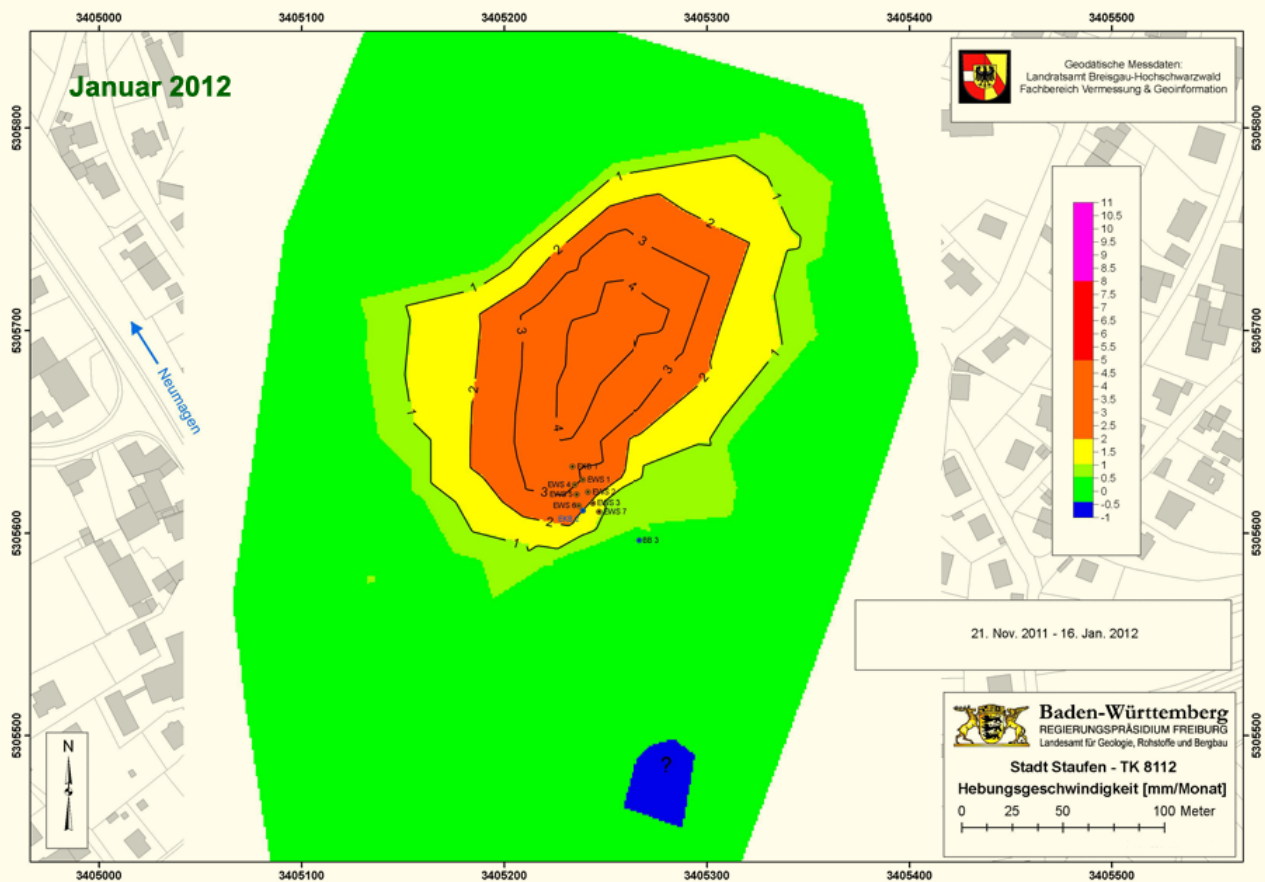


Zweiter Sachstandsbericht zu den seit dem 01.03.2010 erfolgten Untersuchungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br.



Zweiter Sachstandsbericht

Az.: 94-4763//12-2487

01.06.2012



Baden-Württemberg

REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Herausgeber: REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG – Abteilung 9
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB)
Albertstraße 5, 79104 Freiburg i. Br.
Telefon: (07 61) 208-30 00
Telefax: (07 61) 208-30 29
E-Mail: abteilung9@rpf.bwl.de
Internet: <http://www.rp-freiburg.de>

Bearbeitung: Dr. Clemens RUCH, Dr. Gunther WIRSING, C. HUNKLER

Unter Mitarbeit von: Dr. G. DIETZE, S. KRYSZON, M. MAUCHER, O. NÜBLING, E. SUTTER (Ref. 91 Landesservicezentrum)
Dr. M. FRANZ, Dr. E. NITSCH, G. GOLLEMBECK, Dr. M. MARTIN (Ref. 92 Landesgeologie)
Dr. R. PRESTEL, Dr. C. TRAPP (Ref. 94 Landeshydrogeologie und -geothermie)
Dr. E. BAUER, V. BAUER, Dr. O. KECK, A. KOCH, Dr. H.-M. MÖBUS (Ref. 95 Landesingenieurgeologie)

Grafik: J. CROCOLL, G. FISCHER, C. HUNKLER, A. KOCH, Dr. C. RUCH, B. SCHMÜCKING, Dr. G. WIRSING

Satz und Layout: G. GIESEL

Ausgabe: Juni 2012

© Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Titelbild: Hebungsfigur Staufen (Nov. 2011 – Jan. 2012)



Inhaltsverzeichnis	Seite:
1 Vorbemerkungen	9
2 Entwicklung der Geländehebung	10
3 Brunnenbohrung BB 3	22
3.1 Festlegung des Bohransatzpunktes	22
3.2 Stammdaten, Ausbauhinweise	24
3.3 Geologische Schichtabfolge	28
3.4 Geophysikalische Bohrlochmessungen	30
3.4.1 Beschaffenheit und Struktur der Bohrlochwandung, Bohrlochverlauf (Akustischer Scan)	33
3.4.2 Lithologische Differenzierung der Bohrung (natürliche Gammastrahlung)	34
3.4.3 Lokalisierung von Wasserzutritten (Vertikale Strömungsgeschwindigkeit, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur)	35
4 Hydraulische Maßnahmen und begleitende Überwachung	37
4.1 Dauerabsenkbetrieb EKB 2 bis zur ersten Pumpmaßnahme in der BB 3	37
4.2 Pumpbetrieb in der EKB 2 und der BB 3 seit 01.03.2011.....	40
4.2.1 Pumpbetrieb in der EKB 2 und der BB 3 von 01.03. bis 11.05.2011	40
4.2.1.1 Klarpumpen und Pumpversuch BB 3 vom 01.03. bis 08.03.2011	41
4.2.1.2 Pumpversuch BB 3 und Optimierung des gemeinsamen Absenkbetriebes aus der EKB 2 und der BB 3 vom 01.04. bis 18.04.2011	47
4.2.1.3 Gegenseitige Beeinflussung der Grundwasserentnahmen, Druckreaktionen beim Abteufen der BB 3	50
4.2.2 Dauerabsenkbetrieb in EKB 2 und BB 3 seit 18.04.2011	50
4.3 Grundwasserstandsmessungen in der EKB 1	56

5	Hydrochemische und isotopehydrologische Untersuchungen	57
5.1	Hydrochemische und isotopehydrologische Charakterisierung der Grundwässer	57
5.1.1	BB 3 (Erfurt-Formation (kuE), früher Unterkeuper)	64
5.1.2	EKB 2 (Erfurt-Formation (kuE) und Meißner-Formation (moM), früher Unterkeuper und Oberer Muschelkalk)	66
5.1.3	Weierhofquellen	68
5.1.4	Vergleich der Grundwässer aus EKB 2 und BB 3 (Erfurt- und Meißner-Formation)	69
5.2	Zeitliche Entwicklung der hydrochemischen Zusammensetzung der Grundwässer in EKB 2 und BB 3	72
5.3	Korrelation von elektrischer Leitfähigkeit und Sulfatgehalt der Grundwässer	76
5.4	Anteil der Grundwasserkomponenten aus der Meißner-Formation (Oberer Muschelkalk) bzw. der Erfurt-Formation (Unterkeuper) an der Gesamtförderung aus der EKB 2	78
5.5	Quantifizierung des Sulfataustrags	79
5.6	Zusammenfassende Bewertung	81
6	Untersuchungen in den Erdwärmesonden	83
6.1	Temperaturmessungen	83
6.1.1	Zielsetzungen der Temperaturmessungen und eingesetzte Verfahren	83
6.1.2	Ergebnisse der Temperaturmessungen in den Erdwärme - sonden	84
6.2	Wasserstandsmessungen	94
6.3	Hydrochemie und Isotope	102
7	Zusammenfassung	103
8	Literatur	108

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2.1: Hebungsfigur November 2009 - Januar 2010.
- Abb. 2.2: Hebungsfigur Januar 2010 - März 2010.
- Abb. 2.3: Hebungsfigur März 2010 - Mai 2010.
- Abb. 2.4: Hebungsfigur Mai 2010 - Juli 2010.
- Abb. 2.5: Hebungsfigur Juli 2010 - September 2010.
- Abb. 2.6: Hebungsfigur September 2010 - November 2010.
- Abb. 2.7: Hebungsfigur November 2010 - März 2011.
- Abb. 2.8: Hebungsfigur März 2011 - Mai 2011.
- Abb. 2.9: Hebungsfigur Mai 2011 - Juli 2011.
- Abb. 2.10: Hebungsfigur Juli 2011 - September 2011.
- Abb. 2.11: Hebungsfigur September 2011 - November 2011.
- Abb. 2.12: Hebungsfigur November 2011 - Januar 2012.
- Abb. 2.13: Zeitliche Entwicklung der Hebungsgeschwindigkeit seit Einleitung der schadensbegrenzenden Maßnahmen.
- Abb. 2.14: Zeitliche Entwicklung der absoluten Hebungsbeträge an ausgewählten Messpunkten (MP 9, 7, 12, 13 und 4, Lage der Messpunkte vgl. LGRB 2010).
- Abb. 2.15: Zeitliche Entwicklung der Hebungsgeschwindigkeit an ausgewählten Messpunkten.
- Abb. 2.16: Darstellung der absoluten Hebungsbeträge im Zeitraum Mai 2008 bis Januar 2012.
- Abb. 3.1: Lageplan mit Bohransatzpunkt der Brunnenbohrung BB 3 in Bezug zum Erdwärmesondenfeld sowie den bereits abgeteufte Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2.
- Abb. 3.2: Schematische Darstellung der in der BB 3 angetroffenen geologischen Schichtenfolge in Bezug zu den Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis 3 sowie den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2.
- Abb. 4.1: Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2 vom 18.12.2009 bis zum 28.02.2011 mit kontinuierlicher Aufzeichnung der Pumprate und des abgesenkten Grundwasserspiegels (zur Druckreaktion am 22.02.2011 vgl. Kap. 4.2.1.3).
- Abb. 4.2: Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2 vom 10.11.2009 bis zum 28.02.2011 mit kontinuierlicher Aufzeichnung der Pumprate und der elektrischen Leitfähigkeit des entnommenen Grundwassers sowie der elektrischen Leitfähigkeit der entnommenen Grundwasserproben.
- Abb. 4.3: Pumpmaßnahme in der EKB 2 und BB 3 vom 01.03.2011 bis 11.05.2011: Entnahmeraten (unten) und Absenkbeträge (Mitte) sowie elektrische Leitfähigkeit in der BB 3 und Probenahmen für hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen (oben).

- Abb. 4.4: Wasserstandsänderung (unten) und Entnahmeraten (oben) während des Klarpumpens und des Pumpversuches in der EKB 2 und der BB 3 vom 01.03. bis 08.03.2011. Entnahmeraten- und Wasserstands-Schwankungen in Folge von kurzzeitigen Pumpenausfällen sind nicht dargestellt.
- Abb. 4.5: Wasserstandsänderung in der Hilfsverrohrung der BB 3 sowie zwischen dem Sperrrohr (558 mm) und der Hilfsverrohrung (178 mm, jeweils Außendurchmesser) vom 05.03.2011, 6:40 Uhr bis 08.03.2011, 9:28 Uhr. Kurzfristige Anstiege des Wasserstandes sind durch Pumpenausfälle verursacht. Die für die hydraulische Auswertung verwendeten Kurvenabschnitte sind farblich hervorgehoben (siehe Legende).
- Abb. 4.6: Pumpversuch BB 3 vom 05.03.2011, 6:40 Uhr bis 08.03.2011, 9:28 Uhr: Halblogarithmische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Absenkung (ab 10 min Pumpdauer), Auswertung der Absenkung nach COOPER & JACOB (1946).
- Abb. 4.7: Pumpversuch BB 3 vom 05.03.2011, 6:40 Uhr bis 08.03.2011, 9:28 Uhr: Halblogarithmische Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Wiederanstiegs, Auswertung nach THEIS (1935).
- Abb. 4.8: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten in EKB 1, EKB 2 und BB 3 während des Pumpversuchs in der BB 3 und der Optimierung des Absenkbetriebes in EKB 2 und BB 3 vom 01.04. bis 18.04.2011.
- Abb. 4.9: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten während des Pumpversuchs in der BB 3 und der Optimierung des Absenkbetriebes in EKB 2 und BB 3 vom 01.04. bis 18.04.2011. Die für die hydraulische Auswertung verwendeten Kurvenabschnitte sind farblich hervorgehoben (siehe Legende).
- Abb. 4.10: Pumpversuch BB 3 vom 01.04.2011, 12:24 Uhr, bis 15.04.2011, 12:36 Uhr: Halblogarithmische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Absenkung, Auswertung der Absenkung nach COOPER & JACOB (1946).
- Abb. 4.11: Pumpversuch BB 3: Wiederanstieg vom 15.04.2011, 12:38 Uhr, bis 18.04.2011, 8:28 Uhr: Halblogarithmische Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Wiederanstiegs, Auswertung nach THEIS (1935).
- Abb. 4.12: Gemeinsamer Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2 und der BB 3: Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen von Entnahmerate und Druckwasserspiegel bis zum 27.02.2012.
- Abb. 4.13: Gemeinsamer Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2 und der BB 3: Ergebnisse der kontinuierlichen und im Rahmen von Probenahmen durchgeführten Leitfähigkeitsmessungen bis zum 27.02.2012. Die durch Pfeile markierten Leitfähigkeitssprünge in der EKB 2 beruhen auf Nacheichungen der Messsonden.
- Abb. 4.14: Schematische Darstellung der Grundwasserdruckverhältnisse im Umfeld der EKB 2 und BB 3 bei Dauerabsenkbetrieb.
- Abb. 5.1: Reaktion des Wasserstandes im Sammelbecken der Weiherhofquellen auf Entnahmeratenänderungen in der BB 3 (bei kontinuierlichem Absenkbetrieb in der EKB 2, zwischen dem 16.11. und dem 01.12.2011 war die Pumpe in der BB 3 wegen Installationsarbeiten abgestellt).

- Abb. 5.2: Zusammenstellung der Ergebnisse aller bisher durchgeführten Tritium-Messungen (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen).
- Abb. 5.3: Zusammenstellung der Ergebnisse aller bisher durchgeführten $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen).
- Abb. 5.4: Zusammenstellung der Ergebnisse aller bisher durchgeführten ^{13}C -Messungen (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen).
- Abb. 5.5: Zusammenstellung der Ergebnisse aller bisher durchgeführten ^{14}C -Messungen (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen).
- Abb. 5.6: Korrelation $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ -Gehalte (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen, kuL: Erfurt-Formation (kuE), mo2: Meißner-Formation (moM)).
- Abb. 5.7: Korrelation $^{18}\text{O}/^{14}\text{C}$ -Gehalte (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen, kuL: Erfurt-Formation (kuE), mo2: Meißner-Formation (moM)).
- Abb. 5.8: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus der Erfurt-Formation (kuE, Unterkeuper) der Brunnenbohrung BB 3.
- Abb. 5.9: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus der Erfurt-Formation (kuE, Unterkeuper) und Meißner-Formation (moM, Oberer Muschelkalk) der Bohrung EKB 2.
- Abb. 5.10: PIPER-Diagramm: Vergleich der Grundwässer der beiden Entnahmestellen EKB 2 und BB 3, der Weiherhofquelle und des Brunnens Schladerer neu (Nomenklatur nach FURTA & LANGUTH (1967): A: normal erdalkalische, überwiegend hydrogen-carbonatische Wässer, B: normal erdalkalische, hydrogencarbonatisch-sulfatische Wässer, C: normal erdalkalische, überwiegend sulfatische Wässer, D: erdalkalisch-alkalische, überwiegend hydrogencarbonatische Wässer, E: erdalkalisch-alkalische, überwiegend sulfatisch-chloridische Wässer, F: alkalische, überwiegend hydrogen-carbonatische Wässer, G: alkalische, überwiegend sulfatisch-chloridische Wässer).
- Abb. 5.11: Hauptinhaltsstoffe der Grundwässer aus der EKB 2 und der Brunnenbohrung BB 3 (Analysen seit März 2010; aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden nur ausgewählte Untersuchungsergebnisse dargestellt). Zu Vergleichszwecken wurden ebenfalls die Analysen der Weiherhofquelle dargestellt.
- Abb. 5.12: Korrelationsdiagramm Natrium / Kalium (doppellogarithmische Darstellung).
- Abb. 5.13: Korrelationsdiagramm Cäsium / Aluminium (doppellogarithmische Darstellung).
- Abb. 5.14: Korrelationsdiagramm Calcium / Sulfat (doppellogarithmische Darstellung).
- Abb. 5.15: Zeitliche Entwicklung der hydrochemischen Zusammensetzung des Grundwassers der EKB 2 (Erfurt-Formation, kuE, Unterkeuper und Meißner-Formation, moM, Oberer Muschelkalk).
- Abb. 5.16: Zeitliche Entwicklung der hydrochemischen Zusammensetzung des Grundwassers der BB 3 (Erfurt-Formation, kuE, Unterkeuper).
- Abb. 5.17: Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Sulfatgehalt der entnommenen Grundwasserproben vom 10.11.2009 bis 08.02.2012.

- Abb. 5.18: Korrelation zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Sulfatgehalt der entnommenen Grundwasserproben (Bestimmtheitsmaße Korrelation EKB 2: $R^2 = 0,99$, BB 3: $R^2 = 0,93$). Die Proben der BB 3 vom 04., 05. und 07.03.2011 zeigen noch Einfluss der Bohrspülung, deshalb wurden sie in die Korrelation nicht mit einbezogen (die Daten vom 02.03.2011 sind nicht dargestellt, da sie sehr stark durch die Bohrspülung beeinflusst sind).
- Abb. 6.1: Temperaturprofile EWS 1. Die Messung vom 09.02.2010 ist über die gesamte Tiefe stark durch Hydratationswärme beeinflusst (0 - 50,6 m u. GOK zwischen etwa 16,0 und 18,5 °C) und deshalb nicht dargestellt.
- Abb. 6.2: Temperaturprofile EWS 2.
- Abb. 6.3: Temperaturprofile EWS 3. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Messungen vom 22.02. und 17.11.2010 nicht dargestellt.
- Abb. 6.4: Temperaturprofile EWS 4.
- Abb. 6.5: Temperaturprofile EWS 5.
- Abb. 6.6: Temperaturprofile EWS 6. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Messungen vom 03.12.2009, 03.02. und 17.11.2010 nicht dargestellt.
- Abb. 6.7: Temperaturprofile EWS 7.
- Abb. 6.8: Beispiele für konstante Wasserstände in vollständig dichten EWS-Rohren: Erdwärmesonderohre 7-2 und 7-3 (03.03.2011 bis 17.02.2012). In den Rohren kam es bei den Temperaturmessungen am 20.04. und 05.07.2011 durch die Befahrung mit der Temperaturkabelsonde zu Wasserverlusten (plötzliches Absinken des Wasserstands).
- Abb. 6.9: Beispiele für fallende Wasserstände: Erdwärmesonderohre EWS 2-3 und EWS 5-2 vom 26.04.2010 bis 17.02.2012. Bei der EWS 2-3 liegt der Wasserspiegel seit dem 18.11.2011 unterhalb 60,5 m u. GOK, einer für das Lichtlot nicht passierbaren Engstelle.
- Abb. 6.10: Beispiele für fallende Wasserstände mit Überlagerung durch Pumpbetrieb: Erdwärmesonderohre EWS 2-1 und EWS 2-2 vom 03.03.2011 bis 27.02.2012. Die Drucksonde in der EWS 2-1 wurde am 09.12.2011 10 m tiefer gehängt, was eine plötzliche Abnahme des Wasserstandes verursachte.
- Abb. 6.11: Vergleich der Wasserstände in den Erdwärmesonderohren EWS 3-1 und EWS 5-1 vom 03.03.2011 bis 27.02.2012.
- Abb. 6.12: Wasserstand in den Erdwärmesonderohren EWS 6-1 und EWS 6-2 vom 03.03.2011 bis 17.02.2012.

Tabellenverzeichnis

- Tab. 2.1: Hebungsverlangsamung (nach volumetrischer Auswertung*) seit Beginn der Abwehrmaßnahmen ab September 2009.
*) ermittelt aus Volumen Neubildung an der Geländeoberfläche je Messperiode
**) Werte in Teilbereichen durch oberflächennahes Schwinden in Folge mehrmonatiger Trockenheit beeinflusst
- Tab. 3.1: Stammdaten der Brunnenbohrung BB 3.
- Tab. 3.2: Festgestellte Spülungsverluste während des Abteufens der Brunnenbohrung BB 3.
- Tab. 3.3: Qualitative Analysenergebnisse aus der Brunnenbohrung BB 3.
- Tab. 3.4: Geophysikalische Bohrlochmessungen in der BB 3.
- Tab. 3.5: Strukturen in der Bohrlochwandung der BB 3 mit Tiefenangaben in m u. GOK. Ebenfalls ermittelte Schichtflächen sind nicht aufgeführt (siehe Anl. 3.5).
- Tab. 4.1: Ablauf des Klarspülens und des Pumpversuchs in der BB 3 vom 01.03.2011 bis 08.03.2011 (nach GEOSSENS 2011a).
- Tab. 4.2: Betriebsplan des Pumpversuches in der BB 3 vom 01.04.2011 bis 18.04.2011 (mit vorheriger Reduzierung der Entnahmerate in der EKB 2). Aufgeführt sind die erreichten Pumpraten, nachdem sich ein annähernd konstanter Wasserspiegel eingestellt hat (nach Bericht GEOSSENS, 2011b).
- Tab. 5.1: Hydrochemische und isopenhydrologische Beprobungen in EKB 1, EKB 2 und BB 3 seit November 2009 (moM: Meißner-Formation, kuE: Erfurt-Formation)
- Tab. 5.2: Zusammenstellung wichtiger hydrochemischer Inhaltsstoffe und der isotopischen Zusammensetzung der Grundwässer aus Unterkeuper (Erfurt-Formation, kuE) und Oberem Muschelkalk (Meißner-Formation, moM) sowie der Weiherhofquellen des Laufbrunnens Innenhof Schladerer und des Brunnens neu Schladerer.
*von 04.03.2011 bis 04.04.2011 Einfluss durch inhibierte Bohrspülung
+ evtl. Einfluss durch inhibierte Bohrspülung
- Tab. 5.3: Anteilige Grundwasserkomponenten aus dem Oberen Muschelkalk bzw. Unterkeuper an der Gesamtförderung aus der EKB 2, ermittelt durch Mischungsrechnung anhand der elektrischen Leitfähigkeiten.
- Tab. 5.4: Eingangsdaten für die Bilanzierung der aus der EKB 2 geförderten Sulfatfracht.
- Tab. 5.5: Eingangsdaten für die Bilanzierung der aus der BB 3 geförderten Sulfatfracht.
- Tab. 6.1: Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 seit dem 09.02.2010 (davor durchgeführte Messungen siehe LGRB 2010). Angegeben sind Methode (Profilmessung mit Kabelsonde (15 mm) oder glasfaseroptische Messung (Glasfaserkabel 11 oder 3 mm Durchmesser)), die erreichten Messtiefen (ET, Bezugspunkt GOK) und das gemessene Sondenrohr (EWS - Rohr, z.B. 1-2). In Rot: Temperaturmessungen, die stark durch die Hydratationswärme der Verpress-Maßnahmen in den Erdwärmesonden beeinflusst sind.
- Tab. 6.2: Ergebnisse der Wasserstandsmessungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 (2011-2012). Mehrfachnennung bei der Kategorisierung möglich.



Anlagenverzeichnis

- Anlage 3.1: Zeichnerische Darstellung der BB 3 mit Ausbauplan
- Anlage 3.2: Bohrprofil BB 3
- Anlage 3.3: BB 3: Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen (ausgeführt durch Fa. terratec, Heitersheim)
- Anlage 3.4: BB 3: Ergebnisse des Akustischen Scans (BHTV) (ausgeführt durch Fa. terratec, Heitersheim)
- Anlage 3.5: Bohrlochstrukturen BB 3 und Schmidt-Plots
Quelle: Bericht der Fa. terratec (TERRATEC, 2011)
- Anlage 3.6: Bohrprofile EKB 2 und BB 3 und Korrelation der natürlichen Gammastrahlung in den Bohrungen
-
- Anlage 5.1: Ergebnisse der hydrochemischen Untersuchungen (Teil 1)
- Anlage 5.2: Ergebnisse der hydrochemischen Untersuchungen (Teil 2)
- Anlage 5.3: Ergebnisse der hydrochemischen Untersuchungen (Teil 3)
- Anlage 5.4: Ergebnisse der isotopenhydrologischen und Spurengas-Untersuchungen

1 Vorbemerkungen

Im September 2007 wurden im Auftrag der Stadt Staufen in der Rathausgasse in Staufen sieben Erdwärmesonden gebaut, um das denkmalgeschützte renovierte Rathaus mit Erdwärmetechnologie zu heizen und zu kühlen.

Etwa zwei Wochen nach Fertigstellung der Erdwärmesonden wurden Anfang Oktober 2007 erstmals Risse im neu renovierten Rathaus und in benachbarten Gebäuden festgestellt. In der Folge hat sich die Schadensentwicklung auf weite Teile des Altstadtgebietes ausgeweitet.

Mit Kabinettsentscheidung vom 12. Januar 2009 wurde das Regierungspräsidium Freiburg beauftragt, belastbare Daten- und Informationsgrundlagen zu schaffen, anhand derer geeignete schadensbegrenzende Maßnahmen aufgezeigt werden können, deren Kosten abzuschätzen und dem Wirtschaftsministerium darüber zu berichten.

Nach Abschluss der Erkundungsarbeiten und Einleitung der Abwehrmaßnahmen im September 2009 (Verpressen der Erdwärmesondenbohrungen, Einleitung der Dauerpumpmaßnahme) ist der Hebungsprozess rückläufig und nimmt seitdem nahezu linear ab.

Die Ergebnisse der Erkundung und der ergriffenen Abwehrmaßnahmen bis März 2010 wurden vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg (LGRB) in dem umfangreichen Sachstandsbericht „Geologische Erkundungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br.“ (LGRB 2010) zusammengestellt, der seitdem auf der Internetseite des LGRB veröffentlicht ist (http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/home/schadensfall_staufen_bericht). Sie wurden bei einer Fachveranstaltung am 22. Februar 2010 in Staufen sowohl Fachleuten als auch einem breiten Publikum vorgestellt. Darüber hinaus wurden sie in der Folge von Vertretern des LGRB und des Ingenieurbüros für Geotechnik, Kirchzarten, mehrfach bei Kongressen und Fachveranstaltungen dem Fachpublikum aus den Bereichen Geologie, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, Geothermie und Geotechnik vorgetragen und zur Diskussion gestellt.

Die seit Veröffentlichung des ersten Sachstandsberichtes beim Bau der Brunnenbohrung BB 3 angefallenen, sowie alle sonstigen zwischenzeitlich neu hinzugewonnenen Untersuchungs- und Monitoringergebnisse werden im vorliegenden zweiten Sachstandsbericht mit Stand Ende Februar 2012 dokumentiert. Er wird wie der erste Sachstandsbericht auf der Homepage des LGRB eingestellt.

2 Entwicklung der Geländehebung

In den nachfolgenden Abbildungen 2.1 bis 2.12 sind die im Zeitraum Januar 2010 bis Januar 2012 gemessenen Hebungsfiguren als flächenhafte Verteilung der Hebungs-
geschwindigkeiten (Millimeter pro Monat) fortgeschrieben. Das LGRB informiert in
einer animierten Zeitreihendarstellung kontinuierlich über die aktuelle Entwicklung
der Hebungsfigur

(http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/home/schadensfall_staufen_entwicklung).

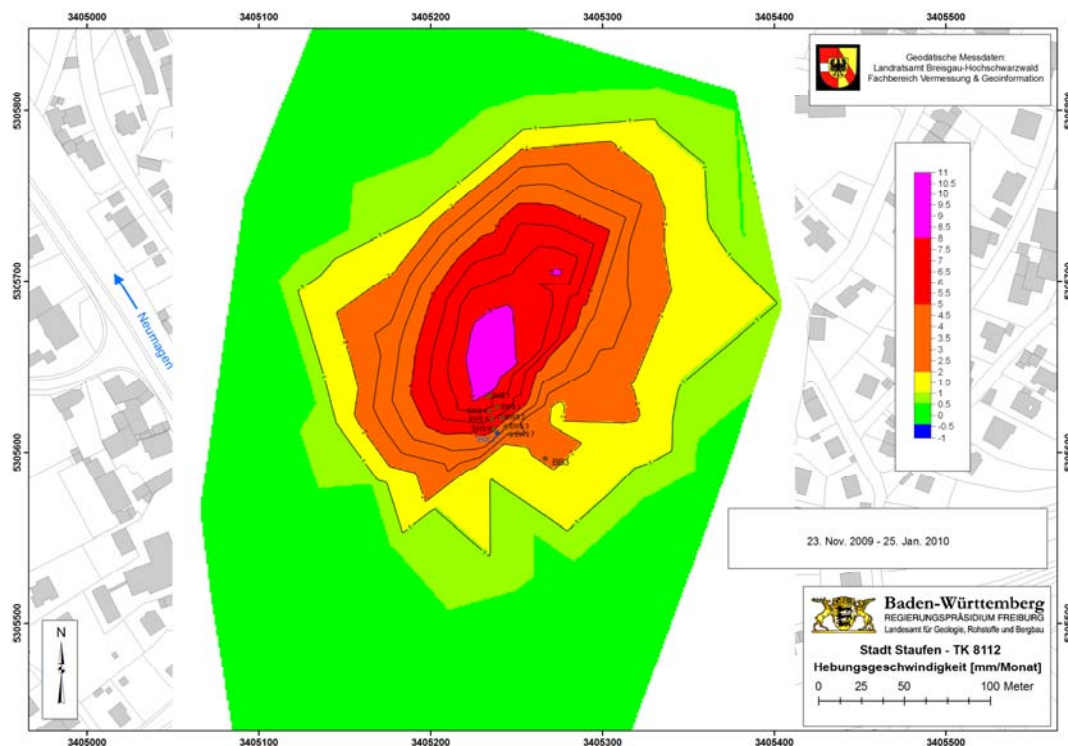


Abb. 2.1: Hebungsfigur November 2009 - Januar 2010.

