

# **Abschlussbericht**

## **geomatrix.bw, Teil 3: Kosteneffiziente Messsysteme und Konzepte zur Überwachung oberflächennaher Erdwärmennutzung**

G. Bisch, N. Klaas, J. Braun

Universität Stuttgart  
Institut für Wasser- und  
Umweltsystemmodellierung  
VEGAS

Förderkennzeichen ZO4E 28002

Laufzeit: 1.5.2009 – 31.3.2014

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Programms „Herausforderung Erdwärme“ mit Mitteln aus der Zukunftsoffensive IV des Landes Baden-Württemberg finanziert.

Juni 2014

## Inhaltsverzeichnis

1	AUFZÄHLUNG DER WICHTIGSTEN WISSENSCHAFTLICH- TECHNISCHEN ERGEBNISSE UND ANDERER WESENTLICHER EREIGNISSE	1
1.1	Referenzstandorte	1
1.1.1	Grundsätzliches	1
1.1.2	Firmengelände Firma Gungl, Renningen	1
1.1.3	Wohngebiet in Kilchberg	3
1.1.4	Betriebsgelände Bohrfirma Herrenknecht	5
1.1.5	Bad Wurzach	7
1.1.6	VEGAS-Großbehälter	26
1.2	Thermal Response Test	36
1.3	Gamma-Gamma Dichte-Messung	37
1.4	Vergleich der Temperaturlausbreitung mit Excel-Berechnungstool GWP- SF_09.05	38
1.5	Validierung numerischer Modelle mit Daten aus VEGAS-Experimenten	39
1.6	Temperatur-Messtechnik	41
1.7	Zusammenfassung	43
2	VERGLEICH DES STANDS DES VORHABENS MIT DER URSPRÜNGLICHEN ARBEITS-, ZEIT- UND AUSGABENPLANUNG	45
2.1	Arbeitsplanung	45
2.2	Zeitplanung	45
2.3	Aktuelle Ausgaben- und Ausgabenplanung	45
2.4	Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert?	46
2.5	Sind inzwischen von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?	46
2.6	Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?	46
2.7	Fortschreibung des Verwertungsplans	46

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Druckaufnehmer mit Datenlogger zur kontinuierlichen Ermittlung von Piezometerhöhen in Beobachtungsbrunnen	2
Abbildung 2	Lageplan der geplanten Erdwärmesonden auf dem Gungl Betriebsgelände	2
Abbildung 3	Lage der Sonden in Kilchberg	4
Abbildung 4:	Aufbau des Untergrunds	5
Abbildung 5	Lage der abgeteufte Erdwärmesonden auf dem Parkplatz der Bohrfirma Herrenknecht	6
Abbildung 6	Eingebaute Erdwärmesonde auf dem Parkplatz der Bohrfirma (links) und Technikraum (rechts)	6
Abbildung 7	Geologisches Profil mit Tiefenlage der eingebauten Pt100, Pumpen und Schläuchen für die Tracerzugabe	7
Abbildung 8	Messstellen M1 (oben), M2 (mitte) und M3 (unten) zur kontinuierlichen Druckmessung	8
Abbildung 9	Lageplan mit GW-Richtung aus Bestandsdaten	9
Abbildung 10	Durch Messung der Piezometerhöhe ermittelte GW-Richtung am 30.06.2010, 12.10.2010, 19.04.2011, 11.10.2011, 10.01.2012, 15.05.2012 und 20.11.2012	10
Abbildung 11	Zeitreihe der kontinuierlichen Druckmessung in unmittelbarer Nähe zum Standort	10
Abbildung 12	Ausschnitt aus der kontinuierlichen Druckmessung, Darstellung absoluter Drücke	11
Abbildung 13	Datenerfassung zur Temperaturmessung in 4 Brunnen im Abstrom der EWS, einem Brunnen oberstrom, zwei Koaxialsonden, einer Helix, Zu- und Rücklauf der EWS und für den Wärmemengenzähler	11
Abbildung 14	Eingemessener Sonden Plan	12
Abbildung 15	Lage der Kernbohrung vom 10.01.2012	13
Abbildung 16	Tiefenlage aller Temperatursensoren in m u. GOK	14
Abbildung 17	Betriebszyklen der Erdwärmesonde	14
Abbildung 18	Messwerte nach Inbetriebnahme der EWS-Sonde zu Heizzwecken (01.11.2010, 01.12.2010, 01.01.2011) in Strömungsrichtung unterstrom der EWS	16
Abbildung 19	Messwerte nach Inbetriebnahme der EWS-Sonde zu Heizzwecken (01.02.2011, 01.03.2011, 01.04.2011) in Strömungsrichtung unterstrom der EWS	17
Abbildung 20	Messwerte nach Inbetriebnahme der EWS-Sonde zu Heizzwecken (01.05.2011, 01.06.2011, 01.09.2011) in Strömungsrichtung unterstrom der EWS	18
Abbildung 21	Messwerte nach Inbetriebnahme der EWS-Sonde zu Heizzwecken (01.11.2011) in Strömungsrichtung unterstrom der EWS	19

---

Abbildung 22: Temperaturverteilung am 1.1.2012 (Heizperiode)	19
Abbildung 23: Temperaturverteilung am 1.3.2012 (Heizperiode)	19
Abbildung 24: Temperaturverteilung am 1.5.2012 (Ende Heizperiode)	20
Abbildung 25: Temperaturverteilung am 1.7.2012 (Beginn der Kühlperiode)	20
Abbildung 26: Temperaturverteilung am 1.9.2012 (Ende der Kühlperiode)	20
Abbildung 27: Temperaturverteilung am 1.11.2012 (Beginn der Heizperiode)	21
Abbildung 28: Temperaturverteilung am 1.1.2013 (Heizperiode)	21
Abbildung 29: Temperaturverteilung am 1.3.2013 (Heizperiode)	21
Abbildung 30: Temperaturverteilung am 1.5.2013 (Ende der Heizperiode)	22
Abbildung 31: Temperaturverteilung am 1.7.2013 (Beginn der Kühlperiode)	22
Abbildung 32: Temperaturverteilung am 1.9.2013 (Ende der Heizperiode)	22
Abbildung 33: Temperaturverteilung am 1.11.2013 (Beginn der Heizperiode)	23
Abbildung 34 Zeitpunkt der Ankunft der Kälte-/Wärmefront und Größe der Temperaturveränderung an den Messstellen M1 bis M4 an Sensor T6 (21m Tiefe)	23
Abbildung 35 Grundwasserprobennahme mit den eingebauten pneumatischen Pumpen	24
Abbildung 36: Analyseergebnisse von DOC/DIC- und der Ionen Nitrat, sulfat und Natrium Messstelle M1, 3,90m unterstrom der EWS in 10m (oben) und 20m (unten) Tiefe (Heizphase rot, Kühlphase blau)	25
Abbildung 37: Analyseergebnisse p und m-Wert sowie von Schwermetallen an Messstelle M1 in 10m und 20m Tiefe	25
Abbildung 38 Bohrung und Einbau der EWS auf VEGAS Großbehälter	29
Abbildung 39 Online Anzeige aller 144 Temperaturmesspunkte, der 4 Durchflüsse durch die EWS, Volumenstrom der Grundströmung und deren Vorlauftemperatur	29
Abbildung 40 Aufsicht mit Lage der EWS und Temperatursonden	30
Abbildung 41 Lage der Erdwärmesonden und Bohrungen für Temperaturmessung, Aufsicht	31
Abbildung 42 Seitenansicht des VEGAS-Behälters mit Erdwärmesonden und Bohrungen für Temperatur mit Pt100-Sensoren	31
Abbildung 43 Temperatúrausbreitung im VEGAS-Behälter, Seitenansicht, Heizen von EWS2, Abstandsgeschwindigkeit = 0,32 m/d	33
Abbildung 44 Reichweite der Ausbreitung der Wärmefahne nach 7 Tagen in der Aufsicht auf die Grobsandschicht	34
Abbildung 45 Reichweite der Ausbreitung der Wärmefahne nach 14 Tagen in der Aufsicht auf die Grobsandschicht	34
Abbildung 46 Reichweite der Ausbreitung der Wärmefahne nach 19 Tagen in der Aufsicht auf die Grobsandschicht	35

---

Abbildung 47 Reichweite der Ausbreitung der Wärmefahne nach 19 Tagen in der Aufsicht auf die Feinsandschicht.	35
Abbildung 48 TRT an EWS4 im VEGAS-Behälter zur Bestimmung thermischer Bodenparameter	36
Abbildung 49 Dichte-Messung des Ringraumes um EWS4:	38
Abbildung 50 Berechnung der Wärmeausbreitung im VEGAS-Behälter mit dem Excel-Tool GWP-SF	39
Abbildung 51 Der diskretisierte VEGAS-Behälter im FEFLOW-Modell	40
Abbildung 52 Ausbreitung der Wärme um die geheizte EWS 2	40
Abbildung 53 Vergleich der mit FEFLOW berechneten Zeitreihen mit den gemessenen Temperaturverläufen	41
Abbildung 54 Messverstärker für PT-1000 Widerstandstemperatursensoren	42

## Kurzfassung

Im Teilprojekt TP3 des Projektverbundes geomatrix.bw wurden zwei Feldstandorte sowie der VEGAS-Großbehälter mit Messtechnik instrumentiert, um die Modellrechnungen, die in den Teilprojekten TP1 und TP2 durchgeführt wurden mit realen Daten zu validieren und zu verifizieren.

Durch die beiden untersuchten Feldstandorte wurde sowohl ein offenes als auch ein geschlossenes Erdwärmesystem untersucht. Der VEGAS-Großbehälter spiegelte mit seinen vier eingebauten Erdwärmesonden ein geschlossenes System wider. Der VEGAS Großbehälter wurde zusätzlich zu den beantragten Messfeldern instrumentiert, da die hier exakt bekannten hydraulischen Randbedingungen und die kürzere, jahreszeitlich unabhängige Versuchsdurchführung den Projektpartnern eine schnellere Kalibrierung ihrer numerischen Modelle ermöglichte. Diese wurden dann anschließend an den Feldstandorten mit teilweise weniger bekannten hydraulischen, dafür jedoch realistischen Verhältnissen mit den gemessenen Temperaturdaten validiert.

In der verlängerten Projektphase sollten Daten über mehrere Jahre erfasst werden, die auf eine Beeinflussung des Grundwassers aufgrund des Wärme bzw. Kälteeintrags durch Erdwärmesonden hinweisen.

## Summary

During the third year of the project two field sites as well as a large tank in the VEGAS facility were instrumented with monitoring technology. Data from these sites are shared with the other project partners in TP1 and TP2 so they may validate and verify their numerical models.

The two new field sites represent both an open and a closed geothermal energy system. The thermal wells in the large VEGAS tank are also installed as a closed system. This tank was equipped in addition to the originally planned field sites since here all boundary conditions may be controlled and the experiments may be conducted independent from seasonal influences. Hence, the numerical modellers have the chance to validate their models quickly to then be ready for the field data with which to verify the models under less ideal, albeit more realistic conditions.

# 1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

## 1.1 Referenzstandorte

### 1.1.1 Grundsätzliches

Die kontinuierlichen Temperaturmessungen sowie der regelmäßigen Grundwasserprobenahme am geschlossenen Erdwärmesondensystem am Feldstandort Bad Wurzach konnten dank der verlängerten Projektlaufzeit über einen Zeitraum von 3,5 Jahren durchgeführt werden. Dabei ging es insbesondere um die Fragestellung, wie stark die Grundwasserqualität durch den Eintrag von Wärme bzw. Kälte durch eine Erdwärmesonde aufgrund veränderter mikrobieller Aktivität beeinflusst wird. Deshalb wurden die Grundwasserproben auf spezielle Inhaltstoffe analysiert, die auf eine veränderte chemische und mikrobielle Aktivität schließen lassen.

Im Folgenden werden der (immer noch) im Betrieb befindliche wie auch die in den vergangenen Projektphasen bearbeiteten Standorte beschrieben und Ergebnisse dargestellt.

### 1.1.2 Firmengelände Firma Gungl, Renningen

Der Neubau des Firmengebäudes der Gungl Bohrgesellschaft mbH in Renningen wurde mit 16 geschlossenen Erdwärmesonden bis 99 m Tiefe zum Heizen und Kühlen ausgestattet.

Für die Kalibrierung der für dieses Projekt eingesetzten numerischen Modelle zur advektiven und konduktiven Berechnung des Wärmetransports sowie zur Erfassung der Auswirkung des Wärmeeintrags- bzw. Entzugs auf das geochemische Regime des Grundwassers ist eine Anordnung von Erdwärmesonden in Richtung der Grundwasserströmung von Vorteil. Die Gungl Bohrgesellschaft mbH ermöglichte es, die Anordnung der Bohrungen auf ihrem Firmengelände frei zu wählen. Dies erforderte zuerst die exakte Bestimmung der Grundwasserströmungsrichtung. Dazu wurden an drei Ecken des Firmengeländes je eine Bohrung abgeteuft und mit Erdwärmesonden versehen. Das mittig liegende standardmäßig verbaute Verpressrohr mit 32mm Durchmesser wurde durch die Bohrfirma durch eines mit 40mm ersetzt. Darin konnten Druckaufnehmer mit Datenlogger eingebaut werden. Nach 15 Tagen wurden die Daten der Druckaufnehmer ausgelesen. Die Neigung der daraus ermittelten Dreiecksfläche ergibt eine Grundwasserströmung in Richtung SSO mit einem Gradienten von 1,3%.



Abbildung 1 Druckaufnehmer mit Datenlogger zur kontinuierlichen Ermittlung von Piezometerhöhen in Beobachtungsbrunnen

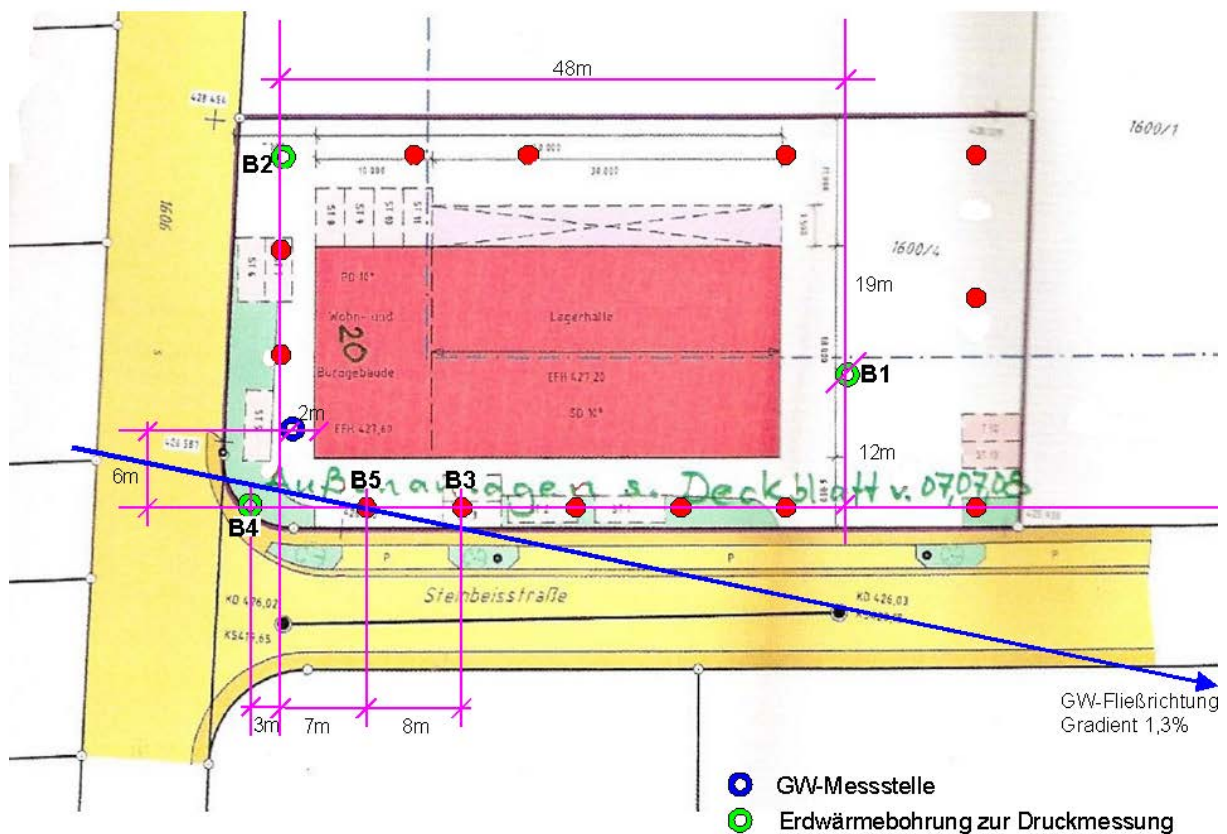


Abbildung 2 Lageplan der geplanten Erdwärmesonden auf dem Gungl Betriebsgelände

Zur optimalen Kalibrierung der numerischen Modelle und zum grundlegenden Verständnis der Prozesse war eine wie folgt beschriebene Anordnung der Bohrungen vorgesehen: Alle Bohrungen sollten in Strömungsrichtung auf einer Linie abgeteuft werden. Unterstrom der Wärmequelle sollten in 1m, 4m, 8m und 16m Entfernung je eine weitere Bohrung niedergebracht und in vertikaler Richtung äquidistant mit Temperatursensoren versehen werden. Nur die erste Bohrung sollte zunächst zur Warmegewinnung benutzt werden. Die drei Bohrungen im Abstand von 4, 8 und 16 m sollten erst nach Abschluss des Projektes zur Warmegewinnung verwendet werden. Während der Laufzeit des Projekts sollten sie lediglich als vertikal aufgelöste Messpunkte zur Ermittlung der Wärmeausbreitung dienen. Alle Bohrungen sollten mit einem Inklinometer vermessen werden, damit der horizontale Abstand zwischen Wärmeentnahme und Temperatursensor exakt erfasst und in der Berechnung der Wärmeausbreitung berücksichtigt werden konnte. Die vertikale Temperaturverteilung in dieser einen Meter



entfernten Bohrung gibt die initiale Temperatur der Erdwärmesonde wieder, die durch die Bentonitabdichtung in den Aquifer abgegeben wird.

Die im Juni 2009 abgeteuften Bohrungen B4 und B5 erschlossen eine Kluft mit Grundwasserzutritt in 74 m Tiefe. Bohrung B3 erschloss eine Kluft in 95m Tiefe. Die zu Projektbeginn bereits vorhandene Grundwassermessstelle, welche 5m von B4 entfernt ist, wies nur geringen Wasserzutritt in 45m Tiefe auf und hat somit keinen Anschluss an diese Kluft. Um den Wärmetransport nicht nur konduktiv sondern auch advektiv rechnen zu können, müssen alle mit Temperatursensoren ausgestatteten Bohrungen durch das Grundwasser angeströmt werden.

Zum Erreichen der Anordnung in einer Linie in Strömungsrichtung hätte die Erdwärmebohrung zwischen GW-Messstelle und B4 liegen müssen. Diese Bohrung und die in einem Meter entfernte Bohrung hätten verrohrt ausgebaut werden müssen, damit eine Inklinometermessung hätte durchgeführt werden können. B3 wurde versehentlich außerhalb der Linie gebohrt und mit einer Erdwärmesonde versehen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die durch B4 und B5 erschlossene Kluft, welche die zum Wärmetransport erforderliche Grundwasserströmung bereitstellt, beim Versatz der Erdwärmebohrung Richtung GW-Messstelle ebenfalls erschlossen würde, wurde als zu gering eingeschätzt, als dass dies die Kosten für die zusätzlichen Bohrungen plus Verrohrung gerechtfertigt hätte. Somit wurde in Übereinstimmung aller Projektpartner dieser Standort aus Kostengründen nicht mehr weiter verfolgt. Dazu kam, dass sich während der Bohrungen herausstellte, dass der Aufbau des Untergrunds in Renningen äußerst komplex ist und damit die Messwerte nur mit Mühe hätten interpretiert werden können.

### 1.1.3 Wohngebiet in Kilchberg

In einem Wohngebiet in Kilchberg südlich von Tübingen wurden im Dezember 2009 sieben Bohrungen im Direct Push-Verfahren zusammen mit den Kollegen der Universität Tübingen bzw. vom KIT abgeteuft. Die Sondierungen wurden mit 1-Zoll Rohren als Unterflurmessstelle ausgebaut, damit nach Beendigung des Messprogramms die Temperatursensoren wieder ausgebaut werden können. An diesem Standort handelt es sich um ein offenes Erdwärmesystem im Quartär. Das ungesättigte Quartär reicht von 2 m bis 5,2 m unter GOK, der gesättigte Quartärkörper von 5,2 m bis 8,0 m. Darunter befindet sich der grundwasserstauende Gipskeuper.

In diesem Wohngebiet ist eine größere Anzahl an Wärmebohrungen vorhanden, deshalb wurde 14 m oberstrom eines vorhandenen Schluckbrunnens eine zusätzliche Bohrung abgeteuft um das vertikale Temperaturprofil des zur Erdwärmebohrung fließenden Grundwassers zu erfassen. Stromabwärts des Schluckbrunnens sind drei Bohrungen in Strömungsrichtung in 13 m, 15 m und 21 m Entfernung sowie eine quer dazu verlaufende Reihe mit 3 Bohrungen in 37 m Entfernung. Diese drei Bohrungen sind jeweils 3 m voneinander entfernt. Alle Bohrungen sind bis auf das 8,5 m unter GOK liegenden Grundgebirge, dem Gipskeuper abgeteuft und erfassen vollständig den 3 m mächtigen Grundwasserleiter.

In den Bohrungen E2 und E3 wurden jeweils acht Pt1000-Sensoren eingebaut und an einen 16-kanaligen PT-1000 Temperatur-Datenlogger angeschlossen. In die Referenzmessstelle wurden ebenfalls Temperatursensoren in den gleichen Tiefen ü. NN eingebaut und mit einem Datenlogger versehen. Der Injektions- und Extraktionsbrunnen sollte ebenfalls mit einem einzigen Datenlogger ausgestattet werden. Aufgrund der räumlichen Distanz, die über eine Grundstücksgrenze und eine Einfahrt hinweg geht, wurde vom Grundstücksbesitzer mit dem Extraktionsbrunnen ein mehrjähriger Einbau von Temperatursensoren mit Kabelführung über sein Grundstück untersagt. Deshalb wurde nur der Schluckbrunnen mit 8 Temperatursensoren und Datenlogger ausgestattet.

Die jeweils 8 Temperatursensoren je Bohrung zur Erfassung der Ausbreitung des vertikalen Temperaturprofils liegen im ungesättigten Quartär in 4m und 5m und im gesättigten Quartär in 5,5m, 6,0m, 6,5m, 7,0m, 7,5m und 8m Tiefe. Zur besseren Vergleichbarkeit immer in gleicher Tiefe ü. NN.



