



Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU

Anlage 5

zu

**Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen
im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen (Hebungsgebiet "Süd")**

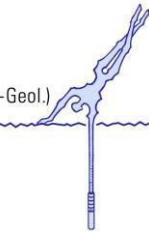
- Sachstandsbericht -

Az.: 95-4764//18-6346

vom 04. Dezember 2018

Grundwasserhydraulische Versuche in Bohrung B2a (mo)

Bericht des Büro Voutta vom 17.11.2016



**Bericht zu den
grundwasserhydraulischen Versuchen in
der Erkundungsbohrung B 2a,
Kniebisstraße
73635 Böblingen**

(bearbeitet durch Vees|Partner in *kursiver* Schrift)

Auftraggeber: Landratsamt Böblingen

Verfasser: André Voutta

Datum: 17.11.2016

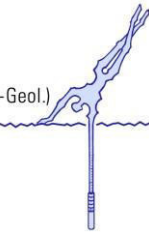
I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

1	Veranlassung	3
2	Standort	4
2.1	Geologie	6
2.2	Hydrogeologie	7
3	Grundwassermonitoring	8
4	Erkundungsbohrung B2a.....	8
4.1	Pumpversuch bei einer Bohrtiefe von 38 m, offene Bohrung	10
4.2	Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 51.4 m, Intervall 45 – 51.4 m	13
4.3	Erneuter Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 51.4 m, Intervall 39 - 51.4m	14
4.4	Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 57.4 m, Intervall 51.0 - 57.4 m	15
4.5	Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 63.4 m, Intervall 57 – 63.4 m	16
4.6	Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 84.8 m, Intervall 63.5 - 84.8m.....	17
4.7	Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 106 m, Intervall 84 - 106m	18
4.8	Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 132 m, Intervall 106 - 132m	19
4.9	Packerpumpversuch B2a, Bohrtiefe 145 m, Intervall 133 – 145 m	20
4.10	Packerpumpversuch B2a, Bohrtiefe 163 m, Intervall 144 – 163 m	22
4.11	Abschlusspumpversuch B2a	24
5	Bohrlochgeophysikalische Messungen	29
5.1	Messung der natürlichen Radioaktivität	29
5.2	Messung der elektrischen Leitfähigkeit	30
6	Grundwassermonitoring	32

Verwendete Unterlagen

Präsentation des Landratsamtes Untere Wasserbehörde am 25.10.2013 Jochen Weinbrecht

Geologische Karte 1:25.000 mit Erläuterungen zu Blatt 7320 Böblingen: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg Landesvermessungsamt Baden-Württemberg Stuttgart 1986



1 Veranlassung

Im Nordosten der Stadt Böblingen im Wohngebiet zwischen Schwabstraße und Herdweg sind an insgesamt 7 Standorten bis zu 130 m tiefe Erdwärmesonden zur Beheizung der Wohngebäude niedergebracht worden.

Seit 2011 und vermehrt in den Jahren 2012/13 wurden von Anwohnern in den angrenzenden Straßenzügen Gebäudeschäden in Form von Rissen und/oder Setzungen dem Landratsamt Böblingen gemeldet.

Die Auswertung der Laserscanbefliegungen zwischen 2002 bis 2014 zur Vermessungen des Geländeniveaus erbrachte, dass großflächige Geländehebungen von bis zu 20 cm eingetreten sind:

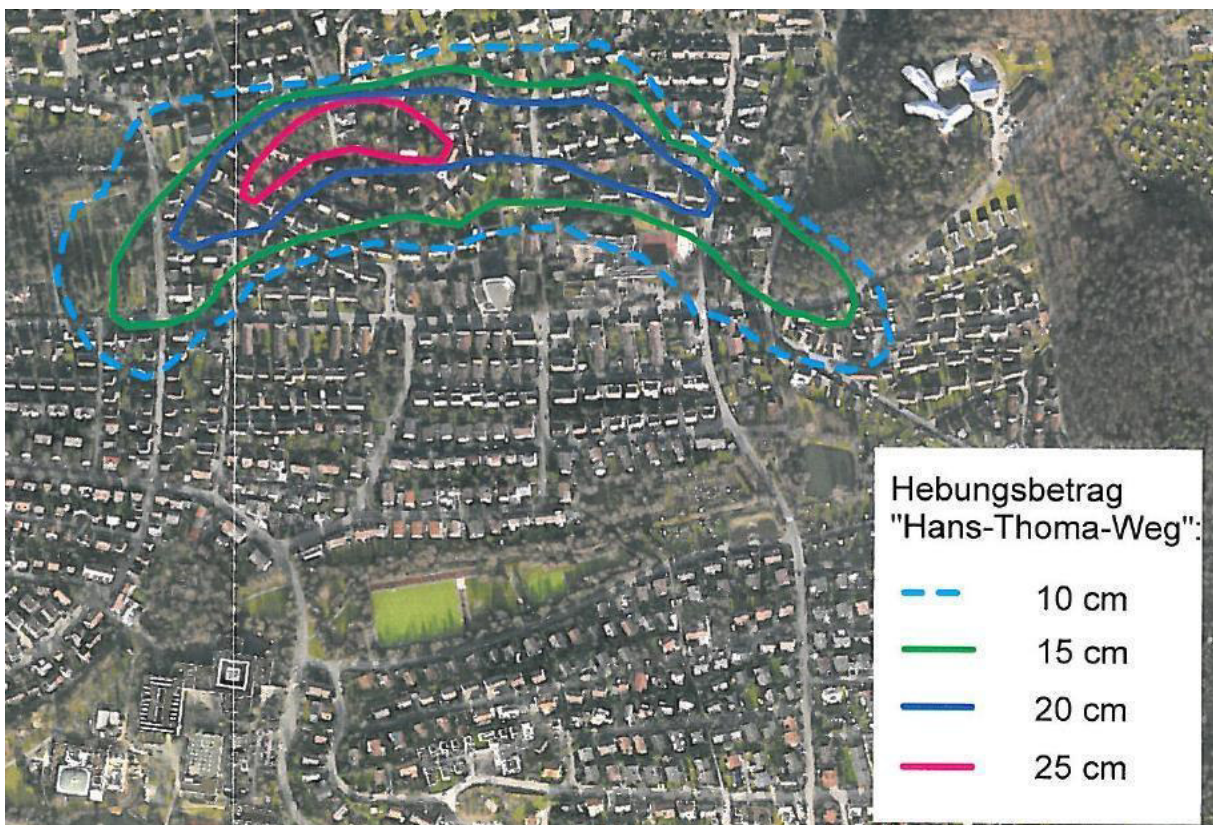
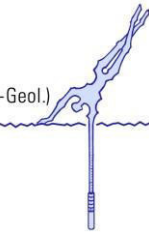


Abbildung 1: Räumliche Ausdehnung der Geländehebungen im südlichen Hebungsgebiet (Quelle LRA Böblingen)

Im Dezember 2013 wurde André Voutta Grundwasserhydraulik vom Landratsamt Böblingen beauftragt, Ruhe-Temperaturprofile und Kurz-Thermal-Response-Tests (K-TRT) sowie Dichte-Anomalie-Messungen in den Erdwärmesonden im Heinrich-Heine-Weg, im Herdweg und im Schliffkopfweg durchzuführen. Die Befunde dieses Untersuchungsprogramm sollen zur



Klärung beitragen, ob die Erdwärmesonden in einem ursächlichen Zusammenhang mit den festgestellten Geländehebungen stehen.

Die daraus gewonnenen Messergebnisse dienen der Feststellung des aktuellen Status und des Gefährdungspotentials und waren Ausgangspunkt für die daran anschließende Sanierung der Erdwärmesonden durch die Fa. Keller Grundbau.

Neben der Untersuchung der Erdwärmesonden war auch eine begleitende Erkundung der lokalen Geologie vorgesehen. In einem ersten Untersuchungsprogramm, das in enger Zusammenarbeit mit den Fachleuten des Landesamtes für Geologie und Bergbau in BadenWürttemberg sowie des Böblinger Wasserwirtschaftsamtes erstellt wurde, waren im südlichen Hebungsgebiet fünf Grundwassermessstellen sowie eine Erkundungsbohrung vorgesehen.

Die Beschreibung der in dieser Erkundungsbohrung durchgeführten geophysikalischen und grundwasserhydraulischen Messungen sowie die Darstellung und Bewertung der Versuchsergebnisse sind Gegenstand dieser Dokumentation.

2 Standort

Das Wohngebiet Kniebisstraße/Heinrich-Heine-Weg liegt im östlichen Teil von Böblingen (vgl. Abbildung 2).

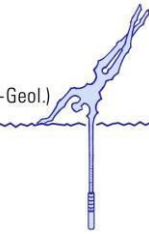


Abbildung 2: Ausschnitt aus der topographischen Karte M 1:25.000 des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg mit Markierung des Bohrpunktes in der Kniebisstraße in Böblingen

- Ort: Böblingen, Kniebisstraße
- Rechtswert 3502064,234
- Hochwert: 5394130,408
- mittlere Geländehöhe ca. 474.62 m NN

Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt das Areal rund um Heinrich-Heine-Weg und Kniebisstraße mit der Lage der errichteten Erdwärmesonden und Grundwassermessstellen auf der Basis von Google Maps.

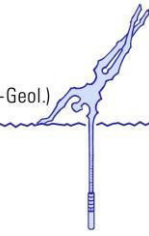


Abbildung 3: Blick auf den Bohrpunkt in der Kniebisstraße mit Lage der im Heinrich-Heine-Weg errichteten Erdwärmesonden und Grundwassermessstellen (Basis: Google Maps)

2.1 Geologie

Auf der geologischen Karte des Blattes 7320 Böblingen treten am Standort Kniebisstraße die Unteren Bunten Mergel (km3u) zutage. Nach den Erläuterungen zum geologischen Blatt Böblingen bestehen die zwischen 14 bis 16 m mächtigen Unteren Bunten Mergeln aus undeutlich geschichteten, ziegelrot bis rotbraun oder braunviolettrot gefärbten und z.T. dolomitischen Tonsteinen mit einzelnen tonigen Dolomitsteinbänkchen.

Darunter folgen die zwischen 95 und 100 m mächtigen Lagen des Gipskeupers (km1). Diese bestehen aus wechselnden Schichten von zum Teil dolomitischen Tonstein- und Sulfatgesteinslagen.

Grundwasser ist über dem „Gipsspiegel“ an der Grenze zum unausgelaugten Gips/Anhydrit führendem Gestein in den Lagen des Gipskeupers zu erwarten.

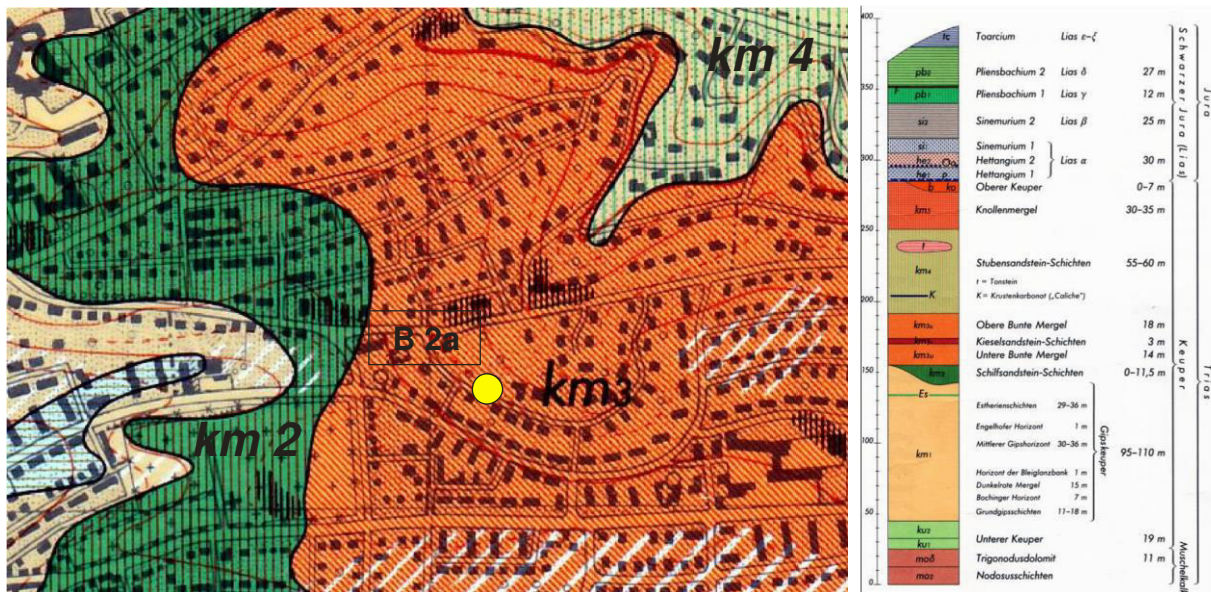
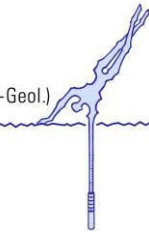


Abbildung 4: Ausschnitte aus der geologischen Karte Blatt 7320 Böblingen

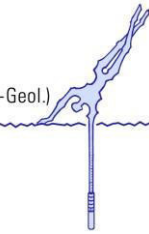
Nach dem aktuellen Schichtenverzeichnis, aufgenommen durch das LGRB aus den Kernen der Bohrung B 2a stehen unter 11 m mächtigen Tonmergel- bzw. Tonsteinen der Unteren Bunten Mergel (km3u) und einem mit stark 4 m mächtigen Schilfsandstein bis 125 m die Schichten des Gipskeupers an. Danach folgen bis in 145.5 m Tiefe die Gesteine des Lettenkeupers. Unterhalb 145.5 m u. GOK bis zur Endteufe der Bohrung bei 162.75 m wurde der Muschelkalk erschlossen.