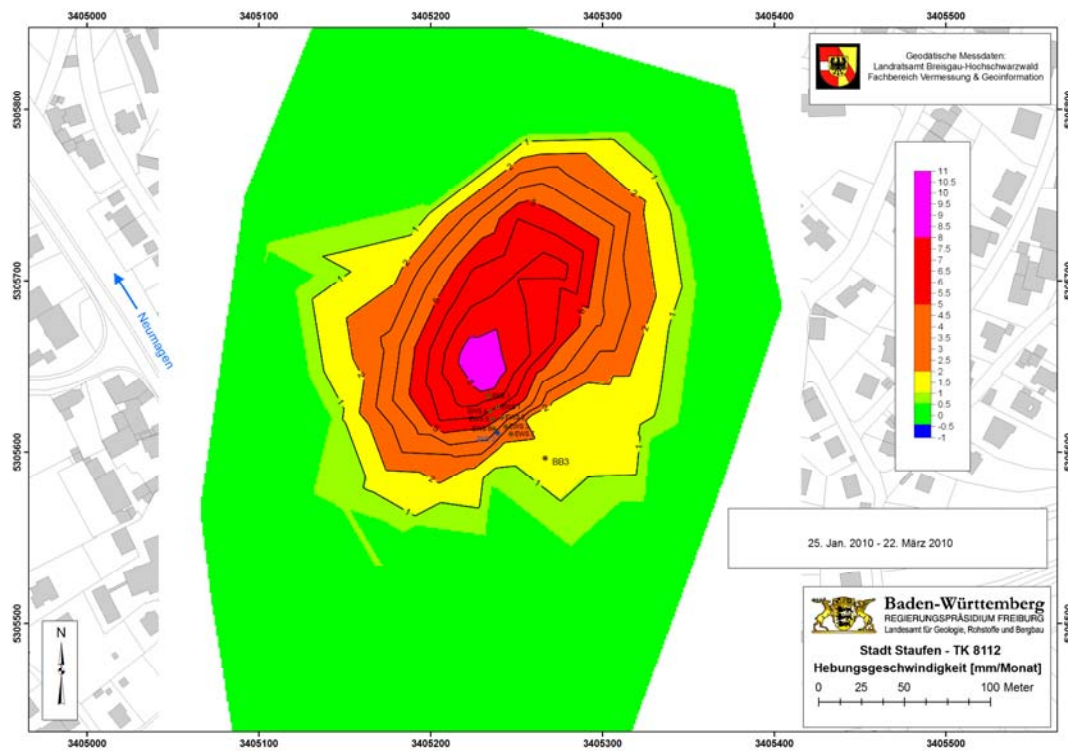


Abb. 2.2: Hebungsfigur Januar 2010 - März 2010.

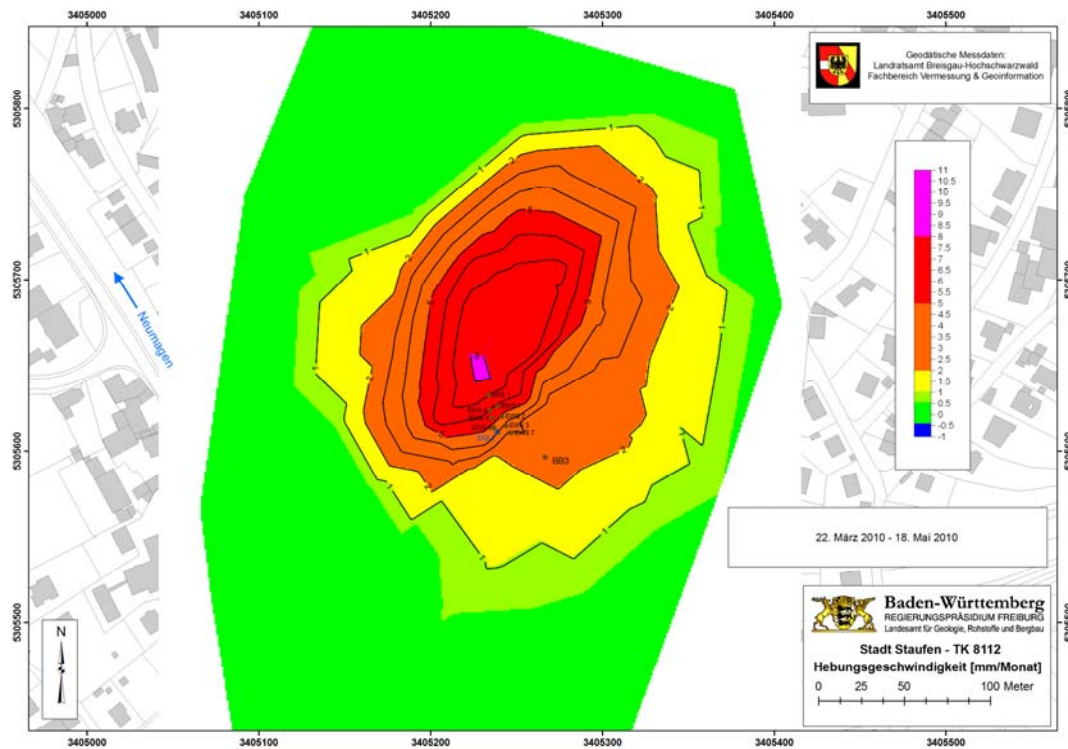


Abb. 2.3: Hebungsfigur März 2010 - Mai 2010.

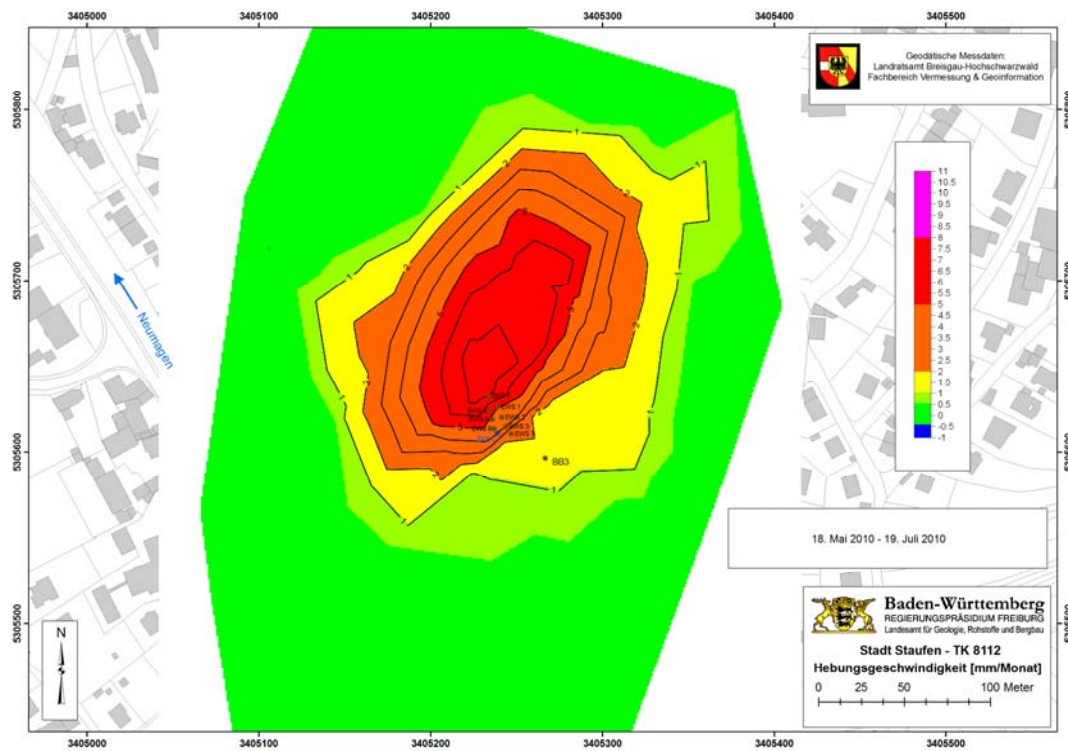


Abb. 2.4: Hebungsfigur Mai 2010 - Juli 2010.

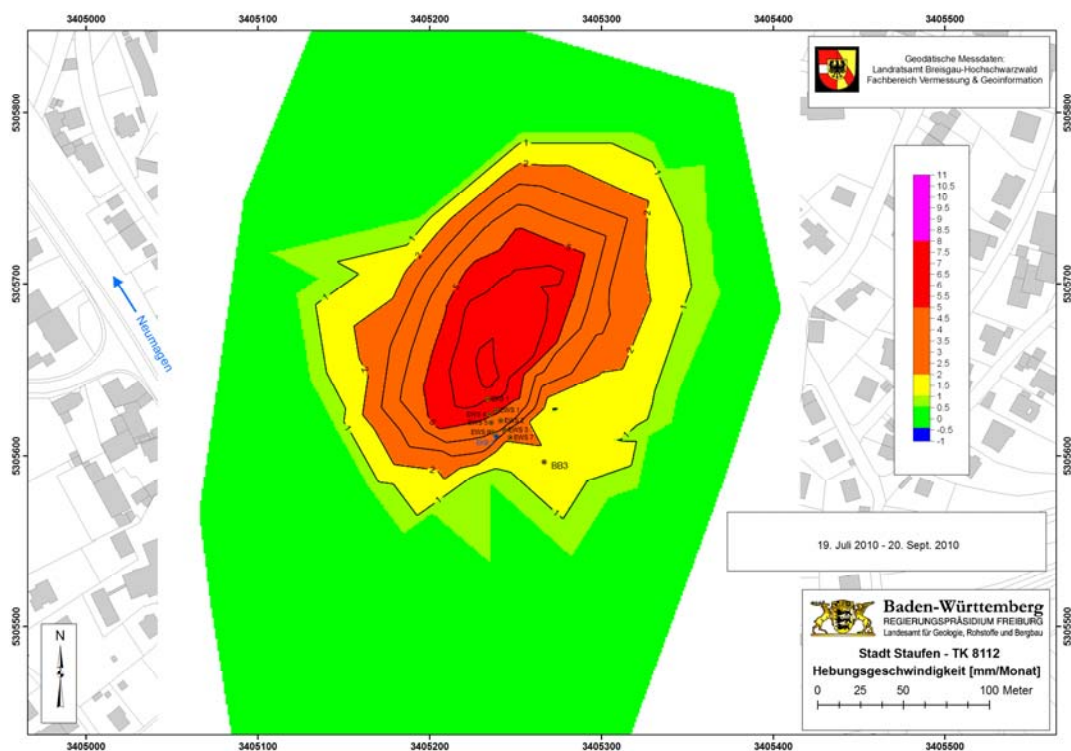


Abb. 2.5: Hebungsfigur Juli 2010 - September 2010.

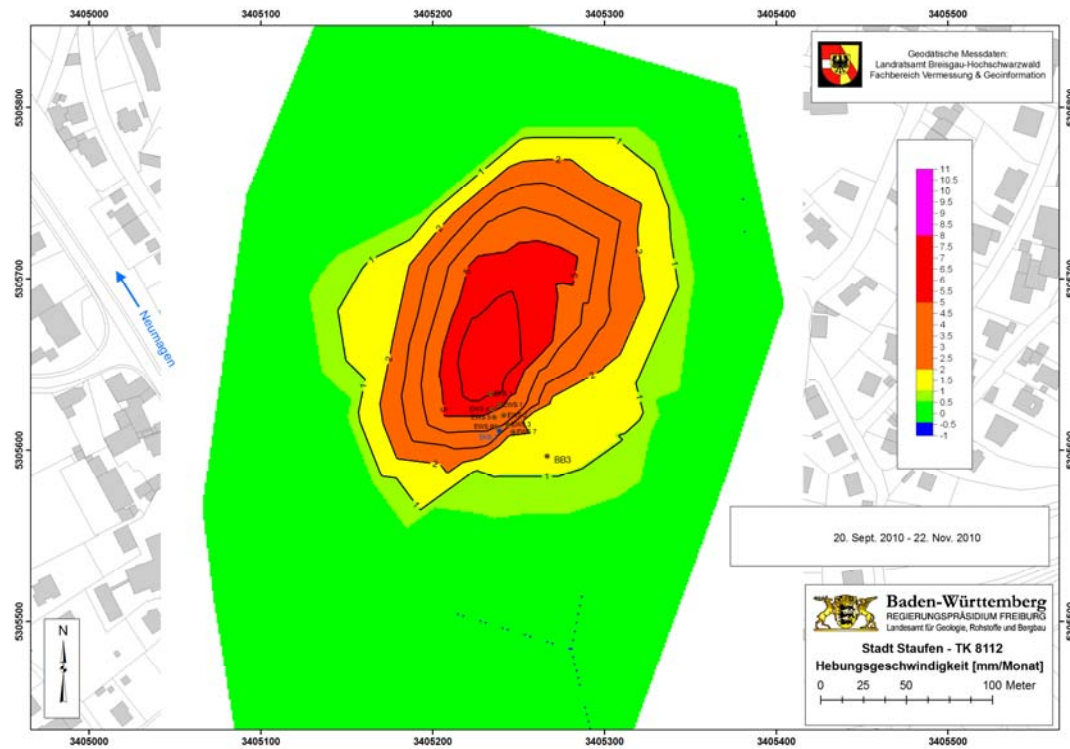


Abb. 2.6: Hebungsfigur September 2010 - November 2010.

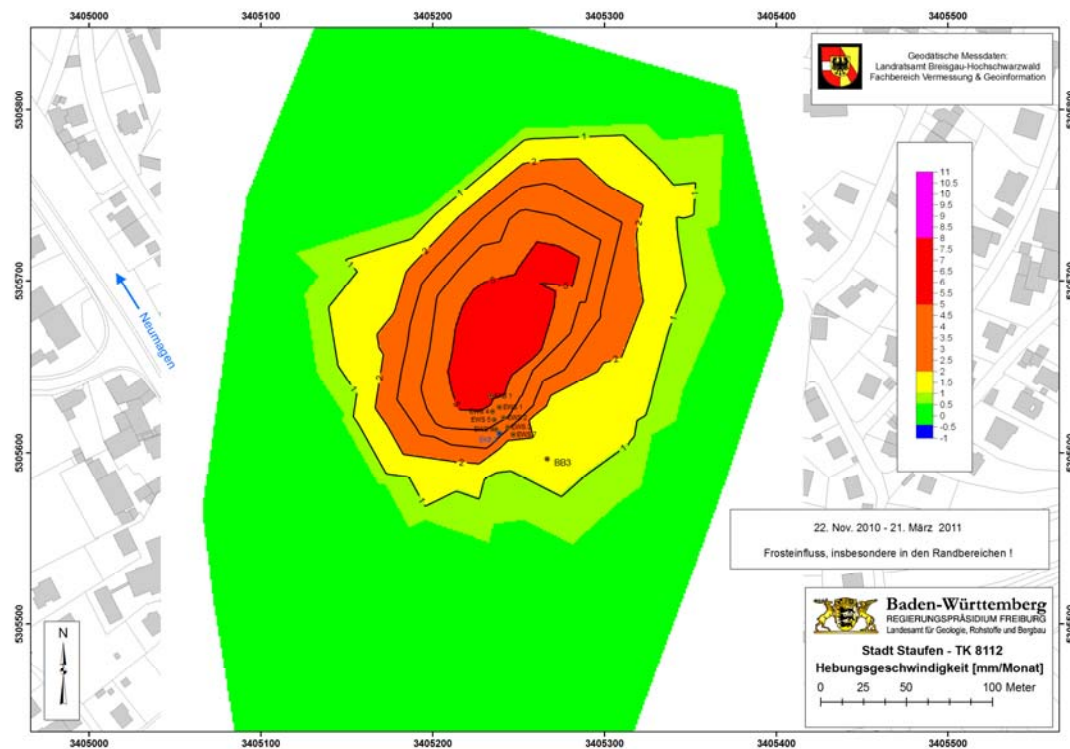


Abb. 2.7: Hebungsfigur November 2010 - März 2011.

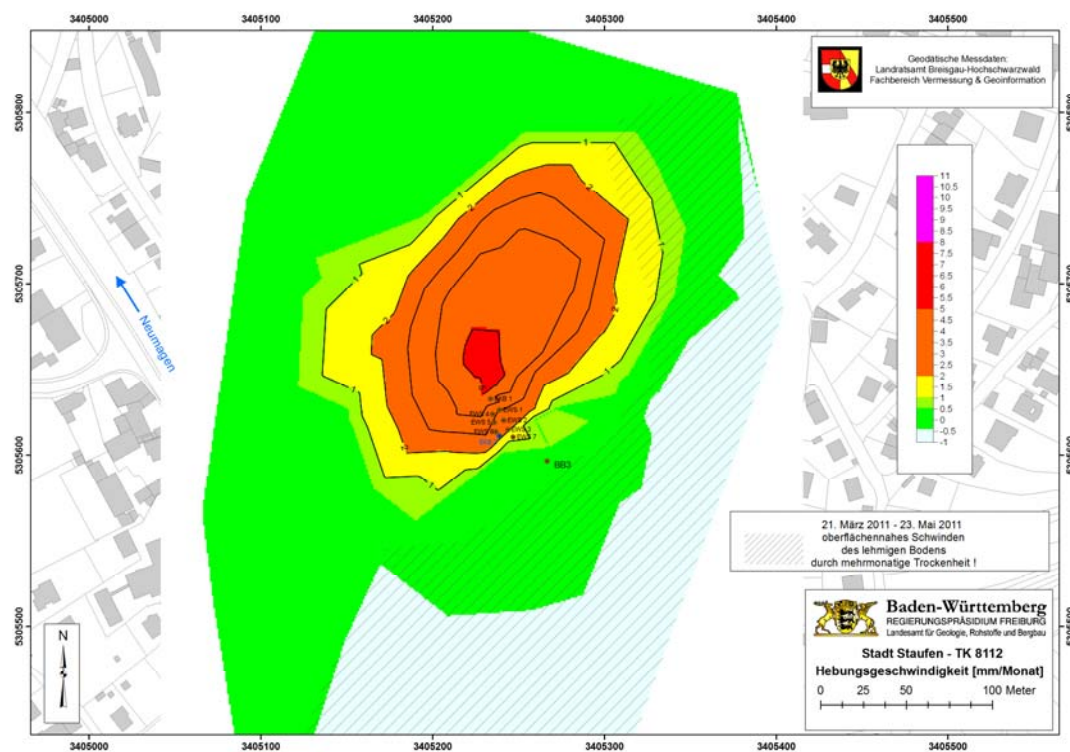


Abb. 2.8: Hebungsfigur März 2011 - Mai 2011.

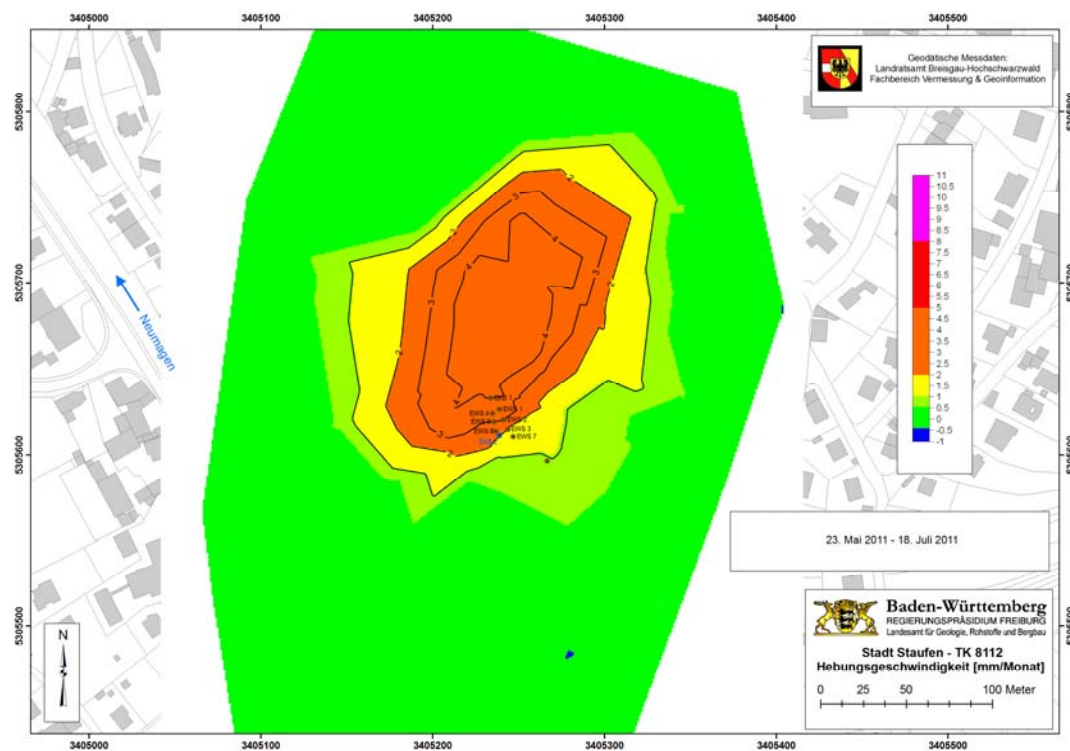


Abb. 2.9: Hebungsfigur Mai 2011 - Juli 2011.

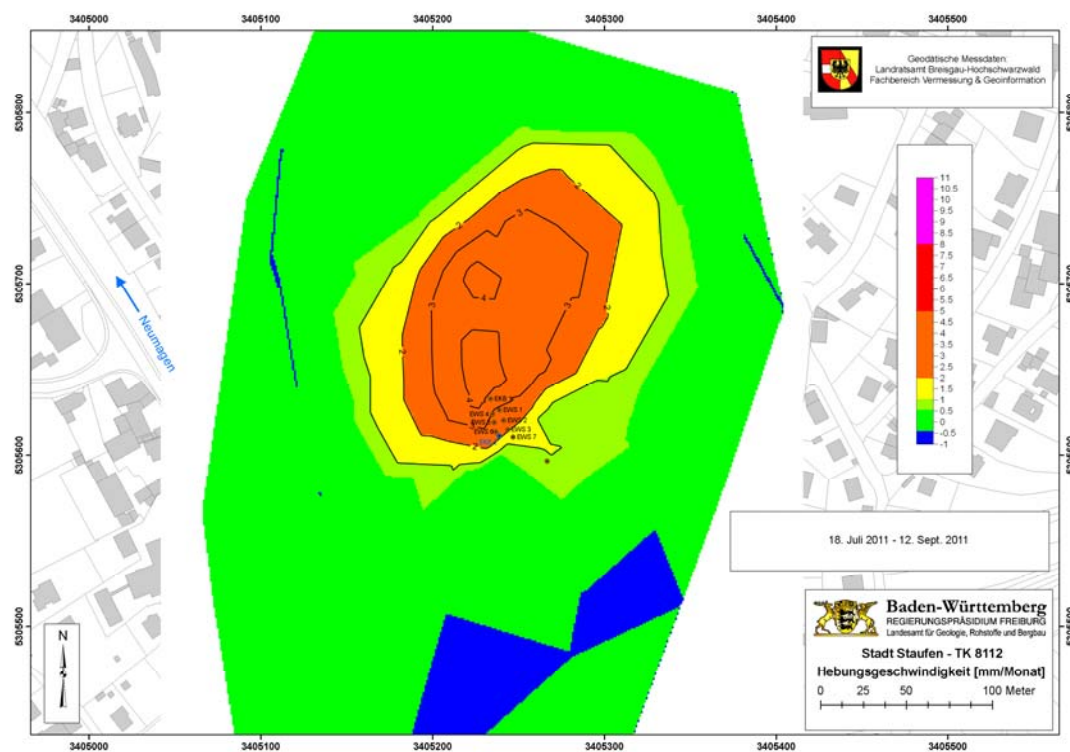


Abb. 2.10: Hebungsfigur Juli 2011 - September 2011.

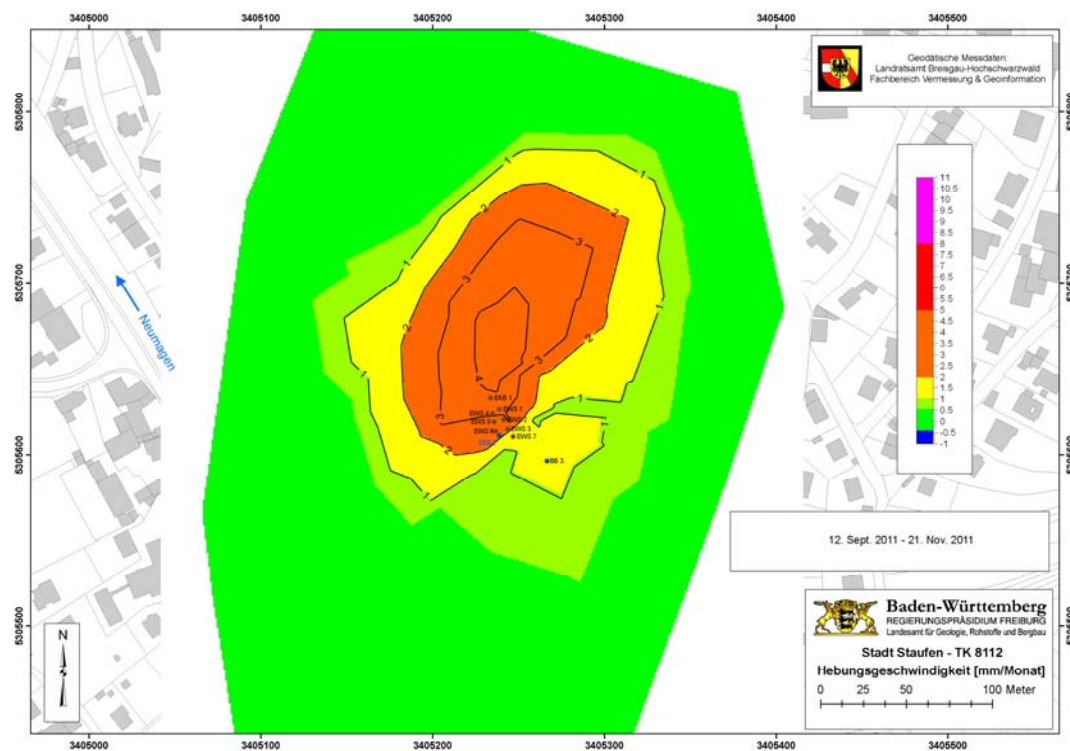


Abb. 2.11: Hebungsfigur September 2011 - November 2011.

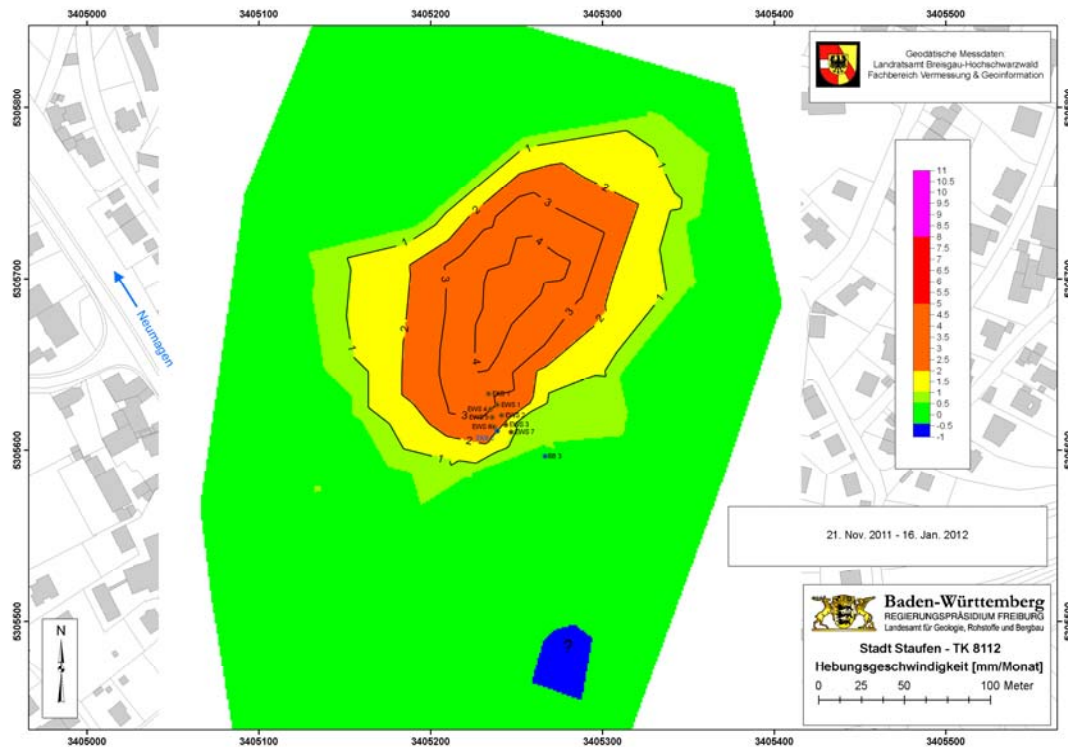


Abb. 2.12: Hebungsfigur November 2011 - Januar 2012.