Abbildung 3: Lage der Sonden in Kilchberg

Die Lage der Bohrungen wurde entsprechend früherer Untersuchungen, bei der die Strömungsrichtung von Südost nach Nordwest verläuft festgelegt (siehe Abbildung 3). Diese Strömungsrichtung von Südost nach Nordwest konnte mittels Temperaturmessungen nicht verifiziert werden. Wiederholt durchgeführte Messungen der Piezometerhöhe haben die Strömungsrichtung von Südwest nach Nordost mit einigen Schwankungen bestätigt. Ein bisher unbeachtetes Stauwerk in der Nähe des Wohngebiets Kilchberg beeinflusst die Strö-

mungsrichtung in diesem Testfeld durch den gut durchlässigen Grundwasserleiter enorm (Dipl.-Arbeit von Marc Berner, Universität Tübingen, siehe Abbildung 4).

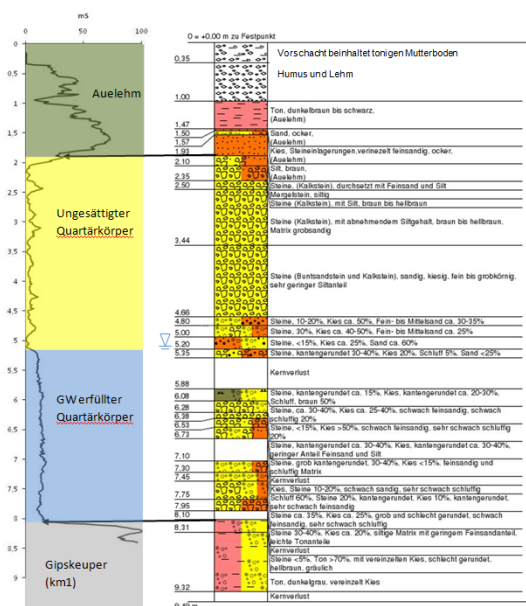


Abbildung 4: Aufbau des Untergrunds

brunnens abzuteufen wurde deshalb verworfen. Eine zusätzliche Messstelle zwischen dem Schluckbrunnen und E2 wurde vom Besitzer des Grundstücks nicht genehmigt. Die Messstelle mit Datenlogger am Rand des Grundstücks auf der Straße abzuteufen birgt wie die Referenzmessstelle E1 die Gefahr von Vandalismusschäden.

### 1.1.4 Betriebsgelände Bohrfirma Herrenknecht

Im Januar 2010 wurde auf dem Betriebsgelände der Firma Herrenknecht im Rheintal mit den Arbeiten an einem Erdwärmesondenfeld mit 25 Erdwärmesonden begonnen. Während der Arbeiten konnte noch mit dem Eigentümer über eine Zusammenarbeit verhandelt werden. An der letzten abgeteufte Sonde konnten dann im Februar 2010 noch 16 Stück Pt1000 Temperatursensoren an der Erdwärmesonde bis in 90m Tiefe äquidistant verteilt angebracht und eingebaut werden. Anschließend Verhandlungen mit Eigentümer bzgl. Verbleibs der Messstellen nach Projektende blieben bis dato ergebnislos, so dass diese EWS nicht mit einem Datenlogger versehen werden konnte. Auch die mündliche Zusage, im Abstrom dieser Erdwärmesonde drei weitere Bohrungen zur vertikal aufgelösten Temperaturerfassung abzuteufen scheiterte an der zeitnahen Übereinstimmung in Bezug auf die rechtlichen Randbedingungen. Mitte des Jahres 2010 wurde dann dieser Standort zugunsten des Standortes Bau-Grund Süd in Bad Wurzach aufgegeben.

Die gemessenen Temperaturdaten an diesem Standort sind wegen mehrfachen Defekts zweier Datenlogger durch Kälte und / oder Vandalismus nicht interpretierbar. Zwei der drei Datenlogger sind nicht mehr reparabel. Die gemessenen Temperaturdaten an E2 und E3 zeigen keine signifikante Erniedrigung der Grundwassertemperatur während des Heizbetriebs. Dies liegt an der Veränderung der Strömungsrichtung des Grundwassers von Nord-West nach Nord-Ost. Einzelmessungen der Temperatur in den Messstellen E5, E6, E7 zeigten aufgrund der Entfernung und der veränderten Strömungsrichtung ebenfalls keine Temperaturveränderungen, sie werden von der sich ausbreitenden Wärmefahne nicht erfasst

bzw. nicht erreicht. Der Plan östlich von E7 weitere Messstellen im direkten Abstrom des Schluck-

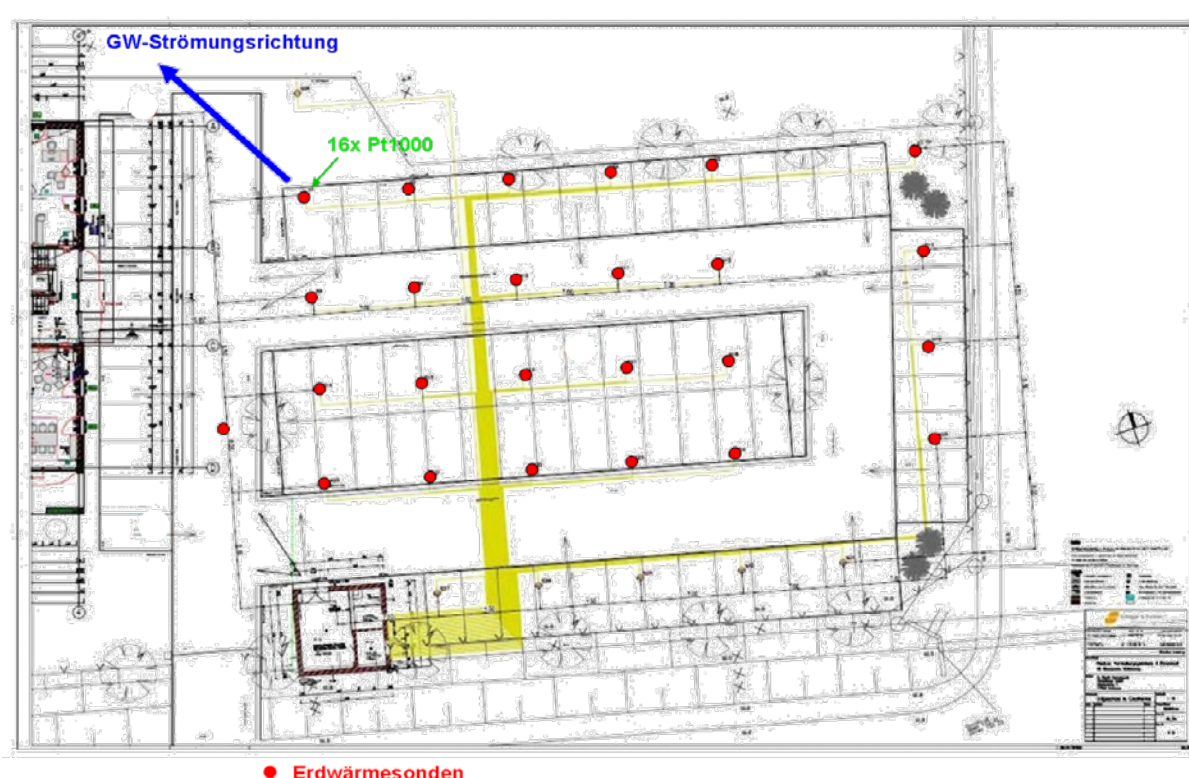


Abbildung 5 Lage der abgeteufte Erdwärmesonden auf dem Parkplatz der Bohrfirma Herrenknecht

Die Kabel der 16 Temperatursensoren, die an einer Erdwärmesonde äquidistant bis in 90m Tiefe angebracht wurden, sind unter dem Parkplatz hindurch bis in einen Technikraum verlegt (Abbildung 5, unten am Ende der gelben Linien). Abstromige Temperaturmessungen sind an diesem Standort nicht möglich, es besteht aber im Falle einer Einigung mit dem Betreiber weiterhin die Möglichkeit, das vertikale Temperaturprofil einer sich in Betrieb befindlichen Erdwärmesonde zu erfassen. Dies ist deshalb interessant, da als Faustformel 50W/m Entzugsleistung für die Dimensionierung einer EWS verwendet werden, dieser Wert sich aber aufgrund des hohen Temperaturgradienten am oberen Eintritt der EWS in den Boden gravierend bis zur Endteufe ändert. Die höchste Entzugsleistung ist folglich im oberen Bereich der EWS, während sie mit zunehmender Tiefe stark abnimmt.



Abbildung 6 Eingebaute Erdwärmesonde auf dem Parkplatz der Bohrfirma (links) und Technikraum (rechts)

### 1.1.5 Bad Wurzach

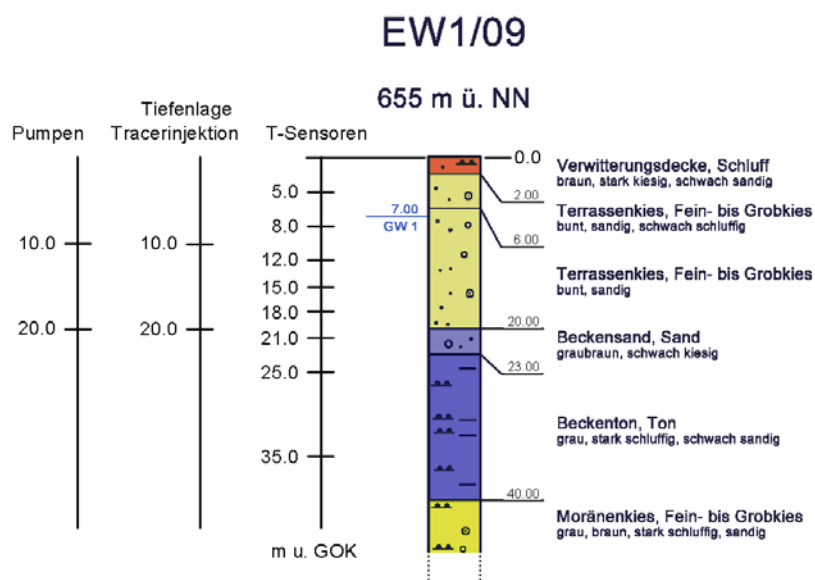
Nachdem sich schon im Frühjahr 2010 abzeichnete, dass der Standort Herrenknecht doch nicht für dieses Projekt verwendet werden kann, wurde mit den Verhandlungen mit der Firma BauGrund Süd begonnen. Diese war sofort bereit, auf ihrem Firmengelände im Abstrom der vorhandenen und seit 2008 in Betrieb befindlichen Erdwärmesonde fünf weitere Bohrungen speziell für dieses Projekt abzuteufen. Drei davon dienen zur Grundwasserprobennahme in 10m und 20m Tiefe. Eine von diesen fünf Messstellen wurde oberstrom als ungestörte Referenz gebohrt, die ebenfalls der Temperaturmessung und der Grundwasserprobennahme dient.

Geologie des Standorts:

Der Standort liegt in einem Molassebecken, der Grundwasserleiter ist feiner bis grober Terrassenkies, der Grundwasserstauer, ein Beckenton steht zwischen 25 m bis 40 m Tiefe an, darunter folgt feiner bis grober Moränenkies. Die vorhandene Erdwärmesonde ist bis in 100m Tiefe abgeteuft. Messtechnisch erfasst wird aber nur der obere Grundwasserleiter bis 35m Tiefe unter GOK.

<b>BauGrund Süd</b> ErdEnergie Management GmbH Maybachstraße 6 88410 Bad Wurzach	<b>Erdwärmebohrungen BGS</b> 88410 Bad Wurzach	AZ
		Anlage Nr. 3.1

Maßstab d. H. 1:600



**Abbildung 7 Geologisches Profil mit Tiefenlage der eingebauten Pt100, Pumpen und Schläuchen für die Tracerzugabe**

Strömungsrichtung des Grundwassers:

Zur Bestimmung der Strömungsrichtung des Grundwassers wurden in drei Grundwassermessstellen (Abbildung 8) in unmittelbarer Nähe zum Standort im Juni 2010 Datenlogger

(Abbildung 1) zur kontinuierlichen Druckmessung eingebaut. Die Daten wurden in regelmäßigen Abständen ausgelesen und mittels hydraulischer Triangulation ausgewertet.



**Abbildung 8 Messstellen M1 (oben), M2 (mitte) und M3 (unten) zur kontinuierlichen Druckmessung**

Die Datenerfassung lief bis 2012 um die zeitliche Schwankung der Strömungsrichtung zuverlässig und eindeutig interpretierbar zu erfassen. Änderungen in der gemessenen Temperaturentbreitung im Abstrom der EWS lassen sich somit nachvollziehen. Recherchierte Daten aus früheren Abstichmessungen und Pumpversuchen ergaben eine Strömungsrichtung von 7° West. Durchgeführte Messungen kurz vor Beginn der Bohrarbeiten ergaben eine Strömungsrichtung von 7° Ost.

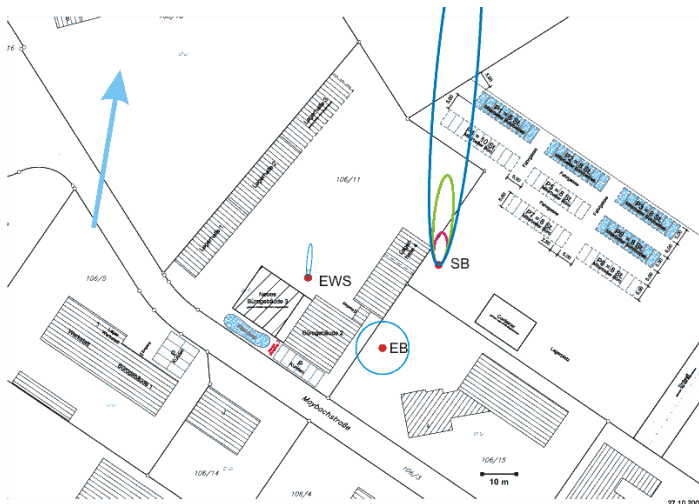


Abbildung 9 Lageplan mit GW-Richtung aus Bestandsdaten

Die somit bei Bohrbeginn bekannte Strömungsrichtung unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen, die zwischen  $7^\circ$  Ost und  $7^\circ$  West variiert. Die während der Projektlaufzeit ermittelte Strömungsrichtung lag im April 2010 bei  $2^\circ$  Ost und im September 2012 bei  $15^\circ$  Ost, eine Strömung in nordwestlicher Richtung, wie in der Literatur angegeben, konnte bisher nie gemessen werden. Die Entscheidung, die Bohrungen für die Temperaturmessung im Abstrom der EWS in östlicher Richtung abzuteufen, erwies sich im Nachhinein als richtig (Abbildung 14).

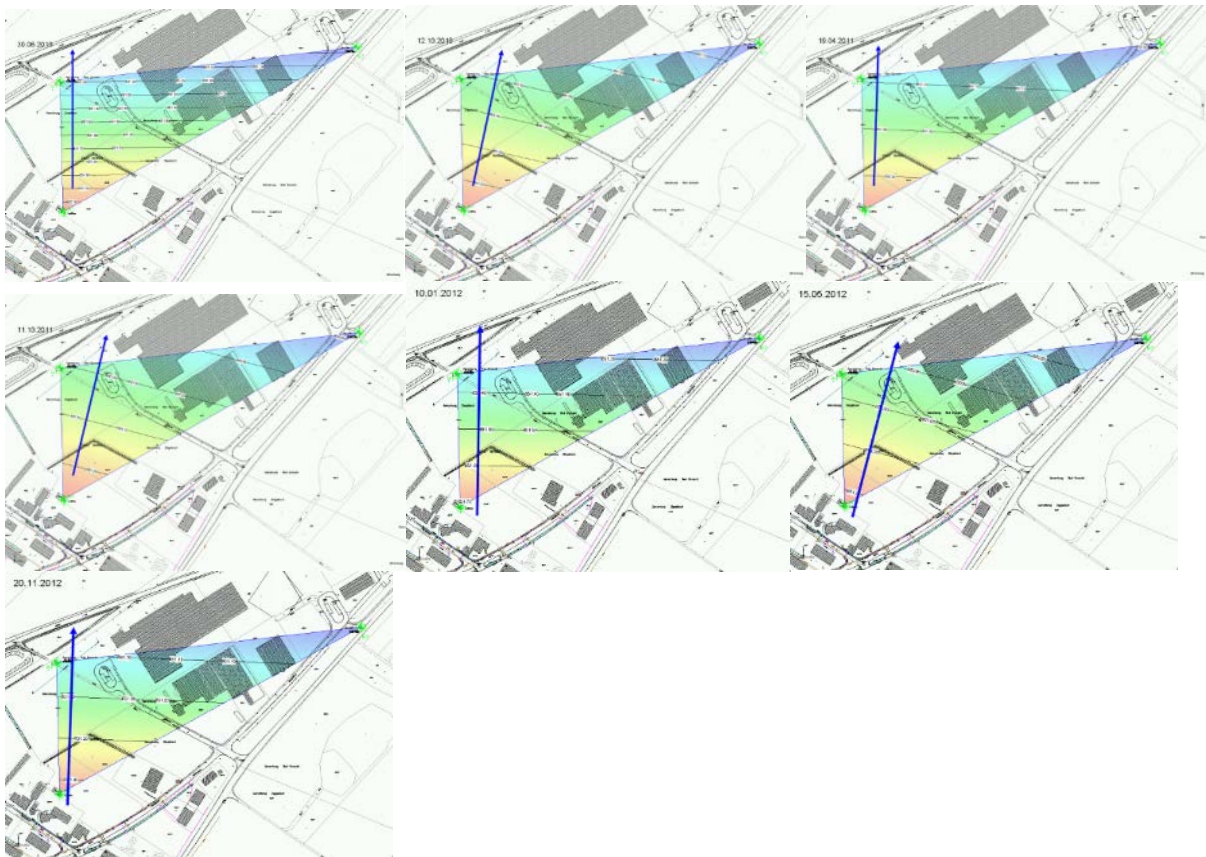


Abbildung 10 Durch Messung der Piezometerhöhe ermittelte GW-Richtung am 30.06.2010, 12.10.2010, 19.04.2011, 11.10.2011, 10.01.2012, 15.05.2012 und 20.11.2012

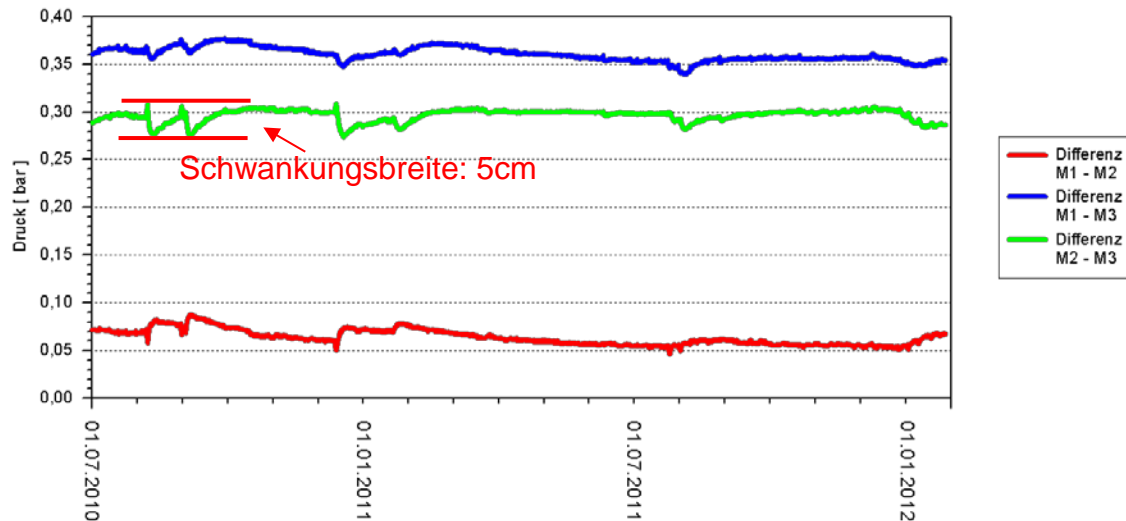
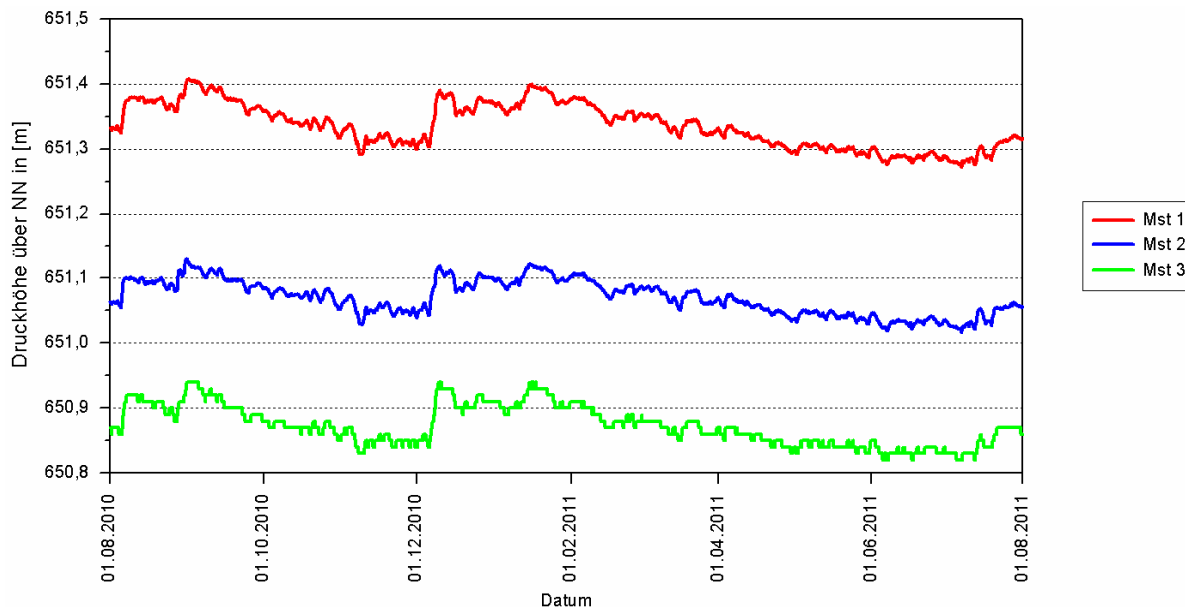


Abbildung 11 Zeitreihe der kontinuierlichen Druckmessung in unmittelbarer Nähe zum Standort

Die kontinuierliche Messung der Piezometerhöhe mittels Druckmessung zeigt maximale Schwankungen pro Messstelle von 64 cm. Subtrahiert man die Absolutwerte der in den drei Messstellen ermittelten Werte voneinander (Abbildung 11), so zeigt sich eine Schwankungsbreite von max. 5 mbar bzw. 5 cm der einzelnen Piezometerdruckhöhen zueinander. Diese Messungen untermauern die durchgeführten Stichtagsmessungen in Abbildung 10 und damit



die ermittelten Änderungen der Grundwasserströmungsrichtung von 0 – 15° Ost. Stichtagsmessungen können auch zufälligerweise gerade die einmaligen Ereignisse erfassen (z.B. Dezember 2010 oder August 2011, Abbildung 11 und Abbildung 12), wodurch Fehlinterpretationen der Strömungsrichtung möglich sind.



**Abbildung 12** Ausschnitt aus der kontinuierlichen Druckmessung, Darstellung absoluter Drücke

Der Ausschnitt aus der kontinuierlichen Druckmessung zeigt die Reaktion der Druckspiegelschwankung auf lokale Regenereignisse, die in allen drei Messstellen parallel verlaufen und somit keinen nennenswerten Einfluss auf die Strömungsrichtung des Grundwassers gezeigt haben.