2.2 Hydrogeologie

Die Tonsteine der Unteren Bunten Mergel und des Gipskeupers sind in der Regel nahezu undurchlässig oder nur sehr gering wasserführend. Dichtes, undurchlässiges Gestein bilden auch die sulfatgesteinshaltigen Bereiche. Grundwasser und eine nennenswerte Durchlässigkeit tritt über dem Gipsspiegel an der Grenze zum unausgelaugtem Gips/Anhydrit führendem Gestein auf.¹

Nach dieser Beschreibung ist es naheliegend, dass das bei 33 m u. GOK am Standort angetroffene Grundwasser dem Bereich der Auslaugungszone über dem Gipsspiegel zuzuordnen ist.

¹ H.-U. Kobler: Erläuterungen zu Blatt 7320 Böblingen, Geologische Karte 1:25.000 von BadenWürttemberg – Kapitel 5. Hydrogeologie



3 Grundwassermonitoring

Vor dem Start der Bohrarbeiten für die Bohrung B2a wurden bereits mehrere Grundwassermessstellen im südlichen und nördlichen Hebungsgebiet abgeteuft.

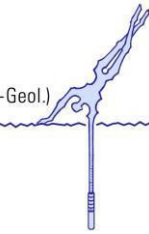
Im Oktober 2014 wurden auch die Grundwassermessstelle GWM 2 im Heinrich-Heine-Weg, die Grundwassermessstelle GWM3 im Herdweg sowie die Grundwassermessstelle GWM4 am Ganssee fertiggestellt und ebenfalls mit Wasserstandsdatenloggern versehen. Im November 2014 folgten als Ergänzung zum ursprünglichen Programm noch die Messstellen B1b und die B2b.

4 Erkundungsbohrung B2a

Mit dem Erreichen einer Bohrtiefe von 38 m wurde in der Erkundungsbohrung B2a ein Versuchsprogramm gestartet, um die hydraulische Durchlässigkeit der durchteuften Formationen charakterisieren zu können. Diese Versuche wurden alle als Einfachpackerversuche mit integriertem shut-in-Ventil oder wahlweise als Packerpumpversuche durchgeführt. Durch die Integration in den laufenden Bohrbetrieb konnte eine zeitlich optimale Versuchsdurchführung nicht immer gewährleistet werden.

Die nachfolgende Tabelle listet alle Versuche in der Versuchsbohrung B2a in ihrer zeitlichen Abfolge auf.

Von	bis	Versuchstyp, Testintervall	Bohrtiefe
22.05.2015	27.05.2015	Packerpumpversuch	38 m
27.05.2015	28.05.2015	Pulsetest	51,4 m
28.05.2015	01.06.2015	Pulsetest	51,4 m
01.06.2015	03.06.2015	Pulsetest	57,4 m
03.06.2015	10.06.2015	Pulsetest	63,4 m
08.07.2015	09.07.2015	Pulsetest	84,8 m
10.07.2015	14.07.2015	Pulsetest	106,0 m
14.07.2015	15.07.2015	Pulsetest	132,0 m
04.08.2015	06.08.2015	Packerpumpversuch	145,0 m
07.08.2015	11.08.2015	Packerpumpversuch	163,0 m
17.09.2015	24.09.2015	Packerpumpversuch	163,0 m



Die Besonderheit an allen Ventiltests ist der Umstand, dass sie in einer inhibierten Spülung stattfinden mussten. Diese Spülung mit einer elektrischen Leitfähigkeit zwischen 50 und 100 mS/cm und einem stark alkalischen pH-Wert soll verhindern, dass Wasser bei Kontakt mit Anhydrit die Umwandlung in Gips bewirkt.

Die Spülung wurde von uns hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften in einer einfachen Versuchsanordnung nach Darcy untersucht. Dazu wurde ein mit dem zu testenden Fluid gesättigter Sandbehälter DN 150 mit einer Potentialdifferenz von 30 Zentimetern beaufschlagt und der Potentialausgleich abgewartet. Der Unterschied zwischen reinem Wasser und der Bohrspülung in verschiedenen Rezepturen betrug dabei im Verhältnis zwischen 1.2 und 1.3 und dürfte vor allem auf die vergrößerte kinematische Viskosität der Spülung zurückzuführen sein. Um diesen Betrag war die scheinbare hydraulische Durchlässigkeit bei Anwendung der Bohrspülung geringer.

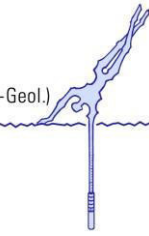
Die Dichtedifferenz von durchschnittlich 2-3 % gegenüber Wasser und die daraus resultierenden „Wasserstände“ wurden bereits in der Sensorik berücksichtigt.

Zur Berücksichtigung der errechneten hydraulischen Durchlässigkeiten kommt noch der Effekt von osmotischen Strömungen, die aufgrund der hohen Mineralisation der Bohrspülung vom Gebirge in Richtung Bohrloch verlaufen. Dieser Effekt, der bei den langen Messzeiten von z.T. mehreren Tagen eine Rolle spielen dürfte, verzögert die Druckerholungszeiten bei den Slug- Injection-Versuchen und täuscht damit eine geringere hydraulische Durchlässigkeit vor. Bei Slug-Withdrawal-Versuchen hingegen findet eine Beschleunigung der Druckerholung statt.

Welches Ausmaß diese physikalischen Effekte haben, ist unklar. Bei Versuchsbohrungen im Opalinuston der Nordschweiz (Benken) wurde dieser Effekt dadurch ausgeschaltet, dass die Bohrspülung während der Testdurchführung exakt der Porenwassermineralisation des Opalinuston (Pearson-Wasser) entsprach.

Eine exakte Korrektur der gefundenen hydraulischen Durchlässigkeiten ist deshalb nicht möglich. Aus diesem Grund werden die Werte nur in Bezug auf die „Darcy-Korrektur“ und die Dichte korrigiert. Die gefundenen Durchlässigkeitswerte sollten vor allem hinsichtlich ihrer Größenordnung betrachtet werden und in die Kategorien

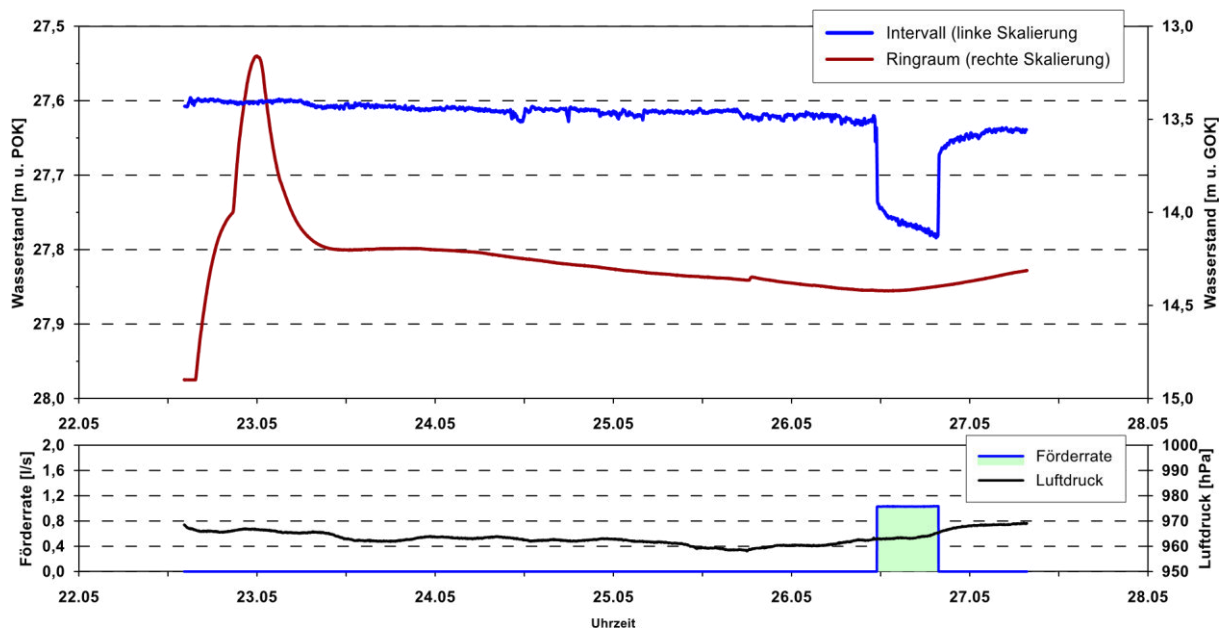
- gut durchlässig
- moderat durchlässig
- wenig durchlässig
- sehr gering durchlässig



unterteilt werden. In allen Versuchen im Gipskeuper wurden demnach nur Durchlässigkeiten der letzten Kategorie - sehr gering durchlässig - gefunden.

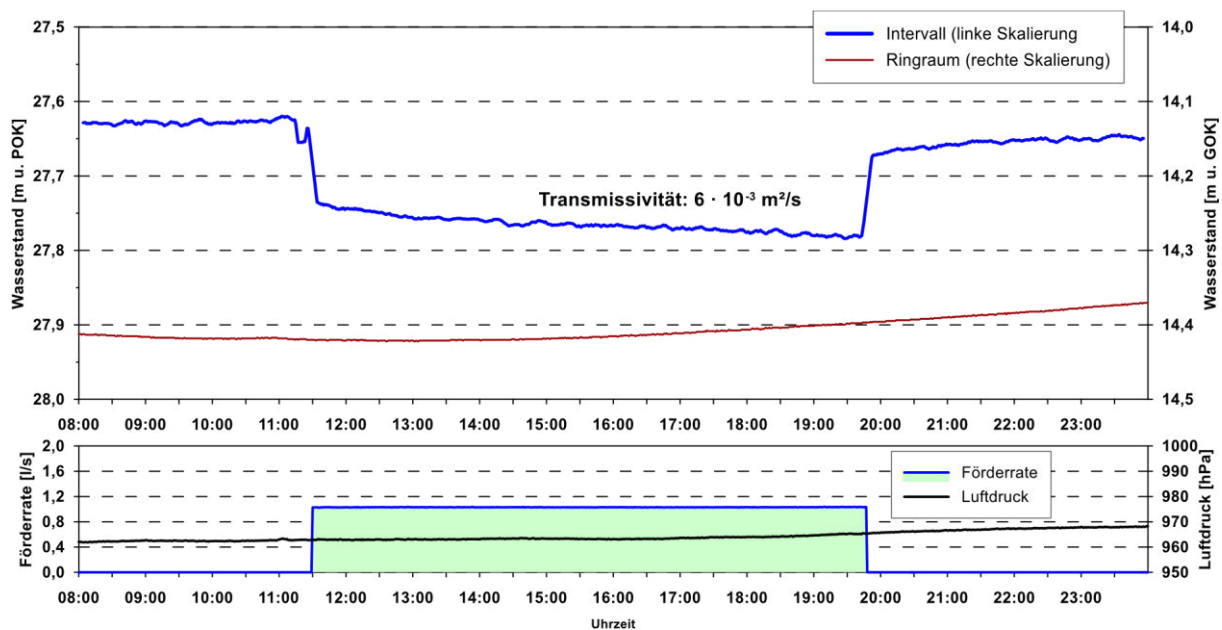
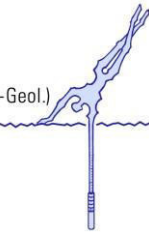
4.1 Pumpversuch bei einer Bohrtiefe von 38 m, offene Bohrung

Am 22.5.2015 erreichten die Bohrarbeiten eine Tiefe von 38 m. In dieser Tiefe wurde der erste hydraulische Versuch durchgeführt. Zunächst wurde eine Packerpumpversuchsgarnitur eingebaut und der Packer zwischen 25 und 26 m positioniert und expandiert. Aufgrund logistischer Erwägungen wurde der Wasserspiegel zunächst über das Wochenende bis zum 26.5 beobachtet. Die zeitliche Entwicklung der Wasserstände über den gesamten fünftägigen Messzeitraum zeigt die nachfolgende Grafik.