Der im ersten Sachstandsbericht vom März 2010 beschriebene Trend, wonach sich der Hebungsprozess verlangsamt, hält im Betrachtungszeitraum bis Januar 2012 kontinuierlich an. Legt man den Zeitraum Mai 2008 bis September 2009 als Ausgangsgeschwindigkeit (100 %) zugrunde, in dem sich die Hebungsgeschwindigkeit kaum nennenswert veränderte, dann verlangsamt sich die Hebungsgeschwindigkeit seither wie in Tab. 2.1 dargestellt.

Abbildung 2.13 zeigt die zeitliche Entwicklung der Prozessgeschwindigkeit für den Gesamt- wie auch den Zentralbereich graphisch.

Die im Laufe der Messungen gewonnene Erfahrung bei der Interpretation der Messergebnisse zeigt, dass die hochgenauen geodätischen Höhenmessungen von saisonalen Prozessen überlagert sein können. Einerseits führen länger anhaltende Frostperioden zu einem zusätzlichen Hebungsbeitrag in Folge von Eislinnenbildung, andererseits führen lang anhaltende Trockenwetterperioden zu einem austrocknungsbedingten oberflächennahen Schwinden. Hiervon sind besonders Messpunkte über feinkörnigen Böden (z. B. Hanglehme, Verwitterungslehme, Abschwemm-massen) betroffen, wohingegen Punkte über grobkörnigem Neumagenschotter weniger beeinflusst werden.

Tab. 2.1: Hebungsverlangsamung (nach volumetrischer Auswertung*) seit Beginn der Abwehrmaßnahmen ab September 2009.

*) ermittelt aus Volumenneubildung an der Geländeoberfläche je Messperiode

**) Werte in Teilbereichen durch oberflächennahes Schwinden in Folge mehrmonatiger Trockenheit beeinflusst

Messperiode	Mai 2008 - Sept. 2009	Mai 2010 - Juli 2010	Juli 2010 - Sept. 2010	Sept. 2010 - Nov. 2010	März 2011 - Mai 2011	Mai 2011 - Juli 2011
Hebungsgeschwindigkeit (im Gesamtbereich)	100 %	74 % (-26 %)	70 % (- 30 %)	59 % (- 41 %)	40 % (-60 %)**	43 % (-57 %)
Hebungsgeschwindigkeit (im zentralen Bereich)	100 %	69 % (- 31 %)	68 % (- 32 %)	62 % (- 38 %)	46 % (- 54 %)**	45 % (-55 %)

Messperiode	Mai 2008 - Sept. 2009	Juli 2011 - Sept. 2011	Sept. 2011 - Nov. 2011	Nov. 2011 - Jan. 2012
Hebungsgeschwindigkeit (im Gesamtbereich)	100 %	36 % (-64 %)	44 % (-56 %)	38 % (-62 %)
Hebungsgeschwindigkeit (im zentralen Bereich)	100 %	40 % (-60 %)	41,5 % (-58,5 %)	38 % (-62 %)

Die strenge Frostperiode zwischen Dezember 2010 und Januar 2011 wie auch die unter Frostbedingungen erfolgte Messung im Januar 2012 ergaben den Hebungsprozess zusätzlich überlagernde Hebungsbeträge, so dass für Januar 2011 auf eine graphische Auswertung der Hebungsfigur verzichtet wurde. Auf Grund der extremen Trockenheit im Frühjahr 2011 haben sich die an der südöstlichen bis östlichen Peripherie des Hebungsereichs gelegenen Messpunkte geringfügig gesetzt. Der betroffene Bereich wurde in der Hebungsfigur vom Mai 2011 durch eine Übersignatur (Schraffur) kenntlich gemacht (Abb. 2.8). Die Flächenschraffur des Bereichs wurde an Hand des hochauflösenden digitalen Geländemodells (NN+287 m - Höhenlinie), der Geologischen Karte (Verbreitung von Abschwemmmassen bzw. Verwitterungstönen) sowie aus dem Vergleich der früheren und heutigen "Nulllinie" abgegrenzt.

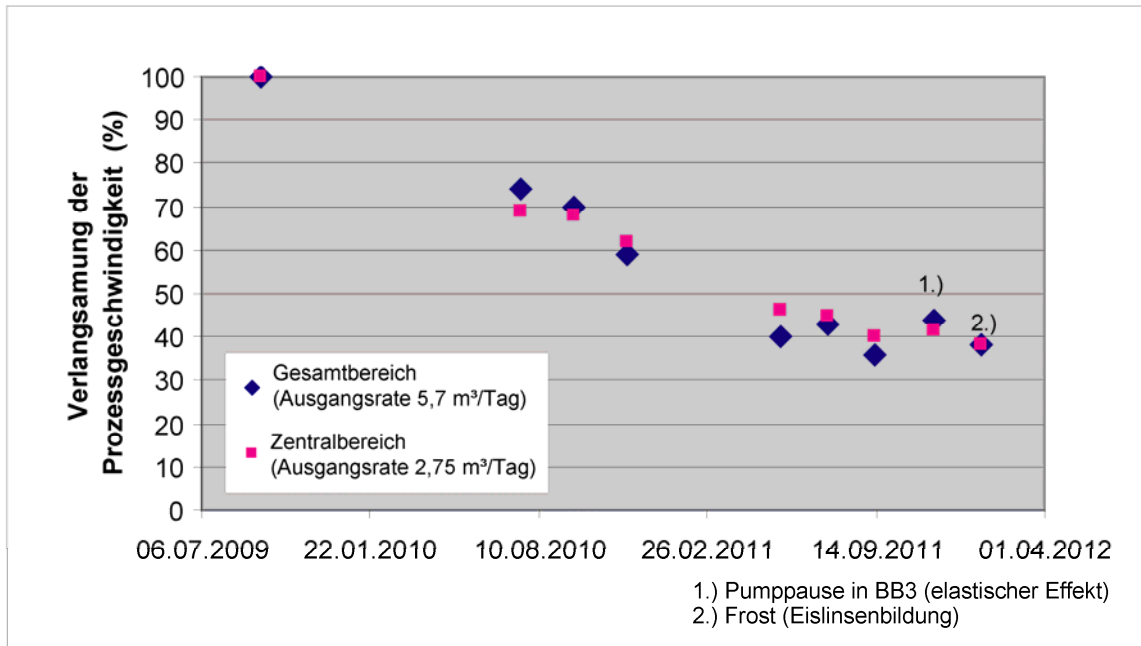


Abb. 2.13: Zeitliche Entwicklung der Hebungsgeschwindigkeit seit Einleitung der schadensbegrenzenden Maßnahmen.

Im Zentralbereich tritt dieser Effekt eher zurück, da hier oberflächennah Neumagenschotter anstehen. Die bei großer Trockenheit des Frühjahres und Sommers 2011 zu beobachtenden zusätzlichen Setzungsbeträge verlieren sich ab der zweiten Jahreshälfte 2011 mit zunehmendem Durchfeuchtungsgrad wieder. In der Woche vor der Messrunde vom 21. November 2011 wurde aus Gründen von Wartungs- und endgültigen Ausbauarbeiten der neue Pumpbrunnen BB 3 abgestellt. Dadurch zeigten die Messungen eine geringfügige zusätzliche Hebung an der Geländeoberfläche (im Millimeter-Bereich), die als (elastisches) „Rückfedern“ des Gebirges im Einflussbereich der in BB 3 erzeugten Grundwasserabsenkung interpretiert wird. In Abb. 2.11 tritt dies mit einer erweiterten gelben Fläche (0,5-2 mm/Monat) im Umfeld von BB 3 am Südostrand der Hebungsfigur in Erscheinung. Dieser Effekt erwies sich - wie die nachfolgende Messung im Januar 2012 belegt (Abb. 2.12) - nach Wiederinbetriebnahme von BB 3 als reversibel.

Die Abb. 2.14 verdeutlicht die zeitliche Entwicklung der absoluten Hebungsbeträge von Januar 2008 bis Januar 2012 am Beispiel von fünf ausgewählten Beobachtungspunkten im Zentrum der Hebungsfigur in der Rathausgasse (MP 9, 7, 12 und 13) und an der westlichen Peripherie des zentralen Hebungsgebietes in der Hauptstraße (MP4).

Die Hebung verlief seit Beginn der regelmäßigen Messungen ab 05. Mai 2008 bis September 2009 weitgehend linear mit einer im Hebungszenentrum maximalen verti-

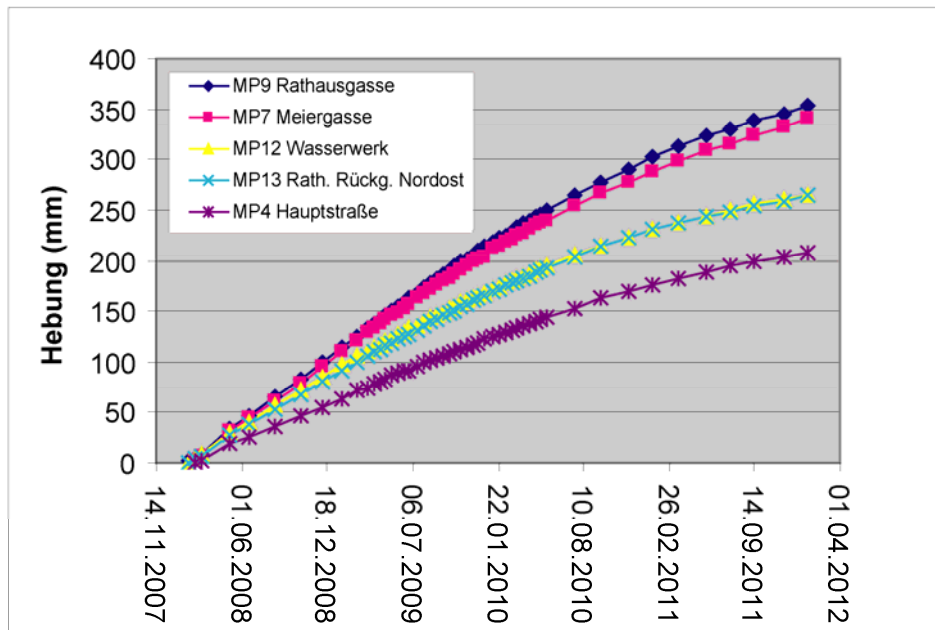


Abb. 2.14: Zeitliche Entwicklung der absoluten Hebungsbeträge an ausgewählten Messpunkten (MP 9, 7, 12, 13 und 4, Lage der Messpunkte vgl. LGRB 2010).

kalen Hebungsrate bis zu 11 mm/Monat. Das Hebungszenrum liegt im Bereich der Rathausgasse. Ab September 2009 setzte die bereits oben beschriebene Verlangsamung des Hebungsprozesses ein und kommt in einer allmählichen Verflachung der dargestellten Messkurven zum Ausdruck.

Deutlicher kommt die Prozessverlangsamung in der Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Hebungsgeschwindigkeiten zum Ausdruck. Die Abb. 2.15 zeigt die für die gleichen Beobachtungspunkte ausgewertete Entwicklung der Hebungsgeschwindigkeit. Darin ist erkennbar, dass nach einer etwa fünfmonatigen ersten Phase (I) seit Abschluss der EWS-Bohrarbeiten die Hebungsgeschwindigkeit in der Phase (II) zumindest in den ersten 100 Tagen des Messzeitraumes rasch bis auf maximal 0,37 mm/Tag (MP 9 und MP 7) ansteigt, um anschließend in einer dritten Phase (III) in eine geringere „Plateau-Geschwindigkeit“ überzugehen. Etwa ab September 2009 zeigt sich in vierter Phase (IV) in allen dargestellten Messpunkten eine deutliche Verlangsamung der Hebungsgeschwindigkeit. Diese Verlangsamung verläuft weitgehend kontinuierlich und dauert bis heute an. Die Januarmessung 2012 ist durch eine geringfügige frostbedingte Hebung überlagert (s. o.), was sich in der Auswertung durch eine Stagnation (MP 12,13 und 4) bzw. eine leichte Geschwindigkeitszunahme (MP 7 und 9) darstellt.

Die seit Mai 2008 bis Januar 2012 gemessenen absoluten Hebungen betragen im Maximum bis 35 cm (MP 42). Sie sind in Abb. 2.16 für das Hebungsgebiet darge-

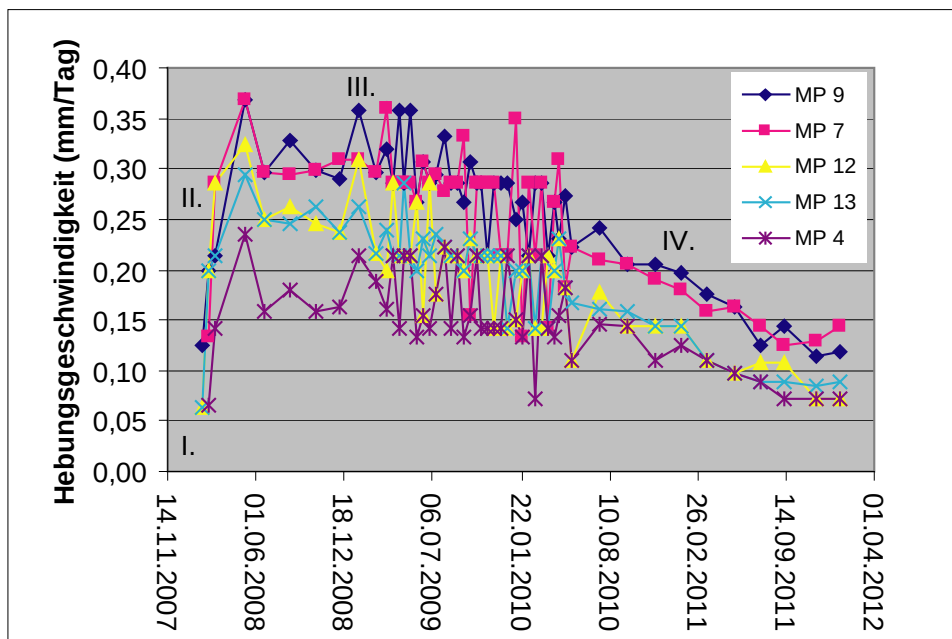


Abb. 2.15: Zeitliche Entwicklung der Hebungsgeschwindigkeit an ausgewählten Messpunkten.

stellt. Diesen Absolutbeträgen sind für den Zeitraum seit Abschluss der Erdwärmesondenbohrungen bis Mai 2008 im Zentrum noch weitere Hebungen im Zentimeterbereich zu addieren, die nur anhand ungenauer früherer Kanalhöhenbeobachtungen abgeschätzt werden können und daher in die flächenhafte Auswertung der absoluten Hebungsbeträge nicht einbezogen wurden.

Bei allen in diesem Kapitel flächenhaft ausgewerteten Geländevertorfungen ist nur die messtechnisch weitaus präziser messbare Vertikalkomponente berücksichtigt. Der Hebungsprozess ist jedoch noch von einer Horizontalkomponente begleitet (vgl. Sachstandsbericht, LGRB 2010). Das genaue Ausmaß der Horizontalkomponente wird anhand radialsymmetrisch über das Altstadtgebiet orientierter Messstrecken ermittelt. Diese Messergebnisse liegen dem LGRB bislang noch nicht vor. Die hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeiten etwas weniger präzise Auswertung der Lageverschiebung amtlicher Katasterpunkte (Fehlervektoren, Messung des Landratsamts Breisgau-Hochschwarzwald vom 26. September 2011) erbrachte entlang der Meiergasse Horizontalverschiebungen zwischen 17 cm und 30 cm nach Nordwest und entlang der Kirchstraße zwischen 4 cm und 9 cm nach Südost. Zwischen Meiergasse und Kirchstraße wurden an einem Katasterpunkt in der Jänergasse keine signifikanten Horizontalverschiebungen gemessen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich der Hebungsprozess seit Beginn der Abwehrmaßnahmen im September 2009 (Dauerpumpmaßnahme, Verpressen der Erdwärmesondenbohrungen) verlangsamt und seit September 2009 bis Januar 2012

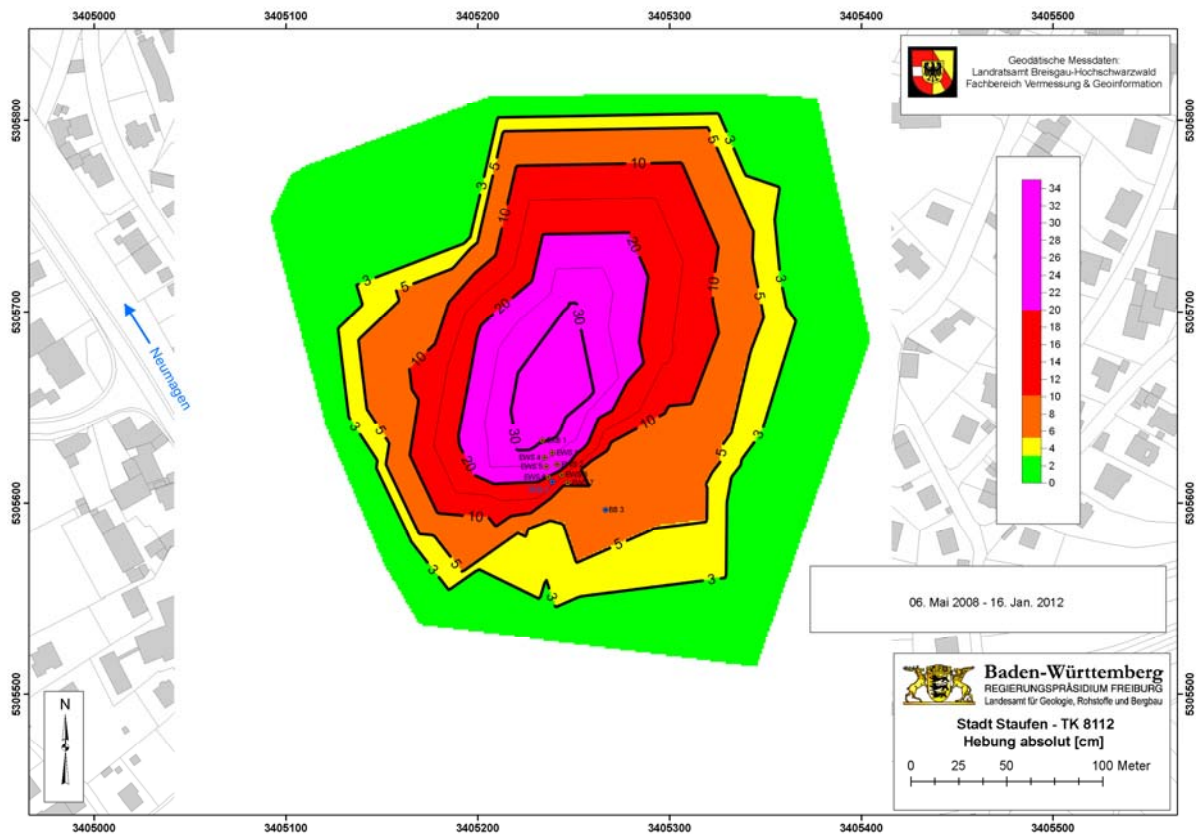


Abb. 2.16: Darstellung der absoluten Hebungsbeträge im Zeitraum Mai 2008 bis Januar 2012.

nahezu linear abnimmt. Die Messungen belegen für den Zeitraum Mai 2008 bis Januar 2012 einen absoluten Hebungsbetrag von insgesamt 35 cm im Bereich der Rathausgasse (Messpunkt 42). Hinzu kommt ein weiterer Betrag von einigen Zentimetern für den Zeitraum zwischen Abschluss der Erdwärmesonden - Bohrarbeiten (September 2007) bis Mai 2008. Die maximale Hebungsgeschwindigkeit lag anfangs bei rd. 11 mm/Monat und hat sich zwischenzeitlich (Januar 2012) auf knapp über 4 mm/Monat reduziert. Der Hebungsprozess (Volumenzunahme des Hebungs-körpers) hat sich im Zentralbereich bisher um rd. 62 % verlangsamt, mit weiter rück-läufiger Tendenz.

Die Beobachtungen belegen die Wirksamkeit der Abwehrmaßnahmen. Es konnte verhindert werden, dass weiteres Grundwasser in den quelfähigen Gebirgsabschnitt aufsteigt. Der Quellvorgang dürfte noch so lange anhalten, bis das in das ehemals trockene Gebirge eingedrungene Grundwasser aufgezehrt ist. Die Absenkmaß-nahme wurde im Mai 2011 durch die Errichtung und Inbetriebnahme eines weiteren Brunnens in der Kirchstraße (BB 3) in ihrem Wirkungsgrad optimiert und abgesichert.

3 Brunnenbohrung BB 3

Der Brunnen BB 3 in der Kirchstraße wurde zur Verbesserung der Absenkung des Grundwasserspiegels, der Optimierung der Förderrate aus beiden Brunnen und zur Erhöhung der Ausfallsicherheit konzipiert. Unterstützend zu den nachträglichen Injektionsmaßnahmen der unzureichend abgedichteten Ringräume der Erdwärmesonden dient der gemeinsame Abwehrbetrieb aus EKB 2 und BB 3 dazu, das Potenzial des Grundwassers aus dem Unterkeuper und untergeordnet aus dem oberen Abschnitt des Oberen Muschelkalks im Erdwärmesondenfeld bis unter den quelfähigen Gebirgsabschnitt abzusenken.

3.1 Festlegung des Bohransatzpunktes

Wie die im ersten Sachstandsbericht (LGRB 2010) in Kapitel 6 zusammengefassten Kenntnisse und Untersuchungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 zeigen, ist das Bohrloch der EWS 2 bei den Bohrarbeiten zwischen 105 m u. GOK und 140 m u. GOK verstürzt. Nach Fertigstellungsbericht der Bohrfirma vom 20. März 2008 wurde die EWS 2 nur bis 105 m u. GOK zur Erdwärmesonde ausgebaut. Daher muss der verstürzte, nicht ausgebaute untere Abschnitt der Bohrung EWS 2 auch nach Abschluss der Nachverpressungen der EWS 1 bis 7 als hydraulisch nicht ordnungsgemäß abgedichtet gelten. Somit verbleibt eine Unsicherheit darüber, inwieweit über den verstürzten unteren Bohrlochabschnitt der EWS 2 ein Fließpfad für gespanntes Wasser aus dem Unterkeuper/Oberen Muschelkalk in den in Quellung befindlichen Gebirgsabschnitt im Gipskeuper besteht.

Da keine nachträgliche Zugangsmöglichkeit zu dem verstürzten Bohrlochabschnitt über die vier Sondenschläuche der EWS 2 gegeben ist und ein Überbohren der stark aus der Vertikalen abweichenden Erdwärmesondenbohrung aus Sicherheitsgründen ausscheidet, muss ein Grundwasseraufstieg durch eine hydraulische Abwehrmaßnahme verhindert werden.

In Anbetracht der eher geringen Gebirgsdurchlässigkeiten ist davon auszugehen, dass sich bei der in EKB 2 in Dauerbetrieb durchgeführten Grundwasserentnahme (Entnahmerate ca. 2,3 l/s, Absenkung ca. 130 m u. GOK) ein verhältnismäßig steiler Absenktrichter mit begrenzter hydraulischer Reichweite einstellt.

Wenngleich die EWS 2 nur bis knapp 100 m u. GOK in ihrer Raumlage vermessen werden konnte, lässt sich aus der Systematik der in den übrigen EWS gemessenen

Bohrlochabweichungen schließen, dass der besonders kritische untere Abschnitt der EWS 2 am weitesten von dem Förderbrunnen EKB 2 entfernt liegt. Ferner wurde im Zuge der hydraulischen Abwehrmaßnahme klar, dass der Pumpbetrieb als wesentliches Element der zur Schadensbegrenzung eingeleiteten Maßnahmen auf lange Zeit aufrecht erhalten bleiben und durch einen weiteren Brunnen unterstützt und abgesichert werden muss.

Unter Berücksichtigung der fachtechnischen Erfordernisse sowie der in der Altstadt gegebenen räumlichen und infrastrukturellen Sachzwänge wurde beschlossen, in der Kirchstraße auf Höhe des dortigen Laufbrunnens eine weitere Bohrung nieder zu bringen und als Brunnen auszubauen. Die Brunnenbohrung BB 3 sollte unter Einhaltung aller gebotenen Sicherheitsanforderungen beim Bohren und Ausbauen sowie unter ständiger Aufrechterhaltung der hydrogeologischen Stockwerkstrennung, jedoch ohne zeitaufwändige Begleituntersuchungen, hergestellt werden. Es war ein möglichst schnelles Bohrverfahren zu wählen, um den Brunnen BB 3 zeitnah erstellen zu können. Zugleich sollten die Bohr- und Ausbaudurchmesser so groß dimensioniert werden, dass auch in großer Tiefe noch eine leistungsfähige Pumpe zum Einsatz gebracht werden konnte. Die Brunnenbohrung BB 3 wurde als bis zu 160 m tiefe, dreimal teleskopierte Vollbohrung ausgeschrieben, wobei der Endbohrdurchmesser nicht kleiner als 300 mm sein durfte. Zur Untersuchung der geologischen Schichtenfolge sollten neben der ständigen geologischen Auswertung des Bohrkleins (cuttings) einige jeweils 5 m lange Kernbohrabschnitte dienen.

Die Brunnenbohrung BB 3 kam im Zeitraum zwischen 12. November 2010 und 15. März 2011 zur Ausführung, die Bohrüberwachung erfolgte durch die Ingenieurgruppe Geotechnik, Kirchzarten. Die geologische und petrographisch-mineralogische Aufnahme oblag dem LGRB.

Die Bohrergebnisse werden im Folgenden beschrieben. Bedingt durch das vorhandene Schichtfallen sind sämtliche Mächtigkeitsangaben nur scheinbare Mächtigkeiten.

3.2 Stammdaten, Ausbauhinweise

Der Bohrpunkt der BB 3 liegt in der Kirchstraße und damit in südöstlicher Verlängerung der in den EWS 1 bis 7 gemessenen Bohrspuren (Abb. 3.1).

Im Lageplan der Abb. 3.1 ist der Bohransatzpunkt der BB 3 in Bezug zum Erdwärmesondenfeld sowie der bereits abgeteufte Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 dargestellt. Die Stammdaten zur BB 3 sind in Tab. 3.1 zusammengestellt.

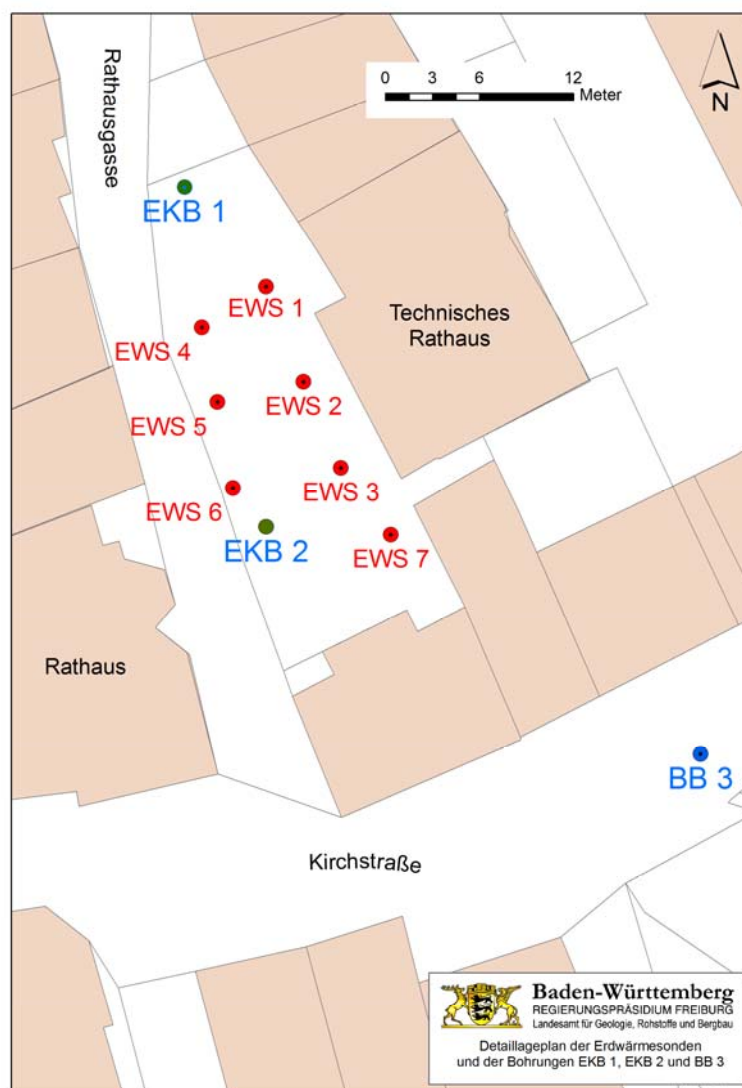


Abb. 3.1: Lageplan mit Bohransatzpunkt der Brunnenbohrung BB 3 in Bezug zum Erdwärmesondenfeld sowie den bereits abgeteufte Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2.

Tab. 3.1: Stammdaten der Brunnenbohrung BB 3.

Bezeichnung	LGRB-Nr.	Rechtswert	Hochwert	Geländeoberkante = Messpunkthöhe [m NN]	Oberkante Sperrrohr [m u. GOK]
Brunnenbohrung BB 3	8112/301	3405267,5	5305597,0	286,66	1,92

Die Abb. 3.2 verdeutlicht schematisch die angetroffene geologische Schichtenfolge in Bezug zu den Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis 3 sowie den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2.