Datenerfassung:



**Abbildung 13** Datenerfassung zur Temperaturmessung in 4 Brunnen im Abstrom der EWS, einem Brunnen oberstrom, zwei Koaxialsonden, einer Helix, Zu- und Rücklauf der EWS und für den Wärmemengenzähler

Die Datenerfassung wurde zusammen mit der Firma Wachendorff Prozesstechnik konzipiert und zusammengestellt. Die modularen Messumformer für PT100-Sensoren kommunizieren mittels TCP/IP-Protokoll über Ethernet, sind wie in der industriellen Prozesstechnik üblich mittels freier Variablendeklaration flexibel konfigurierbar und vor allem kalibrierbar und senden ihre Daten an einen G3-Webserver. Die eingestellte IP-Adresse lautet: 192.168.88.101. Die Daten sind weltweit via vpn-Verbindung vom ftp-Server abrufbar oder online einsehbar. Mittels Drei-Punkt-Kalibrierung konnte die Toleranz zwischen den einzelnen eingebauten Sensoren auf max. +/- 0,05 K begrenzt werden, bei einer typischen Abweichung von der Absoluttemperatur von +/- 0,5 K, welche hier aber keine Rolle spielt, da es um Temperaturdifferenzen geht.

Von der Datenerfassung werden die vertikale Temperaturverteilung der Bohrungen B0, B1, B2, B3, B4, Koaxialsonde 1, Koaxialsonde 3, Helix (B6), Vor- und Rücklauftemperatur der EWS, Volumenstrom durch die EWS und Leistung der EWS bzw. Koaxialsonde erfasst und kontinuierlich aufgezeichnet.

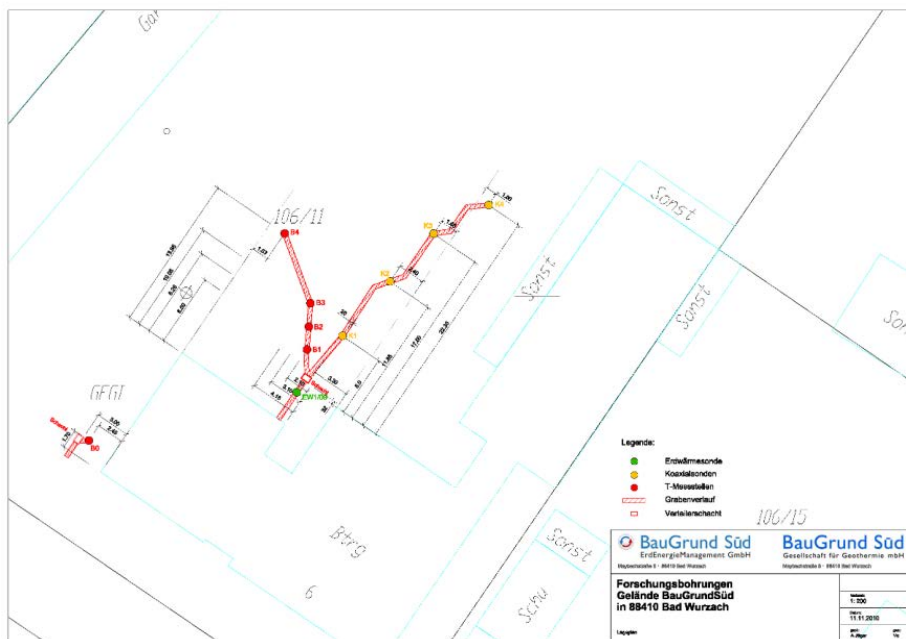


Abbildung 14 Eingemessener Sonden Plan

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde die Lage der Bohrungen festgelegt. Die Abstände unterstrom der EWS sollten 2m, 4m, 6m und 10m sein. Bei den Bohrarbeiten war die Erdwärmesonde weder zugänglich noch sichtbar, so dass der tatsächliche Abstand von B1 zur EWS nun 3,90m beträgt. B1, B2 und B3 liegen jeweils 2m auseinander, B4 wurde im Abstand von 6m zu B3 gebohrt. Da die Richtung der Grundwasserströmung laut Literaturdaten schwankt, liegen die Bohrungen für die Temperaturmessung nicht in einer Linie, sondern in leichtem Zick-Zack, um auch bei schwankender Strömungsrichtung die Wärmefähne zu erfassen. Dabei wurde die rechnerisch erwartete Dispersion berücksichtigt, damit trotzdem alle Messstellen ein Temperatursignal erhalten. Die Tiefenlage der einzelnen Temperatursensoren ist für die analytische und numerische Modellierung extrem wichtig und wurde folgendermaßen abgestimmt: Ein Sensor in der ungesättigten Zone, 4 Sensoren in der gesät-

tigten Zone, ein Sensor im Beckensand und zwei Sensoren im Grundwasserstauer, dem Beckenton. Beim Bohren der Messstellen zeigte sich, dass durch die sehr gute Durchlässigkeit des Aquifers binnen Minuten Feinsand in die Messstellen geschwemmt wurde. Alle Messstellen wurden vor dem Einbau der T-Sensoren in die Filterrohre mit Wasser bei 10 bar Überdruck gespült. Trotzdem ist es nicht gelungen, in B0 und B4 den untersten Sensor bis auf 35m zu positionieren.

In Messstellen B0, B1 und B4 wurden zusätzlich je zwei pneumatisch betriebene Doppelventilpumpen von der Firma imw, Tübingen, in 10m und 20m Tiefe eingebaut. Die Oberstrommessstelle B0 ist außerdem mit zwei 5mm PE-Schläuchen ausgestattet, um bei Bedarf in zwei verschiedenen Tiefen einen Tracer zugeben zu können.

Um thermisch induzierte Vertikalströmung entlang den Sensoren innerhalb des Filterrohres zu verhindern, wurden alle Messstellen nach Einbau der Sensoren und Pumpen mit auf die Durchlässigkeit des Aquifers abgestimmtem Feinsand verfüllt.

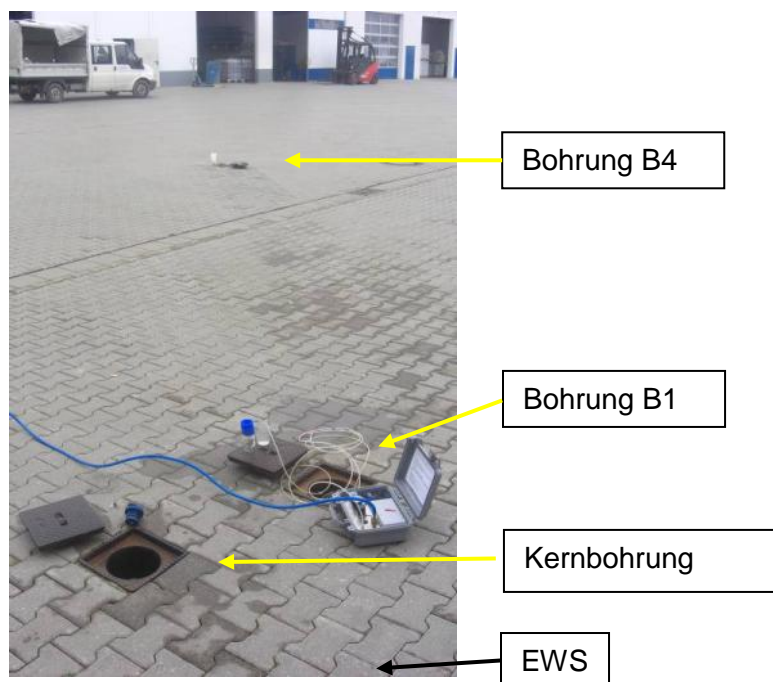


Abbildung 15 Lage der Kernbohrung vom 10.01.2012

Am 10.01.2012 wurde 2 m nord-westlich der EWS, im nicht durch den direkten Abstrom der EWS erfassten Bereich eine Kernbohrung durchgeführt. Ziel war erstens, exakte hydraulische und thermische Parameter direkt am Standort zu gewinnen und zweitens für die Interpretation der geochemischen Parameter eine durch den Wärme-/Kälteeintrag ungestörte Referenz für die mikrobielle Population zu erhalten. Die Auswertung der Mikrobiologie erfolgte durch Partner vom Institute of Groundwater Ecology, AG Mikrobielle Ökologie, Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH).

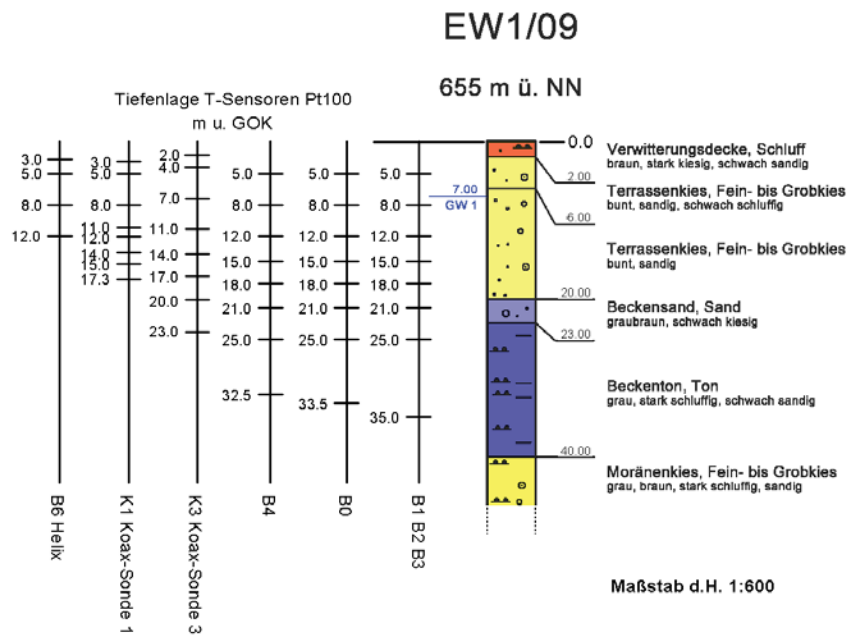


Abbildung 16 Tiefenlage aller Temperatursensoren in m u. GOK

Temperaturmessungen:

Die Zyklen der Erdwärmesonde im Heiz- und Kühlbetrieb lassen sich aus den gemessenen Temperaturen des Vor- und Rücklaufs zur Wärmepumpe erkennen. In der Zeit zwischen dem 07.02.2012 und 18.06.2012 wurde die Erdwärmesonde abgestellt und das Betriebsgebäude mit der Koaxialsonde beheizt. Ab 19.06.2012 wurde wieder auf die Erdwärmesonde zur Gebäudekühlung umgestellt. Während des Betriebs der Koaxialsonde wurden keine Grundwasserproben entnommen, da die Probenahmestellen nicht im Abstrom der Koaxialsonde liegen.

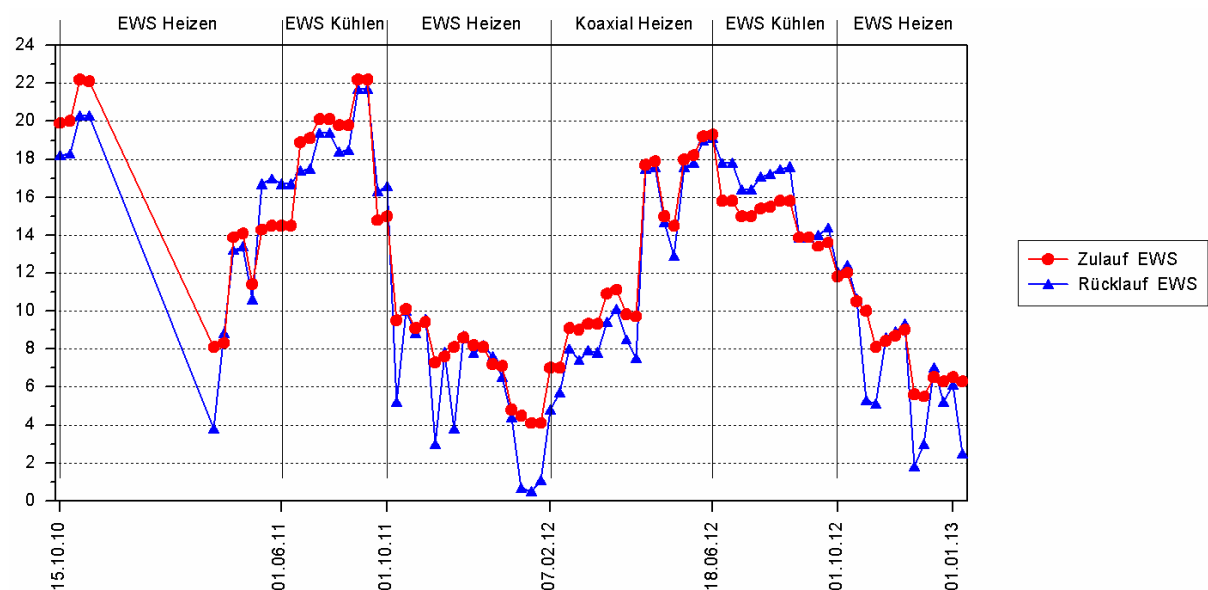


Abbildung 17 Betriebszyklen der Erdwärmesonde

Nachfolgend ist die in den Messstellen B1 bis B4 vertikal aufgelöste gemessene Temperaturverteilung im Untergrund im Abstrom der Erdwärmesonde während der Heizperiode (Abbildung 18 und Abbildung 19) und im Übergang zur Gebäudekühlung im Sommer 2011 (Abbildung 20 und Abbildung 21) zu sehen. Man erkennt die relativ geringe Ausdehnung der Wärmefahnen und die relativ geringen Temperaturdifferenzen, die deutlich unter 1 Kelvin liegen

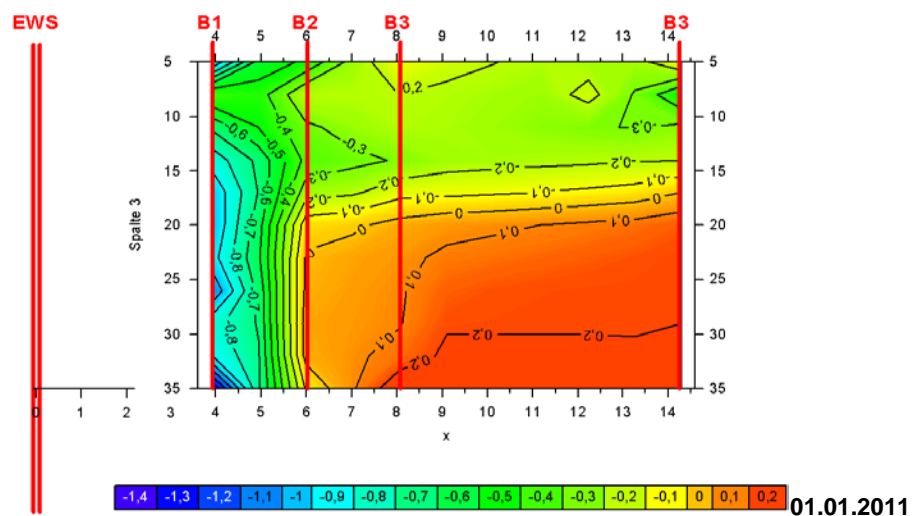
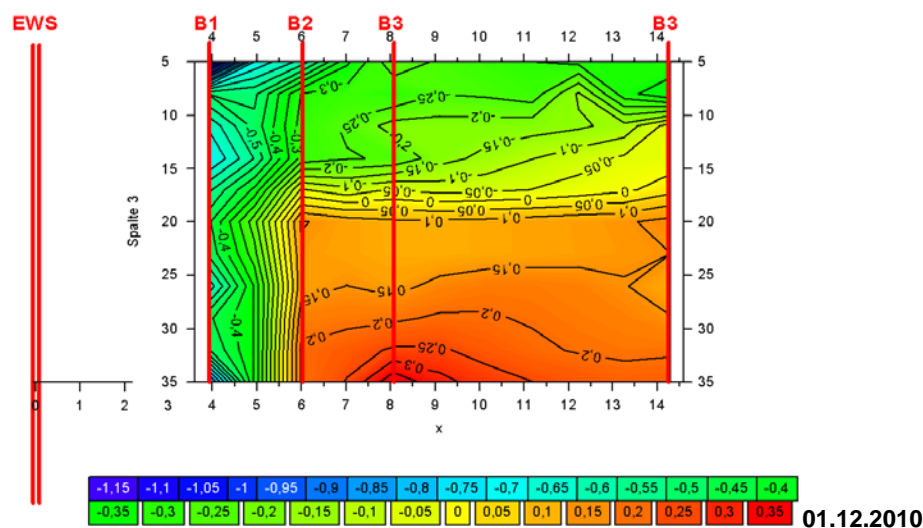
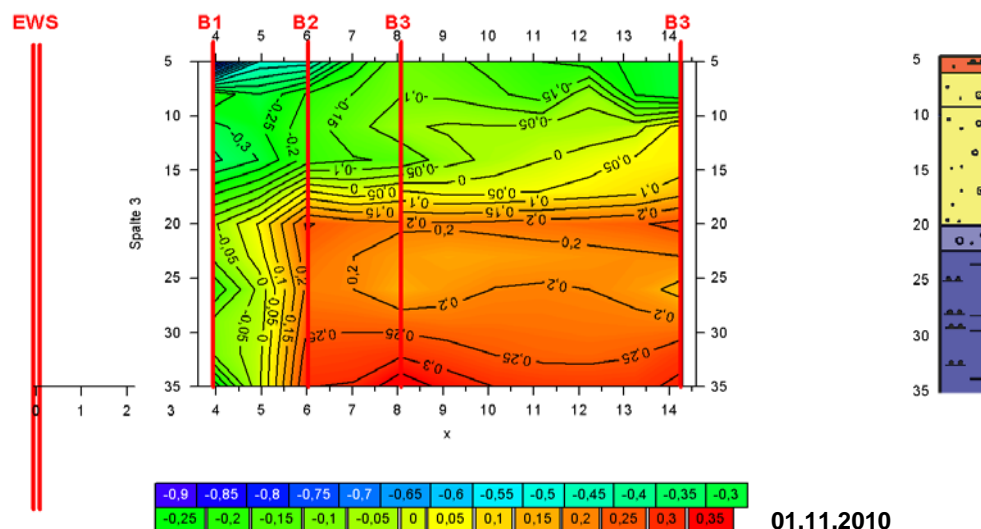


Abbildung 18 Messwerte nach Inbetriebnahme der EWS-Sonde zu Heizzwecken (01.11.2010, 01.12.2010, 01.01.2011) in Strömungsrichtung unterstrom der EWS

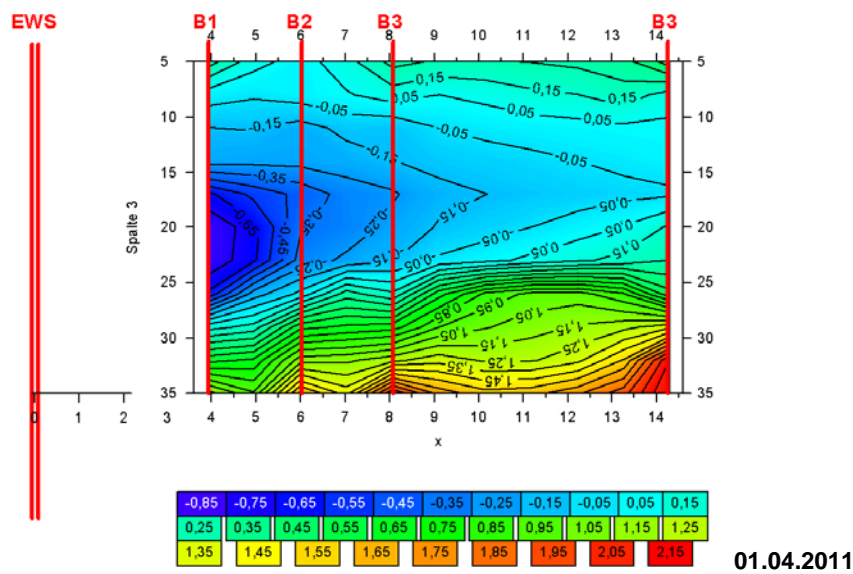
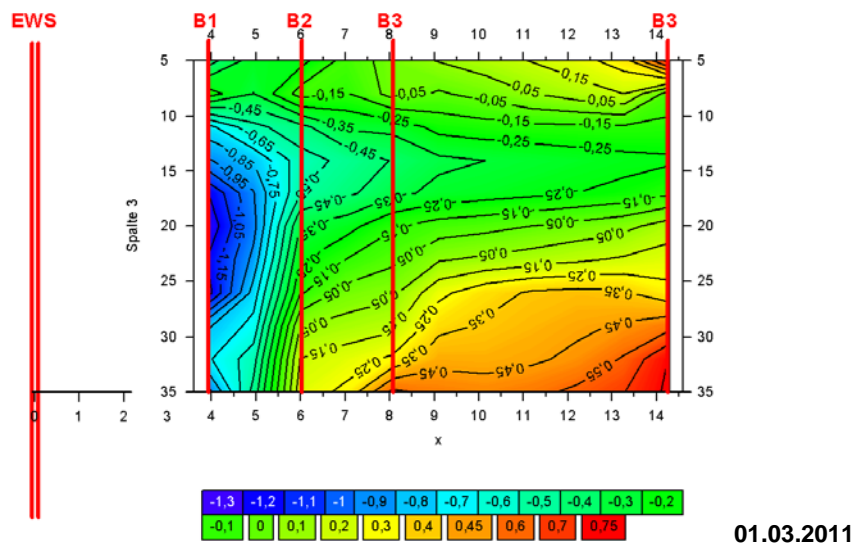
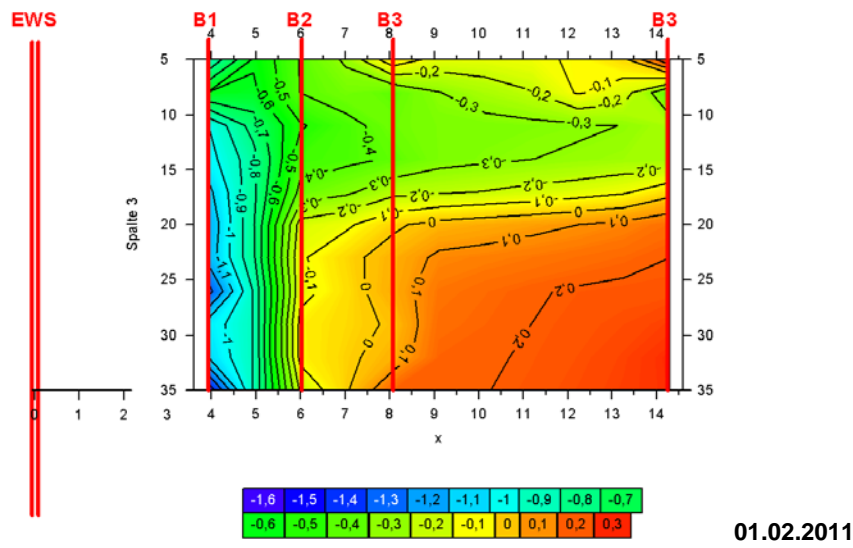