Der Wasserspiegel im Packerintervall zwischen 26 und 38 m stellt sich stabil bei 27.6 m u. GOK ein. Der Grund für den leicht unruhigen Verlauf ist unbekannt, korreliert aber wohl ein Stück weit mit dem Luftdruck.

Am 26.5 um 11:30 Uhr wurde mit der eingebauten Pumpe ein Pumpversuch mit einer Förderrate von 1 l/s gestartet. Die zeitliche Entwicklung der Wasserstände während des Packerpumpversuchs zeigt die nachfolgende Grafik.



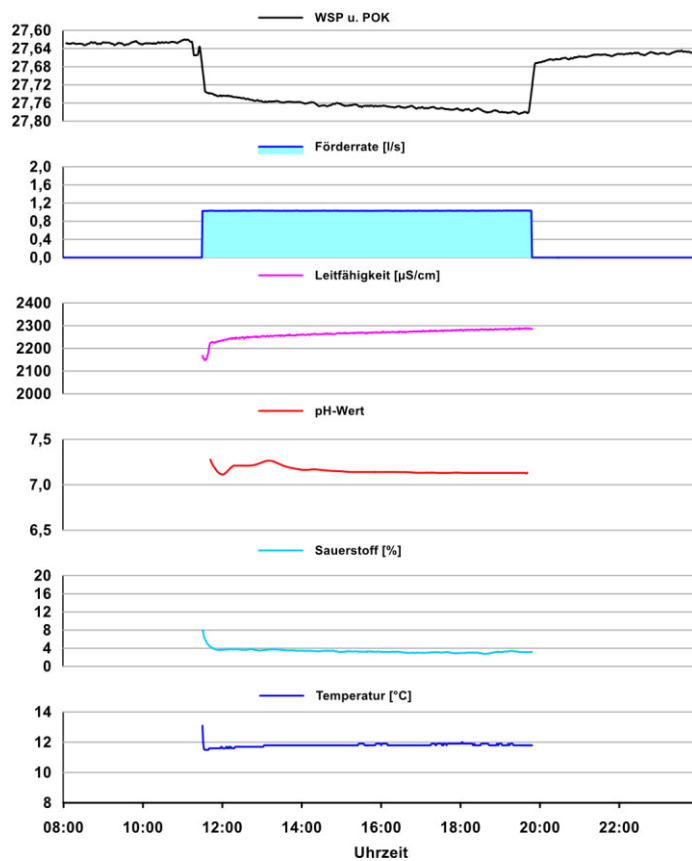
Die Auswertung erfolgte mit der Auswertesoftware AQTESOLV. Berücksichtigt wurden die Lösungsansätze von THEIS, PAPADOPOULOS/COOPER und DOUGHERTY/BABU. Eine Anpassung der Messwerte an die Modelldaten mit plausiblen Parametern führte in der Auswertung nach DOUGHERTY zu einer Transmissivität von

$$T = 6.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (k}_F\text{-Wert von } 5.3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s bei } M = 12 \text{ m)}$$

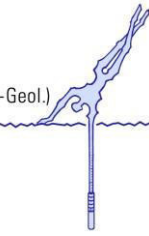
Der Speicherkoeffizient wurde mit einem Wert von 0.25 festgesetzt, da der Druckverlauf sonst nur mit einem Speicherkoeffizienten von 1 nachzubilden gewesen wäre, was aber nicht sinnvoll ist. Die Verwendung eines Speicherkoeffizienten 0.25 setzt dann aber die Einführung eines negativen Skinfaktors voraus, was im vorliegenden Fall ein Hinweis auf erhöhte Durchlässigkeiten (offene Klüfte) im direkten Umfeld der Bohrung ist.

Die physikalisch-chemischen Vor-Ort-Parameter zeigen keine Besonderheiten. Die Leitfähigkeit ist mit $2300 \mu\text{S}/\text{cm}$ typisch für den sulfatdominierten mittleren Keuper, ebenso der leicht basische pH-Wert. Die Sauerstoffkonzentration ist vergleichsweise gering und die Temperatur liegt mit 12°C im erwarteten Bereich.

Die nachfolgende Grafik visualisiert die zeitliche Entwicklung aller Vor-Ort-Parameter während der Pumpphase.

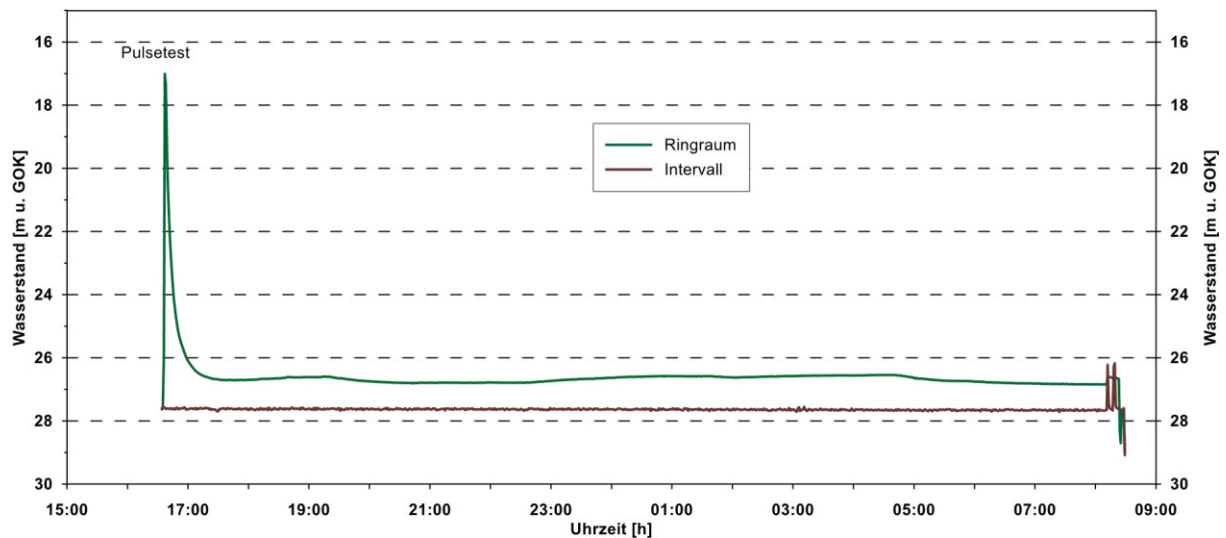


Die Pumpphase wurde um 20:00 Uhr beendet und der Wiederanstieg eingeleitet. Die Messungen wurden am Folgetag, den 27.5.2016 beendet, der Packerstrang ausgebaut und die Bohrarbeiten fortgeführt.



4.2 Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 51.4 m, Intervall 45 – 51.4 m

Die Bohrarbeiten erreichten am gleichen Tag eine Tiefe von 51.4 m u. GOK. Aufgrund der jetzt wesentlich kompakteren Bohrkerns und fehlender Klüfte wurde vom erneuten Einbau einer Packerpumpversuchsgarnitur abgesehen und stattdessen eine Ventiltestgarnitur eingebaut.

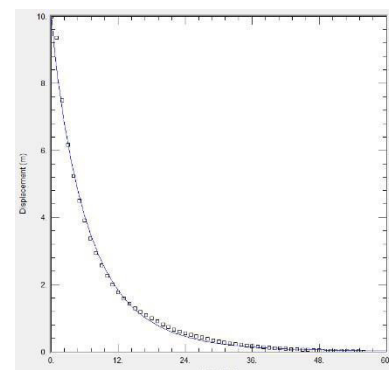


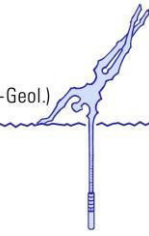
Nach dem Setzen des Packers und der Einstellung der Ruhedrucke im Intervall und dem darüber liegenden Ringraum wurde um 16:37 Uhr das shut-in-Ventil für 30 Sekunden geöffnet und danach sofort wieder geschlossen. Im Testintervall konnte eine Druckerhöhung von 26.6 auf 17.0 m erzielt werden. Mit einer Dauer von zwei Stunden erfolgte die Druckerholung unerwartet rasch. Ein Slug-Test wäre vermutlich auch möglich gewesen.

Die Auswertung der Druckerholung erfolgte mit der Software AQTESOLV mittels der Lösung von DOUGHERTY/BABU und führte zu einer Transmissivität von

$$T = 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (} k_F\text{-Wert von } 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s bei } M = 6.4 \text{ m)}$$

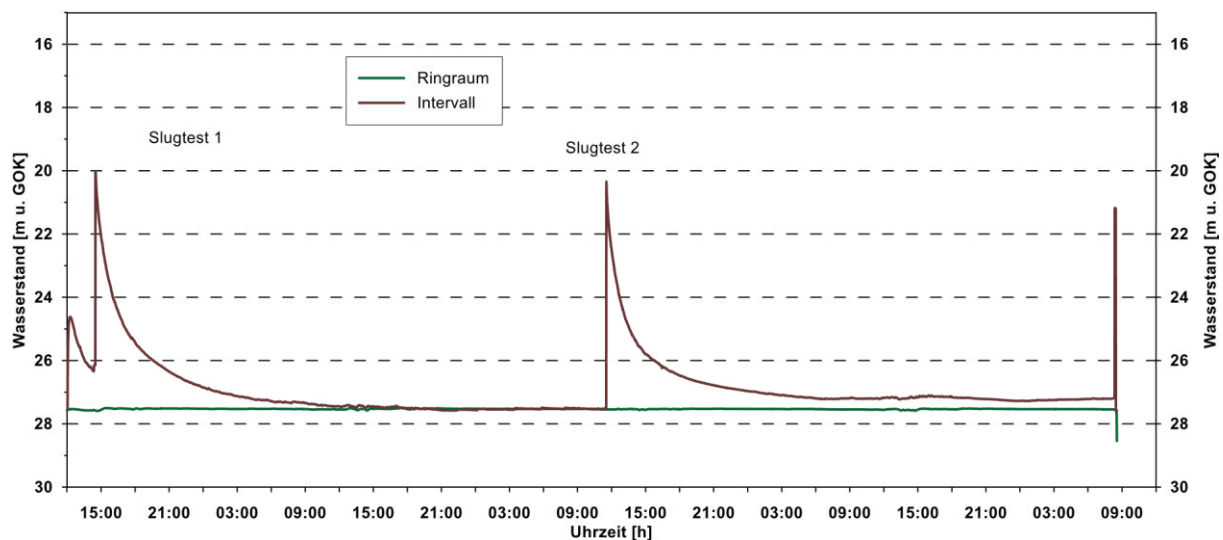
Der berechnete Speicherkoeffizient betrug $7.9 \cdot 10^{-4}$ bei einem Skin-Faktor von 4.3. Die Grafik veranschaulicht die Güte von Messdaten und Modellfunktion





4.3 Erneuter Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 51.4 m, Intervall 39 - 51.4m

Durch den etwas kurz ausgefallenen Pulse-Test im vorangegangenen Intervall wurde beschlossen, auch aus bohrlogistischen Gründen das im letzten Versuch hydraulisch getestete Intervall etwas zu erweitern und den Bereich noch einmal mit einem Slug-Test zu testen.

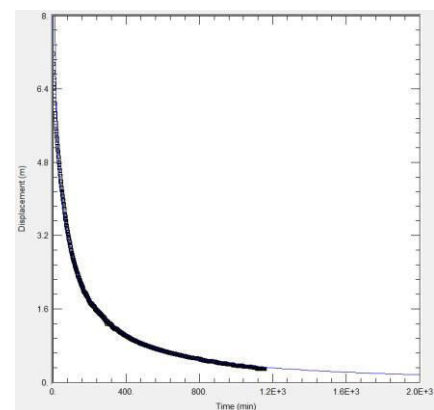


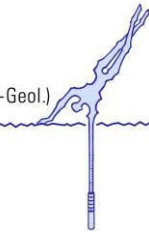
Nach dem Setzen des Packers wurde ein erster Slug-Test um 14:30 Uhr initiiert und die nachfolgende Druckerholung insgesamt 45 Stunden beobachtet. Da noch keine weiteren Bohrarbeiten geplant waren, wurde ein erneuter Slug-Test zur Absicherung des ersten Tests eingeleitet und bis zum 1.6.2015 beobachtet.