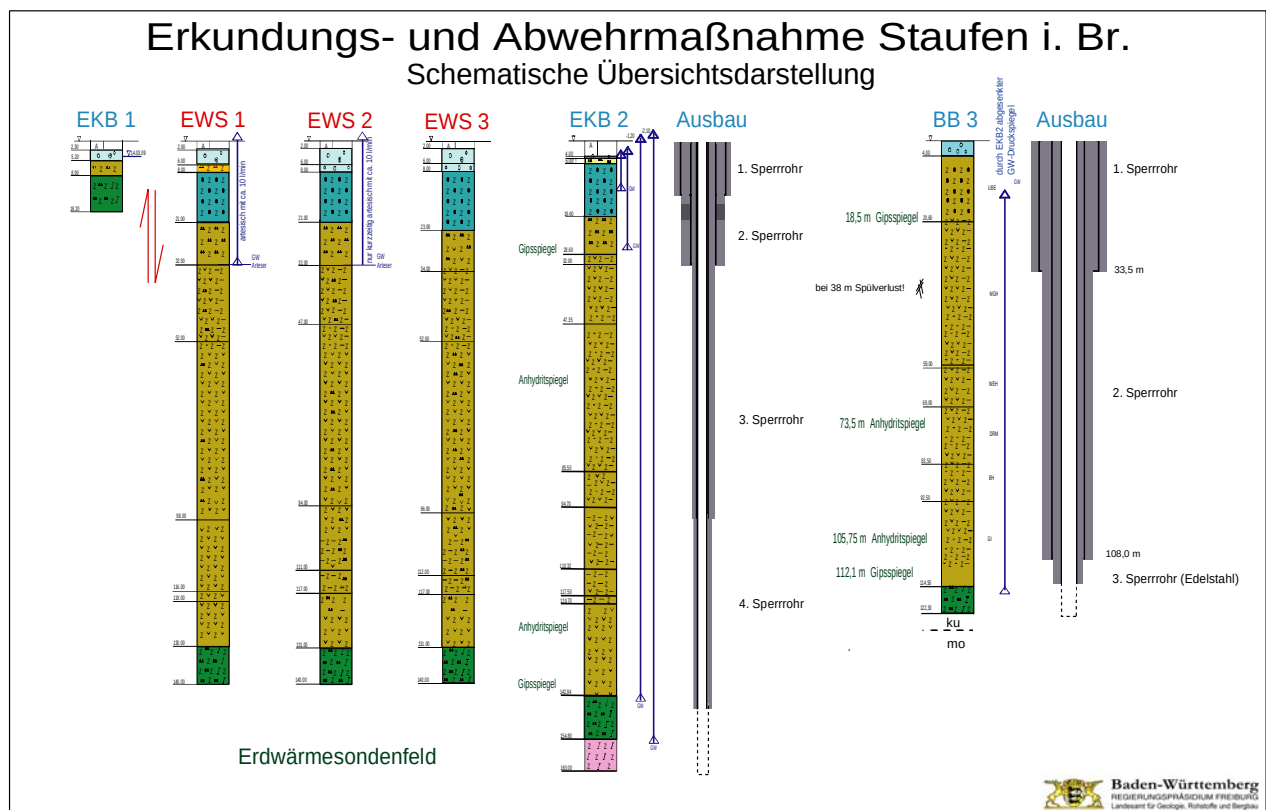


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der in der BB 3 angetroffenen geologischen Schichtenfolge in Bezug zu den Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis 3 sowie den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2.

Der Bohrplatz für die BB 3 wurde am 04.11.2010 eingerichtet. Nach Einbau des ersten Standrohres ($\varnothing$ 1016 mm), welches bei 7,85 m u. GOK absetzt, erfolgte die Bohrung bis 33,50 m u. GOK überwiegend im Vollbohrverfahren (Stufenmeißel

ø 970 mm), wobei am 25.11.2010 ab 22,00 m u. GOK aus Sicherheitsgründen auf inhibierte Bohrspülung umgestellt wurde. Die Bohrspülung hat sich am 30.11.2010 bei Bohrtiefe zwischen 27,00 - 32,50 m leicht ausgedünnt (Hinweis auf Wasserzufluss). Am 02.12.2010 wurde bei 33,50 m u. GOK das erste Sperrrohr (ø 762 mm) eingebaut. Zur Verifizierung der geologischen Schichtenfolge wurden im Bohrschnitt des ersten Sperrrohres insgesamt drei Bohrkernmärsche (KM 1: 7,00 - 8,00 m, KM 2: 8,00 - 10,00 m und KM 3: 10,00 - 13,00 m) im Seilkernbohrverfahren (SK6L) gezogen. Spülverluste traten zwischen 7,00 - 8,50 m u. GOK (ca. 28 m³) auf.

Nach Setzen des ersten Sperrrohres und Aushärten der Abdichtungszementation wurde die Bohrung abschnittsweise im Seilkernbohrverfahren (SK6L, KM 4: 34,60 - 37,00 m, KM 5: 37,00 - 40,00 m, KM 6: 40,00 - 41,50 m, KM 7: 41,50 - 43,00 m, KM 8: 43,00 - 44,00 m, KM 9: 44,00 - 45,70 m, KM 10: 45,70 - 48,70 m, KM 11: 48,70 - 49,60 m, KM 12: 49,00 - 51,60 m, KM 13: 51,60 - 54,70 m), ansonsten im Vollbohrverfahren (ø 720 mm) abgeteuft. Am 10.02.2011 wurde das zweite Sperrrohr (ø 558 mm) auf 108 m u. GOK eingebaut und hinterzementiert.

Die Bohrstrecke bis zur Basis des zweiten Sperrrohres war geprägt von wiederholten Spülungsverlusten, die ein mehrmaliges Aufzementieren und anschließendes Wiederdurchbohren erforderten.

Zur Beherrschung der Spülungsverluste mussten mehrfach Dämmerstrecken (bei 41,50 m 180 l und 400 l, bei 43,00 m 150 l und 170 l, bei 54,70 m 350 l) eingebracht und nach dessen Abbinden wieder aufgebohrt werden. Ab 82 m wurde im Bohrloch immer wieder Nachfall beobachtet, welcher meist am Folgetag in zusätzlicher Bohrzeit beseitigt werden musste. Der Nachfall war jedoch in der Regel nicht von einer Kubatur, die eine zusätzliche Bohrlochzementation erfordert hätte (Ausnahme bei 110,70 m: Abdichtung mit 700 l Dämmersuspension).

Die weitere Bohrstrecke bis zur Endteufe bei 122,30 m u. GOK erfolgte zunächst im Seilkernbohrverfahren (SK6L) mit Kerngewinn (KM 14: 111,60 - 112,60 m, KM 15: 112,60 - 114,70 m, KM 16: 114,70 - 117,60 m, KM 17: 117,60 - 119,60 m, KM 18: 119,20 - 122,30 m). Dabei traten am 22.02.2011 ab 116,30 m Spülungsverluste (9 m³) auf. Zwischen dem 01.03. und 08.03.2011 trat erneut Nachfall bis auf 111 m u. GOK auf. Wie sich beim Wiederaufbohren zeigte, stammt der Nachfall ausschließlich aus dem Übergangsbereich Grabfeld-/Erfurt-Formation. Nach Ausräumen des Nachfalls wurde das Bohrloch im Vollbohrverfahren auf End-Bohrdurchmesser (ø 530 mm) aufgeweitet. Nach den Bohrberichten der Fa. Anger wurde in das Bohrloch bis 114,5 m u. GOK eine VA-Edelstahlverrohrung (ø 340 mm) eingebaut,

das Bohrloch wurde anschließend mit Kies und Sand (von 122,00 - 115,50 m mit Kies 4/8, von 115,50 - 114,50 m mit Kies 2/4, von 114,50 - 114,10 m mit Sand 1/2 und von 114,10 - 113,70 m mit Sand 0,5/1) aufgefüllt und der Ringraum zwischen dem Sandgegenfilter bis ca. 2 m u. GOK hinterzementiert. Nach Erhärten der Ringraumzementation wurde der im Bohrloch eingebaute Kies bis 122,20 m Tiefe abgepumpt und bis 113,60 m u. GOK in Filterkies-Qualität 8/16 frisch geschüttet. Diese Arbeiten waren am 29.03.2011 abgeschlossen.

In der nachstehenden Tabelle 3.2 sind die während des Bohrens festgestellten Spülungsverluste nochmals zusammengestellt.

Tab. 3.2: Festgestellte Spülungsverluste während des Abteufens der Brunnenbohrung BB 3.

Tiefe unter Bohransatz	Verlustmengen	Stratigraphischer Horizont
7,00 - 8,50 m	ca. 28 m ³	Untere Bunte Estherienschichten (kmUBE)
38,00 - 41,50 m	ca. 5,5 m ³ ; Abdichtung mit Brunnendämmer erforderlich (180 + 400 l)	Mittlerer Gipshorizont (kmMGH)
Nach Aufbohren erneut ab 40,50 - 43,00 m	ca. 5,5 m ³ ; Abdichtung mit Brunnendämmer erforderlich (150 l)	Mittlerer Gipshorizont (kmMGH)
erneut bei 43,00 m	Abdichtung mit Brunnendämmer erforderlich (170 l)	Mittlerer Gipshorizont (kmMGH)
44,00 - 49,60 m	schleichend, ca. 2,5 m ³	Mittlerer Gipshorizont (kmMGH)
49,60 - 54,70 m	schleichend, ca. 5,5 m ³ , Abdichtung mit Brunnendämmer erforderlich (350 l)	Mittlerer Gipshorizont (kmMGH)
ab 116,30 - 119,60 m	ca. 9 m ³	Erfurt-Formation (kuE)

Die hydrogeologische Stockwerksgliederung (Neumagenschotter, Gipskarst, Erfurt-Formation (Unterkeuper)) in BB 3 wurde durch Setzen von drei teleskopierten hinterzementierten Sperrverrohrungen aufrecht erhalten. Der Ringraum wurde mit „Slagstar“ der Fa. Wopfinger zementiert, der eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber sulfathaltigem Wasser besitzt. Die Brunnenbohrung BB 3 erschließt die Dolomitregion der Erfurt-Formation (Unterkeuper) (Anl. 3.1).

Die reine Bohrzeit für die Bohrung BB 3 betrug 34 Tage, die übrige Zeit nahmen Ausbauarbeiten (Einbau von Sperrrohren) sowie Einbringen von Zementationen, Einhalten von Abbindezeiten sowie untergeordnet hydraulische und geophysikalische Bohrlochtests in Anspruch. Die Ausbauzeichnung der BB 3 ist in Anlage 3.1 dargestellt.

3.3 Geologische Schichtabfolge

In Abb. 3.2 sowie Anl. 3.1 und Anl. 3.2 ist das Bohrprofil (graphische Darstellung sowie geologische Schichtenbeschreibung) der Brunnenbohrung BB 3 beigefügt.

Unterhalb **anthropogener Aufschüttungen** des Straßenunterbaus und von Grabenverfüllungen der in der Kirchstraße verlegten Versorgungsleitungen folgen bis 4 m u. GOK stark sandige, wechselnd schluffige Fein- bis Grobkiese der quartären **Neumagen-Schotter**. In den Schottern sind vereinzelt Steine und einzelne Blöcke eingelagert. Darunter setzt unmittelbar die Schichtenfolge der **Grabfeld-Formation** (kmGr, frühere Bezeichnung Gipskeuper) ein. Die Schichtneigung beträgt generell 45 - 50° nach Nordnordwest (vgl. Kap. 3.4.2). Als oberster Abschnitt bis 20,6 m u. GOK (nach gamma-Log, vgl. Anl. 3.6) setzen mit dunkelgrauen, rotbraunen und grau-grünen Schlufftonsteinen und einzelnen grauen Dolomitsteinbänken die *Unteren Bunten Estherienschichten* (kmUBE) ein. Schichtlagerungsbedingt fehlt die Stuttgart-Formation (Schilfsandstein) in der BB 3. Die ursprüngliche Gipsführung in den Unteren Bunten Estherienschichten (4,0 m bis 20,6 m u. GOK) ist in Oberflächennähe ausgelaugt, Gipsauslaugungsresiduen (GAR) treten zwischen 6 m und 16 m u. GOK wiederholt auf. Eine erste Gipsführung konnte in der Bohrprobe von 19 m festgestellt werden, wohingegen die Probe von 18 m noch gipsfrei war. Daher wird die Lage des Oberen Gipsspiegels gemittelt bei 18,5 m u. GOK angegeben.

Der *Mittlere Gipshorizont* (kmMGH, 20,6 m u. GOK bis 59,0 m u. GOK) besteht aus grauen Schlufftonsteinen und dunkelgrauen Tonsteinen, die mit hellgrauem Gips (teils massig, teils fein tonflasrig) wechsellagern. Nach den Ergebnissen der benachbarten Erkundungsbohrung EKB 2 dürfte der Gipsanteil auch in BB 3 ca. 80 % erreichen.

Mit dem *Weinsberg-Horizont* (kmWEH, 59,0 m u. GOK bis 69,0 m u. GOK) setzt sich die Schichtenfolge mit dunkelgrauen, z. T. dolomitischen Tonsteinen fort, die von weißen, grauen und hellrosa Gipslagen durchsetzt sind. Der in den Bohrproben abgeschätzte mittlere Sulfatanteil dürfte bei ca. 40 % liegen, wobei nach mineralogischer Analyse noch kein Anhydrit enthalten ist.

Die *Dunkelroten Mergel* (kmDRM, 69,0 m u. GOK bis ca. 83,5 m u. GOK) sind als rotbraune bis dunkelrotbraune Tonsteine ausgebildet, wobei neben Gips ab 73,5 m u. GOK erstmals weiß-grauer Anhydrit auftritt. Der Obere Anhydritspiegel wird somit bei 73,5 m u. GOK festgelegt und liegt im Vergleich zur benachbarten EKB 2 in der BB 3 um knapp 12 m tiefer. Das Anhydrit-/Gipsverhältnis beträgt in der Probe von 73,5 m 4 : 1, wobei der gesamte Sulfatanteil mit durchschnittlich 15 % abgeschätzt wird.

Grauer Tonstein im Wechsel mit grünlichgrauen Dolomitsteinlagen und weißgrauem Anhydrit bilden die Gesteinsabfolge des *Bochingen-Horizonts* (kmBH, ca. 83,5 m u. GOK bis ca. 92,5 m u. GOK), wobei im Bohrgut im Mittel ca. 40 % Sulfatanteil abgeschätzt wurde.

Die *Grundgipsschichten* (kmGI, ca. 92,5 m u. GOK bis 114,5 m u. GOK) sind als Wechsellagerung von hellgrauem Gips/Anhydrit mit grauem, teils dolomitischem Tonstein und beigem bis grauem Dolomit entwickelt. Nach mineralogischer Analyse tritt der Anhydritanteil ab 103 m u. GOK sehr stark zurück (Anhydrit-/Gipsanteil 1 : 9), lässt sich jedoch zur Tiefe (bis maximal 109 m u. GOK) in geringen, vermutlich Nachfall bedingten Anteilen nachweisen. Besonders der Anhydritanteil in der Probe von 106 m dürfte auf Nachfall zurückzuführen sein. Der Untere Anhydritspiegel dürfte tatsächlich nur wenig tiefer als 103 m u. GOK liegen und wird unter Berücksichtigung eines gewissen Sicherheitsabstands mit 105,75 m u. GOK angegeben. Die Gipsführung ist ab einer Tiefe von 112,1 m zu Ende (Unterer Gipsspiegel), darunter folgen bis zur Basis der Grundgipsschichten Auslaugungsgesteine (GAR) sowie zellig-kavernöse Dolomitsteine.

Die **Erfurt-Formation** (kuE, früher Unterkeuper) setzt bis zur Endteufe (122,3 m u. GOK) das Bohrprofil fort. Graue Dolomitsteine, Dolomitmergelsteine, dolomitische Tonsteine und Tonsteine bilden die typische Gesteinsabfolge, die im erbohrten unteren Abschnitt dolomitische Feinsandsteine akzessorisch mit kohligen Pflanzenresten enthält. Die Bohrung endet im Niveau der Sandigen Pflanzenschiefer, wenige Meter oberhalb der Schichtgrenze zur unterlagernden Oberen Hauptmuschelkalk-Formation (mo2).

Der Brunnen BB 3 wurde zwischen dem 16.11. und dem 01.12.2011 mit einem Brunnenschacht versehen. In dieser Zeit war der Pumpbetrieb in der BB 3 unterbrochen. Am 01.12.2011 stellte sich kurz vor Wiederinbetriebnahme in der BB 3 ein durch den Pumpbetrieb in der EKB 2 abgesenkter Wasserstand bei ca. 12,44 m u. GOK ein.

Die Brunnenbohrung BB 3 erfolgte in großen Abschnitten als Vollbohrung. Um Sicherheit zur richtigen Absetztiefe für die einzubauenden Sperrverrohrungen zu gewinnen, wurden in den kritischen Bohrabschnitten in Meter-Intervallen mineralogische Analysen (Röntgenbeugung) ausgeführt. Die qualitativen Analyseergebnisse sind in der Tabelle 3.3 zusammengestellt, die zugehörigen Messdiagramme sind beim LGRB archiviert.

Die in der BB 3 angetroffene Schichtenfolge entspricht unter Berücksichtigung des Schichteinfallens von 45 - 50° nach Nordnordwesten der aus der EKB 2 verifizierten Abfolge im Bereich des Erdwärmesondenfeldes, so dass zwischen diesen Bohrungen keine Störung mit einem größeren Vertikalversatz angenommen werden muss.

3.4 Geophysikalische Bohrlochmessungen

Geophysikalische Bohrlochmessungen dienen der Ableitung von quantitativen und qualitativen Aussagen über den Untergrundaufbau in einer Bohrung und über deren Beschaffenheit. In der BB 3 wurden geometrische Größen wie Neigung und Richtung (Azimut) der Bohrung, Kaliber (Bohrlochdurchmesser) sowie Struktur der Bohrlochwandung (Schichtung, Klüfte, jeweils mit Orientierung) ermittelt (Tab. 3.4). Außerdem wurden Profile der natürlichen Gammastrahlung, Temperatur, elektrischen Leitfähigkeit sowie die vertikale Strömungsgeschwindigkeit des Wassers gemessen. Mit den drei letztgenannten Größen wurden Wasserzutritte (Tiefenlage und anteilige Menge) bestimmt. Die eingesetzten Untersuchungsmethoden sind im Sachstandsbericht des LGRB vom 01.03.2010 (LGRB 2010) und im Bericht der Firma terratec vom 07.09.2011 (TERRATEC 2011) beschrieben. Bedingt durch die leichte Abweichung der Bohrung aus der Vertikalen weichen die angegebenen Tiefen von den tatsächlichen geringfügig ab.

Tab. 3.3: Qualitative Analysenergebnisse aus der Brunnenbohrung BB 3.

Teufe	Gips (G)	Anhydrit (A)	Verhältnis A : G	Ton- minerale	Quarz	Calcit	Dolomit
22 m				X	X	n. b.	n. b.
22-23 m	X			X(wenig)	X(wenig)	X	X
25,4 m	X(>50%)			X	X		
28,5 m	X			X(wenig)	X(wenig)	X	X
41,2 - 41,3 m	X			X (Illit)			
49,45 - 49,55 m	X			X	X		
49,70 - 49,75 m	X			X	X		
50,00 - 50,10 m	X			X	X		
51,35 - 51,50 m	X			X	X		
54,60 - 54,70 m	X			X	X		
57 m	X			Illit	X		
60 m	X				X		
63 m	X				X		
66 m	X				X		
69 m	X				X	X (8%)	
70 m	X			X	X		
71 m	X			X	X		
72 m	X			X	X		
73 m	X	X (20 %)		X	X		
Oberer Anhydritspiegel							
73,5 m	X	X	4 : 1		X		X (15 %)
74 m	X	X	1 : 1	X	X		
86 m	X(wenig)	X(überwiegend)			X(wenig)		
87 m	X(wenig)	X(überwiegend)			X(wenig)		X
88 m	X(wenig)	X(überwiegend)			X(wenig)		X
89 m	X(<5%)	X			X(wenig)		X
90 m	X(<5%)	X			X(wenig)		X
91 m	X (< 5%)	X			X		X
92 m	X (< 5%)	X		X	X		X
93 m	X (< 5%)	X		X	X		X
94 m	X (< 5%)	X			X		X
95 m	X etwas	X			X		X
96 m	X	X	4 : 1	X	X		X
97 m	X	X	1 : 2	X	X		X
98 m	X	X	1 : 5	X	X		X
99 m	X	X (< 5%)		X	X		X
100 m	X	X	1 : 3	X	X		X
101 m	X	X	1 : 5	X	X		X
102 m	X	X	1 : 3	X	X		X
103 m	X	X	1 : 3	X	X		X
104 m	X	X (sehr wenig)	1 : 9	X	X		X
105 m	X	X (sehr wenig)	1 : 9	X	X		X
105,75 m	X	X (sehr wenig)	1 : 9	X	X		X
Unterer Anhydritspiegel							
106 m	X	X (?Nachfall)	1 : 3	X	X	X	
107 m	X	X (sehr wenig)	0,5 : 9,5	X	X	X	
108 m	X	X (wenig)	1 : 9	X	X	X	
109 m	X	sehr wenig	0,5 : 9,5	X	X		X (21%)
110 m	X	fast nicht (1%)		X	X		X (13%)

Die geophysikalischen Bohrlochmessungen in der Bohrung BB 3 wurden am 13. Januar und 10. März 2011 von der Fa. terratec, Heitersheim, durchgeführt (Tab. 3.4; TERRATEC 2011). Die wichtigsten Ergebnisse sind in Anl. 3.3 - Anl. 3. 6 dargestellt. Folgende Messverfahren wurden eingesetzt:

- Akustischer Bohrlochscanner (borehole televiewer, BHTV mit Orientierungsmodul; Ultraschallsignal: gemessen werden Amplitude und Laufzeit des reflektierten Signals)
 - o Erfassung der Bohrlochwandung zur Ermittlung der Strukturen und deren Orientierung
 - o Erfassung des Bohrlochkalibers und des Bohrlochverlaufs
- Messung der natürlichen Gammastrahlung (Sensor integriert in BHTV- oder TSG1300-Sonde)
- Temperatur im Ruhezustand und während des Pumpbetriebs (TSG1300-Sonde)
- Elektrische Leitfähigkeit im Ruhezustand und während des Pumpbetriebs (TSG1300-Sonde)
- Flowmeter (Ruhezustand und Pumpbetrieb) (electromind 3“ Impeller-Flowmeter-sonde)

Tab. 3.4: Geophysikalische Bohrlochmessungen in der BB 3.

Datum	Bohrlochsohle (m u. GOK)	Unterkante Verrohrung (m u. GOK)	Messintervall (m u. GOK)	Messungen
13.01.2011	54,7	33,5 (1. Sperrrohr)	33,7 - 54,4	BHTV (Struktur, Kaliber)
13.01.2011	54,7	33,5 (1. Sperrrohr)	0 - 52,3	BHTV (Bohrlochverlauf), Gamma
10.03.2011	121,6 *	108,0 (2. Sperrrohr), 111,6 (Hilfsverrohrung)	~ 110 - 121,6	Gamma, Leitfähig- keit, Temp., Flow, BHTV (Struktur)
10.03.2011	121,6 *	108,0 (2. Sperrrohr), 111,6 (Hilfsverrohrung)	0 - 121,1	BHTV (Verlauf, Kaliber)

* Die Bohrtiefe betrug 122,3 m. Vor den geophysikalischen Messungen am 10.03.2011 kam es zu einem Nachfall im Bohrloch (aus etwa 112 bis max. 116 m u. GOK). Das nachgefallene Material konnte nur bis zu einer Teufe von 121,6 m entfernt werden.

Aus den Laufzeitendaten des BHTV wurde das Kaliber der Bohrung berechnet. Dies ist mit der Einschränkung möglich, dass für die Berechnung eine konstante Schallgeschwindigkeit der Spülung angenommen wird. Hauptsächlich im oberen Messintervall, in dem mit inhibierter Bohrspülung gebohrt wurde, unterliegt die Datenauswertung einer gewissen Unsicherheit. Der Auswertung wurde dort eine Schallgeschwindigkeit der Bohrspülung von 1530 m/s zugrunde gelegt (erhöhte Schallgeschwindigkeit durch mögliche erhöhte Salinität aufgrund des Spülungszusatzes). Für den unteren Bohrlochabschnitt wurde von 1488 m/s ausgegangen (klares Wasser).

3.4.1 Beschaffenheit und Struktur der Bohrlochwandung, Bohrlochverlauf (Akustischer Scan)

Die Laufzeitmessung des akustischen Signals und das daraus berechnete Kaliberlog (Anl. 3.3 und 3.4) zeigen über die beiden Messintervalle (~ 35 bis 54,4 m u. GOK und 110 bis 121,6 m u. GOK) sowohl Bohrlochabschnitte, die relativ glatte Wandungen aufweisen und kaliberhaltig sind, als auch solche mit Klüften und Bohrlochwandausbrüchen oder -auswaschungen. Die Strukturen, die auf der Bohrlochwandung identifiziert werden konnten, sind in Tab. 3.5 sowie in Anl. 3.4 und Anl. 3.5 zusammengestellt.

Die Bohrlochwandausbrüche bzw.-auswaschungen zwischen 36,9 und 46,0 m u. GOK (Anl. 3.3: Kaliberlog) entsprechen ungefähr den Bereichen, in denen mehrfach Spülungsverluste beim Niederbringen der Bohrung auftraten. Es handelt sich um einen Abschnitt im Mittleren Gipshorizont. In der benachbarten Bohrung EKB 2 traten in der gleichen Schicht ebenfalls Bohrlochwandausbrüche auf.

Tab. 3.5: Strukturen in der Bohrlochwandung der BB 3 mit Tiefenangaben in m u. GOK. Ebenfalls ermittelte Schichtflächen sind nicht aufgeführt (siehe Anl. 3.5).

Kluft	Offene Schichtfuge	Bohrlochaufweitung	Bohrlochauswaschung
			36,9 – 42,9 m
39,39 m			
40,96 m			
42,34 m			
		42,9 – 45,3 m	
		45,7 – 46,0 m	
	45,86 m (Ø 71,45 mm)		
		111,0 – 113,6 m	
		115,3 – 116,8 m	
115,78 m			
116,60 m			

Schichtflächen und Klüfte wurden hauptsächlich anhand der gemessenen Amplitude ermittelt. Im oberen Messintervall zeigt die Schichtung (Anl. 3.5) insgesamt ein bevorzugtes Einfallen um 45° mit einer bevorzugten Einfallsrichtung um 330° (Nord-nordwest). In diesem Abschnitt liegt auch eine offene Schichtfuge bei 45,86 m u. GOK (vgl. Tab. 3.5). Die Klüfte zeigen keine klare Vorzugsorientierung. Im unteren Messintervall fällt die Schichtung um 50° ein. Sie weist eine deutliche Häufung um Einfallsrichtungen nach Westnordwest (290°) auf. Die Klüfte liegen flach bzw. annähernd vertikal mit Einfallsrichtung Nordost.

In Anlage 3.3 ist der Bohrlochverlauf dargestellt. Im Tiefenabschnitt zwischen 0 und 25 m ist die Bohrung um ca. $0,5^\circ$ geneigt, bis 45 m nimmt die Neigung auf $1,4^\circ$, bis 93,3 m annähernd konstant auf $6,5^\circ$ zu. Zwischen 93,3 und 110 m beträgt die Neigung etwa $6,5^\circ$, zwischen 110 und 120 m etwa 7° . Der Azimuth der Bohrung ist zwischen 35 und 54 m annähernd konstant um 135° , zwischen 111 und 120,2 m liegt er bei etwa 157° . Der Endpunkt der Bohrung ist in der Horizontalen ca. 7,2 m von ihrem Ansatzpunkt entfernt.

3.4.2 Lithologische Differenzierung der Bohrung (natürliche Gammastrahlung)

Die Messwerte der natürlichen Gammastrahlung sind in Anl. 3.3 und 3.6 dargestellt. Im Januar 2011 wurde die Gammastrahlung im oberen Bohrlochabschnitt bis 52,5 m u. GOK ermittelt. Da bis 33,5 m u. GOK in der Stahlverrohrung (1. Sperrrohr) gemessen wurde, ist die Strahlungsintensität in diesem Bereich gedämpft (Zählraten von ca. 25 cps (counts per second)). Im März 2011 wurde durchgehend bis 121,2 m u. GOK gemessen. In den Anl. 3.3 und 3.6 ist nur der Bohrlochabschnitt von 110,3 m u. GOK bis zur Bohrsohle abgebildet, da oberhalb etwa 111 m die Strahlungsintensität durch Hilfsverrohrung und zwei Sperrrohre zu stark gedämpft ist.

In den offenen Bohrlochabschnitten treten Gammaaktivitäten bis 185 cps auf. Die Gammakurve zeigt deutliche Unterschiede in der Strahlungsintensität, was auf eine ausgeprägte lithologische Wechsellagerung hinweist. Je größer der Tongehalt, desto höher ist die Gammastrahlung. Sulfatführende Abschnitte sind generell durch eine geringere Strahlungsintensität gekennzeichnet. Die stärksten Schwankungen mit Werten zwischen 10 und 185 cps treten im unteren Bereich der Grundgipsschichten (GI) und in der Erfurt-Formation (früher Unterkeuper; ku) auf.

Die Messergebnisse der natürlichen Gammastrahlung in der BB 3 wurden mit denen in der Erkundungsbohrung EKB 2 parallelisiert (Anl. 3.6). Aufgrund des Schichtein-

fallens von 45 bis 50° nach Nordnordwest liegen die geologischen Schichten der Grabfeld-Formation (früher Gipskeuper) und der Erfurt-Formation (früher Unterkeuper) in der BB 3 höher als in der EKB 2, der vertikale Unterschied beträgt etwa 26 bis 29 m.