Abbildung 19 Messwerte nach Inbetriebnahme der EWS-Sonde zu Heizzwecken (01.02.2011, 01.03.2011, 01.04.2011) in Strömungsrichtung unterstrom der EWS

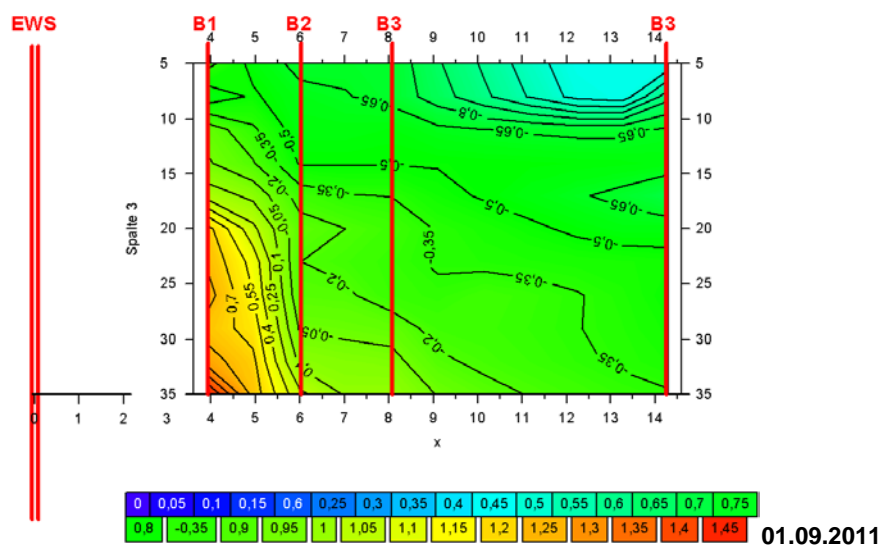
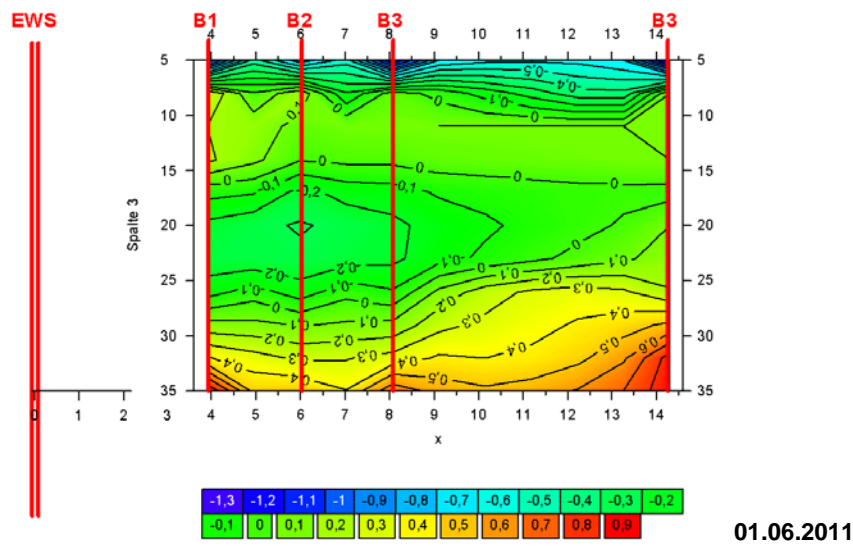
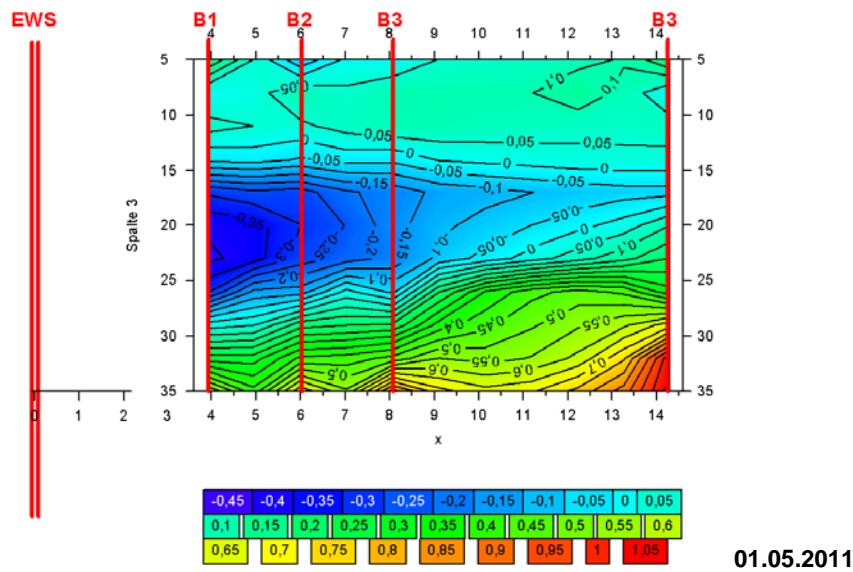


Abbildung 20 Messwerte nach Inbetriebnahme der EWS-Sonde zu Heizzwecken (01.05.2011, 01.06.2011, 01.09.2011) in Strömungsrichtung unterstrom der EWS



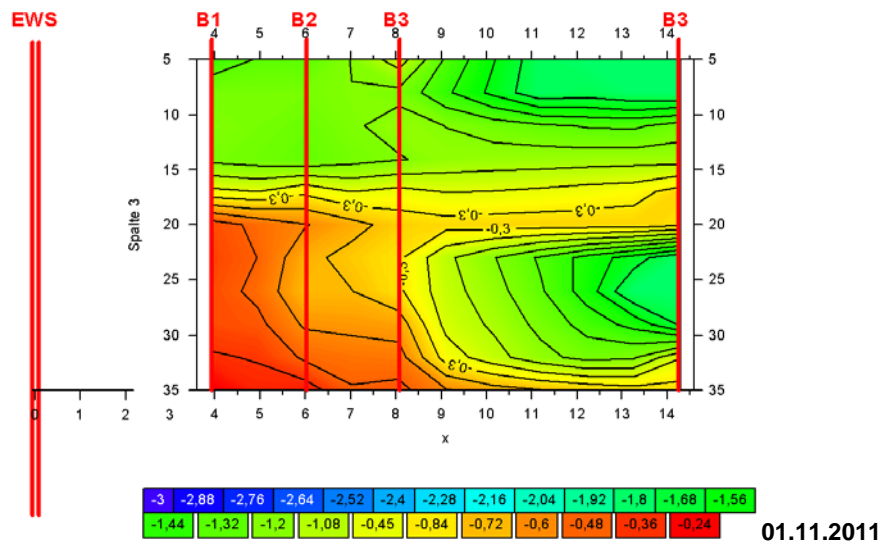


Abbildung 21 Messwerte nach Inbetriebnahme der EWS-Sonde zu Heizzwecken 01.11.2011) in Strömungsrichtung unterstrom der EWS

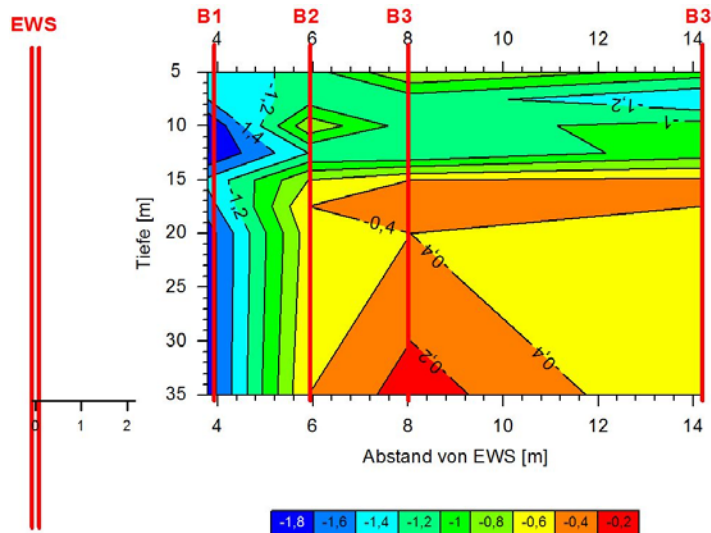


Abbildung 22: Temperaturverteilung am 1.1.2012 (Heizperiode)

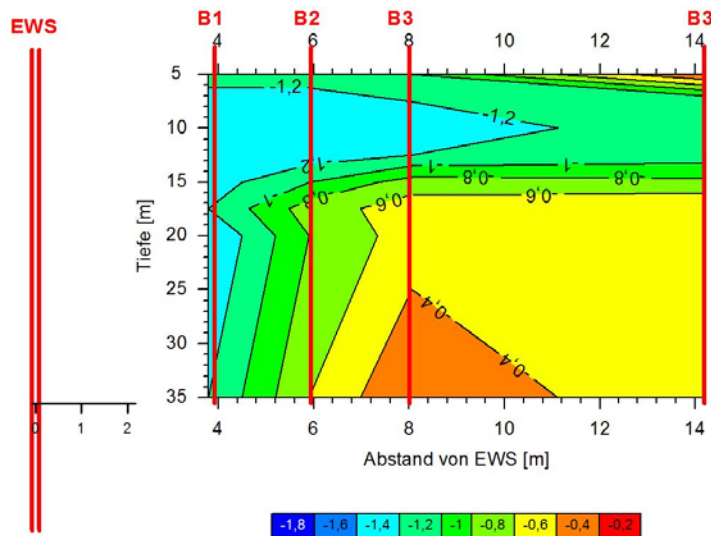


Abbildung 23: Temperaturverteilung am 1.3.2012 (Heizperiode)



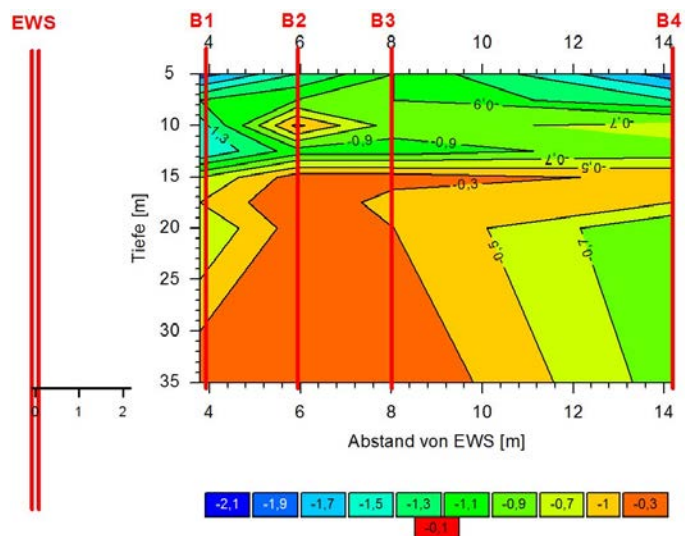


Abbildung 27: Temperaturverteilung am 1.11.2012 (Beginn der Heizperiode)

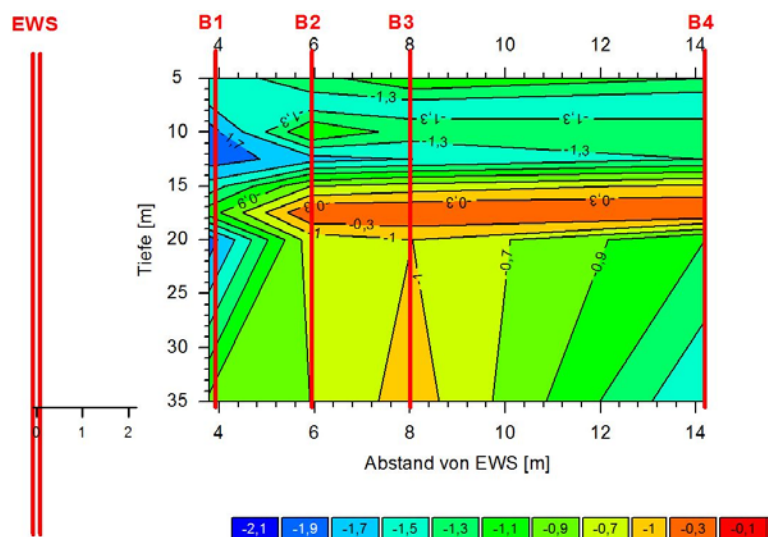


Abbildung 28: Temperaturverteilung am 1.1.2013 (Heizperiode)

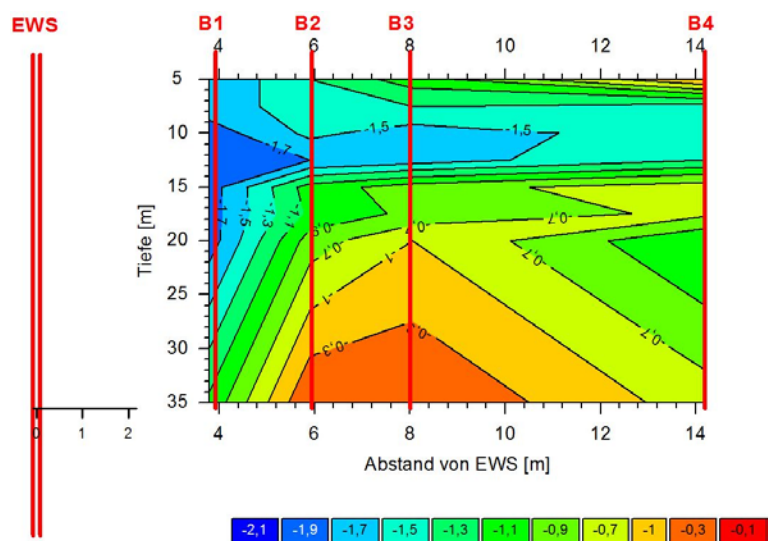


Abbildung 29: Temperaturverteilung am 1.3.2013 (Heizperiode)

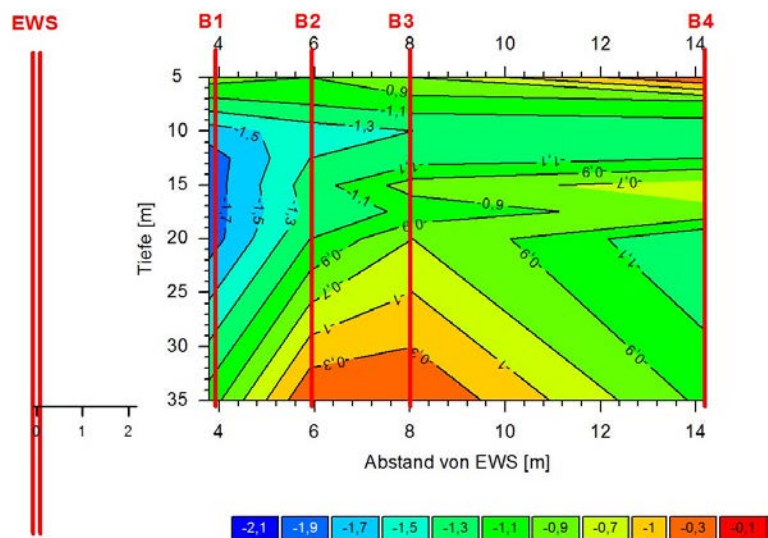


Abbildung 30: Temperaturverteilung am 1.5.2013 (Ende der Heizperiode)

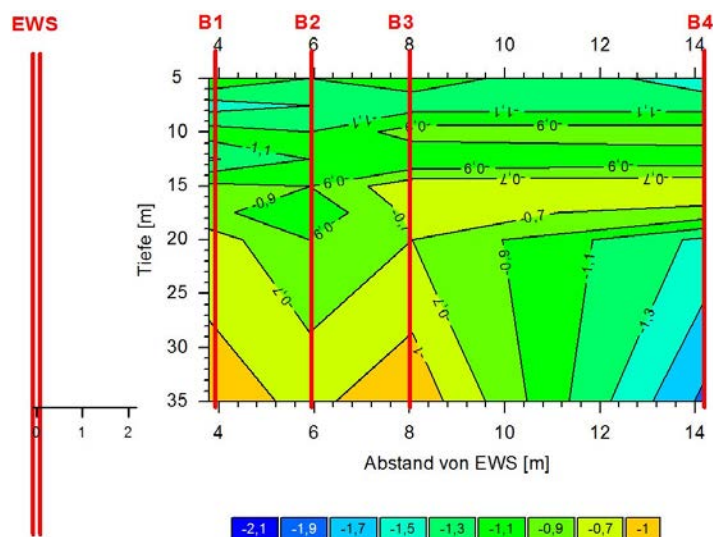


Abbildung 31: Temperaturverteilung am 1.7.2013 (Beginn der Kühlperiode)

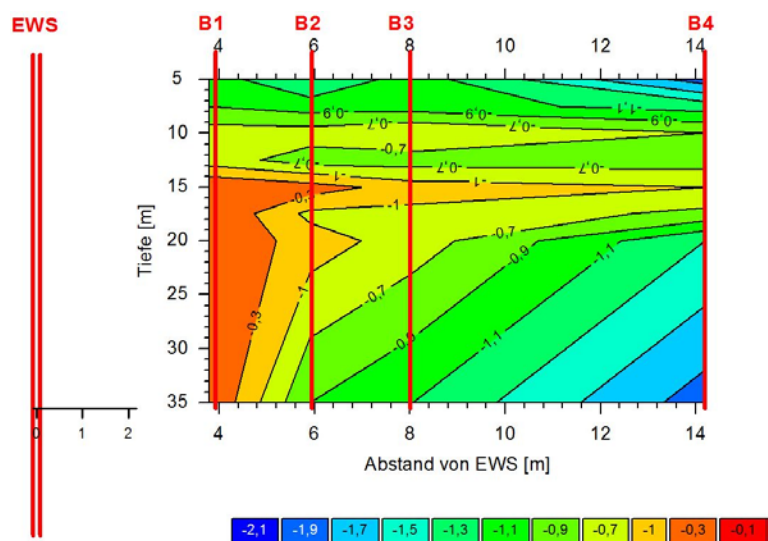


Abbildung 32: Temperaturverteilung am 1.9.2013 (Ende der Heizperiode)

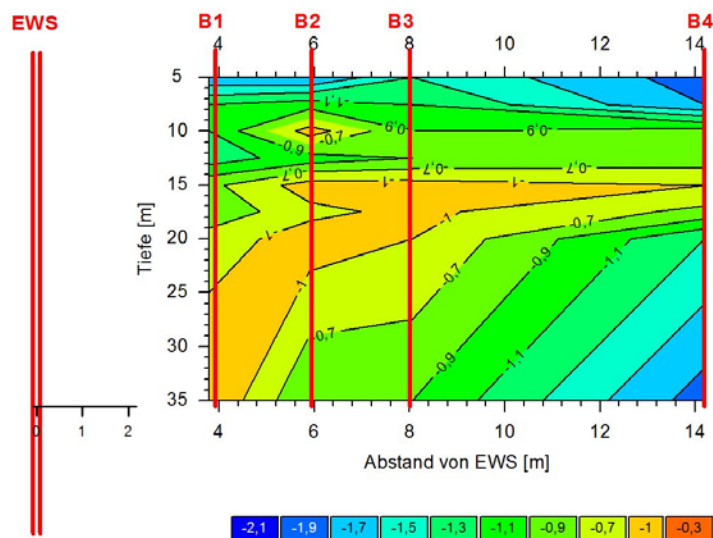


Abbildung 33: Temperaturverteilung am 1.11.2013 (Beginn der Heizperiode)

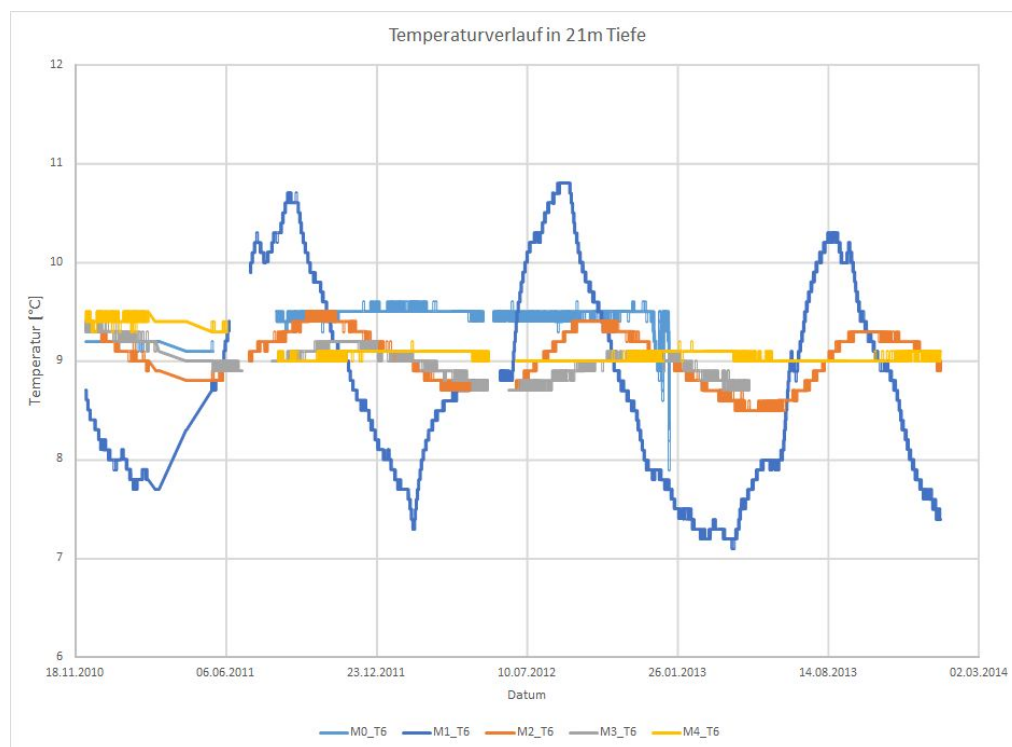


Abbildung 34 Zeitpunkt der Ankunft der Kälte-/Wärmefront und Größe der Temperaturveränderung an den Messstellen M1 bis M4 an Sensor T6 (21m Tiefe)

Betrachtet man exemplarisch die gemessenen Temperaturzeitreihen an den Messstellen B1 bis B4 im Abstrom der EWS so erkennt man an der Amplitude der Zeitreihe die Größe der Temperaturveränderung in 4 m, 6 m, 8 m und 14 m Entfernung die durch die Kälte- bzw. Wärmefahne hervorgerufen wird. In 4 m Entfernung wird eine maximale Änderung von 3,3 K gemessen, in 14 m Entfernung kann im Jahr 2011 nur noch eine Veränderung von max. 0,4 K gemessen werden, wobei das Signal in 2012 und 2013 keine signifikante Änderung mehr zeigt.