Die Auswertung der Druckerholung erfolgte mit der Software AQTESOLV mittels der Lösung von DOUGHERTY/BABU und führte zu einer Transmissivität von

$$T = 2.1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (} k_F\text{-Wert von } 1.5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s bei } M = 12.4 \text{ m)}$$

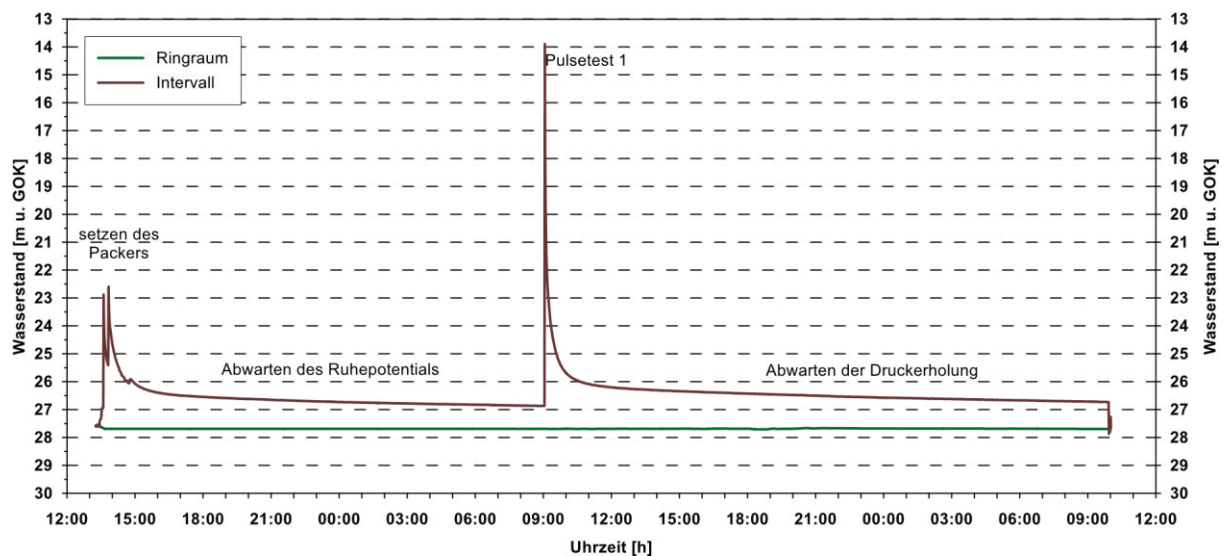
Die Anpassung der Messergebnisse an die Modellfunktion führt zu einem Speicherkoeffizienten von $2.2 \cdot 10^{-3}$. Gleichzeitig ist ein leicht negativer Skin von ca. 0.6 nötig.





4.4 Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 57.4 m, Intervall 51.0 - 57.4 m

Am 1.6.2016 wurden die Bohrarbeiten wieder aufgenommen und die Bohrung von 51.4 auf 57.4 m u. GOK vertieft. Direkt im Anschluss wurde die Testgarnitur wieder eingebaut, um einen erneuten Test im Bohrungsabschnitt zwischen 51.0 und 57.4 m zu durchzuführen.

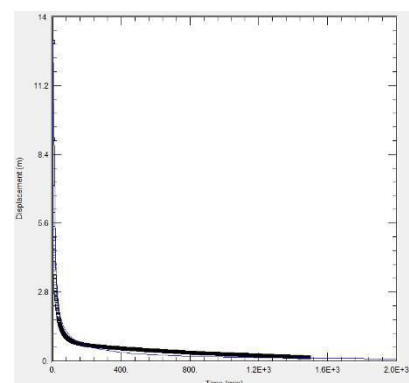


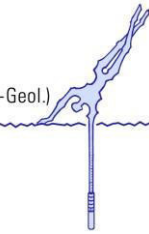
Der Versuch wurde am 1.6.2016 um 13:00 mit dem Setzen des Packers begonnen. Die Beobachtung des Ruhedruckes erfolgte bis zum Folgetag um 9:30 Uhr. Dabei wurde ein Druckspiegel von 26.9 m u. GOK erreicht. Der Pulsetest erreicht eine initiale Druckhöhe von 13 m Wassersäule. Verfahrensgemäß wird das shut-in-tool ca. 30 Sekunden nach dem Öffnen wieder geschlossen, was zu einer deutlichen Beschleunigung der Druckerholung führt. Diese Druckerholung wurde bis zum Folgetag um 10:00 Uhr gemessen.

Die Auswertung nach DOUGHERTY/BABU erbrachte eine Transmissivität von

$$T = 3.7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (} k_F\text{-Wert von } 5.8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s bei } M = 6.4 \text{ m)}$$

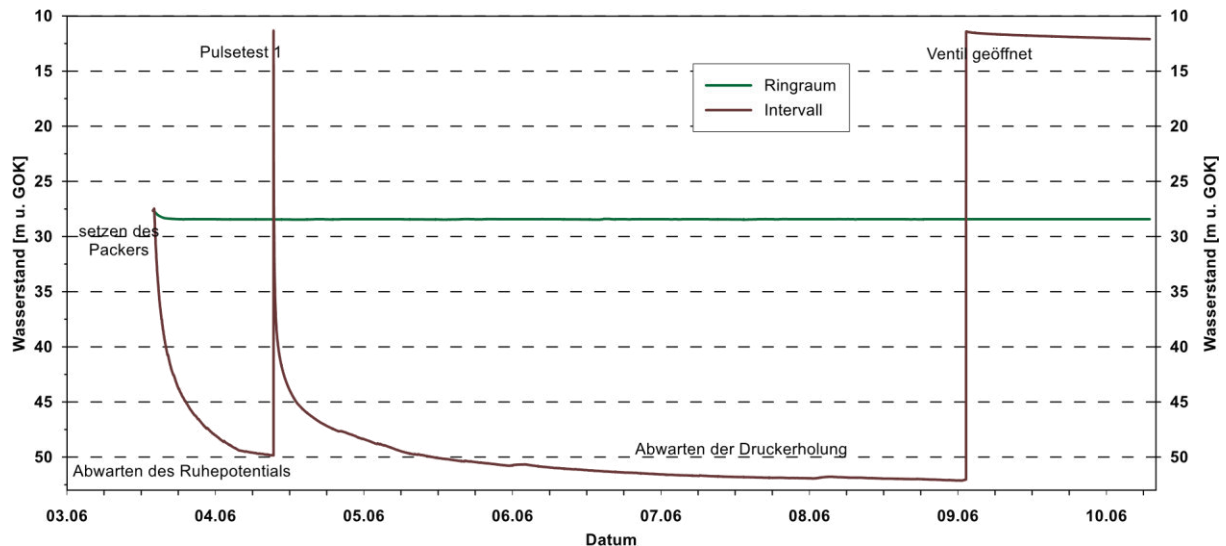
Die Anpassung der Modellfunktion an die Messwerte gelingt nur mit moderater Qualität und es ist davon auszugehen, dass vor allem der während des gesamten Versuches noch stetig sinkende Ruhedruck dafür verantwortlich ist.





4.5 Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 63.4 m, Intervall 57 – 63.4 m

Nach einer weiteren Vertiefung der Bohrung von 57.4 auf 63.4 m wurde ein weiterer Pulsetest durchgeführt.

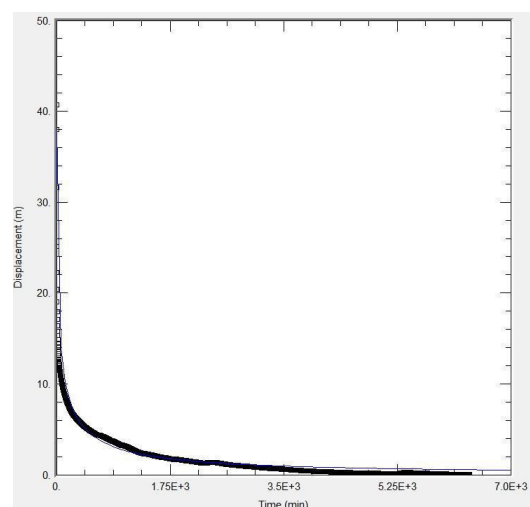


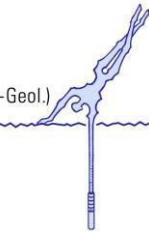
Nach dem Setzen des Packers zwischen 50 und 51 m ergab sich ein gegenüber dem vorangegangenen Test deutlich geringerer Ruhedruck von jetzt 52.1 m u. GOK. Das ist bemerkenswert und markiert einen Wechsel des hydraulisch dominierenden Systems.

Aus dem Pulse-Test, dessen Druckerholung über fast 6 Tage gemessen wurde, ergibt sich eine Transmissivität von

$$T = 8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (} k_F\text{-Wert von } 1.3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s bei } M = 6.4 \text{ m)}$$

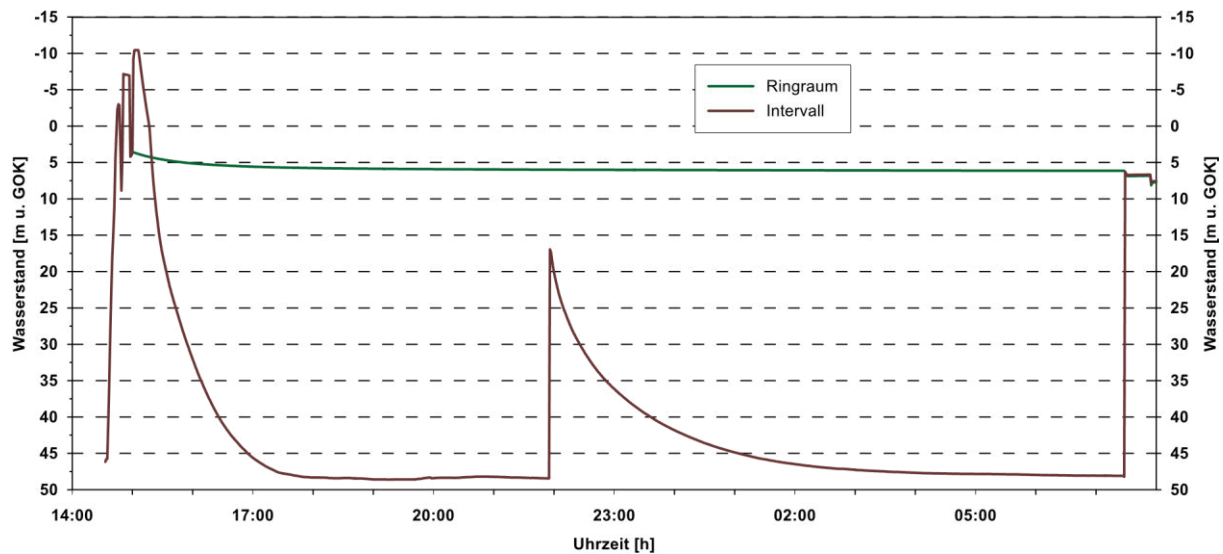
Die Anpassung der Modellfunktion an die Messwerte gelingt wieder nur mit moderater Qualität und es ist davon auszugehen, dass vor allem der während des gesamten Versuches noch stetig sinkende Ruhedruck dafür verantwortlich ist. Darüber hinaus kommen bei diesen sehr geringen Durchlässigkeiten weitere Störfaktoren wie z.B. die Temperatur und osmotische Prozesse zum Tragen.





4.6 Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 84.8 m, Intervall 63.5 - 84.8m

In der Zeit zwischen dem 10.6 und dem 8.7 wurde die gesamte Bohrung umgestellt und eine Hilfsverrohrung einzementiert. Die Bohrung erreichte dann am 8.7.2015 eine Bohrtiefe von 84.8 m. In Anbetracht der sehr kompakten Kerne wurde ein Ventiltest vorbereitet und der Packer zwischen 62.5 und 63.5 m u. GOK eingebaut.

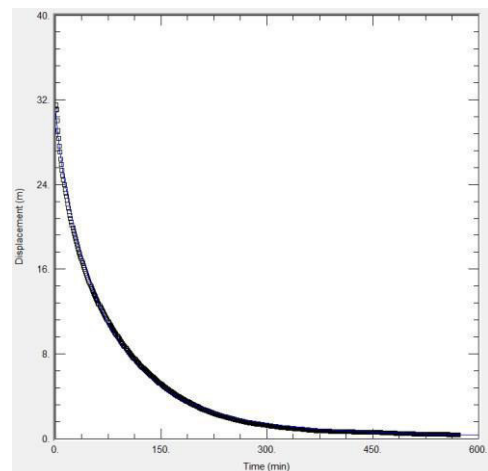


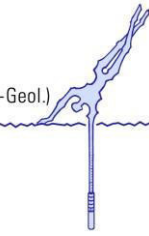
Mit dem Setzen des Packers am 8.7. um 14:20 Uhr bei geschlossenem Ventil wurde der Intervalldruck stark erhöht. Die Druckerholung erfolgte trotzdem zügig und war gegen 19:00 Uhr abgeschlossen. Um 22:00 Uhr wurde der Pulsetest gestartet und die daraus resultierende Druckerholung bis zum nächsten Morgen beobachtet.