Der durch die Verrohrung gemessene Bohrlochabschnitt bis 33,5 m u. GOK wurde aufgrund der gedämpften Gammaaktivitäten nicht für einen Vergleich mit der EKB 2 herangezogen. Der Messbereich unterhalb der Verrohrung befindet sich innerhalb des Mittleren Gipshorizontes (MGH). Im Vergleich zur EKB 2 liegt dieser in der BB 3 um etwa 27 m höher, die Mächtigkeiten in den Bohrungen entsprechen sich. In Anl. 3.6 ist der Bereich der Gammaloge, der in den Bohrungen jeweils den gleichen Abschnitt im Mittleren Gipshorizont abdeckt, farbig hinterlegt. Eine Parallelisierung ist für die Ausschläge zwischen 67 und 68 m in der EKB 2 und zwischen 40 und 41 m in der BB 3 möglich. Weitere Korrelationen sind wegen der engständigen Wechsellagerung von Tonstein und Gipsstein (in der EKB 2 außerdem noch Anhydritstein-Lagen) im Mittleren Gipshorizont nicht deutlich zu erkennen. Die Parallelisierung wird in der BB 3 außerdem in der Tiefe um 41,5 und 43,0 m u. GOK durch die teilweise Bohrlochzementation (Dämmerstrecken) erschwert.

Die Gammastrahlung im unteren Abschnitt der BB 3 lässt sich gut mit der in der EKB 2 korrelieren. Das Messintervall umfasst den unteren Bereich der Grundgips-schichten (unterhalb des Unteren Gipsspiegels) und die oberen Schichten der Erfurt-Formation. Die Schichten sind nach den zugeordneten Messwertspitzen um etwa 28 bis 29 m versetzt.

3.4.3 Lokalisierung von Wasserzutritten (Vertikale Strömungsgeschwindigkeit, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur)

Die vertikale Strömungsgeschwindigkeit, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur wurden in der BB 3 sowohl im Ruhezustand als auch während des Pumpbetriebs zwischen etwa 110 und 121,6 m u. GOK gemessen (Anl. 3.3).

Die vertikale Strömungsgeschwindigkeit im Ruhezustand entspricht der Fahr-geschwindigkeit der Sonde von etwa 3 m/min. Zwischen 110 und 111,5 m u. GOK ist die Messkurve gestört, da die Sonde am Übergang vom Vollrohr ins offene Bohrloch an der Bohrkronen aufstand und eine gewisse Strecke zum Erreichen der Fahrt-geschwindigkeit benötigt hat. Anhand der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit während des Pumpbetriebs (Pumprate 6,5 m³/h) lässt sich der Hauptwasserzutritt im

Messintervall von etwa 116,0 bis 116,7 m u. GOK deutlich erkennen. Er liegt innerhalb der Erfurt-Formation (Unterkeuper). In diesem Tiefenbereich wurde mit Hilfe des akustischen Scans bei 116,6 m u. GOK eine Kluft identifiziert. Auch bei der Bohrkernaufnahme wurde im Dolomitstein eine durchgehend offene Kluft zwischen 116,35 und 116,70 m u. GOK erkannt. Zwischen 111,5 und 112,5 m u. GOK ist die Strömung wegen einer Bohrlochaufweitung verringert.

Die elektrische Leitfähigkeit schwankt zwischen 1460 und 1930 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Ruhezustand und Pumpbetrieb zusammengefasst). Das Wasser im Bohrloch ist durch die Bohrspülung beeinflusst und zeigt deshalb im Vergleich zum Grundwasser der Erfurt-Formation (Unterkeuper) erhöhte Leitfähigkeiten (vgl. Kapitel 5). Bei 116,5 m u. GOK weist die Leitfähigkeit in der Pumpphase ein Minimum auf. Dies ist auf den Hauptwasserzutritt in dieser Tiefe zurückzuführen. Zwischen 111,5 und 112,0 m zeigen die Messungen im Ruhezustand und während des Pumpbetriebs eine Erhöhung der Leitfähigkeit im Niveau des unteren Gipsspiegels an.

Die Temperaturen liegen im gesamten Profilabschnitt zwischen 14,1 und 14,3 °C. Der Hauptwasserzutritt lässt sich an der relativ starken Temperaturänderung zwischen 116,3 und 116,7 m u. GOK erkennen.

4 Hydraulische Maßnahmen und begleitende Überwachung

Seit Beginn der schadensbegrenzenden hydraulischen Maßnahmen werden die Daten zu Entnahmerate und Absenkbeträgen sowie zu den vor-Ort-Parametern elektrische Leitfähigkeit und Temperatur kontinuierlich aufgezeichnet. Sie dienen zur Ermittlung hydraulischer Kennwerte, der Überwachung der erforderlichen Absenktziele und der Funktionsfähigkeit der installierten Pumpen sowie des Lösungsinhalts des geförderten Wassers.

4.1 Dauerabsenkbetrieb EKB 2 bis zur ersten Pumpmaßnahme in der BB 3

Seit September 2009 erfolgten aus der EKB 2 längere Entnahmephasen im Rahmen hydraulischer Tests (LGRB 2010). Seit dem 04.11.2009 wird aus der im Unterkeuper (Erfurt-Formation) und im Oberen Muschelkalk zwischen 145,2 und 163,0 m u. GOK (Endtiefe) als Brunnen ausgebauten Bohrung EKB 2 mit Ausnahme von einigen erforderlichen Pumpspausen kontinuierlich Grundwasser entnommen. Neben der nachträglichen technischen Abdichtung (Nachverpressung) der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 dient diese Maßnahme dazu, den Druckwasserspiegel des Grundwassers im Unterkeuper und im Oberen Muschelkalk in der EKB 2 dauerhaft unter 130 m u. GOK abzusenken und somit einen weiteren Zutritt von Grundwasser in den quellfähigen Gebirgsbereich des Gipskeupers (Grabfeld-Formation) zu unterbinden.

Zwischen dem 17.11.2009 und dem 18.12.2009 musste der Pumpbetrieb in der EKB 2 während der nachträglichen Abdichtmaßnahmen in den Erdwärmesondenbohrungen vorübergehend eingestellt werden. Aufgrund der festgestellten hydraulischen Verbindung zwischen den nachträglich geschlitzten Erdwärmesondenrohren der EWS 7 und der bepumpten EKB 2 bestand anderenfalls die Gefahr, Injektionsgut von der EWS 7 in die EKB 2 bei zu ziehen und den Absenkbrunnen damit unbrauchbar zu machen.

Seit dem 18.12.2009 wird der Grundwasserspiegel in der EKB 2 - abgesehen von wenigen kurzen, technisch bedingten Stillstandsphasen - dauerhaft abgesenkt (Abb. 4.1).

Die Ergebnisse der kontinuierlich digital aufgezeichneten Messungen der Entnahmerate, des Grundwasserstandes sowie der vor Ort als Leitparameter aufgezeichneten elektrischen Leitfähigkeit des entnommenen Wassers sind in den Abb. 4.1 und 4.2 übersichtsmäßig vom 10.11.2009 bzw. 18.12.2009 bis zum 28.02.2011 dargestellt. Die ebenfalls registrierte Temperatur wurde nicht graphisch dargestellt. Sie

wird stark von der durch den Betrieb der Elektropumpe erzeugten Wärme beeinflusst.

Der sägezahnartige Verlauf der Wasserstandsganglinie zwischen dem 14.04. und dem 04.11.2010 beruht auf spontanen Reaktionen des Druckwasserspiegels auf kurzzeitige Pumpenausfälle bzw. Entnahmeratensteigerungen. Im Zeitraum zwischen Dezember 2009 und Mai 2010 sowie zwischen November 2010 und März 2011 erfolgte ein weitgehend störungsfreier Betrieb. In diesen beiden Zeiträumen blieb der Grundwasserstand trotz einer Erhöhung der Pumprate von ca. 1,35 l/s auf ca. 2,35 l/s annähernd gleich und lag meist zwischen ca. 128 und 132 m u. GOK. Dies wird darauf zurückgeführt, dass es durch die Dauerentnahme zu Freispülvorgängen im Kluftgrundwasserleiter kam. Sie wurden möglicherweise durch das zwangsläufig wiederholte Anfahren der Pumpe und der damit verbundenen kurzzeitigen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers im näheren Umfeld der EKB 2 begünstigt. Als Folge davon hat sich die Ergiebigkeit der EKB 2 deutlich erhöht. Dies kommt in der höheren spezifischen Ergiebigkeit (C) zum Ausdruck, die sich aus dem Quotienten von Förderrate Q [m^3/s] und Absenkbetrag s [m] errechnet. Sie lag im ersten Zeitraum bei ca. $C = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, im zweiten bei ca. $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

In der Abb. 4.2 sind die elektrische Leitfähigkeit des entnommenen Grundwassers und die Pumprate in der EKB 2 dargestellt. Die elektrische Leitfähigkeit wurde sowohl kontinuierlich, als auch im Rahmen der regelmäßigen Probenahmen durch das Labor des RPF/LGRB gemessen. Die kontinuierlich bestimmten Werte der elektrischen Leitfähigkeit liegen um ca. 10 - 90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ über den während der Probenahmen bestimmten Werten, wobei die Unterschiede im Laufe der Messreihe zunahmen. Ursache hierfür ist eine leichte Drift in der kontinuierlich aufzeichnenden Messsonde.

Die kontinuierlich aufgezeichnete Leitfähigkeit korreliert mit der Entnahmerate (Abb. 4.2). In den ersten Monaten des Dauerpumpbetriebes (ab 18.12.2009) blieb die elektrische Leitfähigkeit bis zum Juli 2010 im Rahmen der Messgenauigkeit annähernd konstant (ca. 1070 - 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ kontinuierliche Messung, 1050 - 1070 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Probenahmen). In den Folgemonaten stieg sie mit zunehmender Entnahmerate auf ca. 1290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (kontinuierliche Messung) bzw. 1230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Probenahme) an.

Die zur Klärung dieser Entwicklung durchgeführten hydrochemischen und isotopischen Untersuchungen zeigen, dass sich im Laufe der Dauerentnahme die Mischungsanteile zwischen den in der EKB 2 hydraulisch erschlossenen Grundwasserstockwerken des Unterkeuper (Erfurt-Formation) und Oberen Muschelkalk veränderten. Diese wurden anhand der elektrischen Leitfähigkeiten der beiden

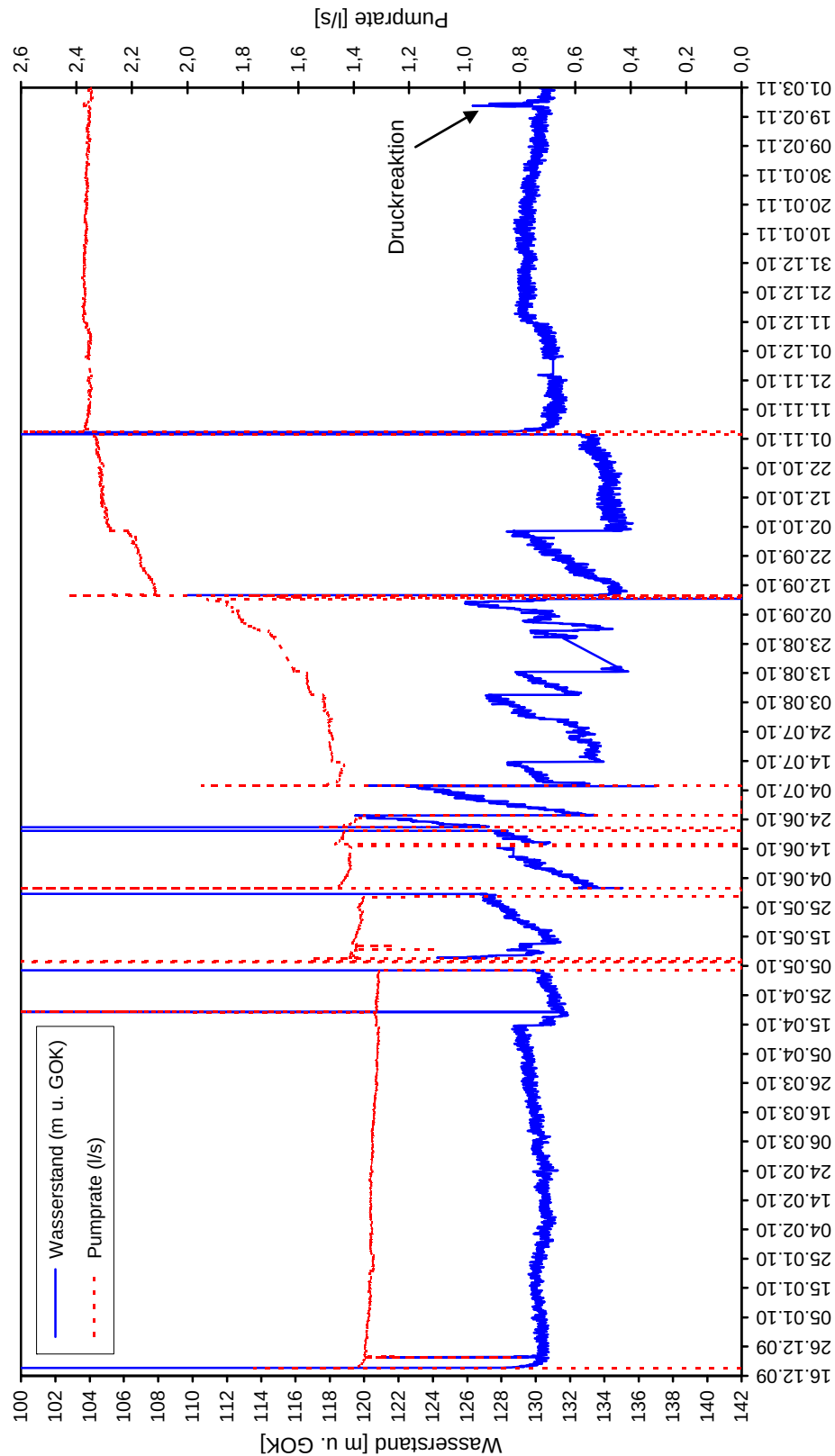


Abb. 4.1: Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2 vom 18.12.2009 bis zum 28.02.2011 mit kontinuierlicher Aufzeichnung der Pumprate und des abgesenkten Grundwasserspiegels (zur Druckreaktion am 22.02.2011 vgl. Kap. 4.2.1.3).

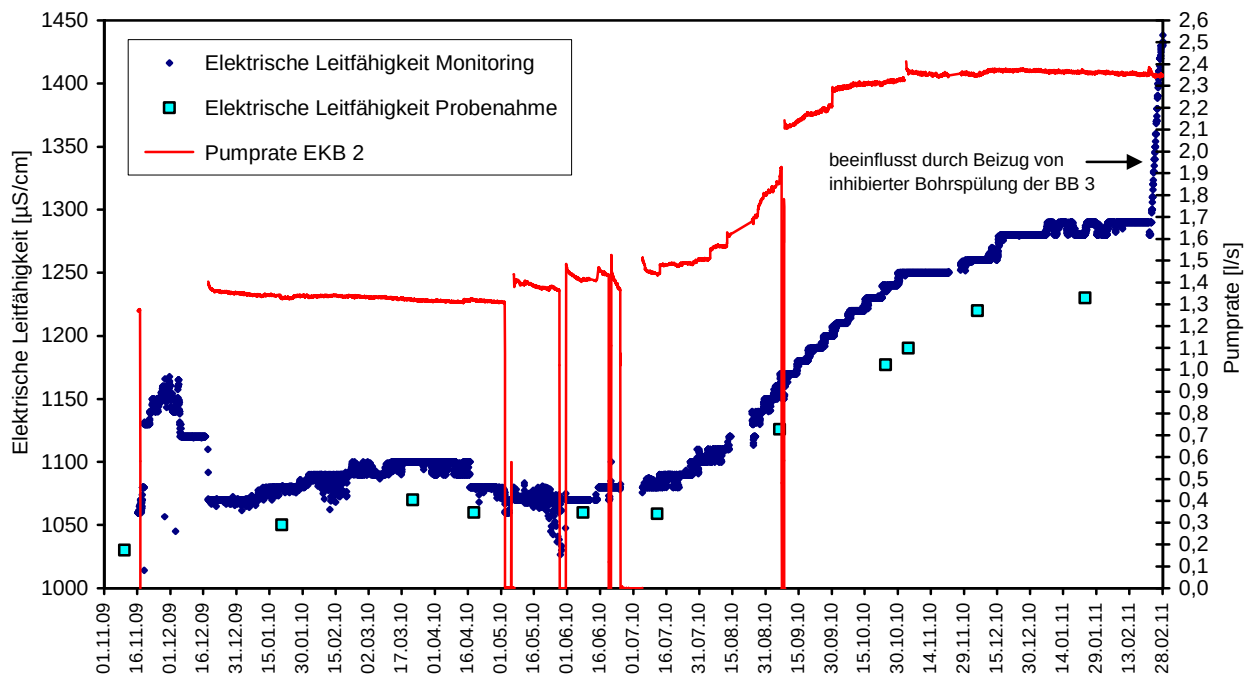


Abb. 4.2: Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2 vom 10.11.2009 bis zum 28.02.2011 mit kontinuierlicher Aufzeichnung der Pumprate und der elektrischen Leitfähigkeit des geförderten Grundwassers sowie der elektrischen Leitfähigkeit der entnommenen Grundwasserproben.

Grundwasser ermittelt. Zu Beginn der Pumpmaßnahme war die Muschelkalkkomponente zu ca. 2/5 und die Unterkeuperkomponente zu ca. 3/5 am geförderten Wasser beteiligt (LGRB 2010). Danach verschob sich das Verhältnis bis zum März 2011 nahezu vollständig zum Unterkeuper (vgl. auch Kap. 5.3).

4.2 Pumpbetrieb in der EKB 2 und der BB 3 seit 01.03.2011

Seit dem 01.03.2011 erfolgte meist ein gemeinsamer Pumpbetrieb in der EKB 2 und der BB 3.

4.2.1 Pumpbetrieb in der EKB 2 und der BB 3 vom 01.03. bis 11.05.2011

Die Entnahmeraten, Wasserstände und elektrischen Leitfähigkeiten in den beiden Brunnen EKB 2 und BB 3 seit Aufnahme des gemeinsamen Pumpbetriebs am 01.03.2011 bis zum 11.05.2011 sind in der Abb. 4.3 dargestellt. Während des gesamten Beobachtungszeitraumes lag die Entnahmerate in der EKB 2 zwischen

2,0 und 2,3 l/s, in der BB 3 zwischen 3,4 und 3,8 l/s (mit Ausnahmen der technisch bedingten Stillstandszeiten der Pumpe).

Beim Abteufen der Bohrung für den Brunnen BB 3 wurden im Quartär und den unterlagernden Schichten des Gipskeupers (Untere Bunte Estherienschiefer bis Grundgipsschichten) keine hydraulischen Untersuchungen durchgeführt. Zum einen wurden mit Ausnahme des in den quartären Neumagen-Schottern bei 3,5 m u. GOK angebohrten Grundwassers bis zum Erreichen des Unterkeupers (Erfurt-Formation) keine signifikanten Wasserzutritte während des Bohrvorganges beobachtet. Zum anderen musste im Interesse eines zügigen Abschlusses der Bohrarbeiten auf zeit- und aufwändige zwischengeschaltete Ventiltests, die mit längeren Unterbrechungen der Bohrarbeiten verbunden gewesen wären, verzichtet werden.

Vom 01.03. bis 08.03.2011 wurde in der BB 3 zur Ermittlung der hydraulischen Kennwerte des Unterkeupers (Erfurt-Formation) ein mehrstufiger Pumpversuch durchgeführt. Daran schloss sich bis zum 29.03.2011 der Ausbau der Bohrung zum Brunnen an, so dass in dieser Zeit keine Grundwasserabsenkung in der BB 3 möglich war. Vom 01.04. bis 07.04.2011, 12:00 Uhr, wurde in der BB 3 ein weiterer Pumpversuch durchgeführt. Daran anschließend erfolgte bis zum 15.04.2011 durch eine Anpassung der Entnahmerate in der EKB 2 eine Optimierung des gemeinsamen Absenkbetriebes. Das Abschalten der Pumpe in der BB 3 bis zum 18.04.2011 war erforderlich, um die Schläuche zur Ableitung des aus der BB 3 entnommenen Wassers, die bis dahin über Flur lagen, unter Flur zu verlegen. Seit dem 19.04. lief der optimierte Absenkbetrieb aus beiden Brunnen als Dauermaßnahme. Am 03.05. um etwa 22:30 Uhr setzte die Pumpe in der BB 3 aus. Sie musste ersetzt werden. Seit dem 10.05., 15:30 Uhr, erfolgt wieder der routinemäßige Dauerabsenkbetrieb. Da die Ersatzpumpe in der BB 3 eine andere Pumpencharakteristik aufweist, war es in der Folge erforderlich, die Entnahmerate mehrfach nachzuregulieren.

4.2.1.1 Klarpumpen und Pumpversuch BB 3 vom 01.03. bis 08.03.2011

Am 23.02.2011 hatte die Bohrung BB 3 die Endtiefe von 122,3 m erreicht. Der einzementierte Rohrschuh der 178-mm Hilfsverrohrung stand bei 111,6 m u. GOK.

In der Zeit vom 01.03. bis 08.03.2011 wurden der unverrohrte basale Abschnitt der Grundgipsschichten und der Unterkeuper (Erfurt-Formation) von 111,6 bis 122,3 m u. GOK klargespült und anschließend hydraulisch getestet (Tab. 4.1, Abb. 4.4). Der Pumpbetrieb erfolgte durch die Hilfsverrohrung. Die 6"-Pumpe hing in der Verrohrung in 108,5 m Tiefe. Die hohe elektrische Leitfähigkeit während des

Klarpumpens und der ersten Phase des anschließenden Pumpversuches zeigt, dass das Grundwasser noch hohe Spülungsanteile aufwies (vgl. Abb. 4.13 und Kap. 5.3, Abb. 5.18). Erst die Probe am Ende des Pumpversuches am 08.03. ist annähernd repräsentativ für das Grundwasser des Unterkeupers (Tab. 4.1, vgl. Kap. 5).

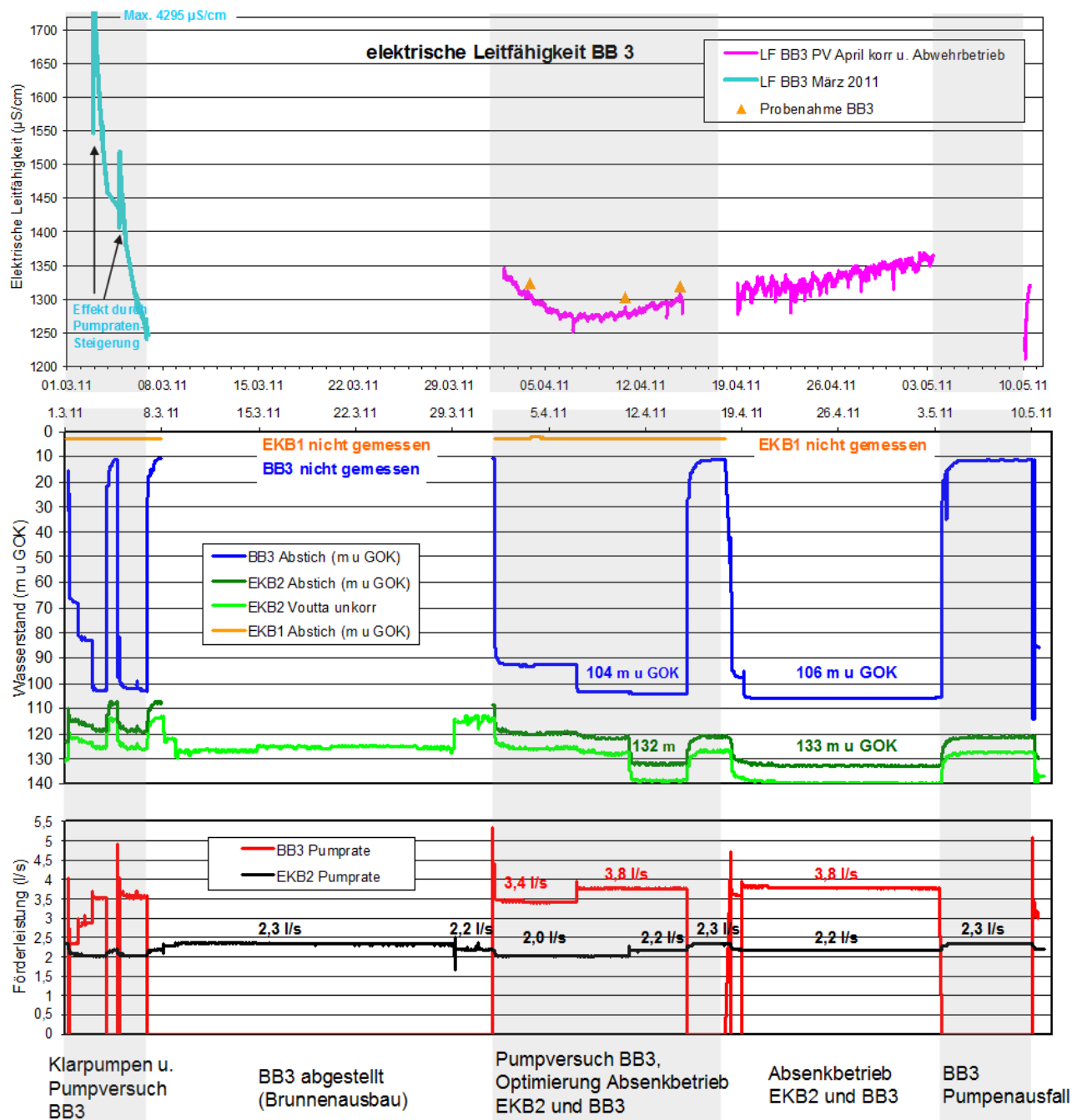


Abb. 4.3: Pumpmaßnahme in der EKB 2 und BB 3 vom 01.03.2011 bis 11.05.2011: Entnahmeraten (unten) und Absenkbeträge (Mitte) sowie elektrische Leitfähigkeit in der BB 3 und Zeitpunkte der Probenahmen für hydrochemische und isopenhydrologische Untersuchungen (oben).

In der Abb. 4.4 sind die Entnahmeraten und Wasserstandsänderungen während des Klarspülens und des Pumpversuches in der BB 3 vom 01. bis 08.03.2011 vereinfacht graphisch dargestellt. Der genaue Ablauf der Pumpmaßnahme ist in der Tabelle 4.1 protokolliert. Während der Absenkung in der BB 3 wurde die Entnahmerate in der EKB 2 von ca. 2,3 auf ca. 2,0 l/s reduziert. Hierdurch wurde vermieden, dass als Folge der Überlagerung der beiden Absenktichter der Wasserstand in der EKB 2 tiefer als 132 m u. GOK abgesenkt wurde. Ansonsten hätte die Gefahr bestanden, dass der Pumpeneinlauf trocken fällt.

Tab. 4.1: Ablauf des Klarspülens und des Pumpversuchs in der BB 3 vom 01.03.2011 bis 08.03.2011 (nach GEOSSENS 2011a).