### Grundwasserprobennahme:

Eine Temperaturveränderung im Grundwasser bewirkt Änderungen im chemischen Gleichgewicht von Wasserinhaltsstoffen und der Bodenmatrix, die mikrobielle Reaktionsrate steigt mit zunehmender Temperatur. Wird durch eine Erdwärmesonde die Temperatur des Grundwassers erhöht oder erniedrigt, kann durch regelmäßige, über einen längeren Zeitraum durchgeführte Probennahmen und deren Analyse auf geeignete Parameter auf Änderungen im chemischen und mikrobiellen Milieu geschlossen werden. Am Standort Bad Wurzach werden deshalb folgende Parameter als Indikatoren für mikrobielle Vorgänge untersucht:

- p und m-Wert
- Anionen und Kationen
- NPOC und TIC
- Schwermetalle

Der p- und m-Wert stellen ein Maß für die Carbonatspezies dar (Carbonat, Hydrogencarbonat sowie freie Kohlensäure), deren Konzentration und deren Verhältnis sich durch mikrobielle Aktivität verändern. DOC und DIC sind Indikatoren für den für die Mikroorganismen verwertbaren organischen Kohlenstoff (DOC). Die Konzentration von bestimmten Anionen und Kationen, dabei speziell die Stickstoffspezies verändern sich ebenfalls bei mikrobiellen Vorgängen. Veränderungen der Konzentrationen an Schwermetallen können Indikatoren für die Änderungen des Redoxpotentials darstellen, welches durch Abbauprozesse beeinflusst werden kann.



**Abbildung 35 Grundwasserprobennahme mit den eingebauten pneumatischen Pumpen**

Die Grundwasserprobennahme erfolgt mittels verloren eingebauten pneumatischen Doppelventilpumpen in 10m und 20m Tiefe. Betrieben werden sie mit Stickstoff, da dieser als inertes Gas keine Veränderungen des Grundwasserchemismus hervorruft (Abbildung 35).

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen die Ergebnisse der Grundwasserprobennahme von März 2011 bis November 2013, also einen Zeitraum von ca. 2,5 Jahren. Die jeweiligen Heiz- und Kühlzyklen sind über den Grafiken rot (Heizen) und blau (Kühlen) markiert.

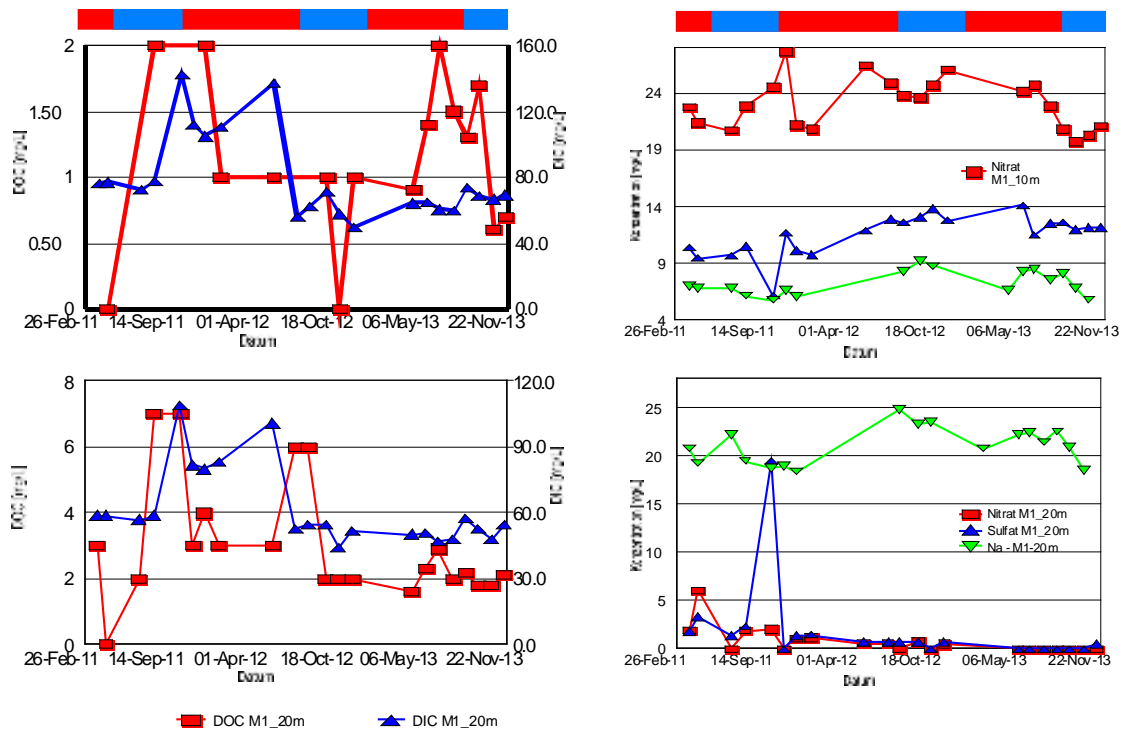


Abbildung 36: Analyseergebnisse von DOC/DIC- und der Ionen Nitrat, sulfat und Natrium Messstelle M1, 3,90m unterstrom der EWS in 10m (oben) und 20m (unten) Tiefe (Heizphase rot, Kühlphase blau)

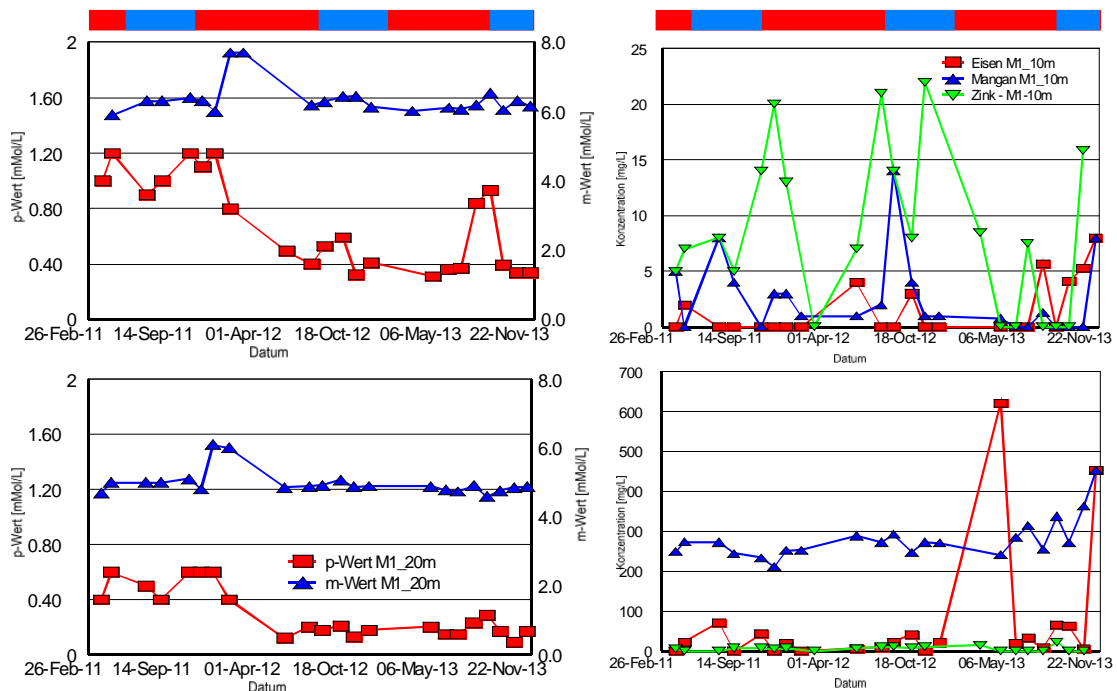


Abbildung 37: Analyseergebnisse p und m-Wert sowie von Schwermetallen an Messstelle M1 in 10m und 20m Tiefe

Die hier dargestellten ausgewählten Analysedaten sind in 3,90m Abstand zur EWS also sehr nahe im Abstrom der EWS entnommene Proben. An diesen Grundwasserproben sollten sich Veränderungen durch den Wärme-/Kälteeintrag durch die EWS am stärksten bemerkbar machen. Dargestellt sind die Parameter, bei denen am ehesten ein Zusammenhang mit dem Betrieb der Geothermieanlage zu erwarten sein sollte (m/p-Wert, redoxsensitive Ionen, Kohlenstoffspezies) oder die größeren Schwankungen zeigten (Zink). Die ersten Proben sind Ende März 2011 entnommen worden. Deutlich zu erkennen sind Unterschiede in der Wasserbeschaffenheit in 10m und in 20m Tiefe. Nach zweimaligem Umstellen von Heizbetrieb auf Kühlbetrieb und wieder zurück lassen sich keine Auswirkungen auf den Grundwasserchemismus und die Mikrobiologie erkennen. Über einen Zeitraum von gut 2,5 Jahren ist kein eindeutiger Zusammenhang der dargestellten Parameter mit dem Betrieb der Anlage zu erkennen. Die zum Teil erheblichen Schwankungen bei einigen Parametern müssen andere Ursachen haben. Beim Parameter Zink, der enorme und unregelmäßige Schwankungen zeigt, sind die Ursachen unklar, aber mit Sicherheit nicht an die Geothermieanlage gekoppelt.

Die am Standort Bad Wurzach durch Grundwasserproben und durch die Kernbohrung vom 10.01.2012 ermittelte bisher etablierte mikrobielle Population ist stark diversifiziert. Es gibt Spezies, die sich nach wenigen Wochen an veränderte thermische Bedingungen anpassen, während andere Monate oder gar Jahre benötigen. Aus diesem Grund lief im VEGAS-Großbehälter ein gemeinsames Forschungsprojekt mit der Helmholtz Gesellschaft München mit speziellen über die Grundströmung inokulierten Mikroorganismen und exakt dosierten Nährsubstraten, um ein gezieltes Anwachsen mesophiler und thermophiler Mikroorganismen zu stimulieren und deren Verhalten innerhalb der Wärmefahne im Abstrom von Erdwärmesonden zu untersuchen. Erst nach mehreren Heiz- und Kühlzyklen hätten am Standort Bad Wurzach gesicherte Aussagen über mikrobielle Veränderungen und damit Aussagen über eine mögliche Veränderung der Grundwasserqualität getroffen werden können, die im Rahmen dieses Vorhabens nicht realisiert werden konnten, da der Aufwand für regelmäßige mikrobiologische Beprobungen und entsprechende Untersuchungen zu groß gewesen wäre. Der Betreiber des Testfeldes ist auch weiterhin bereit, das Testfeld zu Untersuchungen zur Verfügung zu stellen; die notwendigen Einrichtungen (Temperaturmessfeld, Probennahmeeinrichtungen) werden auch zukünftig vorhanden sein.

#### 1.1.6 VEGAS-Großbehälter

Als Standort mit exakt definierten Bedingungen sowohl hydraulisch als auch die Bodenmatrix betreffend wurde der große VEGAS-Behälter mit den Abmessungen  $L \times B \times H = 9 \times 6 \times 4,5\text{m}$  verwendet. Das „Testfeld“ ist als Schichtaquifer mit 5 unterschiedlichen Schichten aufgebaut, wobei sich die  $k_f$ -Werte bis zum Faktor 20 unterscheiden. Die Schichten fallen von Einlauf zum Auslauf des Großbehälters um  $3^\circ$ . Sämtliche van-Genuchten-Parameter d.h. der Wassergehalt als Funktion des Matrixpotentials bzw. die Wasserspannungs-/ Wasserleitfähigkeitsbeziehung, Korngrößenverteilung, Durchlässigkeit sowie Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung der in diesem VEGAS-Behälter verwendeten Sande wie auch die geometrische Konfiguration der eingebauten unterschiedlich durchlässigen Sande sind sehr genau bekannt und bilden Heterogenitäten, wie sie in natürlichen Böden vorkommen, sehr gut nach.



Die Simulation von Heizen und Zurückkühlen auf Grundwassertemperatur im VEGAS-Behälter verringert die Versuchsdauer um viele Monate. Die numerischen Modelle können so rasch unter verschiedenen Betriebsbedingungen kalibriert und dann an den Feldstandorten validiert werden. Für die Grundwasserströmung kann der Gradient präzise eingestellt und kontinuierlich kontrolliert werden. Durch die Möglichkeit, verschiedene Vorlaufemperaturen und Durchflüsse an den einzelnen Erdwärmesonden genau einstellen zu können, ist eine genaue und flexible Kalibrierung der eingesetzten numerischen Modelle möglich.

Konfiguration des Versuchsaufbaus:

In Absprache mit den beiden Projektpartnern wurde die Versuchsanordnung folgendermaßen aufgebaut:

Es wurde eine Sondenkonfiguration mit vier handelsüblichen Doppel-U-Rohr PE 100 DN32 Erdwärmesonden eingebaut. Diese wurden speziell für den Projektpartner von der Hochschule für Technik Stuttgart in L-Form angeordnet (EWS 1 bis 3). EWS 4 ist für den Projektpartner vom KIT von zusätzlichem Interesse für die Überlagerung der Wärmeausbreitung im Fernfeld. Alle 4 EWS können individuell angesteuert werden und lassen sich auch einzeln betreiben. Diese 4 EWS sind mit jeweils acht Pt100 Temperatursensoren bestückt. Die Tiefenlage der Sensoren ist für jede Sonde individuell, so dass in jeder Sandschicht zwei Pt100 eingebaut sind, welche wiederum so angeordnet sind, dass jede einzelne Schicht durch die T-Sensoren in drei Drittel aufgeteilt wird. Der Ringraum um die Erdwärmesonden, die mit einem Durchmesser von 219 mm gebohrt wurden, ist mit den Tonpellets ThermoSeal von GWE mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von 2,5 W/mK und einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $10^{-11}$  m/s verfüllt worden. Die Sandfüllung des Behälters weist ein durchschnittliches  $\lambda$  von 2,1 W/mK auf. Zur Erfassung der Ausbreitung der Wärmefahne wurden zur Temperaturmessung zehn 1-Zoll-Filterbrunnen mittels 40mm Rammkernsondierung mit verlorener Spitze bis auf die maximale Mächtigkeit der Sandfüllung von 4,50m Tiefe gerammt. Nach dem Einbau der 1“-Filterrohre und dem Ziehen des Rammgestänges wurde der Ringraum kollabieren lassen, so dass ein bestmöglicher hydraulischer Anschluss der T-Sensoren an den Bodenkörper und die Grundwasserströmung erfolgt. Auch hier sind die T-Sensoren je Bohrung individuell so angebracht, dass jede Sandschicht gedrittelt wird. Zur Unterbindung thermisch induzierter Vertikalströmung innerhalb des 1“-Brunnens wurden alle schichtgerecht mit Sand verfüllt. Zusätzlich werden die vorhandenen Zu- und Ablaufbrunnen zur vertikal aufgelösten T-Messung verwendet.

Um für die numerischen Modelle definierte Randbedingungen zu erhalten wird außer an den 12 Brunnen zur Temperaturmessung auch an allen vier EWS mit jeweils 8 T-Sensoren die vertikale Temperaturverteilung gemessen sowie die Vor- und Rücklauftemperatur jeder EWS erfasst. Außerdem wird 10cm über der Oberfläche des Sandkörpers an zwei verschiedenen Stellen, an 4 Stellen an der Behälter-Außenwand (2x EG und 2x UG) und an zwei Stellen am Behälterboden die Temperatur kontinuierlich erfasst.

Jede EWS ist mit einem Durchflussmesser ausgestattet und erfasst kontinuierlich den individuellen Durchfluss jeder einzelnen Erdwärmesonde.

Im Großbehälter vorhandene und nicht genutzte Brunnen wurden mit Sand bzw. Packern verfüllt, um bevorzugte Fließwege bzw. Fokussierung der Strömung wie auch thermisch induzierte Vertikalströmungen zu verhindern.



Abbildung 38 Bohrung und Einbau der EWS auf VEGAS Großbehälter

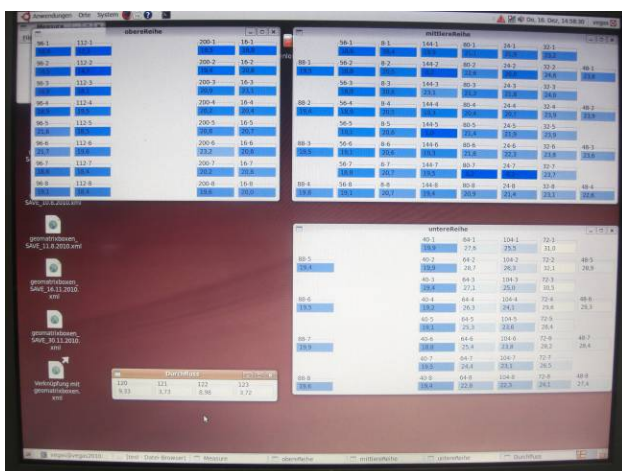


Abbildung 39 Online Anzeige aller 144 Temperaturmesspunkte, der 4 Durchflüsse durch die EWS, Volumenstrom der Grundströmung und deren Vorlauftemperatur

Aus den ersten Experimenten zeigte sich, dass es wichtig ist, die Wärmefahne im Abstrom der Erdwärmesonden auch in ihrer transversalen Ausbreitung zu erfassen. Deshalb wurden zwei weitere Temperaturmessstellen B11 und B12 eingebaut: 0,70m unterstrom von EWS1, Abstand zueinander 1m.

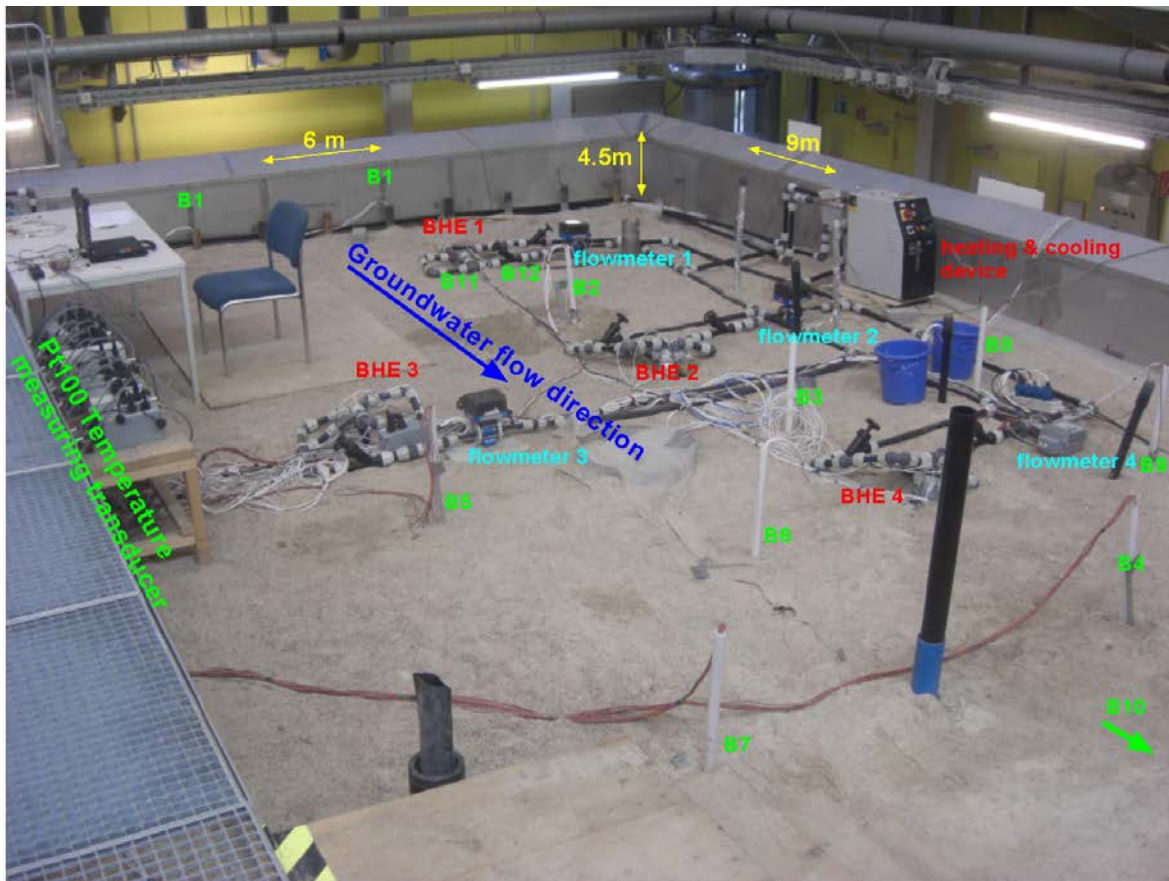


Abbildung 40 Aufsicht mit Lage der EWS und Temperatursonden



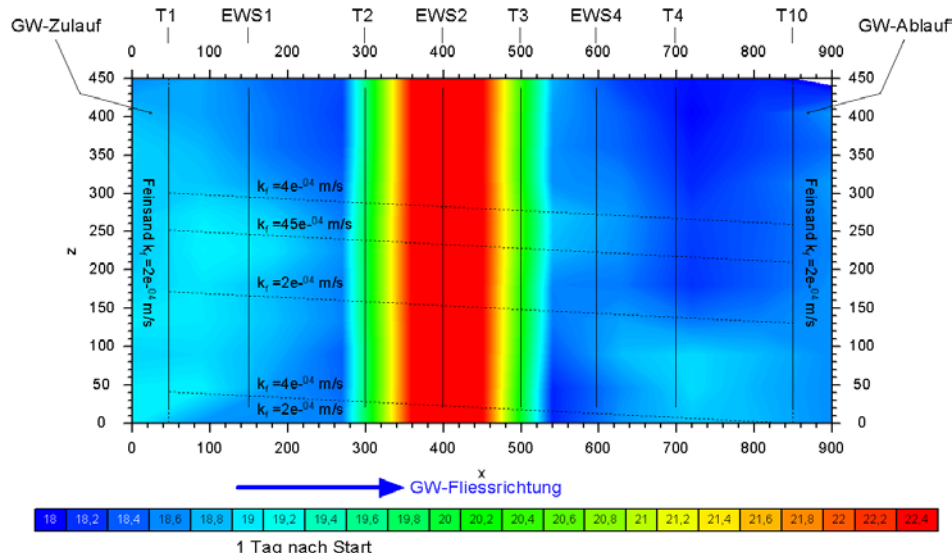
und um eine längere Wärmefahne zu erhalten, sind bisher alle Experimente mit +17K Temperaturerhöhung zur Grundwassertemperatur gefahren worden.

Folgende Konfigurationen wurden bisher bei Experimenten im VEGAS-Behälter untersucht:

- Heizen von EWS1, Q durch EWS1 = 120 l/h, Grundströmung  $v_a = 0,5$  m/d
- Heizen von EWS2, Q durch EWS2 = 764 l/h, Grundströmung  $v_a = 0,32$  m/d
- Heizen von EWS2, Q durch EWS2 = 754 l/h, Grundströmung  $v_a = 0,61$  m/d
- Heizen von EWS2, Q durch EWS2 = 750 l/h, Grundströmung  $v_a = 1,29$  m/d
- Heizen von EWS2, Q durch EWS2 = 733 l/h, Grundströmung  $v_a = 0,44$  m/d
- Heizen von EWS1+2, Q durch EWS = 742 l/h, Grundströmung  $v_a = 1,42$  m/d
- Heizen von EWS2+3, Q durch EWS = 750 l/h, Grundströmung  $v_a = 1,42$  m/d
- Heizen von EWS1, Q durch EWS = 755 l/h, Grundströmung  $v_a = 1,24$  m/d

In den verschiedenen numerischen Modellen werden unterschiedliche Gleichungslöser für den Wärmetransport verwendet. Bei manchen Gleichungslösern überwiegt der konduktive Transport, bei anderen der advective. Um die Gültigkeitsgrenzen der von den Projektpartnern verwendeten numerischen Modelle zu validieren, wurden bei gleicher Heizleistung hohe Geschwindigkeiten der Grundströmung eingestellt, womit der advective Anteil des Wärmetransports überwiegt wie auch niedrige Geschwindigkeiten, bei denen der konduktive Anteil überwiegt.