Die Auswertung des Tests nach DOUGHERTY/BABU führt zu einer Transmissivität von

$$T = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (} k_F\text{-Wert von } 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s bei } M = 21.3 \text{ m)}$$

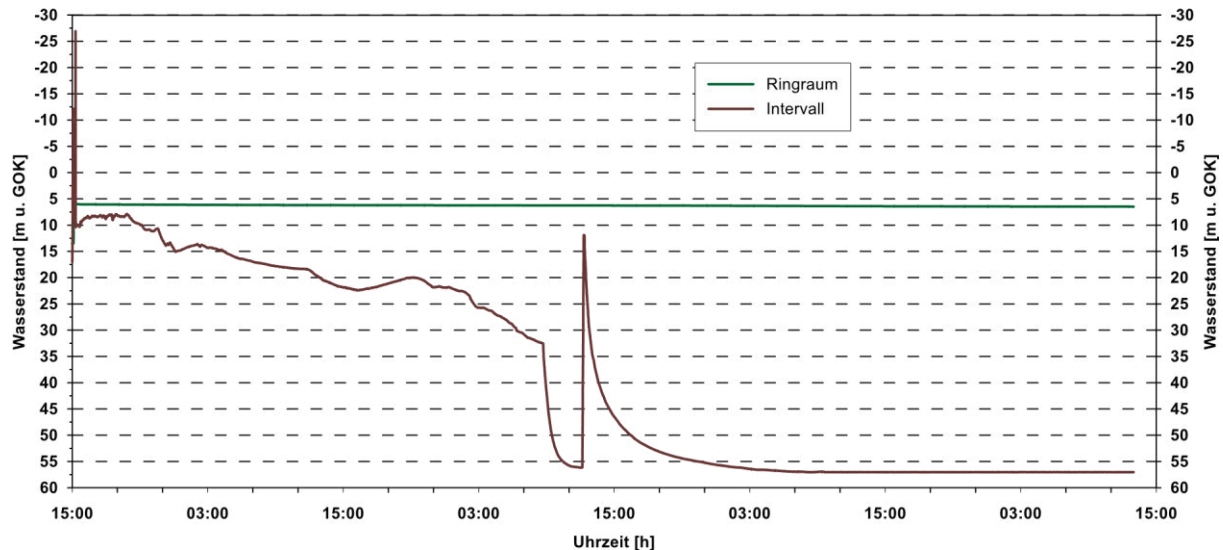
Die Anpassung der Modellfunktion an die Messwerte gelingt sehr gut.





4.7 Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 106 m, Intervall 84 - 106m

Zwischen dem 9.7 und dem 10.7 wurde die Bohrung um weitere 22 Meter vertieft. Der Packer wurde dann ab 13:30 Uhr eingebaut und die Messungen um 14:30 Uhr begonnen.



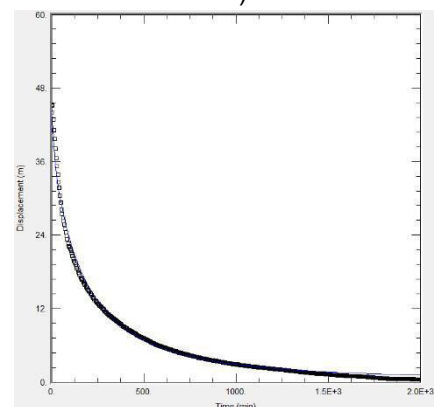
Die Einstellung des Ruhedruckes sollte über zwei Tage hinweg erfolgen, aber wahrscheinlich verhinderte eine unvollständige Schliessung des shut-in-Ventils diesen Vorgang. Am Sonntag wurde der Arbeitsdruck des Ventils erhöht, was den Ruhedruck innerhalb von vier Stunden auf einen Wert von 56.15 m u. GOK sinken ließ. Der anschließende Pulse-Test wurde mit einem Druckimpuls von 4.4 bar ausgelöst. Der Versuch endet am 13.7.2016.

Die Auswertung der Druckerholungsphase des Pulse-Tests nach DOUGHERTY/BABU führt zu einer Transmissivität von

$$T = 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (} k_F\text{-Wert von } 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s bei } M = 22 \text{ m)}$$

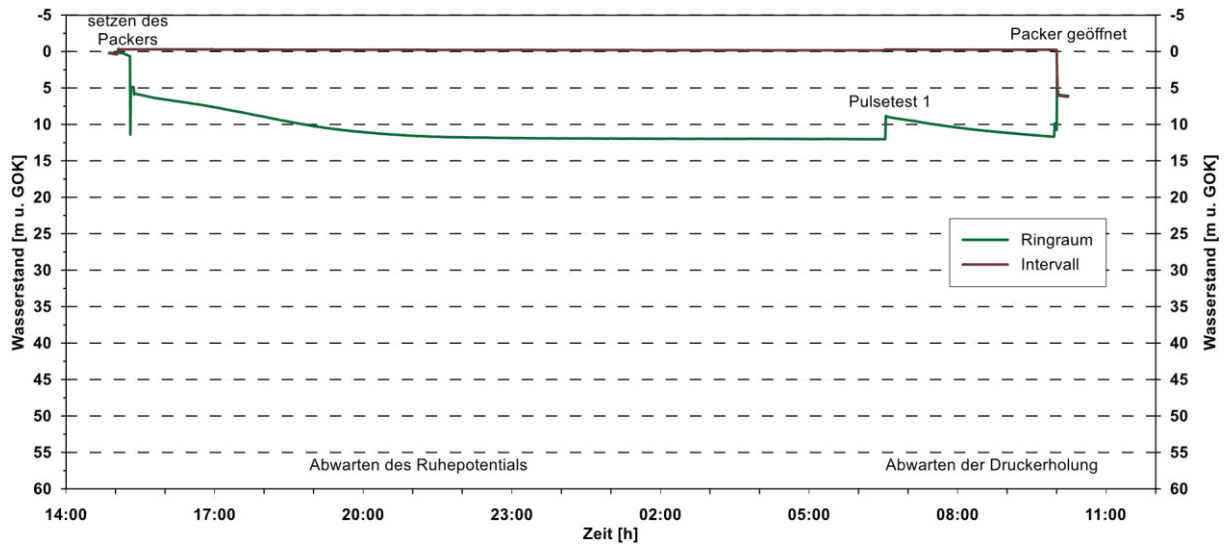
Für eine moderate Anpassung der Modellfunktion an die Messdaten errechnet sich der Speicherkoeffizient zu 1.4

10^{-4} . Ein Skinfaktor ist nicht nötig.

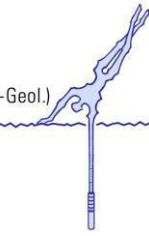


4.8 Ventiltest bei einer Bohrtiefe von 132 m, Intervall 106 - 132m

Am 13. und 14.7.2016 wird die Bohrung um weitere 26 m auf 132 m vertieft und direkt im Anschluss daran ein Pulsetest gestartet.

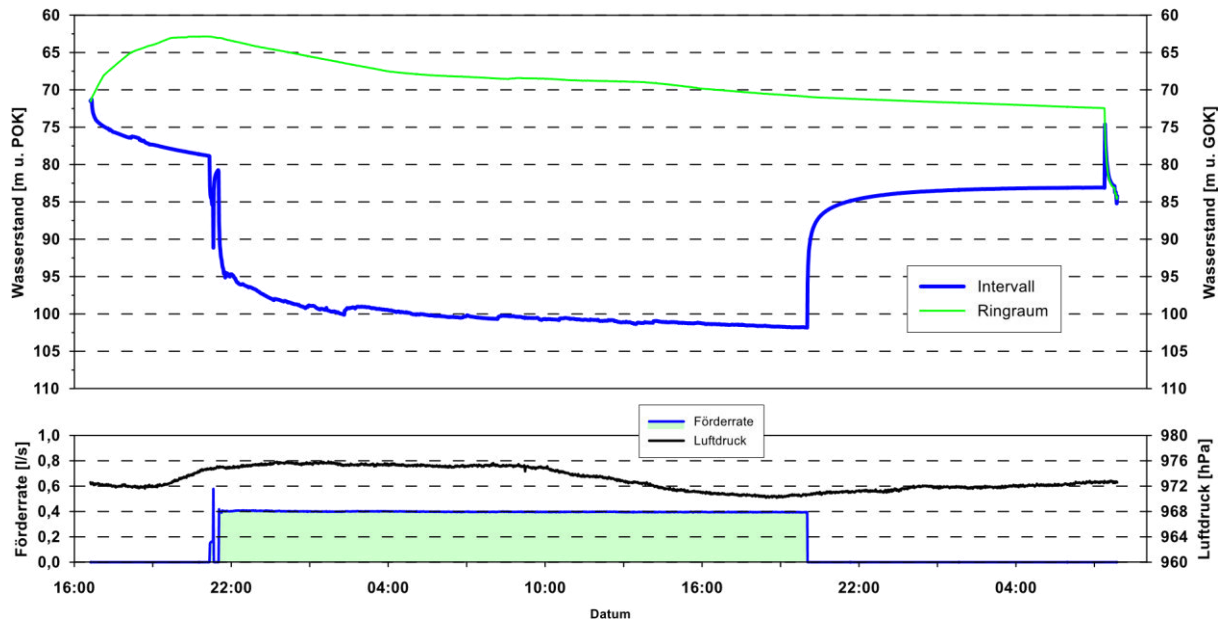


Bei diesem Versuch erreicht der Ruhedruck nicht die erwarteten Werte, sondern stagniert bei ca. 12 m. Da die Werte in keiner Weise plausibel sind, wurde von einer weiteren Auswertung abgesehen. Der Grund bleibt leider unklar. Da die Bohrarbeiten fortgeführt werden mussten, blieb für einen weiteren Versuch keine Zeit mehr.



4.9 Packerpumpversuch B2a, Bohrtiefe 145 m, Intervall 133 – 145 m

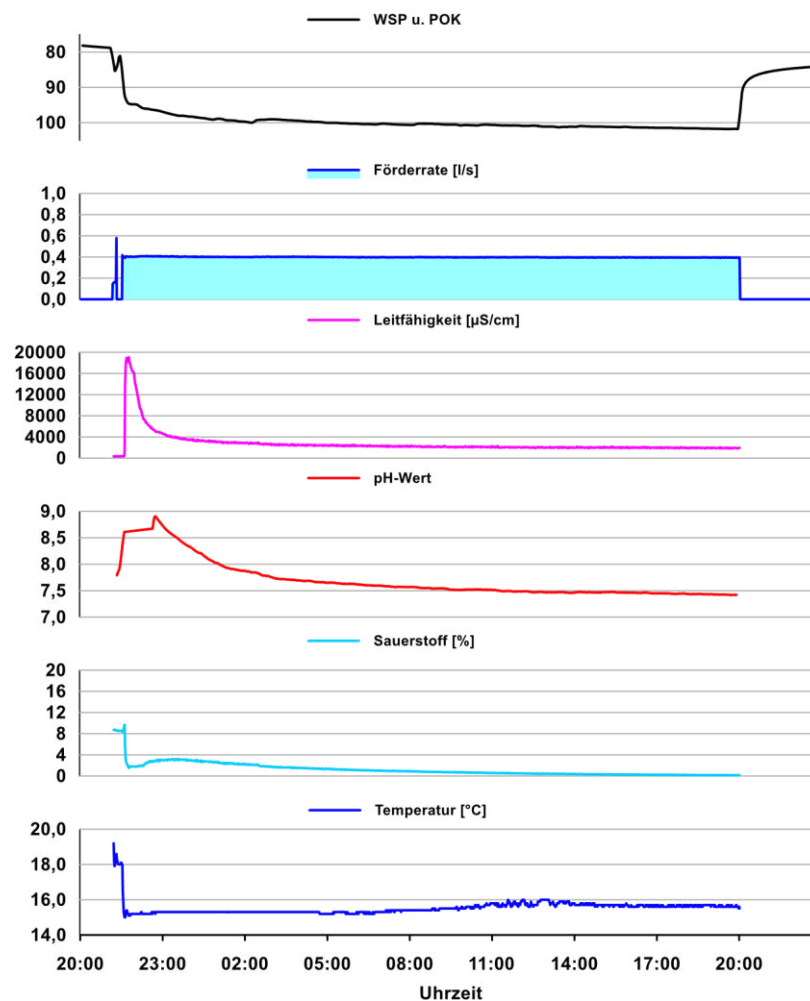
Nach der Vertiefung der Bohrung auf 145 m und dem Erreichen des Unterkeupers wird eine weitere Sperrverrohrung eingezogen. Am 4.8.2015 wird ein Packerstrang mit Pumpe eingebaut und der Packer zwischen 132 und 133 m u. GOK positioniert.



Nach dem Setzen des Packers sinkt der Intervalldruck langsam von 71.5 auf 78.8 m u. GOK. Da nur eine begrenzte Zeit für den Test zur Verfügung steht, wird der Pumpversuch um 21:00 Uhr mit einer Förderrate von 0.4 l/s gestartet.

Der Druckspiegel im Intervall sinkt innerhalb der ersten 10 Minuten von 78.8 auf 94 m u. GOK. Zum Ende der 23-stündigen Pumpzeit beträgt der Druckwasserspiegel 101.83 m u. GOK.