Datum / Uhrzeit	EKB 2 Förderl. l/s	BB 3 Förderl. l/s	Bemerkung / Vorgang	Probenahme
01.03.2011 16:00	2,3	0,0	Erfassung Istzustand	
01.03.2011 17:15	2,1	0,0	EKB 2 runtergeregelt, Pumpe BB 3 getestet	
01.03.2011 17:39-17:45	2,1	0,7	Start Klarpumpen, Einregelung 1. Förderstufe	
01.03.2011 18:18-18:45	2,1	1,2	Einregelung 2. Förderstufe	
01.03.2011 18:48-19:05	2,1	2,5	Einregelung 3. Förderstufe	
02.03.2011 09:20	2,1	2,4	Messwerte gegen Ende 3. Förderstufe	
02.03.2011 10:00-10:44	2,1	2,8	Einregelung 4. Förderstufe	10:00 (kl.) Probenahme LGRB
03.03.2011 09:21	2,0	2,9	Messwerte gegen Ende 4. Förderstufe	
03.03.2011 10:25-11:00	2,0	3,6	Einregelung 5. Förderstufe	
04.03.2011 09:15	2,0	3,5	Messwerte gegen Ende der 5. Förderstufe	08:30-9:00 Probenahme LGRB, Hydroisotop
04.03.2011 11:34	2,0	-	Ende Klarpumpen, Zwischenwiederanstieg	
05.03.2011 06:38	2,2	0,0	Ende Zwischenwiederanstieg	
05.03.2011 06:40	2,2	-	Start Pumpversuch BB 3, 5. Förderstufe	
05.03.2011 08:15	2,1	3,7	Messwerte 95 min 5. Förderstufe	8:45-9:30 Probenahme LGRB, Hydroisotop
07.03.2011 08:50	2,0	3,6	Messwerte. 2 Tage 5. Förderstufe	9:00-9:45 Probenahme LGRB, Hydroisotop
07.03.2011 10:26	2,0	3,6	Ende Pumpversuch, Wiederanstieg	
08.03.2011 09:28	2,2	-	Ende Wiederanstieg	

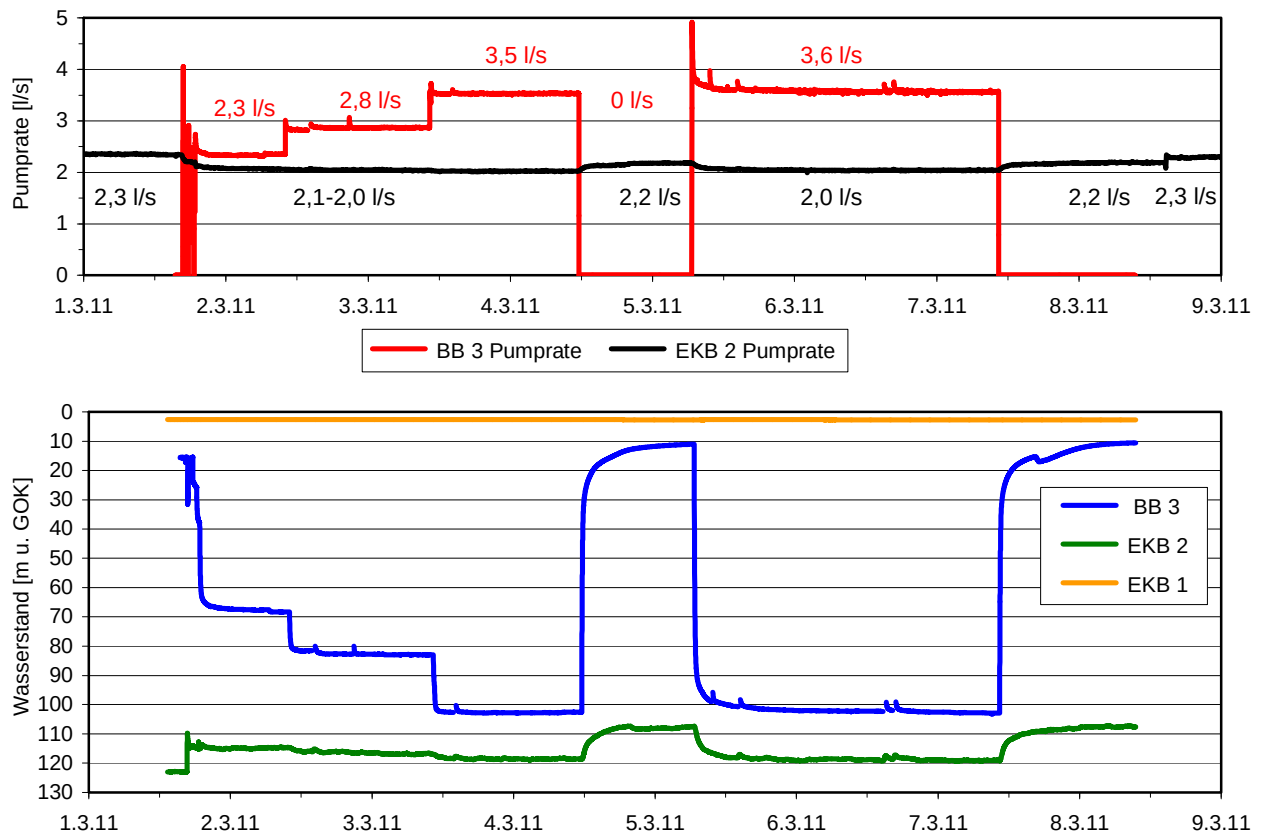


Abb. 4.4: Wasserstandsänderung (unten) und Entnahmeraten (oben) während des Klarpumpens und des Pumpversuches in der EKB 2 und der BB 3 vom 01.03. bis 08.03.2011. Entnahmeraten- und Wasserstands-Schwankungen in Folge von kurzzeitigen Pumpenausfällen sind nicht dargestellt.

Vom 05.03.2011, 6:40 Uhr, bis zum 08.03.2011, 9:28 Uhr, wurde in der BB 3 ein Aquifertest mit konstanter Entnahmerate von 3,6 l/s mit Beobachtung des anschließenden Wiederanstiegs durchgeführt. Die Wasserstände wurden sowohl in der Hilfsverrohrung der BB 3 als auch im Ringspalt zwischen Sperrrohr und Hilfsverrohrung gemessen (Abb. 4.5). Die Hilfsverrohrung erwies sich als nicht vollständig dicht. Dies zeigt die annähernd lineare Abnahme des Wasserstandes zwischen Sperrrohr und Hilfsverrohrung während des Pumpbetriebs in der BB 3. Eine Volumenberechnung ergibt, dass der Wasserfluss in oder aus dem Ringspalt zwischen Sperrrohr und Hilfsverrohrung aber sehr gering und damit vernachlässigbar ist. Allerdings fällt der Wasserstand in der Hilfsverrohrung in der Wiederanstiegsphase bei einem Wasserstand von rund 15 m um 1,5 m sprunghaft ab. Dies weist wahrscheinlich auf eine größere Undichtigkeit der Hilfsverrohrung in diesem Niveau hin.

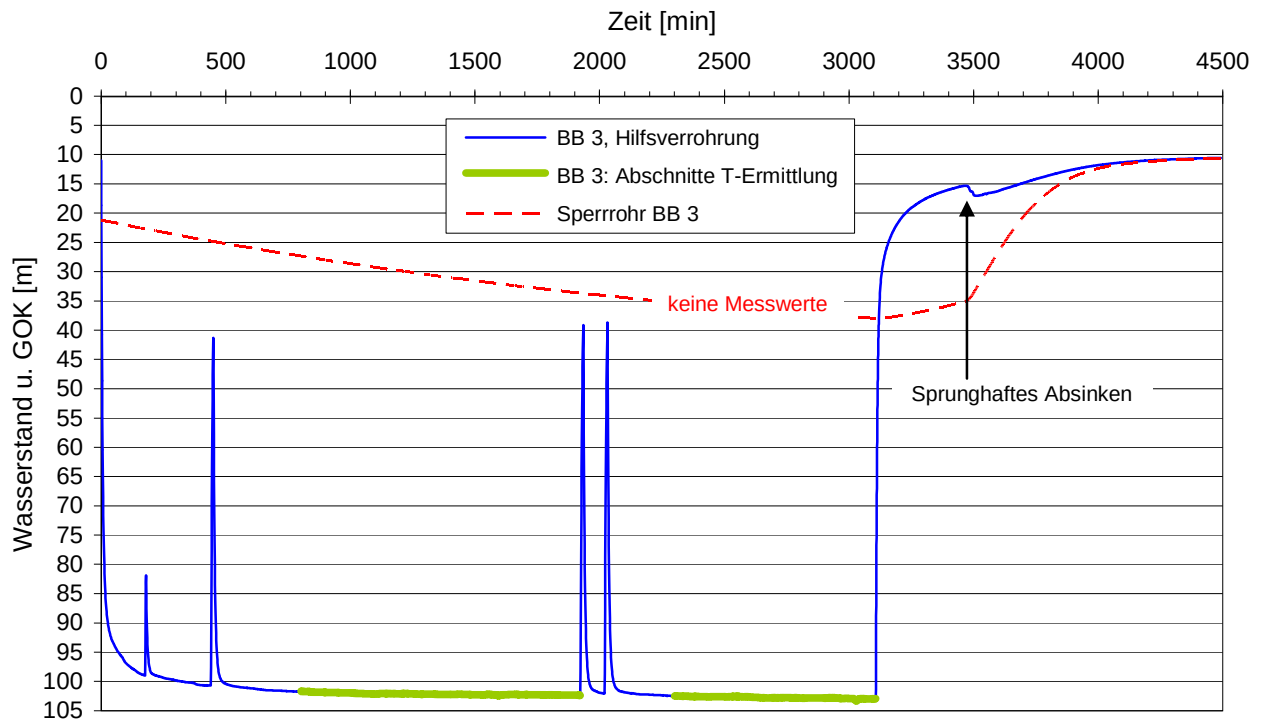


Abb. 4.5: Wasserstandsänderung in der Hilfsverrohrung der BB 3 sowie zwischen dem Sperrrohr (558 mm) und der Hilfsverrohrung (178 mm, jeweils Außendurchmesser) vom 05.03.2011, 6:40 Uhr bis 08.03.2011, 9:28 Uhr. Kurzfristige Anstiege des Wasserstandes sind durch Pumpenausfälle verursacht. Die für die hydraulische Auswertung verwendeten Kurvenabschnitte sind farblich hervorgehoben (siehe Legende).

Die zeitliche Auswertung der Absenkung nach COOPER & JACOB (1946) für die in Abb. 4.5 grün markierten Kurvenabschnitte liefert Transmissivitäten von $T = 1,7 \cdot 10^{-4}$ (rechter Abschnitt) bzw. $4,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (linker Abschnitt) (Abb. 4.6). Daraus errechnet sich ein Mittelwert von $T = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Der Auswertung liegt die Annahme zugrunde, dass es sich um einen weiträumigen Aquifer mit einem vergleichsweise engständigen Kluftmuster handelt und demzufolge Auswerteverfahren angewandt werden können, die ursprünglich für Porenaquifere konzipiert wurden (STRAYLE et al. 1994).

Die Auswertung des letzten, von der Zusickerung aus dem Ringspalt zwischen Sperrrohr und Hilfsverrohrung unbeeinflussten Abschnitts des Wiederanstiegs nach THEIS (1935) ergibt eine Transmissivität von $T = 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (Abb. 4.7).

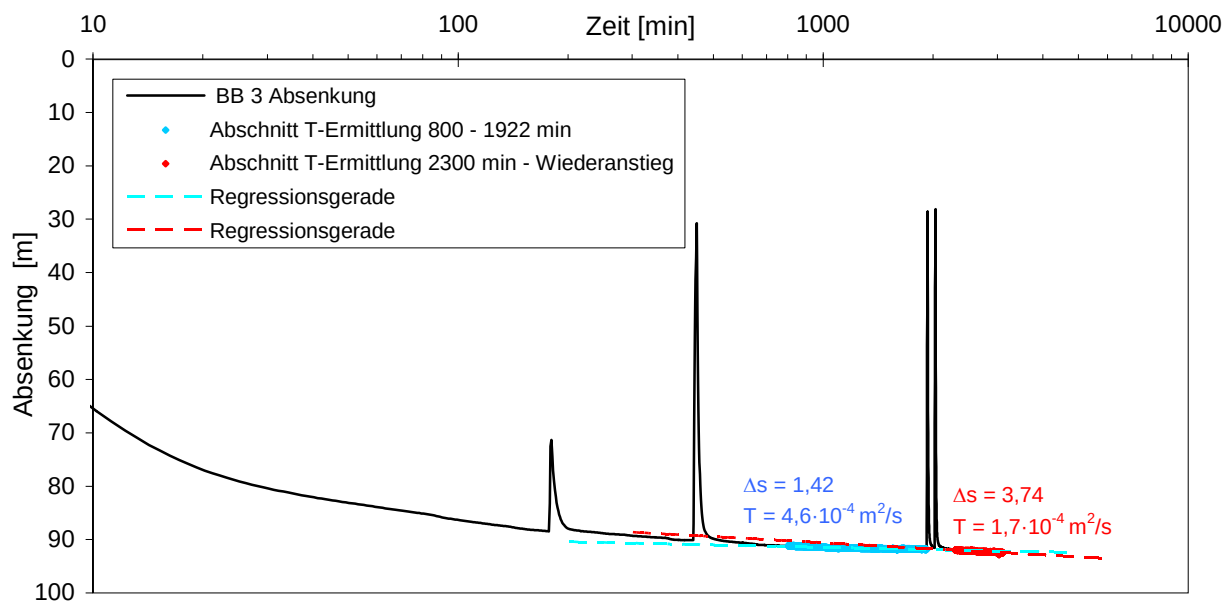


Abb. 4.6: Pumpversuch BB 3 vom 05.03.2011, 6:40 Uhr bis 08.03.2011, 9:28 Uhr: Halblogarithmische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Absenkung (ab 10 min Pumpdauer), Auswertung der Absenkung nach COOPER & JACOB (1946).

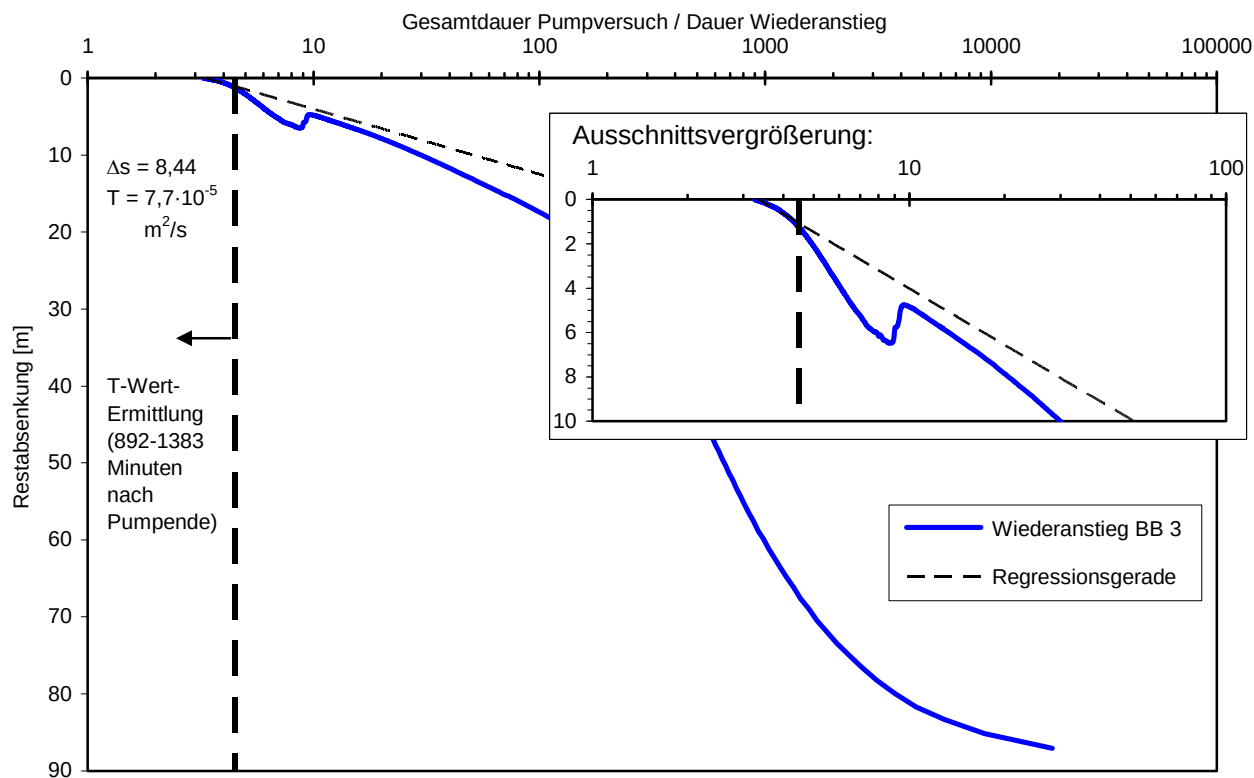


Abb. 4.7: Pumpversuch BB 3 vom 05.03.2011, 6:40 Uhr bis 08.03.2011, 9:28 Uhr: Halblogarithmische Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Wiederanstiegs, Auswertung nach THEIS (1935).

4.2.1.2 Pumpversuch BB 3 und Optimierung des gemeinsamen Absenkbetriebes aus der EKB 2 und der BB 3 vom 01.04. bis 18.04.2011

Vom 01.04.2011, 12:23 Uhr, bis zum 18.04.2011, 08:28 Uhr, wurde in der BB 3 ein zweistufiger Pumpversuch (Entnahmeraten 3,4 und 3,8 l/s) mit Beobachtung des anschließenden Wiederanstiegs im ausgebauten Brunnen (Anl. 3.1) durchgeführt. Der hydraulisch getestete Gebirgsabschnitt von der Unterkante Sperrrohr bei 114,5 m bis zur Brunnensohle bei 122,2 m u. GOK umfasst die erbohrten Unterkeuper Schichten (Erfurt-Formation). In der Tab. 4.2 sind die Betriebspläne des Pumpversuches in der BB 3 sowie der der anschließenden Optimierung des aus beiden Brunnen gemeinsam betriebenen Abwehrrumpfbetriebes zusammengefasst. Abb. 4.8 zeigt die Pumpraten und Wasserstände in graphischer Form. In Abb. 4.9 sind die Kurvenabschnitte markiert, die zur hydraulischen Auswertung des Pumpversuchs herangezogen wurden.

Tab. 4.2: Betriebsplan des Pumpversuchs in der BB 3 vom 01.04.2011 bis 18.04.2011 (mit vorheriger Reduzierung der Entnahmerate in der EKB 2). Aufgeführt sind die erreichten Pumpraten, nachdem sich ein annähernd konstanter Wasserspiegel eingestellt hat (nach Bericht GEOSSENS, 2011b).

Datum, Uhrzeit	EKB 2 Pumprate [l/s]	BB 3 Pumprate [l/s]
29.03.11 20:00	2,2 (Reduzierung von 2,3)	0
01.04.11 12:23	2,0 (Wasserspiegel-Absenkung)	3,5 (Anfang) - 3,4 (Ende)
07.04.11 12:00	2,0	3,8 (Erhöhung Förderrate)
11.04.11 09:20	2,2 (Erhöhung Förderrate)	3,8
15.04.11 12:37	2,3 (Paralleler Anstieg zu Anstieg des Wasserstandes in BB 3)	0 (Abschaltung Pumpe)
18.04.11 08:28	2,3	Ende Beobachtung Wiederanstieg

Die während des Pumpversuchs gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten in der BB 3 sind mit Werten von 1260 bis 1340 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Vergleich zu den ersten hydraulischen Tests im März 2011 mit max. 4793 $\mu\text{S}/\text{cm}$ deutlich niedriger (siehe Abb. 4.13). Im Vergleich zu Unterkeuper-Wasserproben aus der EKB 2 (Herbst 2009), die eine Leitfähigkeit von 1210 bis 1330 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aufwiesen, ist bei den letzten Messungen somit ein Einfluss der Bohrspülung entweder nicht mehr vorhanden oder nur noch sehr gering ausgeprägt.

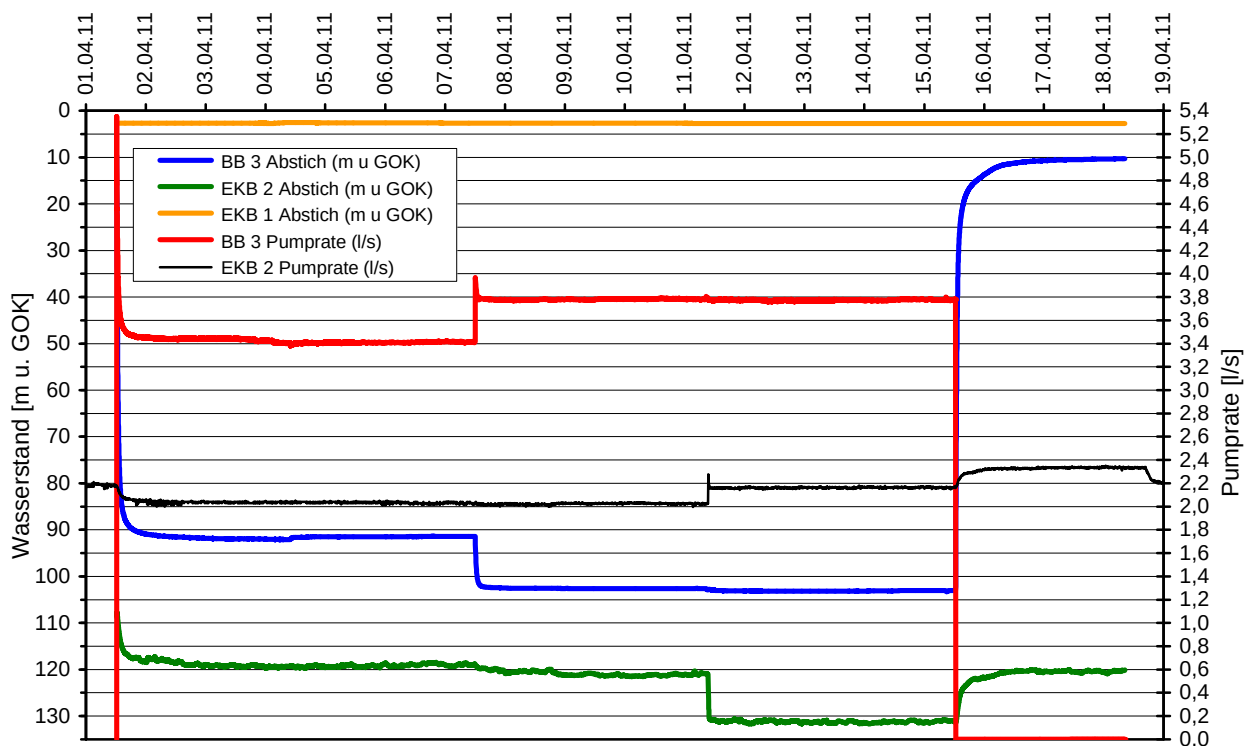


Abb. 4.8: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten in EKB 1, EKB 2 und BB 3 während des Pumpversuchs in der BB 3 und der Optimierung des Absenkbetriebes in EKB 2 und BB 3 vom 01.04. bis 18.04.2011.

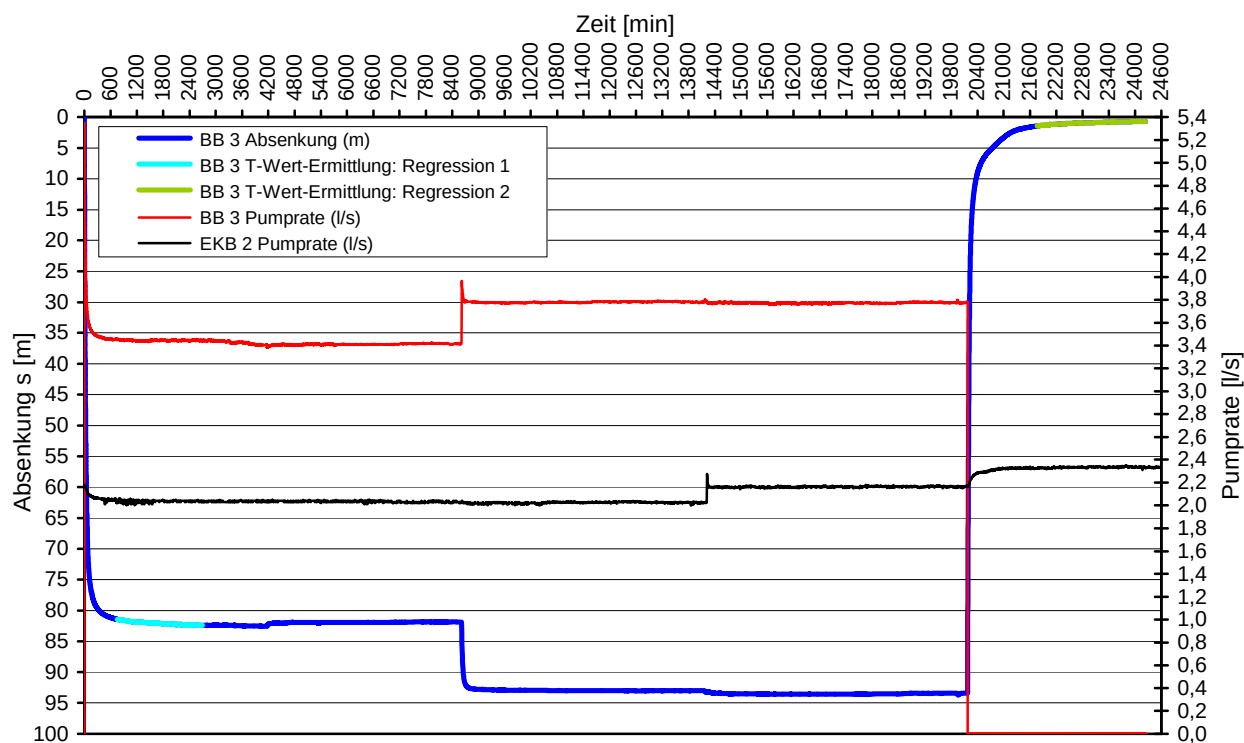


Abb. 4.9: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten während des Pumpversuchs in der BB 3 und der Optimierung des Absenkbetriebes in EKB 2 und BB 3 vom 01.04. bis 18.04.2011. Die für die hydraulische Auswertung verwendeten Kurvenabschnitte sind farblich hervorgehoben (siehe Legende).

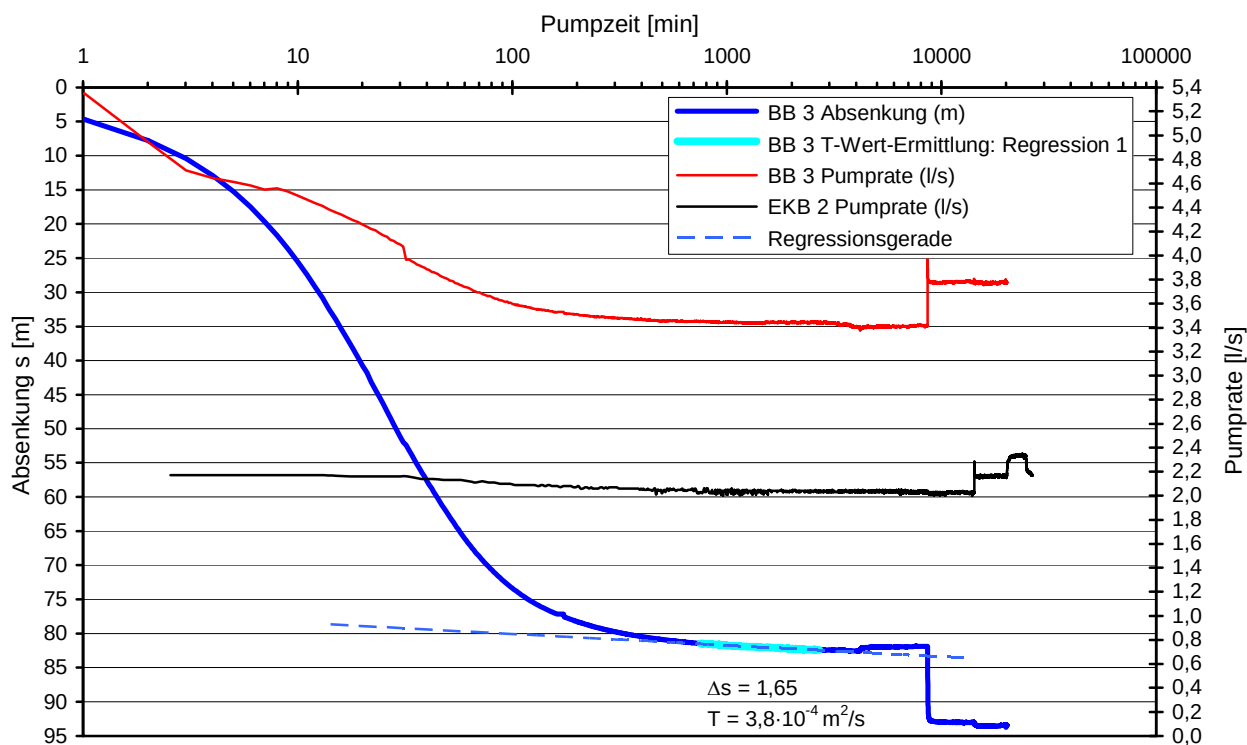


Abb. 4.10: Pumpversuch BB 3 vom 01.04.2011, 12:24 Uhr, bis 15.04.2011, 12:36 Uhr: Halblogarithmische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Absenkung, Auswertung der Absenkung nach COOPER & JACOB (1946).

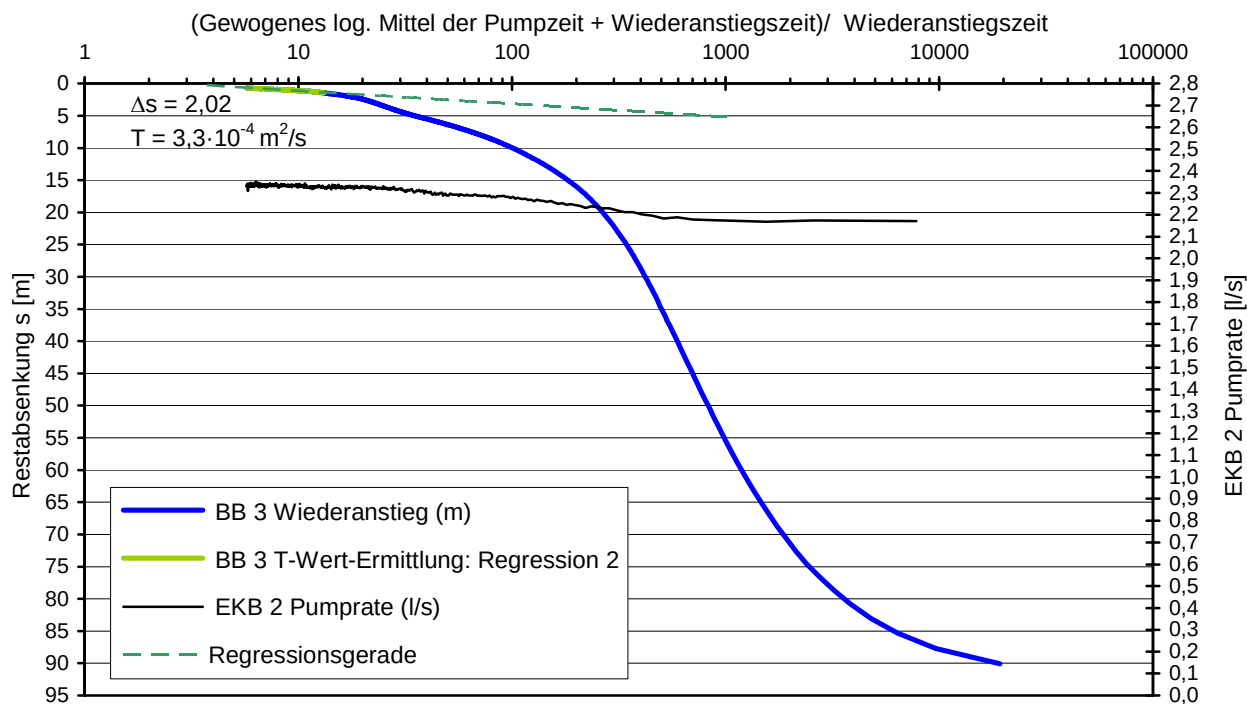


Abb. 4.11: Pumpversuch BB 3: Wiederanstieg vom 15.04.2011, 12:38 Uhr, bis 18.04.2011, 8:28 Uhr: Halblogarithmische Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Wiederanstiegs, Auswertung nach THEIS (1935).