Beim Heizen von EWS 2 mit einer Abstandsgeschwindigkeit der Grundströmung von 0,32 m/d ergeben sich folgende Wärmefahnen (Abbildung 43 bis Abbildung 47)



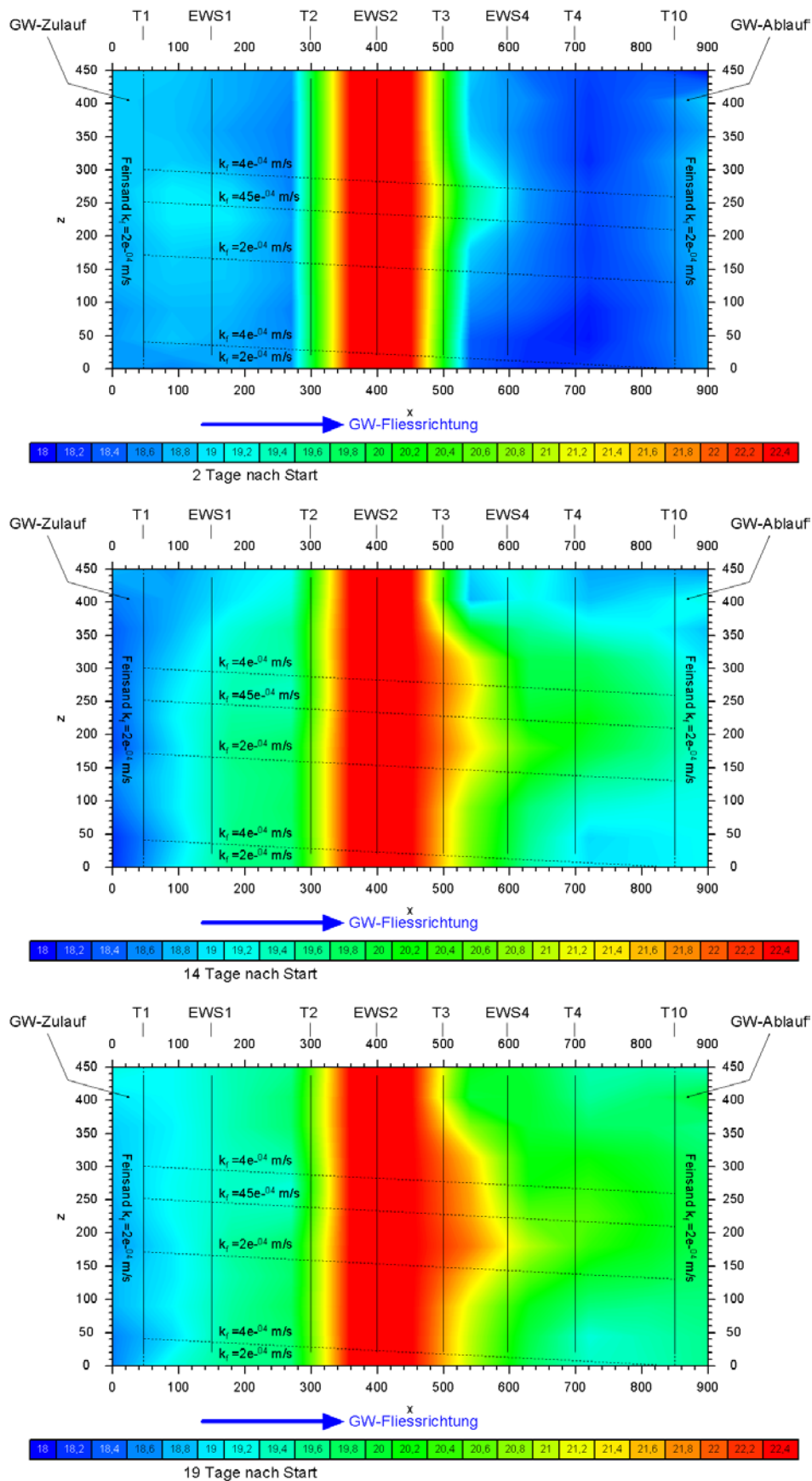


Abbildung 43 Temperaturausbreitung im VEGAS-Behälter, Seitenansicht, Heizen von EWS2, Abstandsgeschwindigkeit = 0,32 m/d

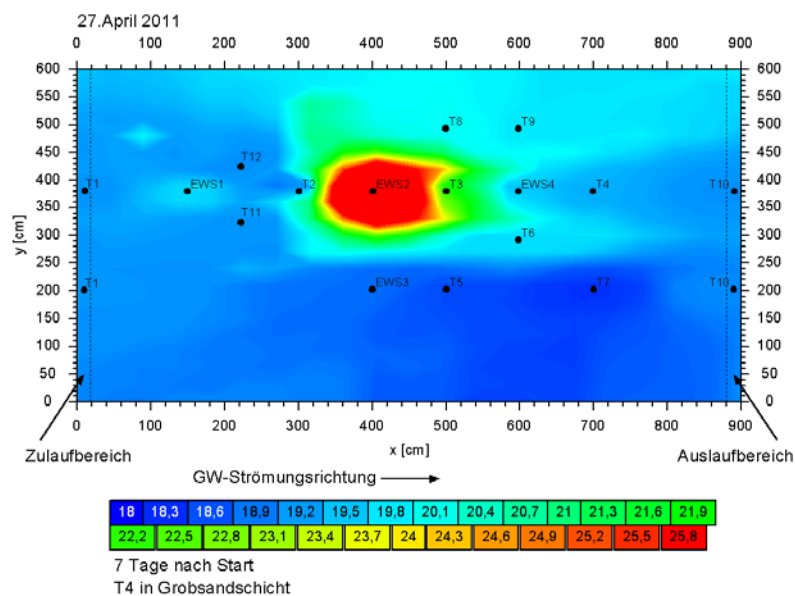


Abbildung 44 Reichweite der Ausbreitung der Wärmefahne nach 7 Tagen in der Aufsicht auf die Grobsandschicht

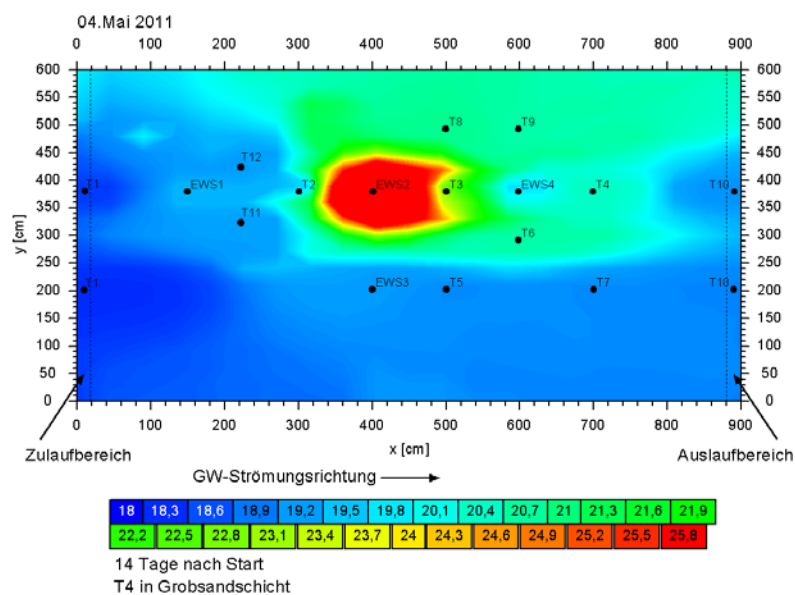


Abbildung 45 Reichweite der Ausbreitung der Wärmefahne nach 14 Tagen in der Aufsicht auf die Grobsandschicht



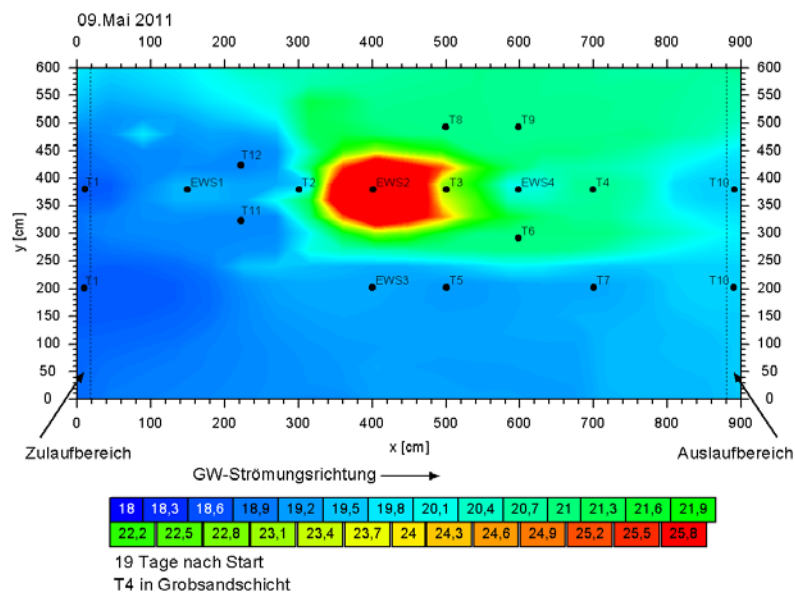


Abbildung 46 Reichweite der Ausbreitung der Wärmefahne nach 19 Tagen in der Aufsicht auf die Grobsandschicht

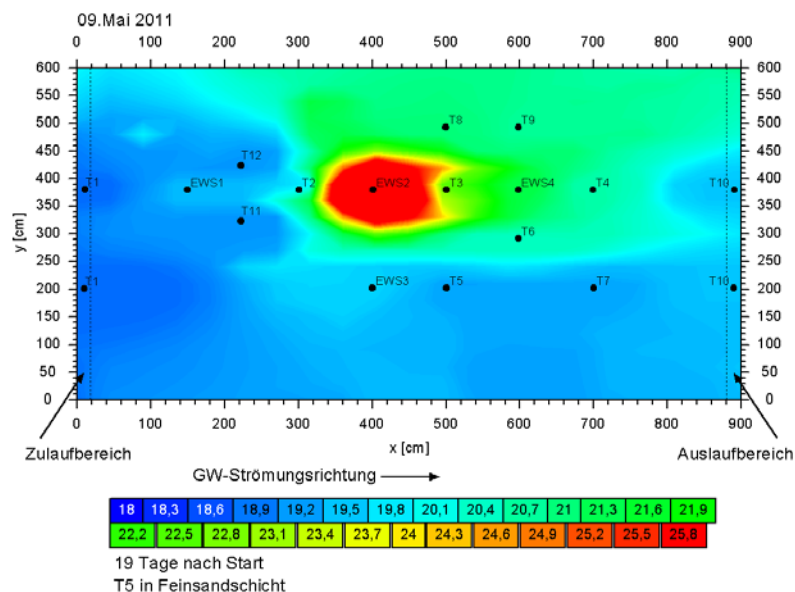


Abbildung 47 Reichweite der Ausbreitung der Wärmefahne nach 19 Tagen in der Aufsicht auf die Feinsandschicht.

Nach 14 Tagen Heizen von EWS2 hat die Wärmefahne den Behälterrand in 5m Entfernung erreicht. Längeres Heizen führt nicht zu einer Verlängerung der Wärmefahne sondern zu einem großflächigeren Aufheizen des Sandkörpers durch Konduktion.

## 1.2 Thermal Response Test

Thermal Response Tests (TRT) dienen in erste Linie dazu, die effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{eff}}$  in W/m\*K einer Erdwärmesondenanlage zu bestimmen. Außerdem kann der thermische Bohrlochwiderstand  $R_b$  in m\*K/ W bestimmt werden. Um nicht nur exakte hydraulische Daten zur Kalibrierung der numerischen Modelle zur Verfügung zu haben, sondern auch thermische Parameter wurde zusammen mit dem Ingenieurbüro A. Voutta Grundwasserhydraulik in Herrenberg an der Erdwärmesonde 4 im VEGAS-Behälter ein TRT durchgeführt.

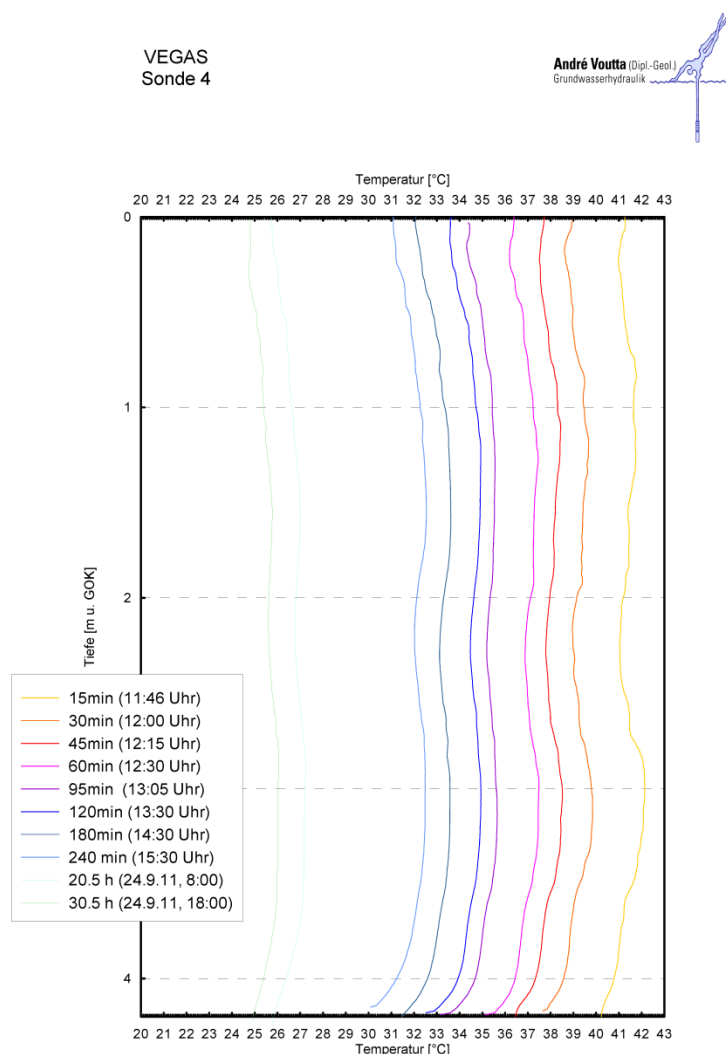


Abbildung 48 TRT an EWS4 im VEGAS-Behälter zur Bestimmung thermischer Bodenparameter

Die Auswertung des TRT aus diesen gemessenen Daten erfolgt mittels linearer Regression und Parameteranpassung. Üblicherweise wird bei der Dimensionierung von Erdwärmesonden von einer Entzugsleistung von in Mittel 50W/m ausgegangen. Die von A. Voutta Grundwasserhydraulik eingesetzte kommerzielle Software errechnet, mit Wasser als Fluid, einem Delta T von 0,6 K zwischen Vor- und Rücklauf, einer Sondenlänge von 4,35 m und einem Volumenstrom von 1,5 l/s, eine Heiz- bzw. Entzugsleistung im VEGAS-Behälter von 133,3

W/m. Dies ist eine erhebliche Differenz zu den üblicherweise angenommenen 50W/m. Dies hat verschiedene Gründe:

- Wasser statt Sole wurde als Fluid benutzt,
- der Quellton war mit Grafit versetzt um eine höhere Wärmeleitfähigkeit zu erzielen (mit diesem seit einigen Jahren eingesetzten Quellton liegt die Wärmeleitfähigkeit des Quelltons über dem des Sandkörpers, damit der Bohrlochwiderstand gesenkt wird und die Entzugsleistung erhöht wird) und
- durch die geringe Sondenlänge (4,35 m) lag durchgehend ein hoher Temperaturgradient zwischen Sonde und Aquifer vor.

Von der TU Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Angewandte Geothermie wurde die Wärmeleitfähigkeit von Sandproben aus den Schichten des VEGAS-Behälters bestimmt. Untersucht wurden drei Proben: Feinsand, Mittelsand und Grobsand. Alle drei Proben wurden in den Probenzylinder locker wie auch verdichtet eingebaut.

Probe		Feinsand	Mittelsand	Grobsand
Einbau		locker	locker	locker
Korndichte		2,64	2,62	2,62
Wärmeleitfähigkeit	[W/m/K]	1,969	2,13	2,249
Porenraum	[-]	0,429	0,36	0,398
Einbaudichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,51	1,68	1,58
Wassergehalt	[%]	18,5	12,5	10
Einbau		dicht	dicht	dicht
Wärmeleitfähigkeit	[W/m/K]	2,227	2,216	2,177
Porenraum	[-]	0,358	0,301	0,337
Einbaudichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,69	1,83	1,74
Wassergehalt	[%]	17,4	11,9	

Das Mittel der gemessenen Wärmeleitfähigkeit beträgt 2,2 W/m/K beim verdichteten Einbau, so wie die Sande auch beim VEGAS-Versuchsbehälter vorliegen. Auswertungen des durchgeführten TRT zeigen keine Abweichungen zu diesen Werten aufgrund des geringen Bohrlochwiderstandes durch den grafithaltigen Quellton.

### 1.3 Gamma-Gamma Dichte-Messung

Die zahlreichen Experimente im VEGAS-Behälter zeigten, dass ein großer Anteil des Wärmeausbreitungsprozesses konduktiv erfolgt. Deshalb ist es für eine genaue Kalibrierung der numerischen Modelle unserer Projektpartner wichtig zu wissen, ob der im Ringraum der Erdwärmesonde zur Abdichtung eingebrachte Bentonitkörper vollständig und gleichmäßig existiert. Mit Kenntnis der exakten Mächtigkeit der Ringraumverfüllung, kann beim Aufsetzen eines numerischen Modells jeder Zelle eine bekannte Länge mit rein konduktivem Wärmetransport zugeordnet werden. Dazu wurde eine geophysikalische  $\gamma$ - $\gamma$ -Messung exemplarisch in EWS 4 durchgeführt. Der im Ringraum eingebaute Ton hat eine wesentlich höhere Dichte als der wassererfüllte Sand im Aquifer. Somit lässt sich die Mächtigkeit des Tons je Tiefenschritt exakt zuordnen.

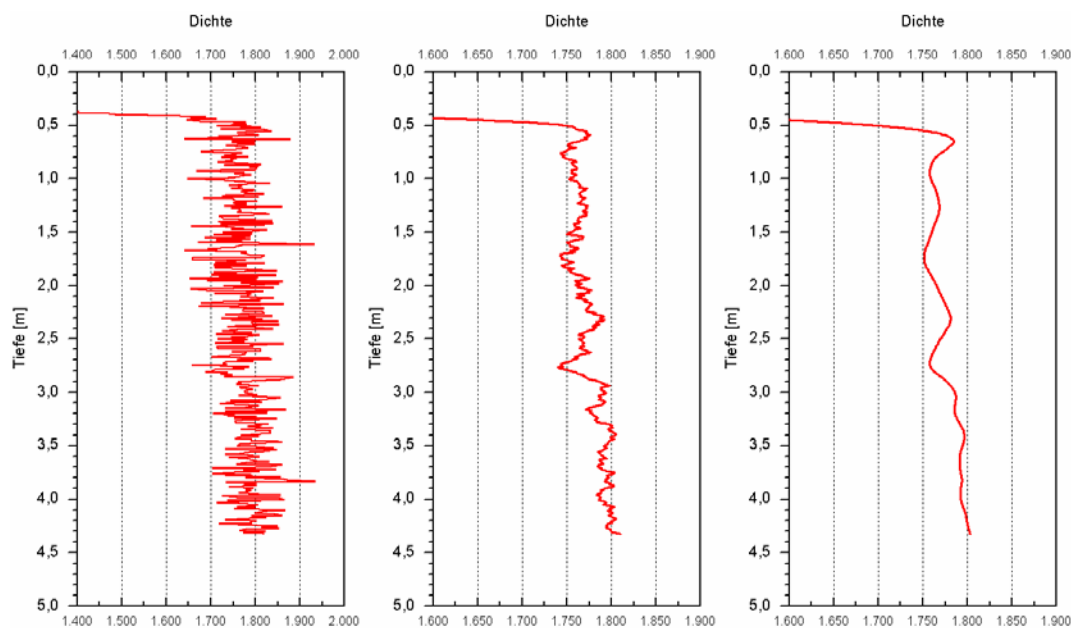


Abbildung 49 Dichte-Messung des Ringraumes um EWS4:

Links: original Messwerte

Mitte: Approximation der Daten mittels gleitendem Mittelwert mit Fensterbreite 17

Rechts: Spline-Approximation mit 50% der Original-Varianz

Bei Kenntnis der Dichte des eingebauten Materials im Ringraum der EWS lässt sich aus den gemessenen Werten die Dicke des Ton-Körpers ermitteln. Die Varianz in der Dichte beträgt über die Tiefe max.  $50 \text{ g/cm}^3$ . Dies entspricht umgerechnet einer Varianz in der Mächtigkeit des eingebauten Tons von ca. 4cm. Diese tiefenaufgelösten Unterschiede in der Mächtigkeit der Tonabdichtung sind gerade für die Kalibrierung der verwendeten numerischen Modelle und speziell zur Berechnung des Nahfeldes um die EWS wichtig.

#### 1.4 Vergleich der Temperaturentbreitung mit Excel-Berechnungstool GWP-SF\_09.05

Um die Wärmeausbreitung im Abstrom einer Grundwasserwärmepumpe zu berechnen gibt es ein von der Ingenieurgesellschaft Kobus & Partner – KUP entwickeltes Excel-Berechnungstool, das auch vom Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg eingesetzt wird.

Ein offenes Erdwärmesystem, auch Grundwasserwärmepumpe genannt ist eine Punktquelle, während eine Erdwärmesonde eine Linienquelle darstellt. Der Wärmeübergang bei einem offenen System ist rein konvektiv, während bei geschlossenen Systemen wie den EWS zuerst vollständige konduktive Wärmeübertragung zwischen Fluid, PE-Rohr, Ringraumabdichtung und dem Aquifer vorliegt.

Viele numerische Verfahren und auch dieses hier getestete Excel-Tool vernachlässigen den konduktiven Wärmetransport, wobei im Nahfeld um die EWS rein konvektiver Wärmetransport vorherrscht und im Fernfeld ein Mix aus Konvektion und Advektion vorliegt. Deshalb darf dieses Tool eigentlich nicht zur Überprüfung der Wärmeausbreitung im VEGAS-Behälter

herangezogen werden. Das Excel-Tool rechnet zweidimensional und berücksichtigt auch keine Dichteströmungen. Der Schichtaufbau des VEGAS-Behälters kann als fünf zweidimensionale Systeme betrachtet werden, wodurch die Linienquelle auf eine Punktquelle reduziert wurde. Der konduktive Wärmetransport durch die Ringraumabdichtung der EWS wurde analog zur Elektronik mittels Serien- und Parallelschaltung von konduktiven und advektiven Anteilen berücksichtigt. Mit dem Excel-Tool wurden dann einzelne Schichten berechnet und mit der gemessenen Temperaturentbreitung verglichen. Dazu wurden dem Programm die Geometrie und die hydraulischen und thermischen Parameter der untersuchten Sandschicht eingegeben wobei dem Tool erlaubt wurde, in Strömungsrichtung weit über die 9m Behälterlänge hinaus zu rechnen.