Die Vor-Ort-Parameter zeigen die Verdünnung der Reste der noch im Bohrloch befindlichen inhibierten Spülung. Die Leitfähigkeit sank innerhalb von 2 Stunden von anfänglich über 18 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf ca. 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Zum Ende des Pumpversuchs betrug sie stabil 1950 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Auch der pH-Wert erreichte nach Pumpbeginn ein Maximum von 12.1, stabilisierte sich aber nach 12 Stunden bei 7.5. Die nachfolgende Grafik visualisiert die zeitliche Entwicklung der Vor-ort-Parameter.

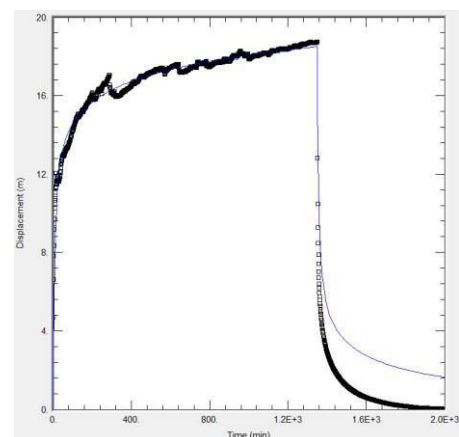


Im Verlauf der 23-stündigen Pumpzeit entwickelt sich ein quasistationärer Zustand, so dass der Versuch hydraulisch ausgewertet werden kann. Für die Auswertung wurden zahlreiche Modelle geprüft – zum Einsatz kam die Lösung nach DOUGHERTY/BABU, weil sie die plausibelsten Werte erzeugte:

$$T = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (} k_F\text{-Wert von } 1.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s bei } M = 12 \text{ m)}$$

Die gefundene Lösung kann den Wiederanstieg nicht abbilden – er verläuft in der Realität schneller als das Modell. Die möglichen Gründe sind vielfältig:

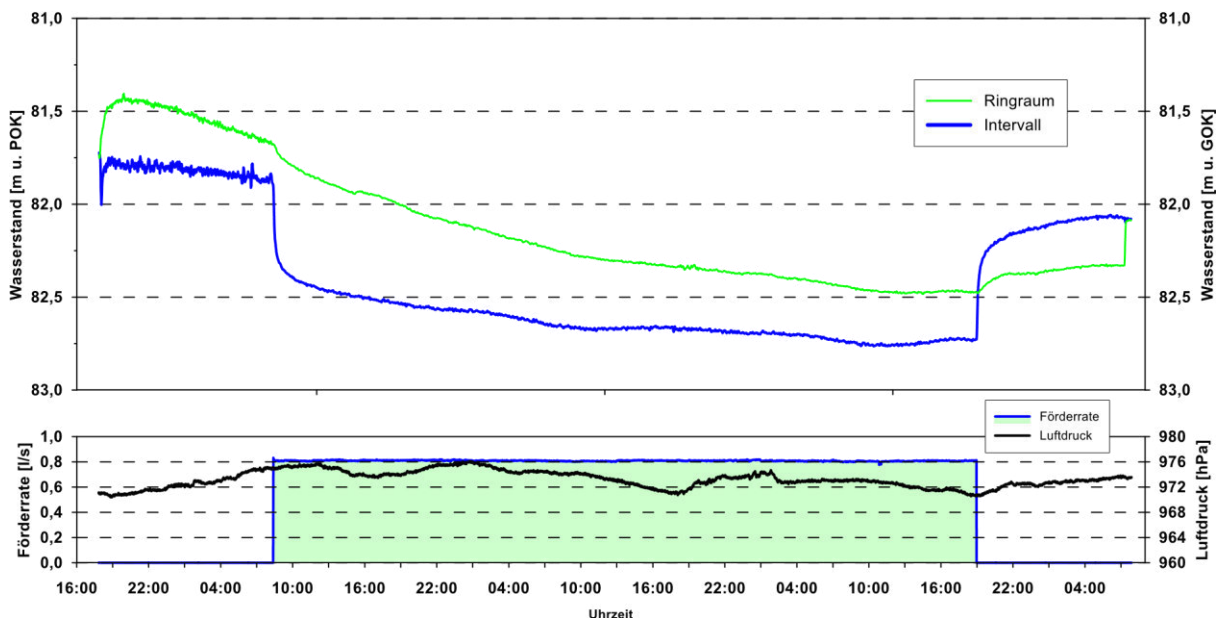
- Variable Dichte des Grundwassers
- Entwicklung des Bohrlochs durch Freispülung





4.10 Packerpumpversuch B2a, Bohrtiefe 163 m, Intervall 144 – 163 m

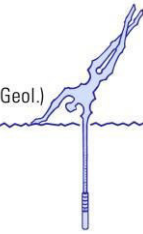
Am 7. und 8. August wurde die Bohrung weiter bis in den oberen Muschelkalk vertieft und damit die projektierte Endteufe erreicht. Vor dem Ausbau zur temporären Grundwassermessstelle war ein weiterer Pumpversuch vorgesehen. Die Packer wurde zwischen 143 und 144 m u. GOK positioniert. Da schon im Bohrbetrieb absehbar war, dass der erbohrte Abschnitt eine deutlich höhere hydraulische Durchlässigkeit hatte, wurde eine entsprechend größere Pumpe eingebaut. Wie die nachfolgende Grafik zeigt, konnte an der ausgewählten Packerposition keine 100%-ige Trennung von Intervall und Ringraum hergestellt werden, jedoch wurde aufgrund der sehr guten Kernqualität von einer Versetzung des Packers abgesehen und von einer Gebirgsumläufigkeit ausgegangen, für die auch die stark verzögerte Druckreaktion im Ringraum spricht.



Der Ausgangswasserspiegel lag zu Versuchsbeginn bei 81.9 m u. GOK. Der Versuch wurde am 8.8 um 8:23 Uhr mit einer Förderrate von 0.8 l/s begonnen. In der Folge sank der Wasserspiegel in den ersten 10 Minuten um 0.3 m. Zum Ende der Pumpphase nach einer

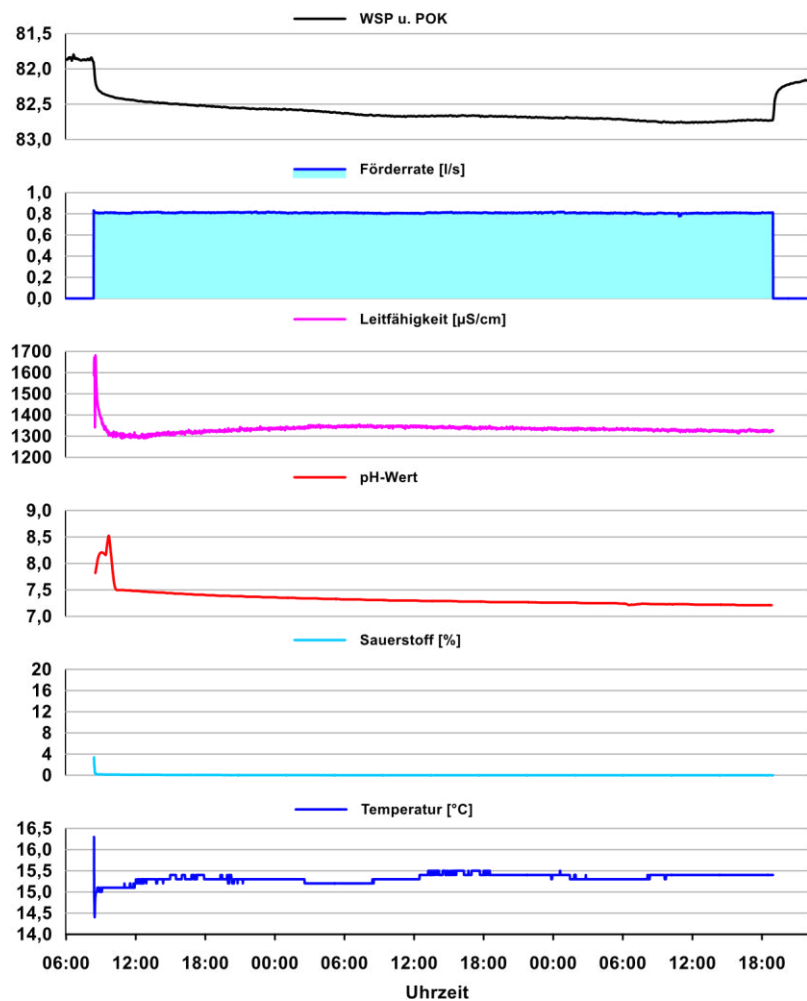
Pumpzeit von 59 Stunden bei 82.73. Die maximal erzielte Absenkung lag damit bei 0.83 m.

Grundsätzlich wäre eine höhere Förderleistung sinnvoll gewesen, aber zum einen sollte das offene Bohrloch im Zielhorizont nicht durch eine zu hohe Absenkung gefährdet werden, zum anderen führen auch geringe Absenkungen zu verwertbaren Ergebnissen.



Aus diesem Grund wurde nach dem Start des Pumpversuchs auf eine Neuinstallation verzichtet

Die Vor-Ort Parameter zeigten nur noch zu Beginn geringe Anteile der inhibierten Spülung. Die Leitfähigkeit schwankt im Versuchsverlauf gering zwischen 1300 und 1350 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Der pH-Wert sinkt leicht von anfänglich 7.6 auf 7.2 zum Ende der Pumpphase. Der Sauerstoffgehalt ist erwartungsgemäß Null und die Temperatur liegt bei etwas über 15°C .



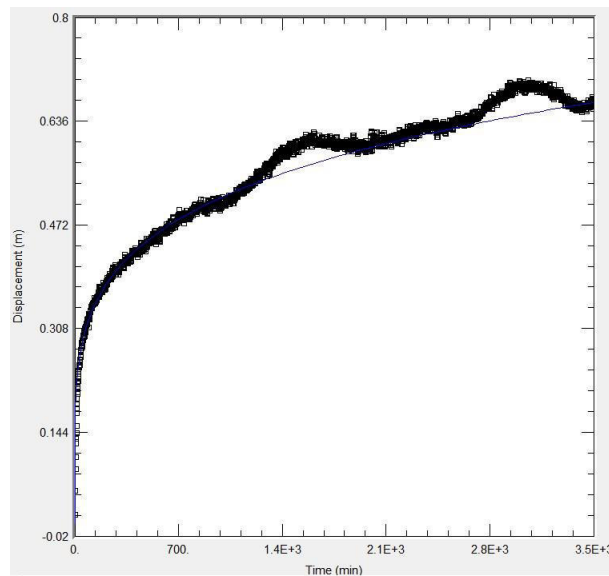
Die Auswertung der Messdaten war aufwendig und führte letztlich nur unter Zugrundelegung eines Klufftaquifers zu plausiblen Ergebnissen. Die Diagnose mittels Ableitung der Messdatenzugabe in den Frühzeitdaten keinen Doppelporositätseinfluss und deshalb wurde diese Lösung zunächst auch nicht weiterverfolgt. Als erschwerend erwiesen sich auch die Einflüsse der Gezeiten, die sich wie auch in der Bohrung B1a durch die typischen Muster bemerkbar machen, aber die Aquiferdiagnose der Spätzeitdaten unmöglich machen.

Die Lösung nach BARKER führt zu einer Transmissivität von



$$T = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (} k_F\text{-Wert von } 8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s bei } M = 19 \text{ m)}$$

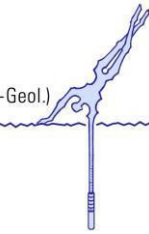
Eine einfache Näherung nach THEIS führt bei einer Pumpzeit von 60 Stunden und einer Förderrate von 0.8 l/s bei der gleichen Transmissivität zu einer Absenkung von 0.8 m und liegt damit in der gleichen Größenordnung. Die nachfolgende Grafik zeigt die Güte der Anpassung mit der Lösung nach BARKER:



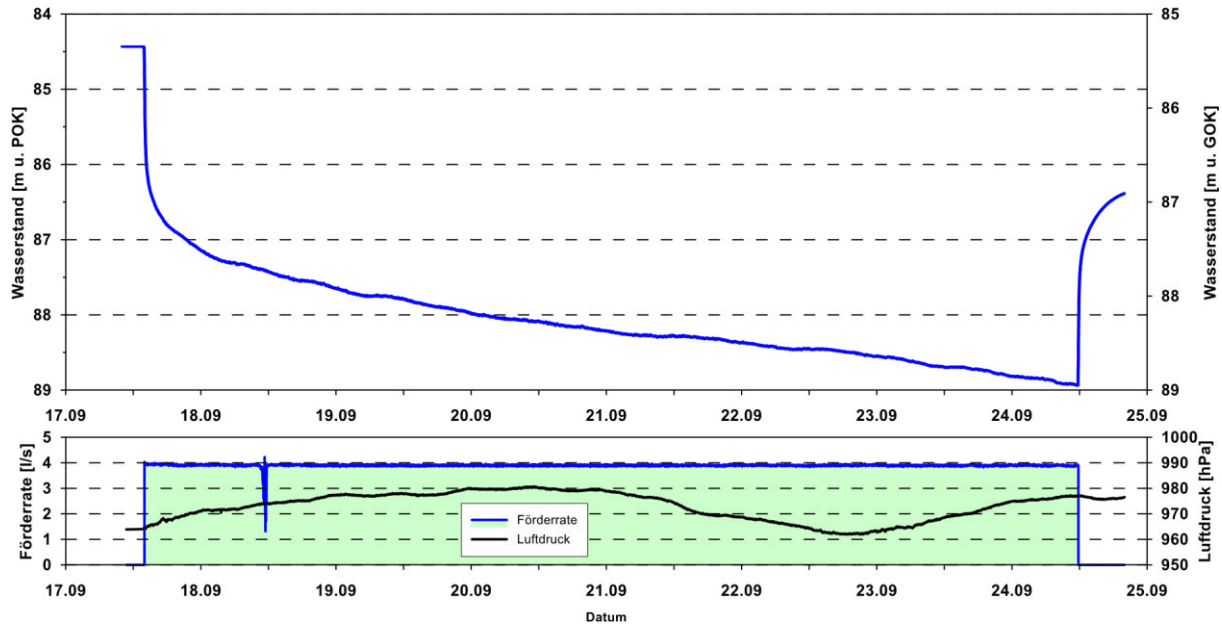
4.11 Abschlusspumpversuch B2a

Nach dem Erreichen der Endtiefe von 162,8 m und der Durchführung des ersten orientierenden hydraulischen Tests mittels Packerpumpversuch wurde die Bohrung erweitert, eine weitere Sperrrohrtour eingezogen und die verbleibende Bohrstrecke im Muschelkalk als temporäre 5“-Grundwassermessstelle ausgebaut.

