten das thermische Verhalten der Hinterfüllung.

Die Temperaturmessungen über die Tiefe decken Anomalien in der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung auf. Speziell erhöhte Wassergehalte zeigen ein abweichendes Reaktionsmuster:

Wegen der im Vergleich zur Hinterfüllungsmatrix ca. 4-fach höheren Wärmekapazität von Wasser wird während der Aufheizphase vermehrt Wärmeenergie in der wasserhaltigen Matrix eingelagert, ohne dass sich die Temperatur in gleichem Maße wie in der intakten Hinterfüllung erhöht. Deutlich wird dieser Umstand an einer markanten negativen Temperaturanomalie zum Ende der Aufheizphase. In der folgenden Abkühlphase wird aus der vermehrt mit Wärmeenergie angereicherten wasserhaltigen Matrix in Folge der gegenüber der Hinterfüllung ca. 4-fach geringeren Wärmeleitfähigkeit von Wasser verzögert Wärmeenergie abgegeben. Während sich im Abschnitt mit Hinterfüllung die Temperaturen wieder vergleichsweise rasch abkühlen – geringeres Wärmeenergieservoir wegen der geringeren Wärmekapazität und hohe Wärmeleitfähigkeit - wird in Abschnitten mit erhöhtem Wassergehalt ausgehend von einem geringeren Temperaturniveau nur eine merklich verlangsamte Abkühlung zu beobachten sein.

Die Wärmekapazität gibt an, wie viel thermische Energie eine Materie pro Temperaturänderung speichern kann – Einheit Joule/Kelvin [J/K].

Die Wärmeleitfähigkeit gibt an, wie viel thermische Energie mittels Wärmeleitung eine Materie in Form von Wärme zu transportieren vermag – Einheit W/(m • K)



EWS-Revision – Synthese von drei eigenständigen physikalischen Messverfahren

- Das Ruhe-Temperaturprofil
- Der-K-TRT
- Die Gamma-Gamma-Dichtemessung

Ergebnis der EWS-Revision:

Weitgehend unvollständige Hinterfüllung zwischen 0 – 22 m u. GOK (GW-Spiegel nach Bohrende), durchsetzt von kleinen „Hinterfüllungsplomben“ (4 – 5 m u. GOK, 12 – 13 m u. GOK, 15 m u. GOK)

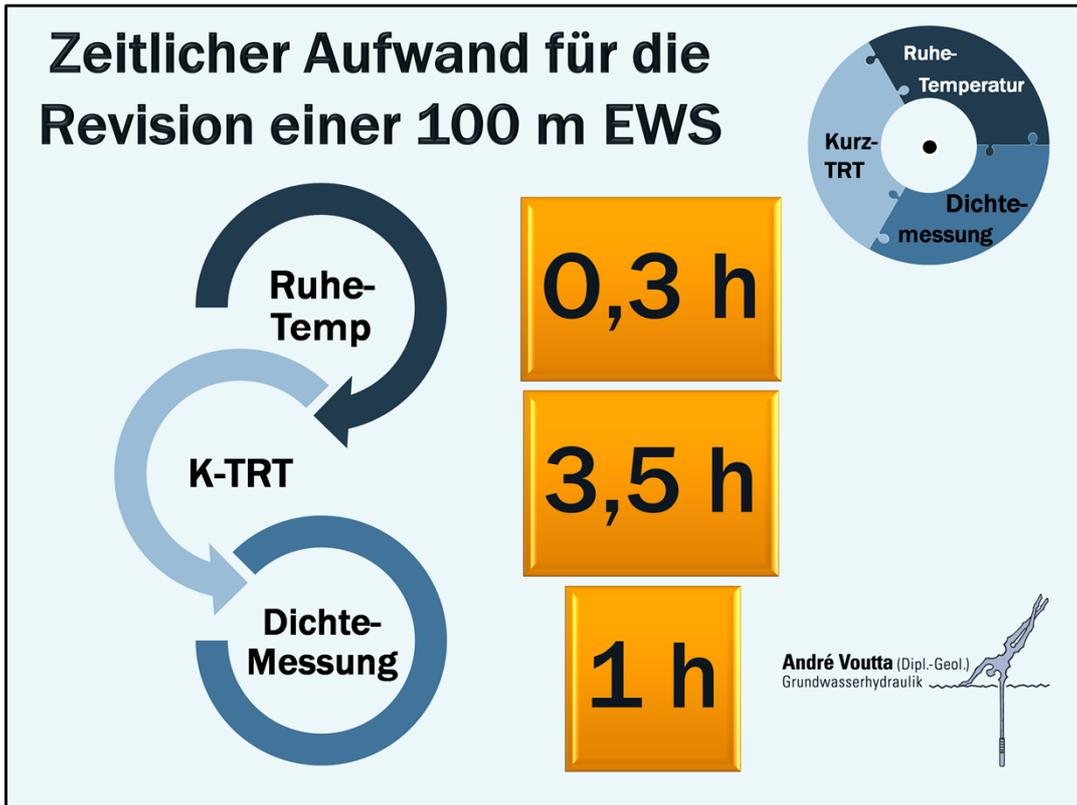
22 - 30 m u. GOK wasserwegsame Hinterfüllung mit geringem Grundwasseraufkommen