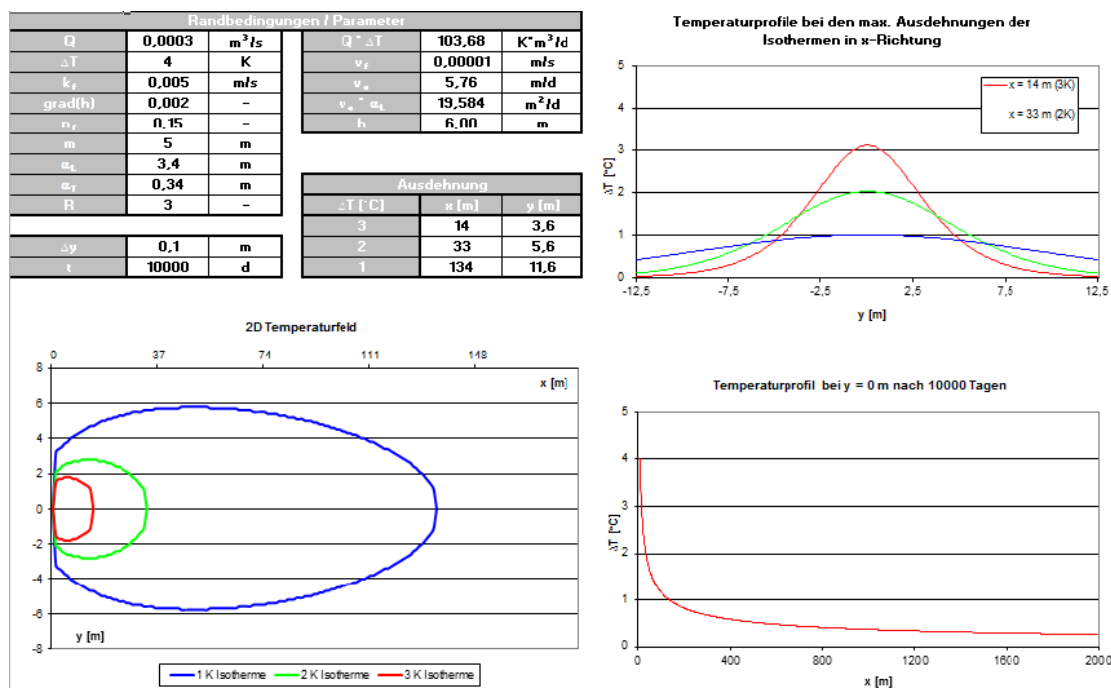


Abbildung 50 Berechnung der Wärmeausbreitung im VEGAS-Behälter mit dem Excel-Tool GWP-SF

Trotz all dieser Anpassungen sind die berechneten Ausdehnungen der Wärmefahne weit größer als tatsächlich gemessen.

### 1.5 Validierung numerischer Modelle mit Daten aus VEGAS-Experimenten

Gemessene Daten aus den VEGAS-Experimenten sind vom Projektpartner am KIT benutzt worden, um das mit FEFLOW aufgebaute numerische Modell zu kalibrieren (Valentin Wagner et. al.).

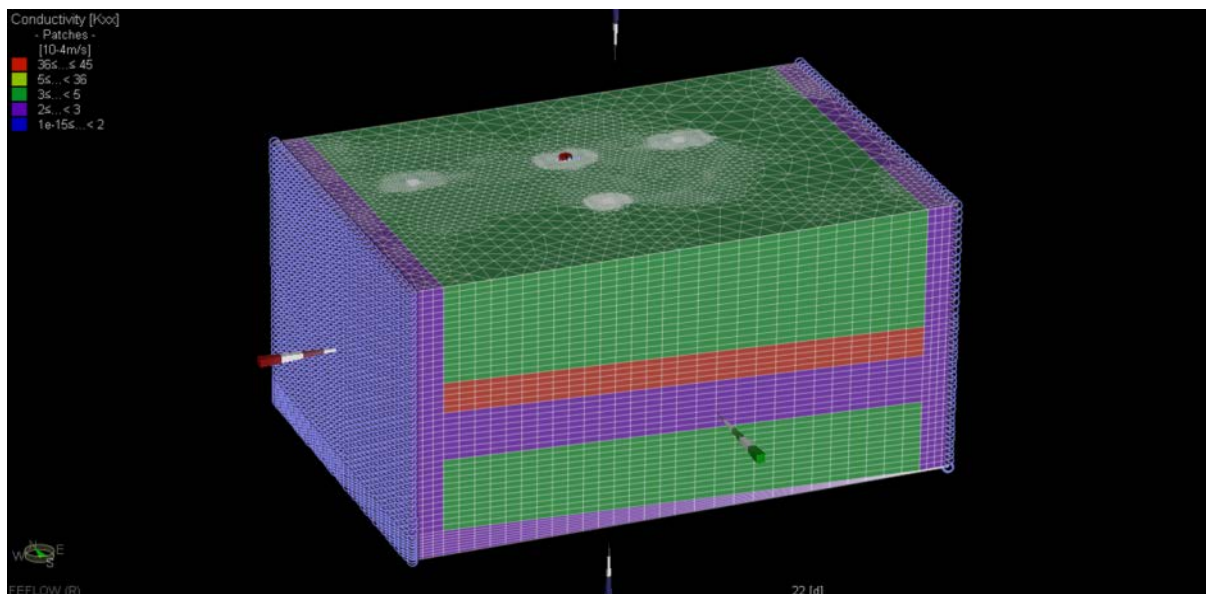


Abbildung 51 Der diskretisierte VEGAS-Behälter im FEFLOW-Modell

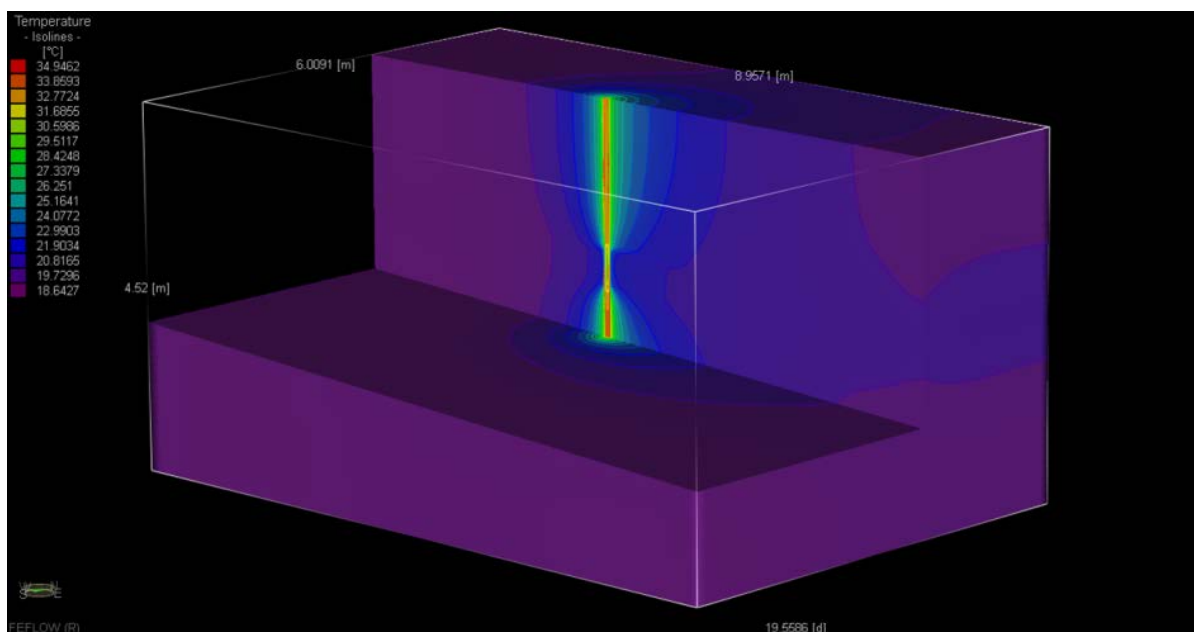
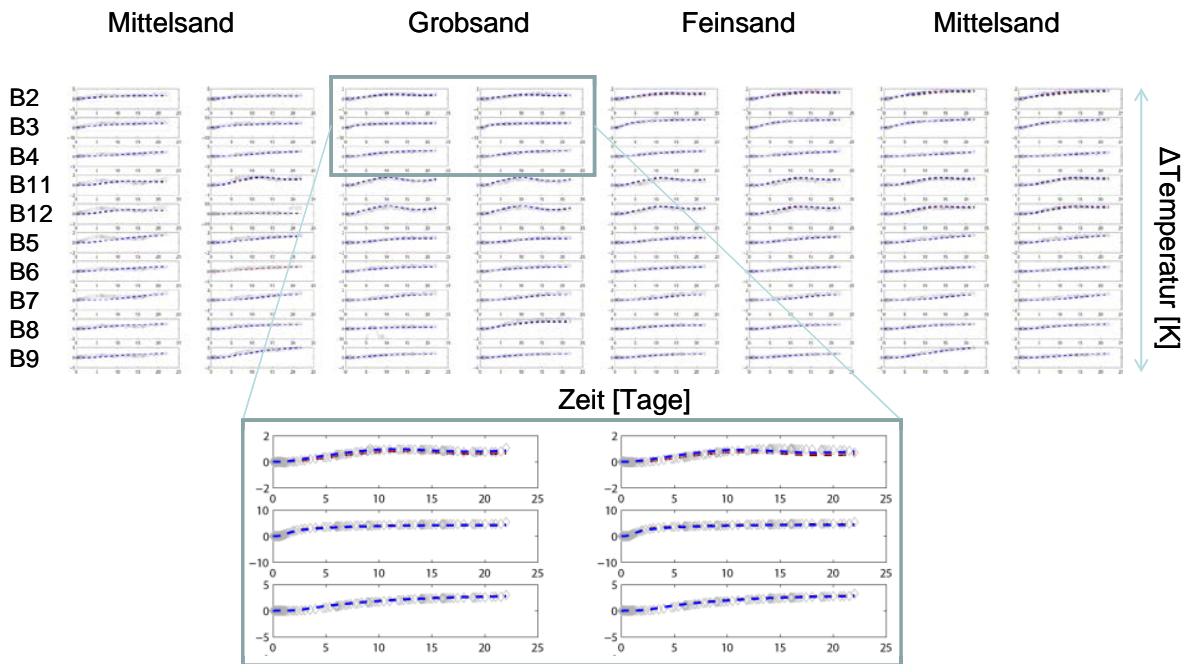


Abbildung 52 Ausbreitung der Wärme um die geheizte EWS 2

Die geringere Wärme im Bereich der Feinsandschicht deckt sich mit Darstellung der gemessenen Daten, worin sich die Wärme in der Feinsandschicht schneller als im Grobsand ausbreitet. Die Wärmeausbreitung ist bei dem hier nachgerechneten Experiment mit  $v_a = 0,32$  m/d durch Konduktion dominiert.



**Abbildung 53** Vergleich der mit FEFLOW berechneten Zeitreihen mit den gemessenen Temperaturverläufen

Den gemessenen Zeitreihen ist trotz kontinuierlicher Kühlung des Wassers für die Grundströmung das von oben in den Behälter eindringende Temperaturfeld der Versuchshalle überlagert. Nach erfolgreicher Kalibrierung des numerischen Modells bilden auch die berechneten Zeitreihen diese Schwankungen ab.

## 1.6 Temperatur-Messtechnik

Zur Erfassung der vertikalen Temperaturverteilung in der abstromigen Wärmeausbreitungsfahne einer Erdwärmebohrung wurden spezielle Systeme entwickelt um die gewünschten Anforderungen für dieses Projekt zu erfüllen. Temperaturdifferenzen von 0,01K sollen zuverlässig erfasst werden können und bei einer maximalen Bohrlochtiefe von 99 m sollen innerhalb des Grundwasserleiters in vertikaler Richtung möglichst viele Sensoren platziert werden können. Außerdem sollen alle Sensoren ohne zeitlichen Versatz abgetastet werden können. Somit wurde nach heutigem Stand der Technik ein 16-Kanal Temperaturdatenlogger mit 16 Bit Auflösung für Pt1000-Widerstandstemperatursensoren in 4-Leiter-Technik entwickelt. Dieses System ist um jeweils 4 bis auf 32 Kanäle erweiterbar. Alle 16 Kanäle können innerhalb einer Sekunde ausgelesen werden. Die batteriebetriebenen Datenlogger können 32 Mio Messwerte, d.h. 2 Mio Messwerte pro Kanal auf SD-Karte abspeichern. Bei einer Messwertaufnahme pro Minute können für ein Langzeitmonitoring der Wärmeausbreitung 1388 Tage (fast 4 Jahre) ununterbrochen gemessen werden. Um die Laufzeit der Batterie zu verlängern, schaltet sich der Logger nach dem Auslesen der 16 Kanäle ab und entsprechend dem voreingestellten Intervall wieder ein. Dazu kann eine sogenannte Vorwärmzeit eingestellt werden, so dass während der Messwertaufnahme die Messwerte nicht durch Temperaturänderung in der Elektronik verfälscht werden. Die Ausgabe der Messwerte erfolgt als unkalibrierte, dafür exakte digitale Werte und als Temperatur in °C mittels Kalibrierung nach Callendarvan-Dusen.

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 - 100 CT^3 + CT^4)$$

Wobei  $R_T$  = Widerstand bei Temperatur T [°C],  $R_0$  = Widerstand bei 0°C und T = Temperatur in [°C]. Die Callendar van Dusen Konstanten A und B werden aus einer 3-Punkt Kalibrierung der Sensoren durch Kurvenanpassung ermittelt. Für Temperaturen größer 0°C können die Terme 3. und 4. Ordnung vernachlässigt werden.

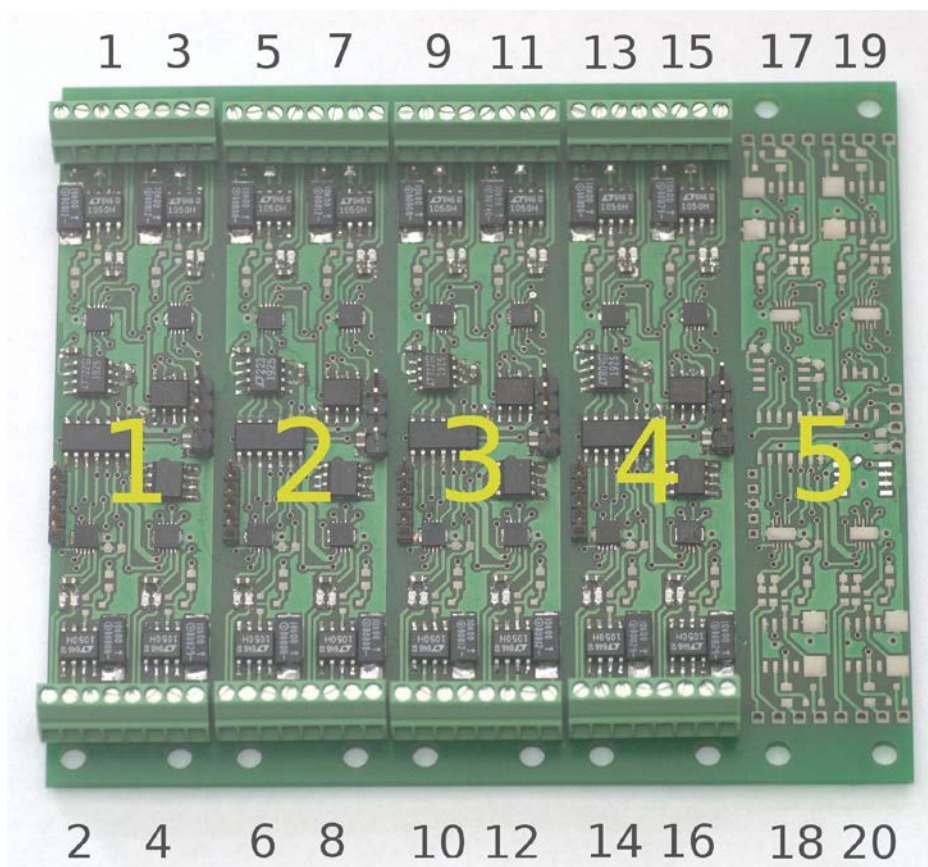


Abbildung 54 Messverstärker für PT-1000 Widerstandstemperatursensoren

Um Speicherplatz einzusparen, kann auf die Ausgabe von digitalen Werten verzichtet werden. Digitale Werte, also Werte ohne Veränderung durch den D-A-Wandler können jederzeit später neu kalibriert werden, so dass sich eine fehlerhafte Kalibrierung im Vorfeld der Messkampagne nicht auf die Genauigkeit der Messung auswirkt. Das Auslesen der Daten aus dem Logger erfolgt plattformunabhängig, kann somit sowohl mit Linux als auch mit Windows-Systemen erfolgen.

Für den VEGAS-Behälter werden aus früheren Projekten vorhandene Pt100-Messumformer verwendet. Der Einsatz teurer autarker Datenlogger ist hierbei nicht erforderlich, da die Messdaten online auf einem PC aufgezeichnet werden können. Verwendet werden 16 Messumformer mit je 8 Kanälen für Pt100 in 4-Leiter Technik, die mittels CAN-Bus mit dem PC kommunizieren und eine Auflösung von 0,1K haben. Die Datenerfassung lässt sich sehr flexibel konfigurieren und wurde so programmiert, dass jeweils über einen Zeitraum von 300s alle 30s ein Messwert aufgenommen wird und der aus diesen 10 Werten berechnete Mittelwert abgespeichert wird.



Für die Temperaturmessung in Bad Wurzach wurde zusammen mit der Firma Wachendorff Prozessmesstechnik eine spezielle modulare Messwerterfassung konfiguriert. Hauptanforderung war nicht nur die direkte Messwerterfassung per Kabel in den Messstellen B1 bis B4 sondern speziell für die Messstelle B0 eine Übertragung der Daten per Funk. Außerdem sollte ein Fernzugriff auf die Daten per Internet möglich sein, um die Anzahl der Fahrten zum Standort zu minimieren. Der eingesetzte Datenlogger speichert die Messwerte und stellt sie mittels integriertem Web-Interface via vpn-Verbindung zum Abruf über das Internet zur Verfügung. Eingesetzt wurden Pt100-Temperatursensoren mit einer Auflösung von 0,1K.

Alle eingesetzten Temperatursensoren wurden vor dem Einbau mittels 3-Punkt Kalibrierung nach Callendar van Dusen kalibriert. Dadurch konnten die fertigungstechnischen Abweichungen der Sensoren ausgeglichen werden und eine vergleichbare Genauigkeit von 0,1 K am Standort Bad Wurzach und VEGAS bzw. 0,02 bei Kilchberg erreicht werden. Eine Kalibrierung auf die Absoluttemperatur spielt bei diesen Messungen keine große Rolle, da die Auflösung und die direkte Vergleichbarkeit je Standort wichtig sind.

## 1.7 Zusammenfassung

Bisher war die Berechnung zum Wärmeausbreitungsprozess im Untergrund zu sehr durch advektiven Transport dominiert. Die Reichweiten der Wärmefahnen wurden, wenn ermittelt mit dem Excel-Berechnungstool GWP-SF\_09.05, deutlich überschätzt. Im Rahmen des Vorhabens geomatrix.bw wurden numerische Modelle bei den Partnern der Teilprojekte TP 1 und TP 2 (weiter-)entwickelt, die auch den konvektiven Wärmetransport berücksichtigen. Durch im VEGAS-Behälter durchgeführten Experimente konnten diese neu entwickelten Modelle kalibriert und verifiziert werden. Eine realitätsnähere Abbildung der tatsächlichen Verhältnisse ist nun möglich.

Am Feldstandort Bad Wurzach und auch im VEGAS-Behälter wurde diese Tatsache mittels kontinuierlicher vertikal aufgelöster Temperaturmessung bestätigt. Im Abstand von 14m konnte in Bad Wurzach nach 3 Jahren Betriebszeit eine Temperaturveränderung im Bereich von ca. 1 Kelvin gemessen werden. Numerische Modelle nehmen bei der Berechnung der Ausbreitung einer Wärmefahne an, dass die Erdwärmesonde kontinuierlich betrieben wird. Tatsächlich arbeitet eine Wärmepumpe im intermittierenden Betrieb, so dass der Wärme-/Kälteeintrag wesentlich geringer ist. Je geringer der Leistungsbedarf, desto länger sind die Zeiten, in denen die Wärmepumpe nicht in Betrieb ist. Dies ist einer der Gründe, warum viele Berechnungen die Länge der Wärme-/Kältefahne deutlich überschätzen.

Diese Tatsache hat Auswirkung auf die Planung von Erdwärmesondenfeldern. Da sich die Wärmefahne deutlich weniger ausbreitet als bisher angenommen, können die Abstände der einzelnen Sonden gegeneinander geringer sein, ohne dass sie sich gegenseitig beeinflussen.

Eine Auswirkung auf Geochemie und Mikrobiologie konnte bisher im Untergrund innerhalb einer Wärmefahne nicht nachgewiesen werden. Die Datengrundlage ist auch jetzt noch für eine gesicherte, belastbare Aussage zu gering, so dass weiterhin das Testfeld betrieben und Grundwasserproben analysiert werden müssen. Der Betreiber des Testfeldes in Bad Wurzach ist weiterhin bereit, sein Betriebsgelände für weitere Untersuchungen zur Verfügung zu stellen.

Der Großbehälter in VEGAS wird über die Laufzeit dieses Vorhabens hinaus weiter genutzt. In einem vom Land Baden-Württemberg geförderten Forschungsprojekt wird zur Zeit eine weitere Erdwärmesonde installiert, bei der neue Verpressmaterialien (Spezialzement) sowie die Wärmeausbreitung in höherer räumlicher Auflösung untersucht werden sollen. Diese Untersuchungen sollen die numerischen Modelle weiter verbessern.

## **2 Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung**

### **2.1 Arbeitsplanung**

Die Druck- und Temperaturmesstechnik wurde bereits in der ersten Projektphase erfolgreich am nicht weiterverfolgten Standort Gungl eingesetzt. Am Standort Herrenknecht mit einer 100m tiefen Erdwärmesonde wurde diese am Vorlaufrohr mit 16 äquidistant verteilten Temperatursensoren instrumentiert und eingebaut. Aufgrund rechtlicher Fragestellungen kam es dort nicht mehr zur Bohrung weiterer drei Messstellen im Abstrom dieser EWS. Nach langen Verhandlungen wurde dieser Standort letztlich dann doch aufgegeben. Da es bis dahin noch kein sicher vorhandener Pilotstandort mit einem geschlossenen System gab, wurde mit der Planung und Instrumentierung des VEGAS-Großbehälters begonnen. Parallel dazu wurde dann hierfür doch ein weiterer Feldstandort gefunden, instrumentiert und in Betrieb genommen, so dass nun ein Feldstandort in Kilchberg mit offenem System, ein Feldstandort mit geschlossenem System in Bad Wurzach und der VEGAS-Behälter mit geschlossenem System in Betrieb sind. Der Standort in Bad Wurzach ist oberstrom der EWS und unterstrom mit Probennahmestellen versehen, so dass dort geochemische Untersuchungen durchgeführt werden können. Am Standort Kilchberg konnten durch ungünstige Rahmenbedingungen keine auswertbaren Ergebnisse erzielt werden.