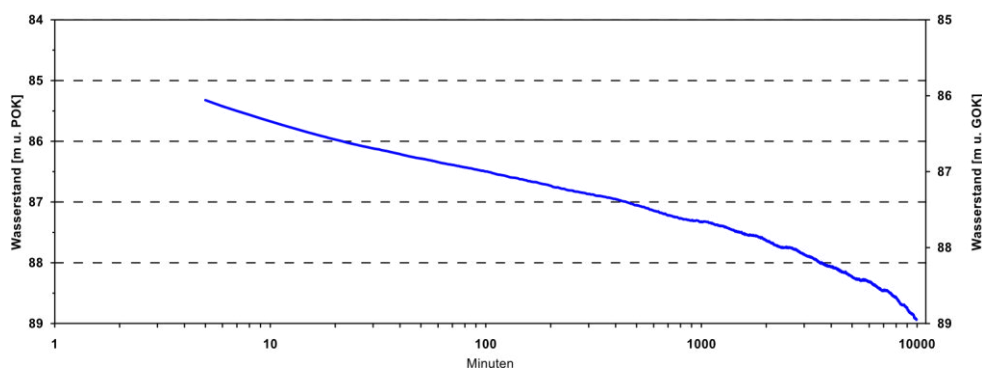
Nach dem Abschluss dieser Umbauarbeiten wurde in dieser Grundwassermessstelle am 17.9.2015 eine Pumpe vom Typ SP14A18 in einer Tiefe von 134 m eingebaut. Ein unmittelbar oberhalb der Pumpe platzierter Drucksensor erlaubte es, den Wasserspiegel im geplanten Pumpversuch so weit als möglich abzusenken und zu beobachten.

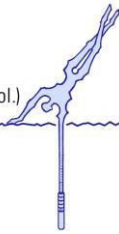


Nach einer kurzen Funktionskontrolle der Pumpe wurde der Pumpversuch am 17.9.2015 um 14:00 Uhr bei einem Ruhewasserspiegel von 84.44 m u. GOK mit einer Förderrate von 3.9 l/s gestartet. Diese Förderrate wurde über einen Zeitraum von 166 h entsprechend 6.9 Tagen aufrechterhalten.

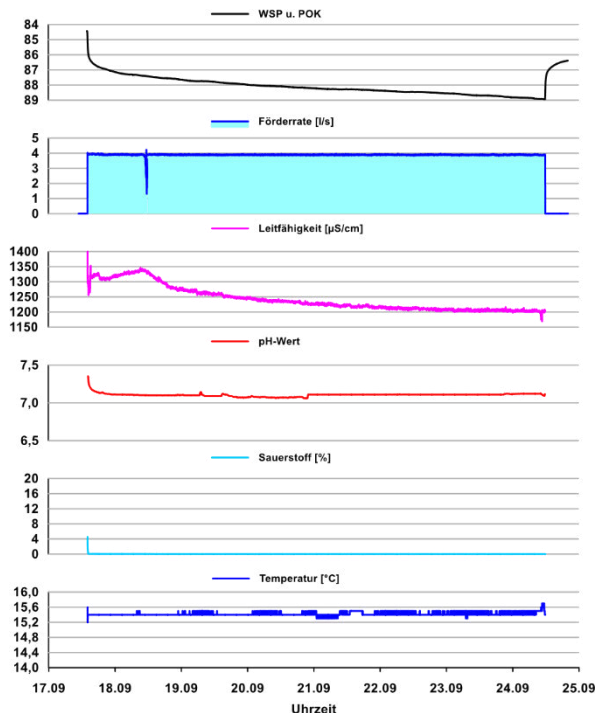


In Verlauf der folgenden halben Stunde sank der Wasserspiegel in der Messstelle von 84.44 m u. GOK auf 86.16 m u. GOK. Nach ca. 18 Stunden stabilisierte sich die Absenkungsgeschwindigkeit und erreichte einen halbwegs konstanten Wert von 0.26 m/Tag. Der tiefste erreichte Wasserspiegel betrug am 24.9.2016 88,94 m u. GOK entsprechend einer Absenkung von 4.5 m. Die halblogarithmische Darstellung zeigt nach ca. einem Tag eine zunehmende Versteilung, was als Hinweis auf eine negative Randbedingung zu werten ist.





Bei den Vor-Ort-Parametern zeigt nur die elektrische Leitfähigkeit zum Zeitpunkt der ersten Hinweise auf eine negative Randbedingung auch eine Änderung der Werte – ab einer Pumpdauer von ca. 24 h beginnen die Leitfähigkeitswerte zu sinken, während sie innerhalb des ersten Tages von 1310 auf 1350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ angestiegen sind. Zu Versuchsende liegt sie bei 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die übrigen Parameter zeigen dagegen keine signifikanten Entwicklungen, die auf eine Änderung der hydraulischen Randbedingungen schließen ließen.



Die nachfolgende Tabelle fasst die Entwicklung der Vor-Ort-Parameter zusammen:

Pumpzeit [h]	Wasserspiegel [m u. GOK]	Förderrate [l/s]	Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	pH-Wert [-]	Sauerstoff [mg/l]	Redox [mV]
1	86,35	3,95	1324	15,4	7,2	0,05	-125
24	87,48	3,93	1315	15,4	7,1	0,02	-192
48	87,83	3,91	1260	15,4	7,09	0,01	-209
72	88,13	3,91	1237	15,4	7,07	0,01	-209
96	88,27	3,89	1218	15,5	7,11	0,01	-202
120	88,46	3,89	1208	15,4	7,11	0,01	-197
144	88,69	3,87	1206	15,4	7,11	0,01	-193
166	88,94	3,91	1204	15,4	7,12	0,01	-184

Die Aquiferdiagnose wird erwartungsgemäß auch hier von den Gezeiteneinflüssen überlagert und dadurch erschwert. Sicher ist aber, dass eine negative Randbedingung vorliegt, die sich ca. 24 Stunden nach Pumpbeginn erstmals bemerkbar macht. Eine weitere Versteilung der Absenkungsgeschwindigkeit wird nach ca. 2.5 – 3 Tagen sichtbar und deutet auf eine weitere negative Randbedingung hin.

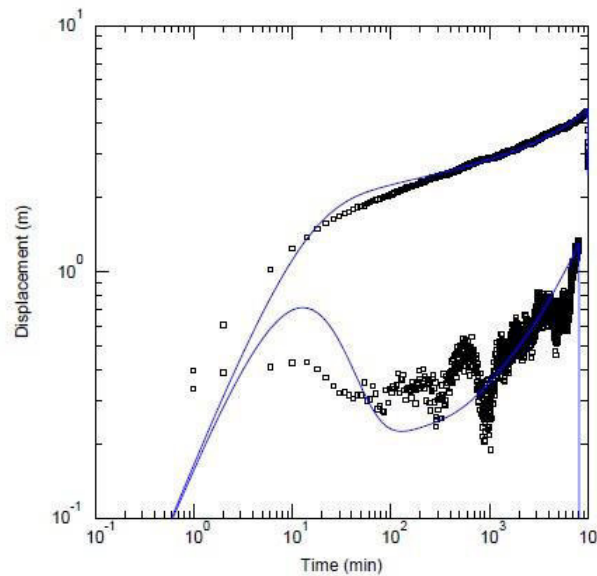
Auch wenn die Software die Abstände der negativen Randbedingungen – hier lineare Staugrenzen – genau beziffert, soll hier nur auf die Größenordnung eingegangen werden: sie liegt bei der am besten anpassbaren Lösung bei wenigen Metern.



Die Auswertung der Messdaten des Pumpversuchs führen zu einer Transmissivität von

$$T = 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (} k_F\text{-Wert von } 1.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s bei } M = 13 \text{ m)}$$

Die nachfolgende Abbildung visualisiert die Anpassung der Modellfunktion an die Messdaten.



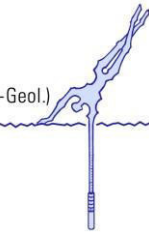
Die Anpassung mit zwei negativen Randbedingungen ist schwierig und höchst spekulativ. In diesem Fall wurden zwei parallele Staugrenzen in verschiedenen Abständen überprüft. Aber auch eine Annäherung über zwei in rechtem Winkel zueinander stehenden Staugrenzen führt zu plausiblen Anpassungen. Insgesamt ist die Bandbreite der möglichen Parameterkonstellationen relativ hoch.

Eine Sensitivitätsanalyse durch die Variation der relevanten Parameter in plausiblen Grenzen und unter Berücksichtigung verschiedener Lösungsansätze führt zu einer Transmissivität von

$$T = 2.2 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

d.h. die Transmissivität liegt in einem Bereich zwischen $1.7 \cdot 10^{-2}$ und $2.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Im Anschluss an den Pumpversuch wurde die Messeinrichtung in der provisorischen Messstelle B2a ausgebaut und ein Wasserstandsdatenlogger für die permanente Beobachtung des Wasserstandes eingebaut.

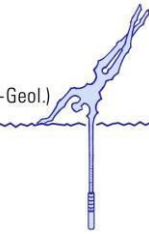


Insgesamt zeigte sich in den durchgeführten hydraulischen Versuchen eine deutliche Zonierung:

Gipskeuper: k_F -Werte um die $1 \cdot 10^{-9}$

Unterkeuper: k_F -Werte um die $1 \cdot 10^{-8}$

Ob. Muschelkalk: k_F -Werte um die $1 \cdot 10^{-7}$



5 Bohrlochgeophysikalische Messungen

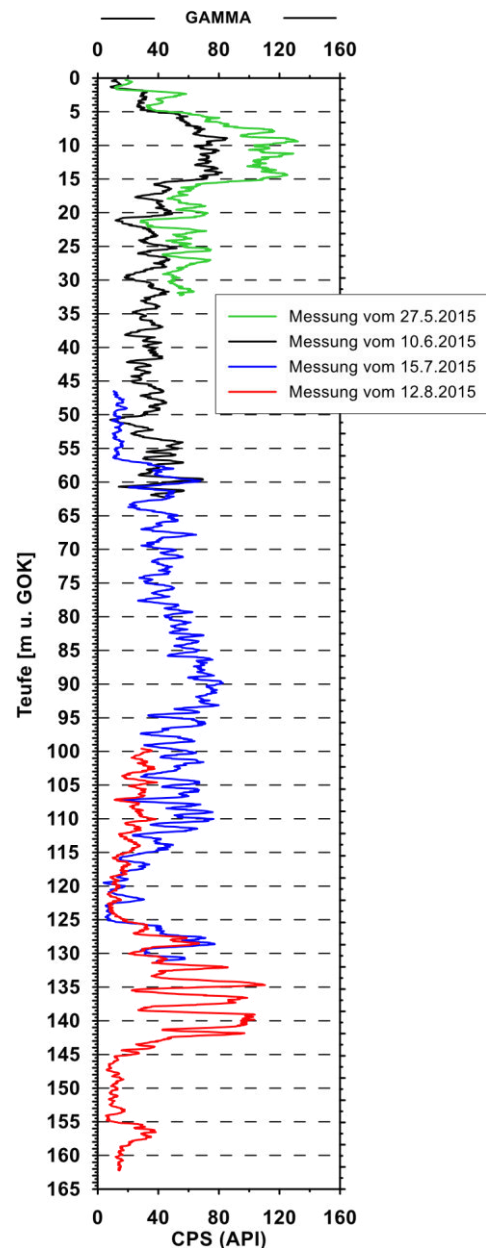
5.1 Messung der natürlichen Radioaktivität

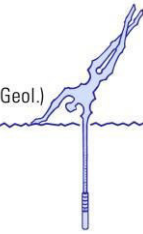
An insgesamt vier Terminen wurden in der Bohrung bohrlochgeophysikalische Messungen durchgeführt. Dabei handelte es sich im Wesentlichen um Messungen der natürlichen radioaktiven Hintergrundstrahlung des erbohrten Gesteins. Darüber hinaus wurden insgesamt drei Leitfähigkeits- und Temperaturprofile durchgeführt

Natürliche Gamma-Strahlung: Die natürliche Gamma-Strahlung wird im Wesentlichen durch das gammaaktive Kalium-Isotop K_{40} verursacht, das vermehrt in Tonen vorkommt. Deshalb eignet sich diese Messmethode sehr gut zur Beurteilung des Tonmineralgehaltes des durchfahrenen Gebirges und ist hilfreich bei der stratigraphischen Zuordnung.