Die zeitliche Auswertung der Absenkung nach COOPER & JACOB (1946) für den in Abb. 4.10 farblich markierten Kurvenabschnitt liefert eine Transmissivität von $T = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS (1935) ergibt eine Transmissivität von $T = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Abb. 4.11). Daraus ergibt sich ein Mittelwert von $3,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Er stimmt annähernd mit dem Wert aus dem Pumpversuch im März überein (siehe Abb. 4.6). Bei einem hydraulisch getesteten Bohrlochabschnitt von $H = 7,7 \text{ m}$ ergibt sich daraus eine Profildurchlässigkeit $T/H = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

In der EKB 2 wurde für den Unterkeuper eine Transmissivität von $T = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ und eine Profildurchlässigkeit $T/H = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ermittelt (LGRB 2010). Die Durchlässigkeit des Unterkeupers bei der EKB 2 ist damit etwa um eine Zehnerpotenz niedriger als bei der BB 3. Dies deckt sich mit dem Absenkverhalten der beiden Entnahmestellen (Pumprate im Verhältnis zur Absenkung) während des Dauerbetriebes sowie mit dem Befund der Bohrkernaufnahmen, wonach in der BB 3 deutlich mehr Klüfte festgestellt wurden als in der EKB 2 (vgl. Bohrprofil Anl. 3.2 sowie LGRB 2010).

4.2.1.3 Gegenseitige Beeinflussung der Grundwasserentnahmen, Druckreaktionen beim Abteufen der BB 3

Beim Abteufen der Bohrung BB 3 wurde mit Erreichen der Schichten des Unterkeuper am 22.02.2011 in der EKB 2, die den Unterkeuper und Oberen Muschelkalk hydraulisch erschließt, ein spontaner Anstieg des Wasserspiegels von etwa 130 auf 126 m u. GOK beobachtet (Druckreaktion, vgl. Abb. 4.1). Außerdem stieg vom 24.02. bis Ende Juni 2011 die elektrische Leitfähigkeit in der EKB 2 von 1300 auf 1450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ leicht an (Abb. 4.2, Abb. 4.13, vgl. Kap. 5.2).

4.2.2 Dauerabsenkbetrieb in EKB 2 und BB 3 seit 18.04.2011

Seit dem 18.04.2011 erfolgt aus den beiden Entnahmestellen EKB 2 und BB 3 ein gemeinsamer Dauerabsenkbetrieb, der nur durch kurzzeitige Ausfälle der Pumpe in der BB 3 zwischen dem 03.05. und 10.05.2011, am 16.06., 27.06., 29.06., 17.09. und am 27.10.2011 unterbrochen wurde. In der EKB 2 fiel die Pumpe am 16.06., 27.06. und 28.06.2011 aus. Die Grundwasserstände, Entnahmeraten und der Leitparameter elektrische Leitfähigkeit werden kontinuierlich registriert (Abb. 4.12 und 4.13). Die digital erfassten Parameter werden online übermittelt. Ein Warnsystem mit minimalen und maximalen Grundwasserständen als Warnwerte in den beiden Entnahmestellen gewährleistet, dass ein eventueller Pumpenausfall sehr kurzfristig bemerkt wird. Für beide Entnahmestellen liegen bei der Stadt Staufen Ersatzpumpen bereit, so dass

eventuell auftretende Ausfallzeiten minimiert werden können. Die Wasserstands-sonde in der EKB 2 wurde bei einem kurzfristigen Stromausfall am 16.06.2011 beschädigt. Am 27.06.2011 wurde sie durch eine neue ersetzt.

Zwischen dem 16.11. und dem 01.12.2011 erfolgte die Abschlussinstallation in der Brunnenbohrung BB 3. Dabei wurde in der Kirchstraße ein Brunnenschacht eingerichtet und die Dimensionierung der unter Flur verlegten Ableitungen an die anfallenden Drücke angepasst. Außerdem wurden die Einrichtungen zur automatischen Messwerterfassung in der EKB 2 und der BB 3 (Entnahmerate, Absenkbeträge, hydrochemische Leitparameter) dauerhaft installiert und für die Verlegung in das Schutzhäuschen in der Rathausgasse vorbereitet. Dies hatte zur Folge, dass die digitalen Messungen für die BB 3 erst wieder seit dem 01.12., für die EKB 2 wieder seit dem 12.12.2011 vorliegen.

Im Dauerabsenkbetrieb werden aus der EKB 2 2,1 - 2,2 l/s, aus dem Brunnen BB 3 3,3 - 3,8 l/s entnommen. Durch die Überlagerung der beiden Absenkbereiche wird der Druckwasserspiegel in der EKB 2 auf 131 - 137 m u. GOK, in der BB 3 auf 102 - 107 m u. GOK abgesenkt. Die Entnahmeraten haben im Beobachtungszeitraum leicht abgenommen. In der BB 3 stieg der abgesenkte Druckwasserspiegel von April bis November 2011 von 104 auf 102 m u. GOK an, seit Mitte Dezember 2011 fällt er von 105 auf 107 m u. GOK (Stand Ende Februar 2012). In der EKB 2 fällt der Wasserspiegel seit etwa Mitte Mai 2011 um ca. 5 m ab (ohne Berücksichtigung der höheren Wasserstände während der Umbauphase in der BB 3).

Die elektrische Leitfähigkeit in der BB 3 ist Anfang März 2011 aufgrund des Einflusses der Bohrspülung noch stark erhöht (Abb. 4.13). Nachdem sie in der Folge in der EKB 2 auf ca. 1290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und in der BB 3 auf ca. 1270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gefallen ist, steigt sie sowohl in der EKB 2 wie auch in der BB 3 leicht an (vgl. Kapitel 4.2.1.3). Seit Ende Juni 2011 ist die Leitfähigkeit in beiden Brunnen im Rahmen der Messgenauigkeit annähernd konstant. Dabei liegt sie bis zum 16.11.2011 im Grundwasser der EKB 2 immer um bis zu ca. 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ über dem Wert der BB 3 (Probenahmen und Analytik durch LGRB-Labor). Eine markante Veränderung in der elektrischen Leitfähigkeit und weiterer Inhaltsstoffe zeichnet sich im Zusammenhang mit der wartungsbedingten Pumpopause in der BB 3 zwischen dem 16.11. und dem 01.12.2011 ab (Abb. 4.13). Kurz nach dem Einschalten der Pumpe betrug die elektrische Leitfähigkeit am 01.12. ca. 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sie stieg bis zum 06.12.2011 auf 1424 $\mu\text{S}/\text{cm}$ an.

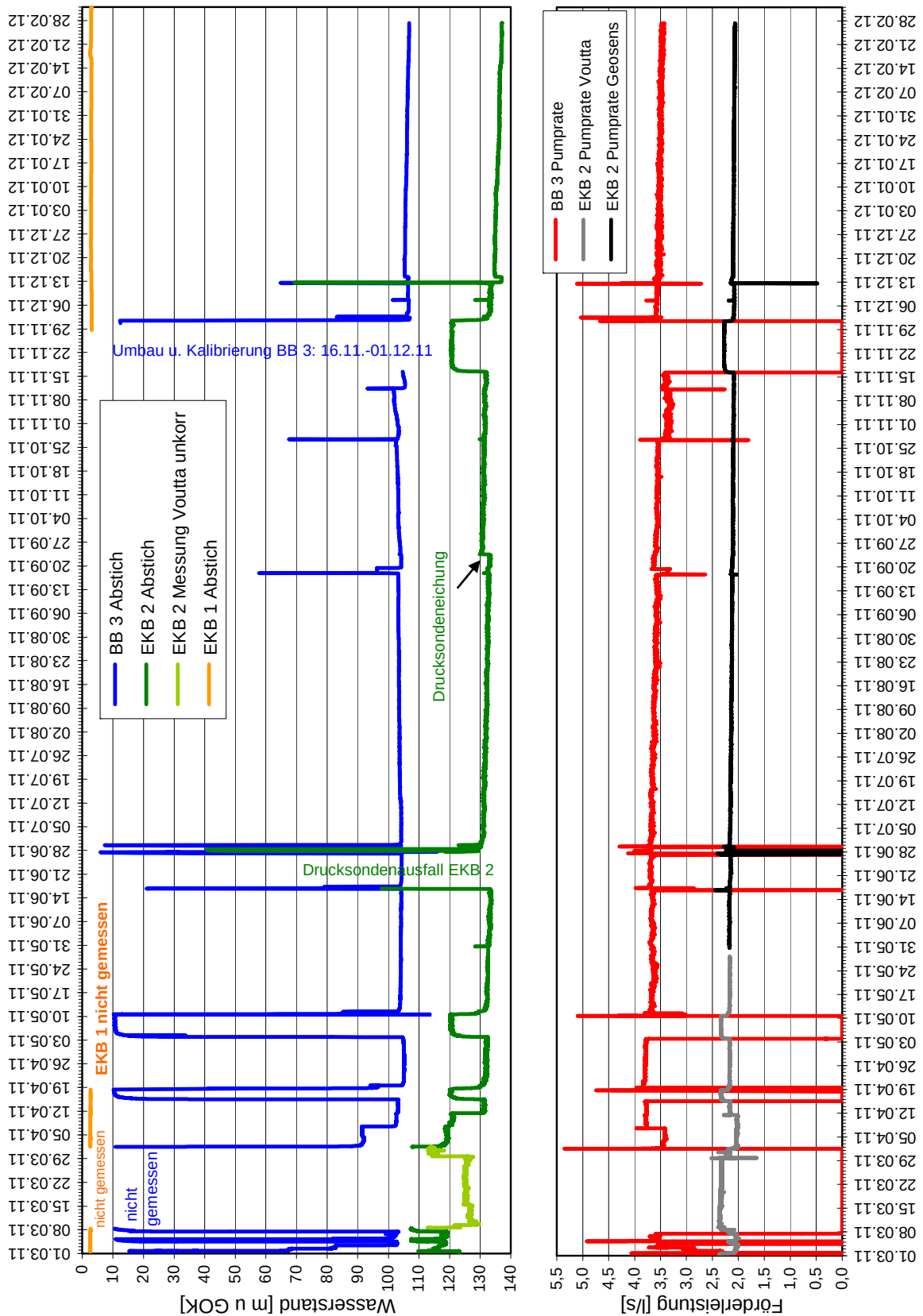


Abb. 4.12: Gemeinsamer Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2 und der BB 3: Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen von Entnahmerate und Druckwasserspiegel bis zum 27.02.2012.

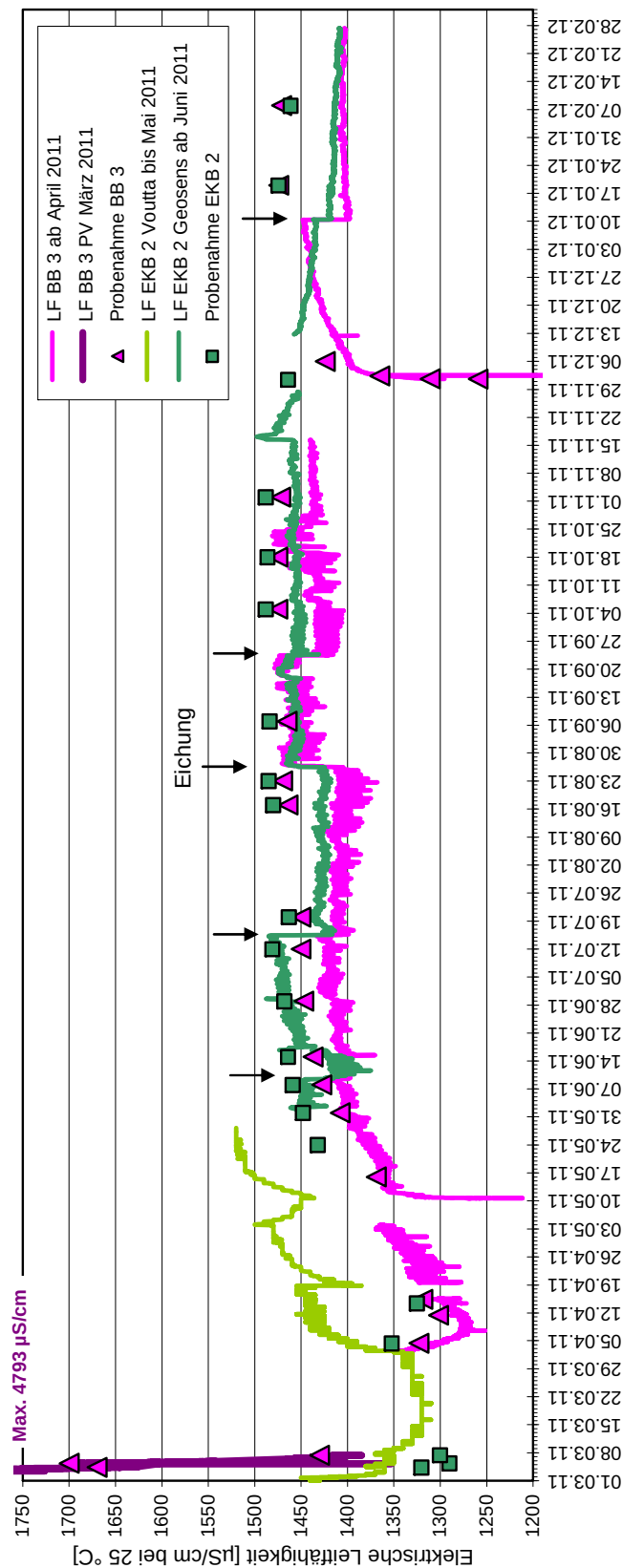


Abb. 4.13: Gemeinsamer Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2 und der BB 3: Ergebnisse der kontinuierlichen und im Rahmen von Probenahmen durchgeführten Leitfähigkeitsmessungen bis zum 27.02.2012. Die durch Pfeile markierten Leitfähigkeitssprünge beruhen auf Nach-eichungen der Messsonden.

Die Auswertung des Tritium- (1,5 TU, siehe Kap. 5.1.1) und der SF₆- bzw. FCKW-Gehalte in der BB 3 ergibt für die Probe vom 06.12.2011 einen Jungwasseranteil zwischen 5 und 20 %. Eine Mischungsrechnung mit einem Jungwasseranteil von 20 % und einer elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers aus der Erfurt-Formation (Unterkeuper) von 1274 µS/cm ergibt für die Jungwasserkomponente eine elektrische Leitfähigkeit von ca. 1230 µS/cm, bei einem Jungwasseranteil von 5 % bedarf es einer elektrischen Leitfähigkeit von 500 µS/cm. Diese niedrige Leitfähigkeit liegt in der Größenordnung, die für das Grundwasser im quartären Neumagenschotter ermittelt wurde (zwischen 250 und 490 µS/cm). Im Vergleich dazu liegt die elektrische Leitfähigkeit der Weiherhofquellen bei ca. 750 µS/cm, die des in der EKB 2 beprobten Wassers aus dem Oberen Muschelkalk bei ca. 715 µS/cm (vgl. Tab. 5.2).

In der EKB 2 wurde am 01.12.2011, 9:00 Uhr, kurz nach Einschalten der Pumpe in der BB 3 eine elektrische Leitfähigkeit von 1464 µS/cm gemessen. Die Leitfähigkeit liegt damit in der Größenordnung der auch danach gemessenen Werte und nur ca. 20 µS/cm unter der vor dem Abschalten der BB 3. In dieser Probe wurden anhand der Spurengas- und Tritiumgehalte ebenfalls Jungwasseranteile zwischen 10 und 20 % festgestellt.

Spätestens seit dem 19.01.2012 erreicht die Leitfähigkeit in beiden Wässern wieder das Niveau vor dem Abstellen der Pumpe. Die Werte sind seitdem bei Leitfähigkeitskonstanz in beiden Wässern im Rahmen der Messgenauigkeit identisch (ca. 1460 bis 1475 µS/cm, Probenahmen vom 19.01. und 08.02.2012).

Die Grundwasserdruckverhältnisse im Umfeld der dauerhaft betriebenen EKB 2 und BB 3 wurden mit einem stark schematisierten hydraulischen Prinzipmodell für stationäre Verhältnisse numerisch simuliert. Dabei wurde für die beiden Entnahmestellen im Unterkeuper/Oberen Muschelkalk eine hydraulische Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-4}$ m/s, als Wasserstände 132 (EKB 2) und 104 m u. GOK (BB 3) in Ansatz gebracht. Abb. 4.14 zeigt die modellierte Lage der Grundwasserdruckfläche entlang des geologischen Profilschnitts zwischen den beiden Bohrungen EKB 2 und BB 3. Die Überlagerung der beiden Absenktrichter der EKB 2 und der BB 3 führt auch im Bereich zwischen den beiden Entnahmestellen dazu, dass der Druckwasserspiegel im Sondenfeld unter den gequollenen Gebirgsabschnitt (in Abb. 4.14 rot umrahmt) abgesenkt wird. Dies gilt auch für den Bereich der EWS 2, die im Abschnitt zwischen 140 und 105 m u. GOK verstürzt ist, so dass sie nicht mehr für eine nachträgliche Ringraumabdichtung aus den perforierten EWS-Schläuchen heraus zugänglich war. Der alleinige Betrieb einer der beiden Entnahmestellen würde nicht zu dem gewünschten Absenkziel führen. In Abb. 4.14. sind die projizierten Endpunkte der EWS-Bohrungen EWS 2 und 7 eingetragen.

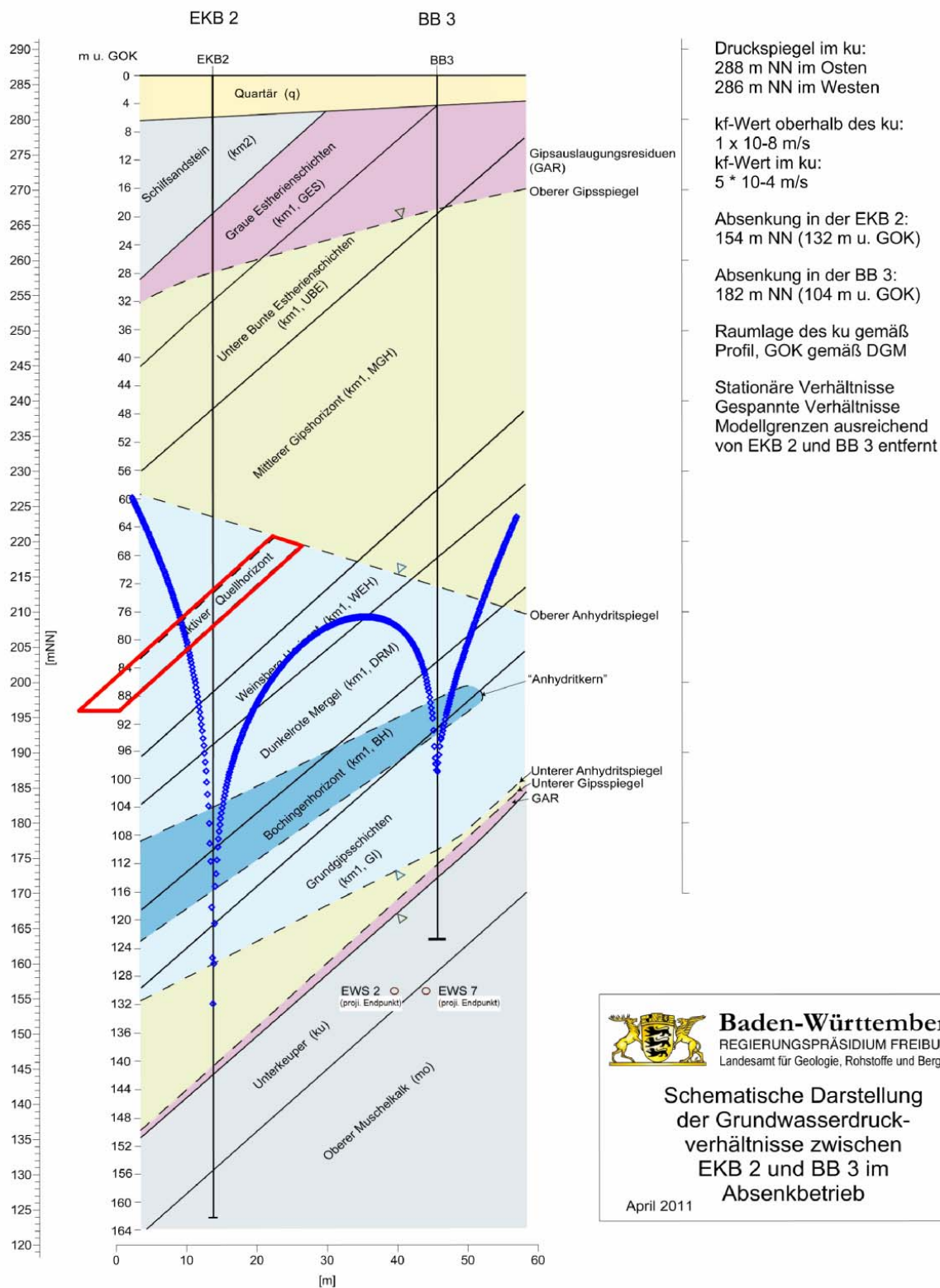


Abb. 4.14: Schematische Darstellung der Grundwasserdruckverhältnisse im Umfeld der EKB 2 und BB 3 bei Dauerabsenkbetrieb.

4.3 Grundwasserstandsmessungen in der EKB 1

Begleitend zu der Pumpmaßnahme in der EKB 2 und BB 3 wurde seit dem 28.11.2011 in der EKB 1 der Grundwasserstand digital erfasst. Es wurden keine signifikanten Reaktionen des Grundwasserstandes auf die Entnahmen beobachtet. Wie bereits im ersten Sachstandsbericht (LGRB 2010, Kap. 5.4.4) auf der Grundlage früherer Messungen ausgeführt, reagiert das Grundwasser in der EKB 1 spontan auf Niederschlagsereignisse. Dies ist die Folge der gespannten Grundwasserverhältnisse im Unterkeuper-Grundwasserleiter der tektonischen Hochscholle, auf der die EKB 1 liegt.

5 Hydrochemische und isotonhydrologische Untersuchungen

Die hydrochemischen und isotonhydrologischen Untersuchungen schließen an die im ersten Sachstandsbericht (LGRB 2010) beschriebenen Untersuchungen an.

Tab. 5.1 gibt einen Überblick über die seit dessen Veröffentlichung durchgeführten Probenahmen in EKB 1, EKB 2 und BB 3. Die Untersuchungen haben zum Ziel, das in der BB 3 angetroffene Grundwasser zu charakterisieren und es mit den übrigen Grundwässern zu vergleichen, die aus den beiden Entnahmestellen EKB 1 und EKB 2 gefördert werden. Außerdem dienen sie der Beobachtung eventueller zeitlicher Veränderungen der Grundwässer und als Referenz für die kontinuierlich durchgeführten Messungen der Vor-Ort-Parameter.

Die Ergebnisse der hydrochemischen und isotonhydrologischen Untersuchungen seit dem 10.11.2009 sind in den Anlagen 5.1 bis 5.4 zusammengestellt. Ältere Analyseergebnisse sowie die Beschreibung der Methodik und der Grundlagen sind in LGRB (2010) dokumentiert. Die Probenahme und die Analytik der Haupt- und Spurenstoffe wurden vom Labor des RPF/LGRB durchgeführt. Die Isotonmessungen erfolgten im Labor der Fa. HYDROISOTOP (Schweitenkirchen), die Spurengasuntersuchungen wurden durch das Labor Dr. Oster (Wachenheim) durchgeführt.

5.1 Hydrochemische und isotonhydrologische Charakterisierung der Grundwässer

Die hydrochemische und isotonhydrologische Charakterisierung der Grundwässer, die in Staufen im quartären Kiesgrundwasserleiter der Neumagenschotter sowie im Schilfsandstein (EKB 1 und EKB 2), Gipskeuper (EKB 2), Unterkeuper (EKB 2) und Oberen Muschelkalk (EKB 2) angetroffen wurden, erfolgte im ersten Sachstandsbericht (LGRB 2010). Die Ergebnisse werden fortgeschrieben (Tab. 5.2) und mit den neuen Erkenntnissen aus der Brunnenbohrung BB 3 sowie den Weiherhofquellen (Kap. 5.1.3) in Bezug gesetzt.

In der Zeit vom 16. November bis 01. Dezember 2011 musste die Pumpe in der BB 3 zum endgültigen Ausbau des Brunnenschachtes, der dauerhaften Installation der Pumpe und der Ableitung sowie der Steuerungs- und Monitoring-Einheiten abgeschaltet werden. Die Pumpe in der EKB 2 lief während dessen unverändert weiter, so dass der Dauerabsenkbetrieb im EWS-Feld gewährleistet war. Mit dem Abschalten der BB 3 wurde ein spontaner Anstieg des Wasserspiegels im Sammelbecken der Weiherhofquelle beobachtet (Abb. 5.1). Dieser vermutete Zusammenhang wird anhand der hydrochemischen Befunde näher untersucht (s. Kap. 5.1.3).

Die Ergebnisse aller bisher durchgeführten Isotopenuntersuchungen sind in den Abb. 5.2 bis 5.7 graphisch dargestellt.

Tab. 5.1: Hydrochemische und isotonenhydrologische Beprobungen in EKB 1, EKB 2 und BB 3 seit November 2009 (moM: Meißner-Formation, kuE: Erfurt-Formation)

Probenbezeichnung	Probenbez. - kurz	TK25	Arnum	Probenahmezeitpunkt	Geologische Einheit
Erkundungsbohrung 1/09 Rathaus Staufen	EKB 1	8112	287	08.06.2010 14:15	kuE
Erkundungsbohrung 1/09 Rathaus Staufen	EKB 1	8112	287	06.12.2010 11:00	kuE
Erkundungsbohrung 1/09 Rathaus Staufen (PV Anfang)	EKB 1	8112	287	16.12.2010 09:05	kuE
Erkundungsbohrung 1/09 Rathaus Staufen (PV Ende)	EKB 1	8112	287	16.12.2010 13:10	kuE
Erkundungsbohrung 1/09 Rathaus Staufen	EKB 1	8112	287	16.12.2010 11:20	kuE
Erkundungsbohrung 1/09 Rathaus Staufen	EKB 1	8112	287	24.01.2011 13:55	kuE
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	10.11.2009 09:30	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	21.01.2010 09:15	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	22.03.2010 09:45	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	19.04.2010 10:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	08.06.2010 09:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	12.07.2010 09:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	06.09.2010 10:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	25.10.2010 10:30	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	04.11.2010 10:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	06.12.2010 09:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	24.01.2011 10:30	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	04.03.2011 09:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	05.03.2011 08:45	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	07.03.2011 09:45	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	04.04.2011 09:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	24.05.2011 14:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	15.06.2011 09:15	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	12.07.2011 09:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	23.08.2011 08:45	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	05.10.2011 09:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	02.11.2011 09:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	01.12.2011 09:00	kuE, moM
Erkundungsbohrung 2/09 Rathaus Staufen	EKB 2	8112	289	19.01.2012 11:30	kuE, moM
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	02.03.2011 10:00	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	04.03.2011 08:30	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	05.03.2011 09:30	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	07.03.2011 09:00	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	04.04.2011 09:45	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	11.04.2011 09:30	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	15.05.2011 09:30	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	16.05.2011 09:00	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	15.06.2011 11:00	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	12.07.2011 10:00	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	23.08.2011 09:30	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	05.10.2011 09:30	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	02.11.2011 10:00	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	01.12.2011 12:55	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	01.12.2011 14:00	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	02.12.2011 09:00	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	06.12.2011 11:15	kuE
BB 3 Rathaus Staufen	BB 3	8112	301	19.01.2012 11:30	kuE

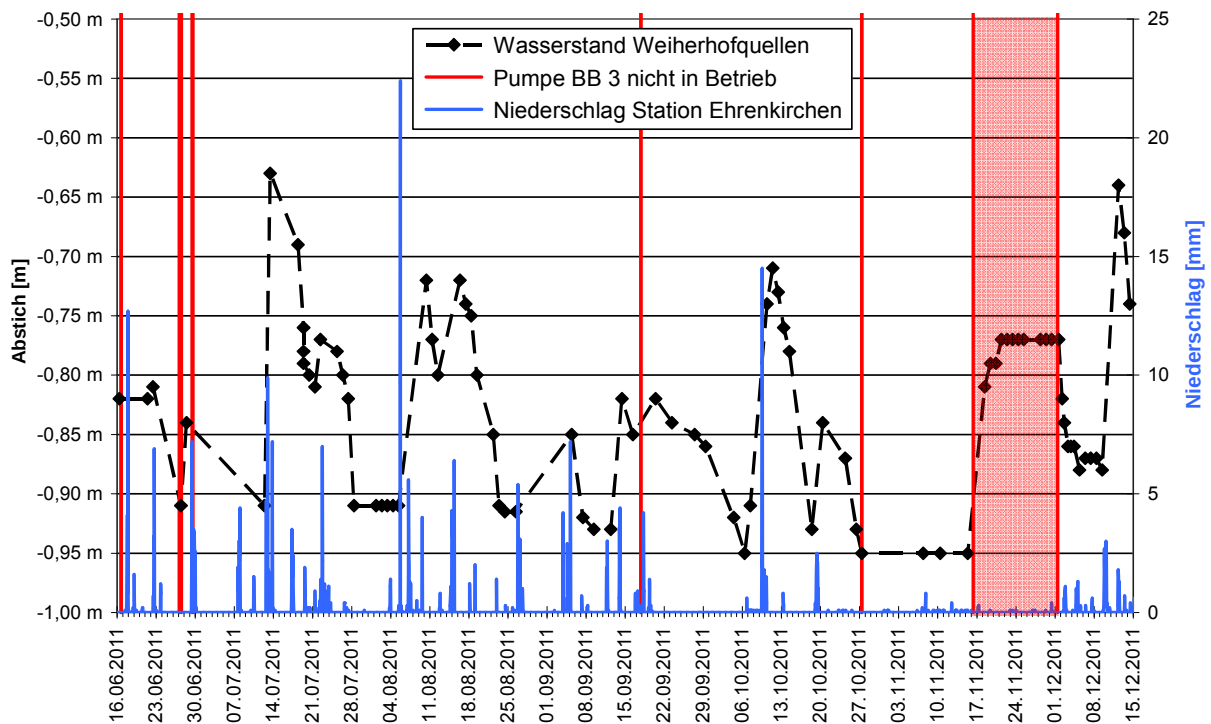


Abb. 5.1: Reaktion des Wasserstandes im Sammelbecken der Weiherhofquellen auf Entnahmeratenänderungen in der BB 3 (bei kontinuierlichem Absenkbetrieb in der EKB 2, zwischen dem 16.11. und dem 01.12.2011 war die Pumpe in der BB 3 wegen Installationsarbeiten abgestellt).