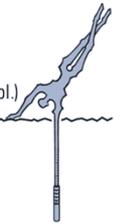
30 – 65 m u. GOK wasserwegsame Hinterfüllung mit hohem Grundwasseraufkommen

65 – 66 m u. GOK Pfropfenartig, intakt ausgebildete Hinterfüllung blockiert vertikalen Grundwasserabfluss

66 - 72 m u. GOK wasserwegsame Hinterfüllung und verminderter Grundwasserabfluss

Unterhalb 72 m u. GOK ist die Hinterfüllung intakt, erkennbar ist ein kleinräumiger Kluftgrundwassereinfluss bei 74 und 79 m u. GOK
Wegen der ungenügend ausgebildeten Hinterfüllung und dem damit ermöglichten vertikalen Grundwasserfluss ist die EWS als mangelhaft einzustufen.

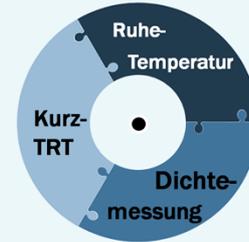




André Voutta (Dipl.-Geol.)
Grundwasserhydraulik



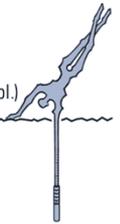
Zusammenfassung

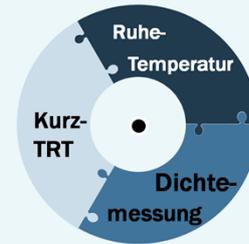
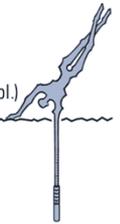


Es gibt drei Messverfahren, die - kombiniert miteinander - weitreichende Aussagen zur Qualität der Hinterfüllung von Erdwärmesonden erlauben.

Die Messungen von Temperatur und Umgebungsdichte in Erdwärmesonden sind technisch gelöst und haben den Status der Entwicklung verlassen.

Die grundsätzliche Möglichkeit der Qualitätsprüfung führt hoffentlich zu einem Qualitätssprung beim Bau und Betrieb von Erdwärmesonden.





**VIELEN DANK FÜR IHRE
AUFMERKSAMKEIT**

Weiterführende Informationen auf:

www.avoutta.de

André Voutta (Dipl.-Geol.)
Grundwasserhydraulik

Sudetenstraße 5
D-71083 Herrenberg
Telefon 070 32/95 71 44
Fax 070 32/95 71 45
Mobil 0171/566 26 30
avoutta@avoutta.de
www.avoutta.de