Auch wenn die Arbeiten von der ursprünglichen Planung abwichen, konnten die Projektziele mit den Aktivitäten im Vorhaben erreicht werden. Mit den erfassten Daten konnten die numerischen Modelle der Projektpartner entscheidend verbessert werden. Die Installationen stehen für weitergehende Untersuchungen auch nach Projektende zur Verfügung und werden im Fall des VEGAS Großbehälters zum Berichtszeitpunkt in einem vom Land Baden-Württemberg geförderten Folgeprojekt genutzt.

### **2.2 Zeitplanung**

Seit Dezember 2010 sind alle Pilotstandorte fertig instrumentiert und in Betrieb. Durch die verlängerte Projektlaufzeit konnten am Standort Bad Wurzach Daten über einen Zeitraum von 3 Jahren erfasst und ausgewertet werden.

### **2.3 Aktuelle Ausgaben- und Ausgabenplanung**

Die Kosten lagen im beantragten Rahmen. Die Ausgaben für Sachmittel liegen deutlich unter der Planung aufgrund der Tatsache, dass der Pilotstandort Bad Wurzach auf Kosten des Eigentümers instrumentiert wurde. Das Testfeld wurde von diesem dann zurückgemietet, so dass sich die Kosten auf das Jahr 2011 verteilt haben und mit der letzten Rate im November

beendet wurden. Die gesamte eingebaute Messtechnik gehört nun dem Betreiber und beim Abschluss des Vorhabens fallen keine weiteren Kosten für einen Rückbau an.

**2.4 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert?**

Auch wenn sich die Findung geeigneter Standorte als wesentlich schwieriger darstellte als in der Antragsphase vermutet, konnten die wesentlichen im Antrag formulierten Ziele erreicht werden.

**2.5 Sind inzwischen von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?**

Es sind keine Ergebnisse seitens Dritter bekannt geworden, die Arbeiten beeinflusst hätten.

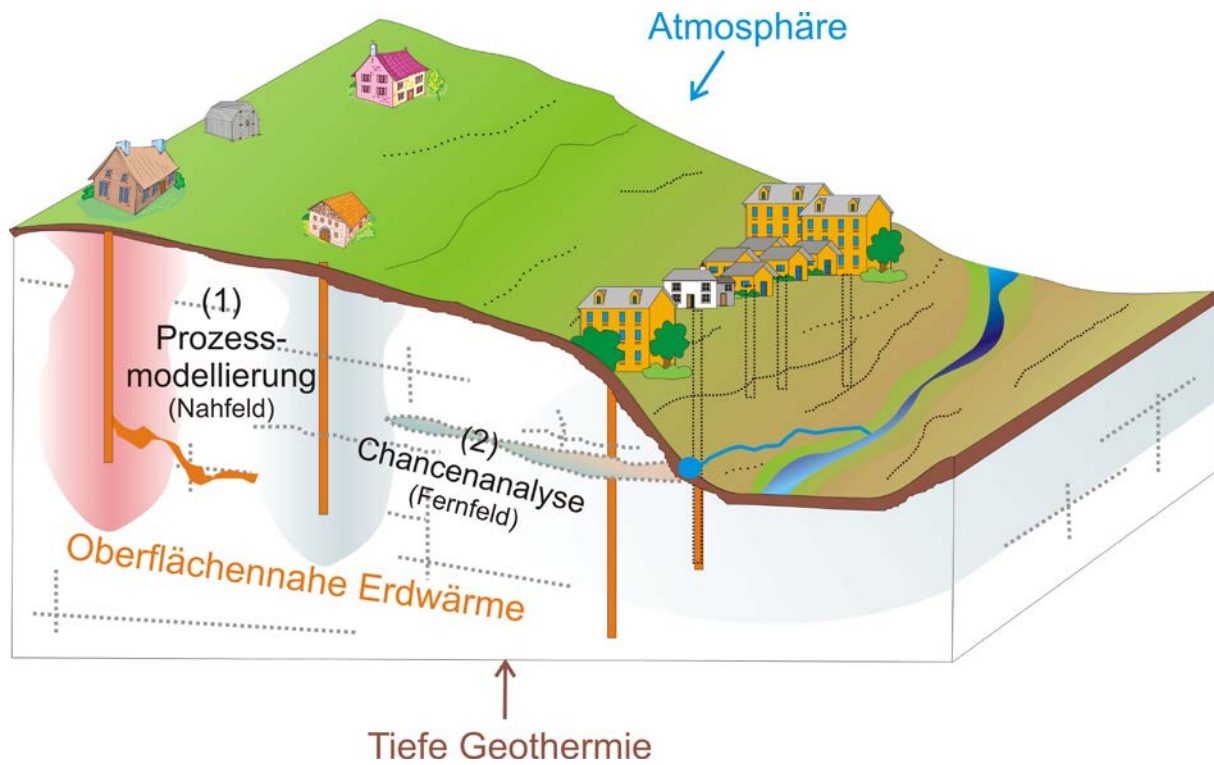
**2.6 Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?**

Es gab keine Änderungen in der Zielsetzung.

**2.7 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Änderungen am Verwertungsplan gab es nicht.

# Projektverbund „geomatrix.bw“



Validierung von Erdwärmesondensimulationen zum Kühlen und Heizen im Nah- und Fernfeld mit Hilfe geothermischer Testfelder

Zusammenarbeit und Verknüpfung der Einzelvorhaben, Synergieeffekte

Juni 2014



## Projektverbund **geomatrix.bw**

Im Projektverbund **geomatrix.bw** wurden ausgewählte „flache“ Erdwärmeeinrichtungen interdisziplinär untersucht, um sowohl die Effizienz des Wärmeübergangs in den Sonden als auch die Auswirkung von solchen Anlagen auf den Aquifer zu beschreiben.

Die Forschungsschwerpunkte der einzelnen Partner konzentrierten sich auf

- TP1: Anlagentechnik und Nahfeldbetrachtung der Energieübertragung zwischen Sonde und Aquifer (HFT Stuttgart)
- TP2: Betrachtung der Einflüsse von Wärmesonden auf das Fernfeld: Nachhaltigkeit, gegenseitiger Einfluss von Sonden, Einfluss von Leckagen auf das Grundwasser (Karlsruhe Institut für Technologie, KIT)
- TP3: Bereitstellung von Messtechnik und Messkonzepten zur Verifizierung und Validierung des numerischen Modells (Uni Stuttgart, VEGAS)

Zur Erreichung der Ziele begleitete der Projektverbund Geothermieanwendungen im Feld. Zusätzlich wurde im VEGAS Großbehälter ein Geothermiefeld installiert. Der Vorteil dieser Installation waren eine genaue Kontrolle der Anfangs- und Randbedingungen, und die Möglichkeit, größere Temperaturgradienten zu fahren und damit auch stärkere Signale zu erhalten. Weiterhin waren die Versuche im Labor nicht an jahreszeitbedingte Lastwechsel geknüpft und erlaubten somit mehrere Temperaturganglinien in kürzeren Zeiträumen.

- Die Geothermieanlagen im Feld und im Großbehälter wurden wissenschaftlich begleitet.
- Die von TP1 und TP2 zu entwickelnden numerischen Modelle wurden abgestimmt und durch die Ergebnisse der begleitenden Messtechnik verifiziert und validiert.
- Die Zusammenarbeit der Partner (Abb. 1) wurde durch einen Kooperationsvertrag geregelt.

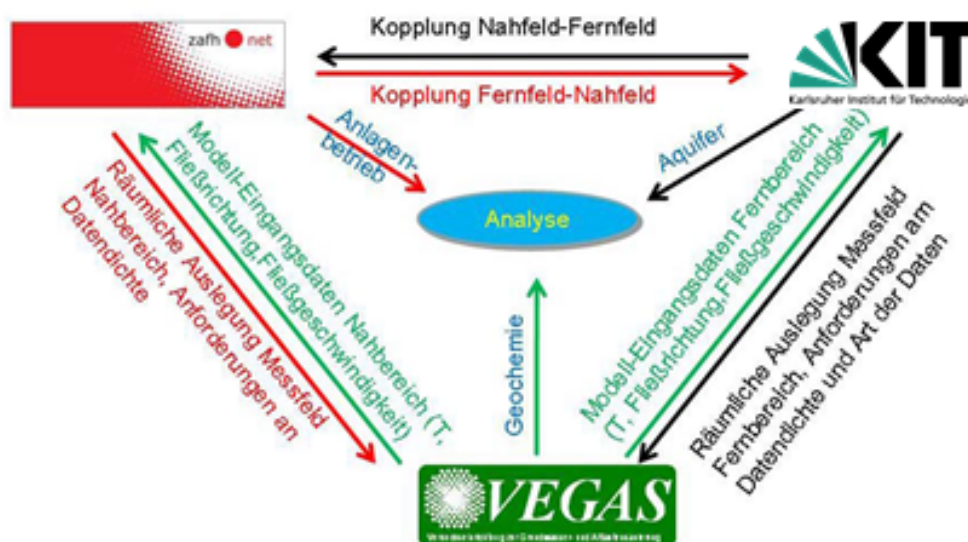


Abbildung 1: Kopplung der Teilprojekte im Rahmen des Forschungsvorhabens **geomatrix.bw**

## **Zusammenarbeit zwischen den geomatrix-Partnern**

### **TP 1: Ganzjährige Nutzung von Geothermie zum Heizen und Kühlen von Gebäuden**

Die Verwendung von Erdwärmesondenanlagen als Wärmequelle oder –senke für haustechnische Anlagen zur Temperierung von Innenräumen war Untersuchungsgegenstand und Projektbeitrag der Hochschule für Technik (HfT).

Die Erweiterung eines an der HfT entwickelten Simulationsmodells zur Abbildung von Grundwasserströmungen wurde mit Messdaten von VEGAS und Simulationsergebnissen des KIT realisiert.

Die Entzugsleistungen des Messaufbaus bei VEGAS konnten mit dem Modell unter Verwendung der von VEGAS bereitgestellten Messgrößen Grundwassertemperatur, -strömungsgeschwindigkeit, Schichtung und Porosität der Quarzsandmatrix und den wärmetechnischen Randbedingungen wie Vor- und Rücklauftemperatur des Sondenfluids, erzielter Massendurchsatz durch die Sonden und Verlustleistungen an den Rändern des Containers validiert werden.

Zur Deckung gebracht wurden die Messergebnisse des Laborversuchs sowohl mit Ergebnissen des mathematischen Modells des KIT, welches zur Abbildung des Versuchsaufbaus auf einem kommerziellen Strömungssimulationsprogramm (FEFLOW) basiert als auch mit dem Modell der HfT. Die räumliche Auflösung im FEFLOW-Modell ist höher als im numerischen Modell der HfT, das Modell ist aber hinsichtlich der berechneten Entzugsleistungen hinreichend genau, um der Simulation von haustechnischen Anlagen zu genügen und lässt sich in ein Gesamtsystemmodell integrieren.

Mit dem validierten Modell konnten unter Zuhilfenahme typischer Heiz- und Kühllasten für Gebäude dynamische Temperaturänderungen im Boden bei mehrjähriger Nutzung der Anlagentechnik prognostiziert werden.

Diese Ergebnisse wurden den Projektpartnern für deren weitergehende Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

## **TP 2: Prozessmodellierung und Chancenanalyse oberflächennaher Erdwärme in Baden-Württemberg**

Im 2. Teil des Kooperationsprojekts geomatrix.bw wurde ein Großtank- (Erdwärmesonde im VEGAS-Container) und zwei Feldexperimente mit zwei unterschiedlichen geothermischen Anlagen (Erdwärmesonde bei Bad Wurzach und Grundwasserwärmepumpe in Kilchberg) gemeinsam mit den Projektpartnern ausgesucht, konzipiert, aufgebaut und detailliert untersucht. Hierbei wurden folgende zahlreiche Übergabeparameter für die weiteren Simulationen bestimmt:

- Geologische, hydrogeologische, thermische und hydrogeochemische Eingabeparameter, wie beispielsweise Grundwassertemperatur, Grundwasserfließrichtung, hydraulische Gradient, Abstandsgeschwindigkeit, Tiefe der Strömungshorizonte und deren Mächtigkeit;
- Die zeitlichen Entzugsleistungen wurden mithilfe von Wärmehählern (Wärmefluss) bestimmt;
- Genaue Temperaturrandbedingung und Lastprofile der Erdwärmesonden (EWS).

Mithilfe dieser Übergangs- bzw. Eingabeparameter, die vor allem von den Kollegen von VEGAS bestimmt wurden, konnten unterschiedliche analytische als auch numerische Simulationen vom KIT durchgeführt werden. Hierbei zeigte sich, dass präzise Aussagen über das Wärmetransportverhalten im Untergrund nur getroffen werden können, wenn alle hydraulischen und thermischen Materialparameter als auch die hydraulischen und thermischen Randbedingungen am Standort hinreichend genau bekannt sind. Dies wird besonders ersichtlich, wenn man die Analyseergebnisse aus dem Großtankexperiment mit den Ergebnissen der beiden Feldstandorte vergleicht. Die Versuche im Großtank, die einen gut untersuchten bzw. bekannten Untergrund und ein dichtes Messnetz aufweisen, zeigen hervorragende Übereinstimmungen mit den numerischen Simulationen. Diese Ergebnisse wurden sowohl national als auch international publiziert und dem Fachpublikum auf zahlreichen Konferenzen präsentiert (Wagner et al. 2012a,b,c; 2013; 2014a,b). Hier konnten detaillierte 3D Simulationen das Prognosepotenzial im Vergleich zu einfacheren analytischen Modellen erheblich verbessern. Dagegen sieht man an den zwei Feldstandorten (Bad Wurzach und Kilchberg), dass bei fehlenden Informationen eine aufwendige numerische Detailsimulation und Validierung mit erhobenen Daten nur bedingt eine signifikante Verbesserung des Prognosepotenzials birgt. Nichtsdestotrotz, konnte am Feldstandort Bad Wurzach die thermische Temperaturentbreitung (Temperaturfahne) durch den Betrieb einer EWS sehr gut beobachtet werden. Die Temperaturentbreitung trotz der thermischen Advektion durch die Grundwasserströmung ist auch an diesem Standort sehr gering und beschränkt sich auf das Nahfeld bei einer EWS (< 5 m). Diese Ergebnisse wurden in dem Textbuch „Thermal Use of Shallow Groundwater“ kürzlich veröffentlicht (Stauffer et al., 2013) und beinhaltet ebenfalls die Ergebnisse der Kollegen aus Stuttgart (Bisch et al., 2012) und zeigen wiederum die enge Zusammenarbeit und die Synergieeffekte, die durch dieses Vorhaben entstanden sind.

Als Fazit der durchgeführten Studie und Zusammenarbeit mit den Projektpartnern folgt, dass eine präzise Prognose über die Temperaturentbreitung durch die thermische Nutzung anhand geothermischer Anlagen nur durch die Unterstützung von detaillierten und aufwendigen Felduntersuchungen in Kombination mit Simulationsansätzen zu erfolgreichen und genauen Ergebnissen führt. Dies konnte vor allem im Großtankexperiment in VEGAS gezeigt werden. Eine flächenhafte Prognose mithilfe von Tabellenwerken und/oder Übersichtskarten für Baden-Württemberg konnte daher nicht durchgeführt werden, da nur eine standort-spezifische Einzelfalluntersuchung zu hinreichend genauen Ergebnissen führt.



### **TP 3: Kosteneffiziente Messsysteme und Konzepte zur Überwachung oberflächennaher Erdwärmenutzung**

Nach gemeinsamer Auslegung der Feldstandorte und des Großbehälterversuchs war VEGAS für die Einrichtung der Messfelder an den Feldstandorten und im VEGAS-Großbehälter, für die Durchführung der Messungen sowie für Pflege und ggf. Reparatur der Anlagen verantwortlich.

In die Planung der Feldstandorte (Anzahl der Messsonden, Abstand der Sonden zur EWS / zum EWS-Feld, Ausstattung der Sonden etc) wurde in enger Abstimmung mit TP 2 durchgeführt. Dadurch wurde sichergestellt, dass die zu erwartenden Felddaten direkt in die Modellierung des Fernfeldes der Sonden Eingang fanden.

Im Testfeld wurden Datalogger-Systeme installiert, die Temperatur- und Druckdaten kontinuierlich aufzeichneten. Die Monitoring-Arrays wurden monatlich beprobt und die Proben im VEGAS-Analytiklabor analysiert. Messwerte wurden TP1 und TP2 zur Verfügung gestellt.

Lastfälle der Feldstandorte waren nicht flexibel, sondern wurden durch die jahreszeitlichen Heiz- und Kühl-Anforderungen der Nutzer festgelegt. Aus diesem Grund wurde zusätzlich ein Großversuch im VEGAS-Labor mit einem Erdwärmesondenfeld ausgestattet, wodurch Heiz- / Kühllastfälle unabhängig von jahreszeitlichen Ganglinien simuliert werden konnten.

Bei der Planung des EWS-Feldes im Großbehälter waren die spezifischen Anforderungen von TP1 und TP2 maßgebend. Nach Übereinstimmung der TP hinsichtlich der Lage der EWS und der Monitoring Arrays wurden diese von VEGAS eingebaut in Betrieb genommen. Zusätzliche Temperatursensoren wurden auf Anfrage von TP1 und TP2 entlang des Großbehälters angebracht um den Effekt der Randbedingungen (Hallentemperatur etc) nachbilden zu können.

Lastfälle der Versuche im Großbehälter (Dauer von Heiz- und Kühlzyklen sowie deren Amplitude) wurden nach Rücksprache und auf Anfrage der Partner festgelegt und variiert.

Zur erfolgreichen Bearbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen im Feld mussten insbesondere auch die rechtlichen Rahmenbedingungen festgelegt werden. (Bohr- und Einbaugenehmigung von EWS und Monitoringausstattung, Verbleib/ Besitz der Einbauten nach Beendigung der Forschungstätigkeiten, Haftung bei Schäden,...). Diese Fragestellungen wurden in enger Zusammenarbeit zwischen der Rechtsabteilung der Universität und dem Projektträger dahingehend gelöst, dass Einbauten im Feld nicht durch geomatrix.de sondern durch den Standorteigentümer vorgenommen und diese Anlagen dann von geomatrix.de für einen gewissen Zeitraum gemietet wurden.

Bereits während der Experimente erhielt VEGAS vonseiten verschiedener Einrichtungen Anfragen, die Daten im Rahmen von Studien- und Masterarbeiten sowie für Dissertationen nutzen zu dürfen. Dies unterstreicht einerseits die dringende Notwendigkeit der durchgeführten Untersuchungen, andererseits zeigen die an VEGAS herangestellten Datenanfragen, dass die durchgeführten Untersuchungen bei weitem nicht hinreichende Daten für eine Reihe von Fragestellungen liefern, die für ein tiefgehendes Verständnis des Einflusses von EWS auf einen Aquifer (Hydrogeologie, Chemie, Mikrobiologie) notwendig sind.

Nach Abschluss der Experimente im Rahmen von geomatrix.bw wurde daher der Großversuch dahingehend umgebaut, dass eine Kühlung des Grundwasserzustroms möglich war, was mikrobielle Untersuchungen unter naturnahen Bedingungen ermöglichte.

Derzeit noch offene Fragestellungen betreffen insbesondere den Einfluss großer Temperaturganglinien ( $-10^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$ ) auf Sonde, Sondennahfeld und Aquifer.

## Publikationen

Bisch, G., Klaas, N., Braun, J. (2012). geomatrix.bw: Teil 3: Validierung von Erdwärmesondensimulationen zum Kühlen und Heizen im Nah- und Fernfeld mit Hilfe geothermischer Testfelder. Report ZO4E28002, Stuttgart.

Eicker Ursula, Pietruschka Dirk, Pesch Ruben. Heat rejection and primary energy efficiency of solar driven absorption cooling systems. International Journal of Refrigeration (2012), Volume 35, Issue 3, pp 729-738

Eicker Ursula, Pietruschka Dirk, Pesch Ruben. Primärenergetische Optimierung von solar thermischen Kühlsystemen. Tagungsband 22. Symposium Thermische Solarenergie, 9.-11. Mai 2012, Bad Staffelstein, S.251-257

Eicker Ursula, Pesch Ruben, Thumm Felix. Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit oberflächennaher Geothermie für das Heizen und Kühlen von Nichtwohngebäuden. Tagungsband 4. Energietechnisches Symposium Nachhaltige Gebäude – Herausforderungen in der Gebäudeenergie-technik, Stuttgart, 2011, S. 47-55

Eicker Ursula, Pesch Ruben, Thumm Felix, Dalibard Antoine. Geothermal energy use for heating and cooling of a low energy building. Proceedings of IXth International scientific and technical conference on New building technologies and design problems, 20.-21.10.2011, Krakow

Eicker Ursula, Pietruschka Dirk, Pesch Ruben. Heat rejection and primary energy efficiency of solar driven absorption cooling systems. Proceedings of 4th Solar Air Conditioning Conference, Larnaka, Cyprus, 12.-14.10.2011

Pesch Ruben, Cotrado Mariela, Martin Maximilian, Pietruschka Dirk, Eicker Ursula. Ganzjährige Nutzung von Erdwärmesonden zum Heizen und Kühlen von Gebäuden mit reversibler Wärmepumpe oder Kompressionskältemaschine, Tagungsband BauSim 2010 „Gebäudesimulation in Wandel“, 22-24 September 2010, Wien, Austria

Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Molina-Giraldo, N., Kinzelbach W. (2013): Thermal Use of Shallow Groundwater. 287 Seiten, CRC Press.

Wagner, V., Bayer, P., Bisch, G., Kübert, M., Blum, P. (2014a): Hydraulic characterization of aquifers by thermal response testing: validation by large scale tank and field experiments. Water Resources Research, 1-15, 50(1), 71-85.

Wagner, V., Blum, P., Bisch, G., Kübert, M., Bayer, P. (2014b): Hydraulische Charakterisierung von Aquiferen über den Thermal Response Test: Validierung in Tank- und Feldexperimenten. FH-DGG-Tagung 2014, Bayreuth, Deutschland, Mai 2014.

Wagner, V., Bayer, P., Bisch, G., Braun, J., Klaas, N., Blum, P. (2012a): Calibrating a High-resolution Numerical Model of a Borehole Heat Exchanger Using FEFLOW. 3rd International FEFLOW User Conference, Berlin, Germany, 03.-05. September 2012.

Wagner, V., Bayer, P., Bisch, G., Braun, J., Klaas, N., Blum, P. (2012b): Bestimmung der thermischen Dispersivität im Kontext der oberflächennahen Geothermie. FH-DGG-Tagung 2012, Dresden, Deutschland, Mai 2012.

Wagner, V., Bayer, P., Bisch, G., Braun, J., Klaas, N., Blum, P. (2012c): Determination of thermal dispersivity using a borehole heat exchanger. EGU General Assembly Conference Abstracts. Vol. 14.

Wagner, V., Bayer, P., Bisch, G., Braun, J., Klaas, N., Blum, P. (2013): Thermal dispersivity based calibration of a numerical borehole heat exchanger model. EGU General Assembly Conference Abstracts. Vol. 15.