Die vier Gamma-Profilmessungen wurden am 27.5.2015, 10.6.2015, 15.7.2015 und 12.8.2015 durchgeführt.

Die Korrelation aller vier Logs gelingt gut, auch wenn einige der Signale bereichsweise durch die verschiedenen Verrohrungen abgeschwächt werden. Das Signalmuster bleibt erhalten.



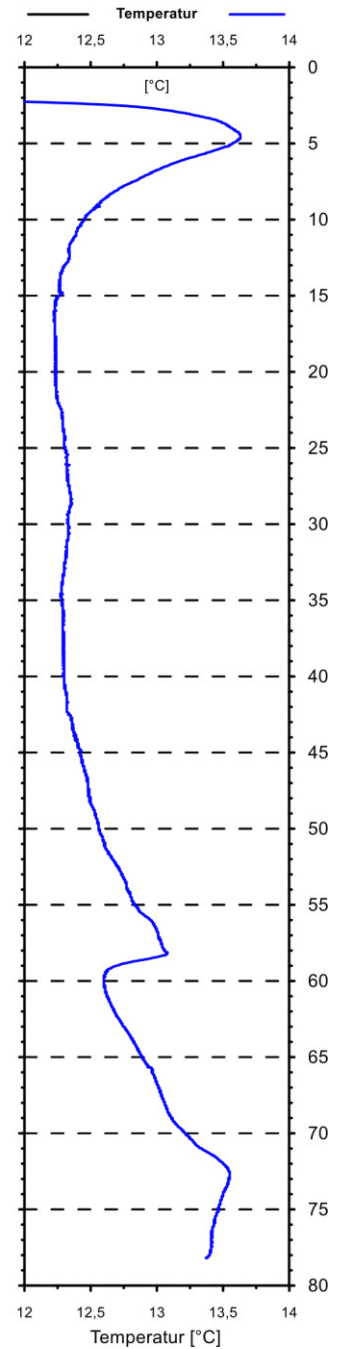
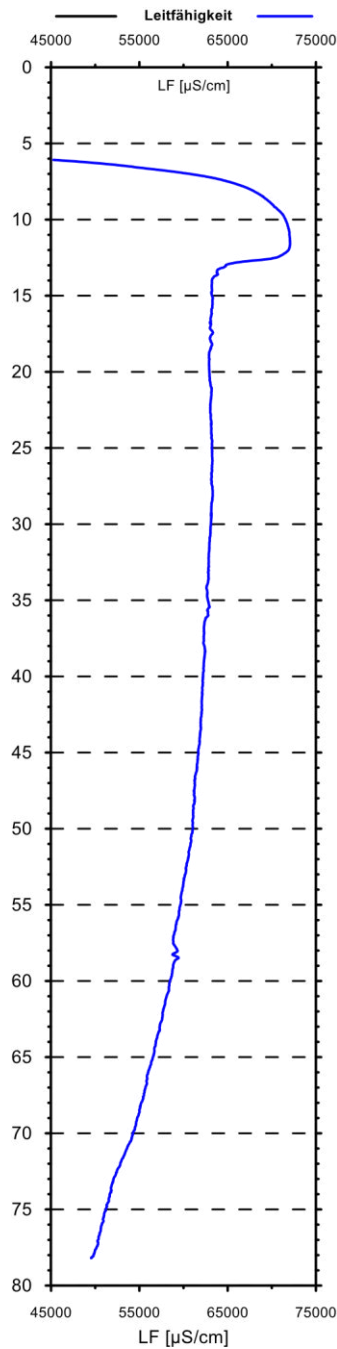


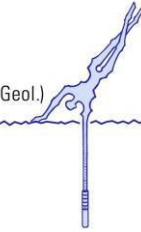
5.2 Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Am 14.10 fand in der Bohrung die erste Messung eines elektrischen Leitfähigkeitsprofils statt. Diese Messung sollte Hinweise auf eine Undichtigkeit der Sperrverrohrung geben und wurde in der inhibierten Spülung durchgeführt.

Die Messung zeigte eine zunehmende Leitfähigkeitsabnahme mit der Tiefe, aber keine bemerkenswerten Sprünge, die als Hinweise auf eine Undichtigkeit gewertet werden können.

Der Temperaturverlauf zeigt einen deutlichen Sprung in 57 m Tiefe, der die Temperatur innerhalb von einem Meter um 0.5°C reduziert.

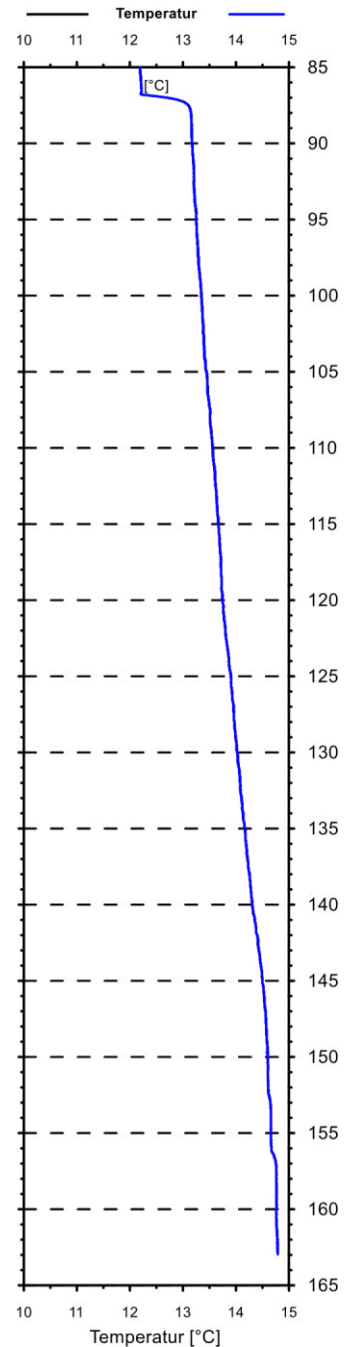
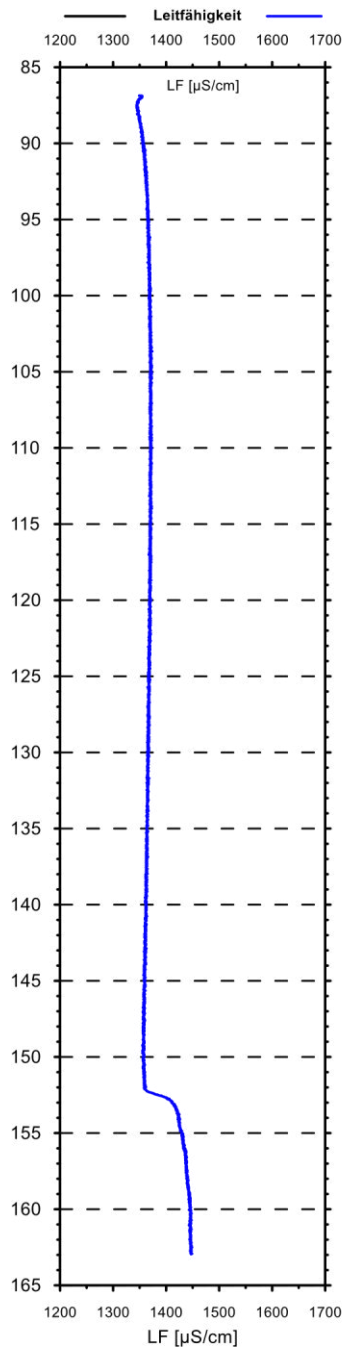


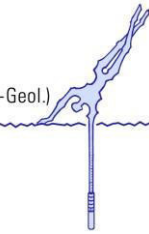


Am 9.12.2015 nach dem Ausbau der Bohrung zur Grundwassermessstelle wurde noch ein weiteres Leitfähigkeits- und Temperaturprofil gemessen.

Der markante Leitfähigkeitssprung in einer Tiefe von 152 m ereignet sich an der Oberkante der Filterstrecke. Er belegt, dass der gesamte Filterabschnitt an den erbohrten Grundwasserleiter angeschlossen ist und auch horizontal durchströmt wird.

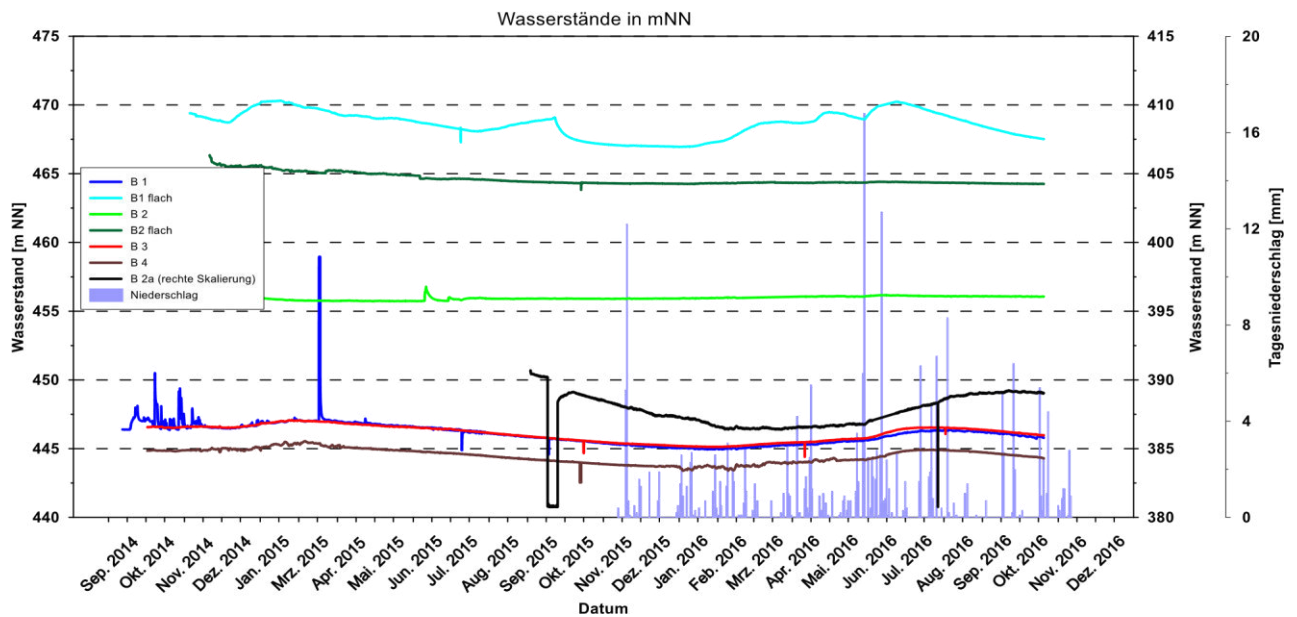
Die gefundenen Leitfähigkeiten des Grundwassers mit Werten um 1150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entsprechen der Mineralisation des Muschelkalkes und unterscheiden sich signifikant von den Wässern des Unterkeupers und Gipskeupers.





6 Grundwassermonitoring

Noch vor dem Beginn der Sanierungsarbeiten an den Erdwärmesonden im Hebungsgebiet 1 wurde mit der Einrichtung von Grundwassermessstellen begonnen. Insgesamt wurden an fünf Standorten sieben Grundwassermessstellen errichtet und kurz nach Fertigstellung mit Wasserstandsdatenloggern ausgestattet. Die nachfolgende grafische Darstellung visualisiert die Wasserstandsdaten aller sieben Messgeräte über den vollen Zeitraum hinweg.



Die letzte Auslesung aller Datenlogger erfolgte Anfang November 2016. Als Interpretationshilfe wurden noch die Niederschlagsdaten ab 2015 mit eingearbeitet. Damit ist es besser möglich, die Dynamik der Grundwassersysteme zu verstehen.

Herrenberg, den 17.11.2016

André Voutta (Dipl. Geologe)