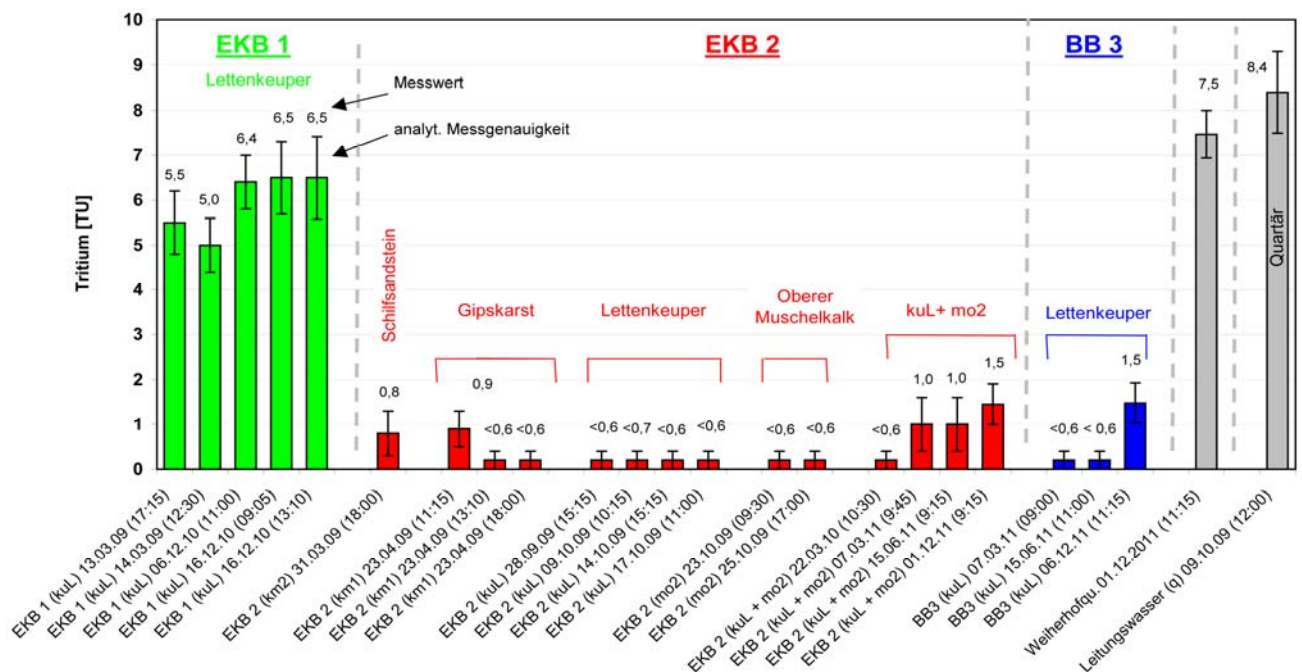


Abb. 5.2: Zusammenstellung der Ergebnisse aller bisher durchgeführten Tritium-Messungen (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen, kuL: Erfurt-Formation (kuE), mo2: Meißner-Formation (moM)).

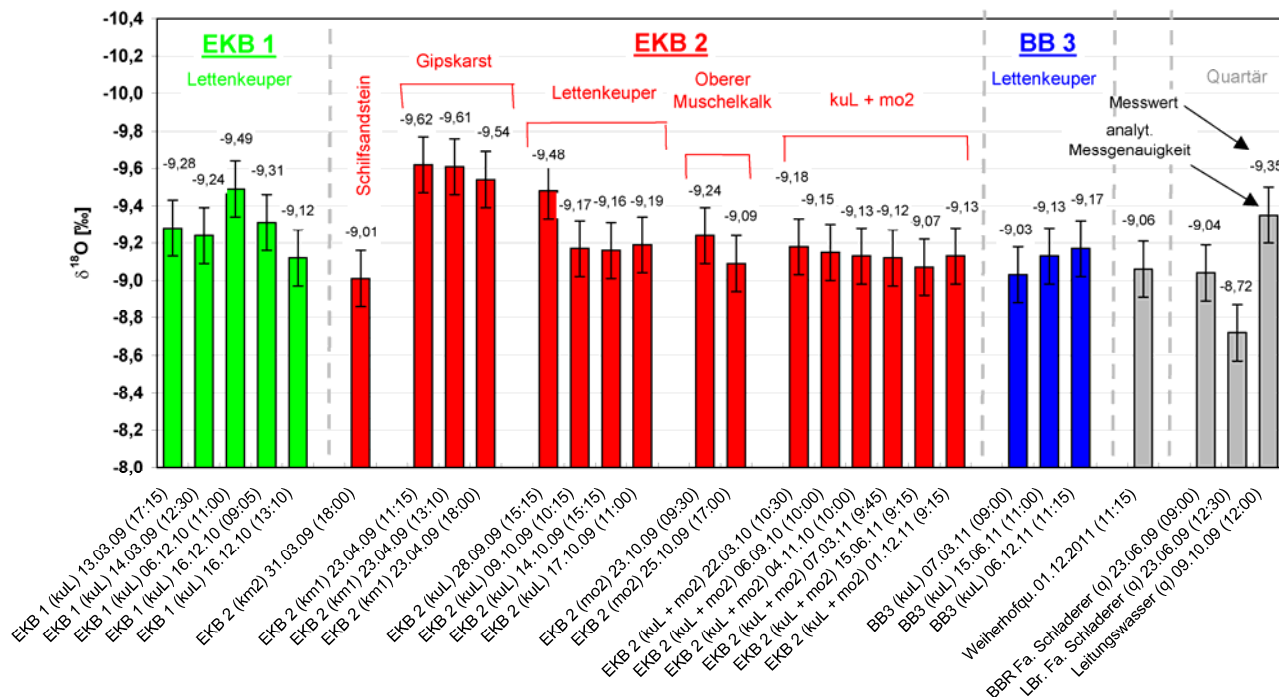


Abb. 5.3: Zusammenstellung der Ergebnisse aller bisher durchgeführten $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen, kuL: Erfurt-Formation (kuE), mo2: Meißner-Formation (moM)).

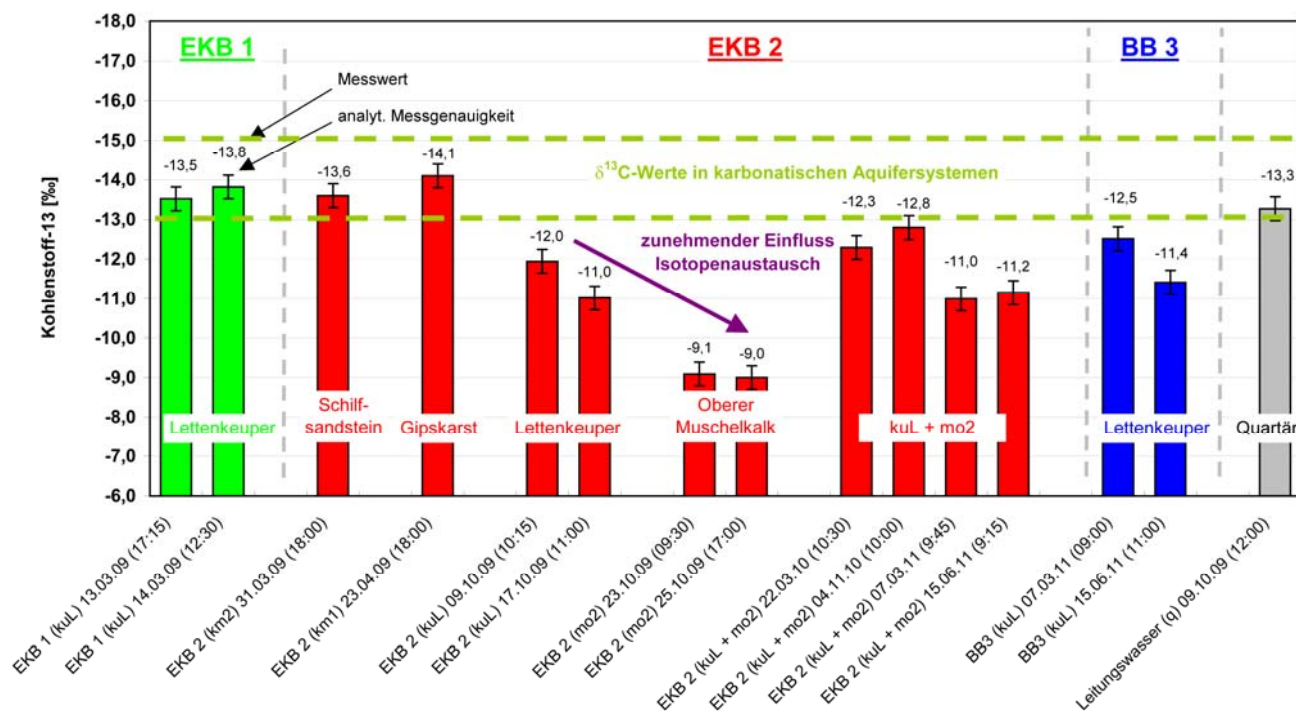


Abb. 5.4: Zusammenstellung der Ergebnisse aller bisher durchgeführten $\delta^{13}\text{C}$ -Messungen (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen, kuL: Erfurt-Formation (kuE), mo2: Meißner-Formation (moM)).

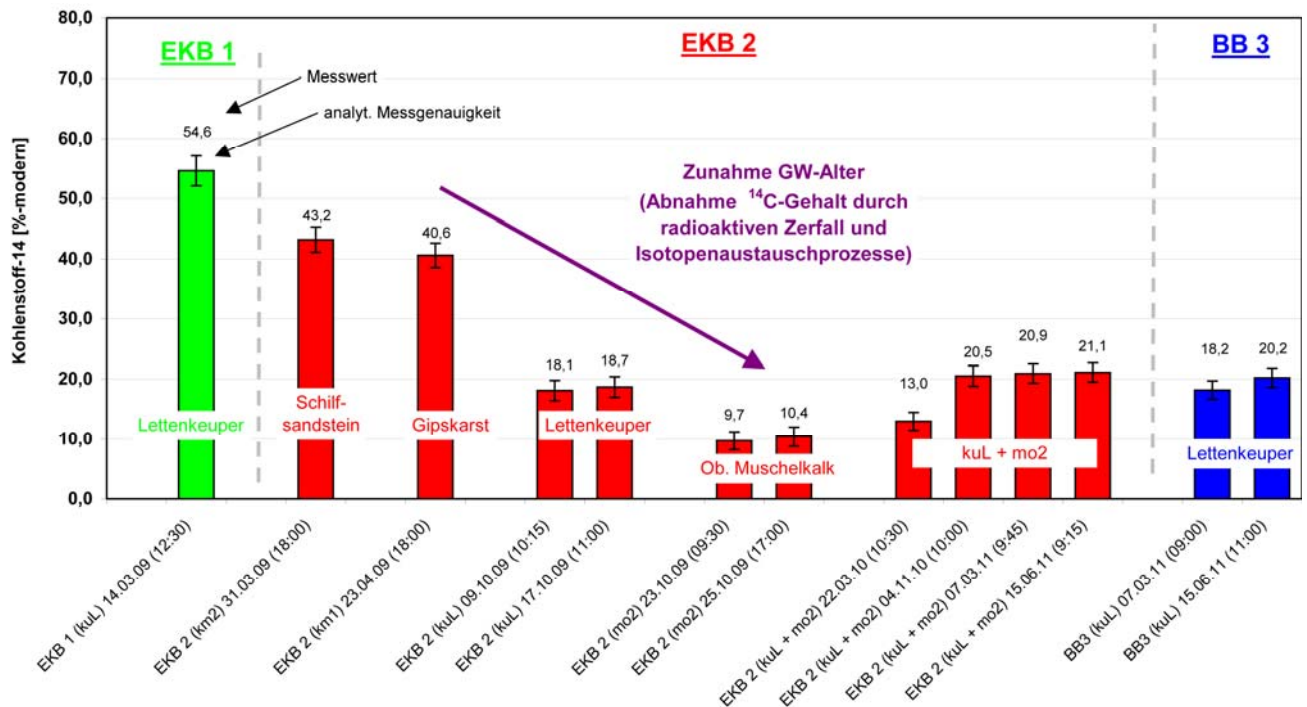


Abb. 5.5: Zusammenstellung der Ergebnisse aller bisher durchgeführten ^{14}C -Messungen (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen, kuL: Erfurt-Formation (kuE), mo2: Meißner-Formation (moM)).

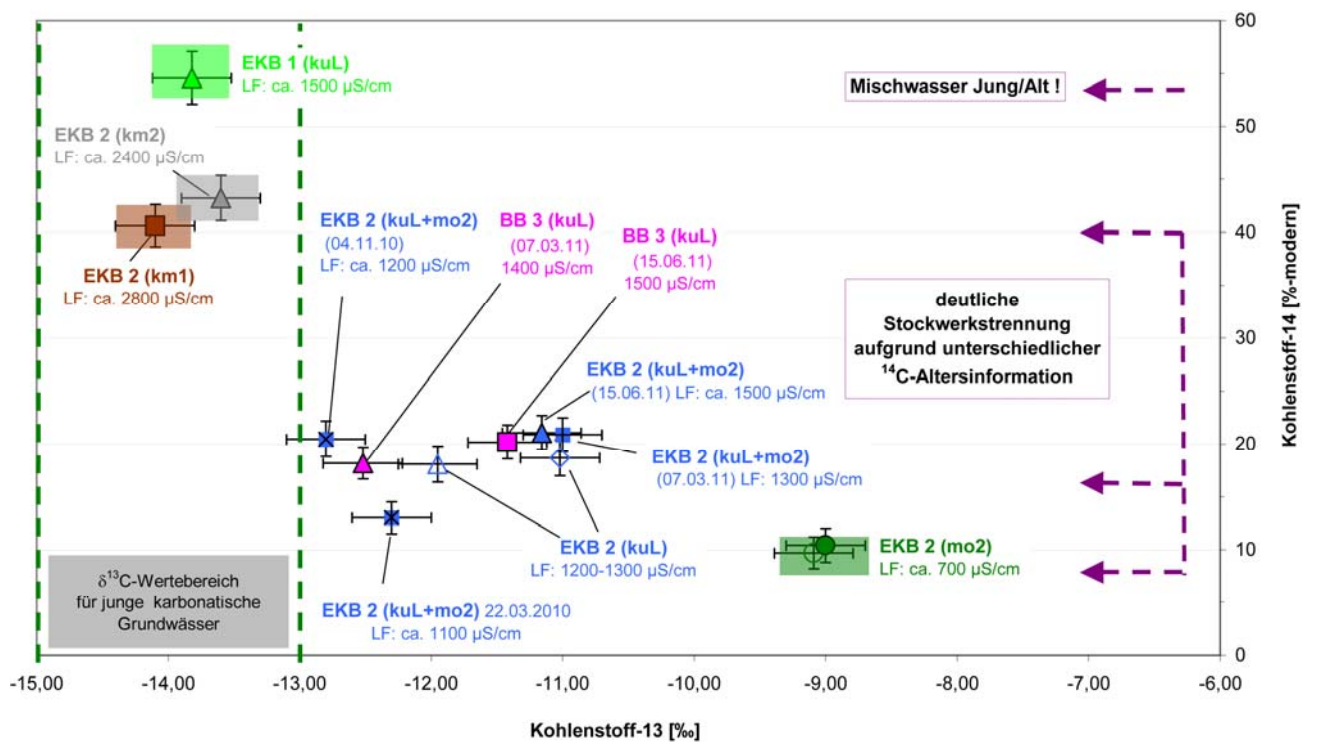


Abb. 5.6: Korrelation $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ -Gehalte (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen, kuL: Erfurt-Formation (kuE), mo2: Meißner-Formation (moM)).

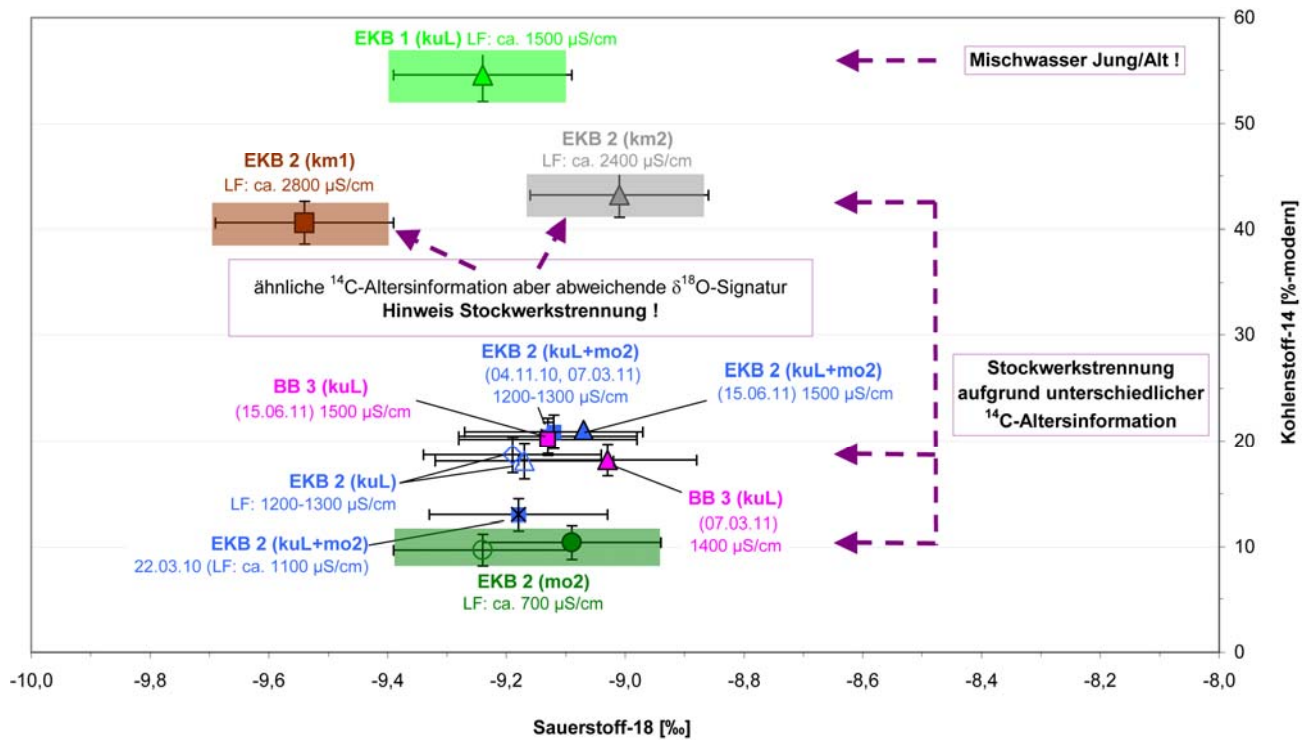


Abb. 5.7: Korrelation $^{18}\text{O}/^{14}\text{C}$ -Gehalte (Grafik: Hydroisotop, Emmendingen, kuL: Erfurt-Formation (kuE), mo2: Meißner-Formation (moM)).

Tab. 5.2: Zusammenstellung wichtiger hydrochemischer Inhaltsstoffe und der isotopischen Zusammensetzung der Grundwässer aus Unterkeuper (Erfurt-Formation, kuE) und Oberem Muschelkalk (Meißner-Formation, moM) sowie der Weiherhofquellen, des Laufbrunnens Innenhof Schladerer und des Brunnens neu Schladerer.

* von 04.03.2011 bis 04.04.2011 Einfluss durch inhibierte Bohrspülung
+ evtl. Einfluss durch inhibierte Bohrspülung

	Datum	El. Leitfähigkeit [µS/cm]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Cl [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	SiO ₂ [mg/l]	HCO ₃ [mg/l]	δ ¹⁸ O [‰]	³ H [TU]	¹³ C [‰]	¹⁴ C [‰-modern]
EKB 2 (kuE)	28.09.- 17.10.2009	1230- 1330	206- 218	41-43	5,7- 6,1 (9,58) ⁺	6,5- 9,7 (38,8) ⁺	3,2- 3,9	428- 434 (481) ⁺	10,7- 11,1	329- 357	-9,19 bis -9,16 (-9,48) ⁺	<0,7	-11,02 bis -11,95	18,1-18,7
EKB 2 (moM)	23.10.- 25.11.2009	714-717	92,3- 92,4	39,7- 39,9	3,6- 3,8	2,3- 2,7 (13,2) ⁺	2,8- 2,9	75,7- 76,3	9,3- 9,7	397	-9,3 bis -9,7	<0,6	-9 bis -9,09	9,7-10,4
EKB 2 (kuE, moM)	22.03.2010- 05.12.2011	1060- 1490	171- 294	40,1- 51,9	5,6- 11,5	4,8 (13,2) ⁺	3,8- 7,4	333- 740	9,4- 10,8	317- 354	-9,07 bis -9,16	1 ± 0,6	-11,0 bis -12,8	20,5 ± 1,7 20,9 ± 1,6
BB 3 (kuE)	11.04.- 05.11.2011 Isotope: 07.03. und 15.06.2011	1300- 1480	241- 248	43,3- 48,7	8,3- 10,7	4,24- 6,5 (15) ⁺	3,9- 5,7	500- 689	10,4- 10,9	317- 357	-9,03* -9,13	<0,6 <0,6	-12,52* -11,42*	18,2 ± 1,5* 20,2 ± 1,6
Weiherhof- quellen (rechter und mittlerer Zulauf)	24.01.2011	744-746	112	22,4- 23,7	16,8- 17,6	3,67- 3,95	23	66,1- 66,5	17,2- 17,6	348- 360	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Laufbrunnen Innenhof Schladerer	02.02. und 23.06.2009	458-486	60,1- 64,6	9,93- 10,07	19,5- 20,2	4,2- 4,5	19,9- 20,6	28,0- 31,7	11,5- 12,0	210- 220	-8,2	n.b.	n.b.	n.b.
Brunnen neu Schladerer	02.02. und 23.06.2009	249-315	35,1- 48,3	5,29- 5,71	8,12- 8,88	1,6- 1,77	9,09- 13,1	17,9- 20,2	11,2- 12,2	107- 150	-9,04	n.b.	n.b.	n.b.

5.1.1 BB 3 (Erfurt-Formation (kuE), früher Unterkeuper)

Das in der **Erfurt-Formation (kuE, Unterkeuper (ku))** der BB 3 erschlossene Grundwasser (18 Analysen seit dem 02.03.2011, davon vier durch Bohrspülung beeinflusst: 04.03., 05.03., 07.03. und untergeordnet 04.04.2011, siehe Abb. 5.16) ist ein **normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser** (PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH 1967, Abb. 5.10). Nach der für Mineralwässer üblichen hydrochemischen Typisierung ist es vom **Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ**. Es handelt sich um ein Wasser mit elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 1260 µS/cm und 1480 µS/cm. Der Gehalt an gelösten Stoffen resultiert im Wesentlichen aus der Lösung von Sulfatgesteinen.

Wie bei der früheren Auswertung (LGRB 2010) wurde auch das neu erschlossene Grundwasser der BB 3 hinsichtlich der Sättigungszustände an den Sulfatmineralen Gips und Anhydrit untersucht. Damit kann zum einen gezeigt werden, in welchen Grundwasservorkommen die Lösung von Anhydrit und die Ausfällung von Gips möglich sind und zum andern in welchen Grundwasservorkommen kein Gips ausfällt. Für die hydrochemischen Berechnungen wurde das Programm PHREEQC des United States Geological Survey (USGS) verwendet.

Isotopisch wurde das Grundwasser der BB 3 drei Mal untersucht (07.03.2011, 15.06.2011 und 06.12.2011 (nur Tritium, ¹⁸O und Spurengase)). Die δ¹⁸O-Gehalte lagen bei -9,03, -9,13 und -9,17 ‰, die Tritiumgehalte in den beiden ersten Proben unter 0,6 TU, in der Probe vom 06.12.2011 bei 1,5 TU. Die C-13-Werte lagen bei -11,42 und -12,52 ‰, die C-14-Werte bei 18,2 ± 1,5 und 20,2 ± 1,6 ‰-modern. Hinsichtlich der Kohlenstoffisotopengehalte entspricht das Grundwasser der BB 3 somit dem aus der EKB 2 entnommenen (Abb. 5.5, 5.6, 5.7).

In der BB 3 sind am 07.03. und 15.06.2011 nach den Tritium-Untersuchungen keine, nach den Spurengas-Untersuchungen nur sehr geringe Anteile an "Jungwasser" festzustellen (Spuren im Bereich der Nachweisgrenze). Möglicherweise handelt es sich dabei noch um Spuren von Bohrspülung. Das dafür verwendete Trinkwasser stammt aus dem Quartär. Alternativ könnten die sehr geringen SF₆-Konzentrationen auf Fluoridgehalte aus Grundgebirgsmaterial (anstehend im Schwarzwald oder als Kristallingerölle in den Neumagenschottern) zurückzuführen sein. Am 06.12.2011 wurden in der BB 3 1,5 TU Tritium gemessen. In der letzten Messung deuten die Tritiumgehalte sowie die ebenfalls gemessenen SF₆-Gehalte somit auf einen Anteil einer Jungwasserkomponente hin, der mit ca. 5 - 20 % bilanziert werden kann.

Die Kalium- und Aluminium-Konzentrationen sind am 07.03.2011 spülungsbedingt noch auffällig hoch, am 15.06. geben sie jedoch keine Hinweise mehr auf einen Einfluss durch Bohrspülung (vgl. Abb. 5.12 und Abb. 5.13).

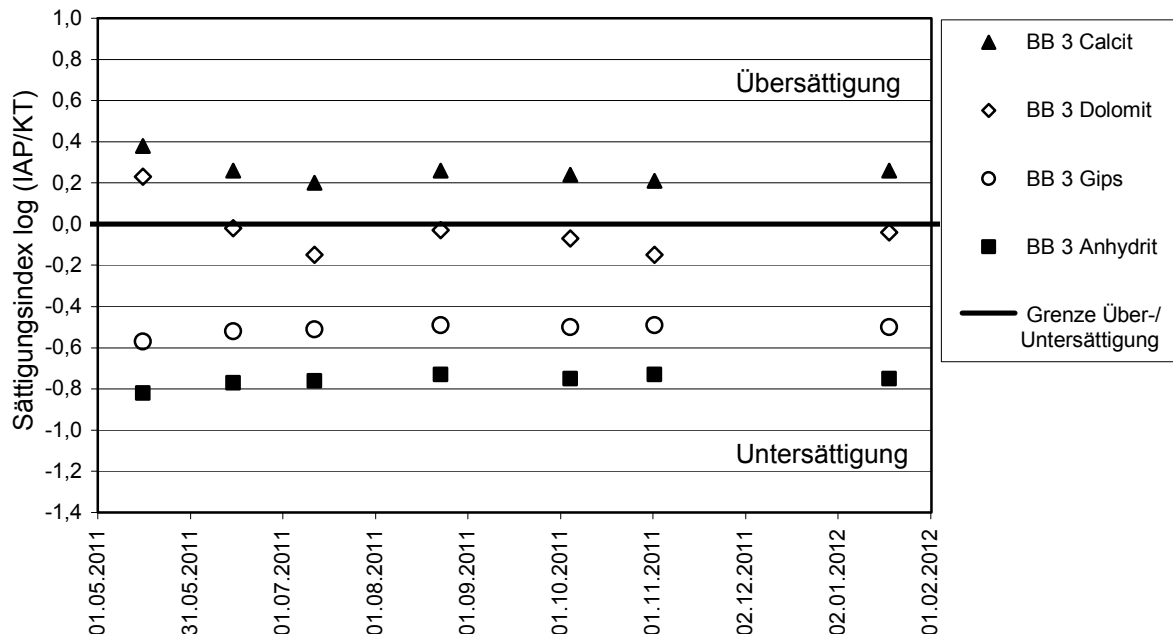


Abb. 5.8: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus der Erfurt-Formation (kuE, Unterkeuper) der Brunnenbohrung BB 3.

Das aus dem Unterkeuper erschlossene Grundwasser des Brunnens BB 3 ist an und Gips deutlich untersättigt (Abb. 5.8). Das Maß der Untersättigung ist im Beobachtungszeitraum im abgepumpten Grundwasser gleich geblieben. Das entnommene Grundwasser kann somit aufgrund seiner hydrochemischen Beschaffenheit Anhydrit und Gips lösen.

Hinsichtlich des Minerals Dolomit ist eine Sättigung bis leichte Untersättigung festzustellen, während das abgepumpte Grundwasser an Calcit permanent übersättigt ist. Die Übersättigung an Calcit ist bemerkenswert, da sich im Grundwasserleiter bei längerem Kontakt zwischen dem Gestein (der Unterkeuper besteht z. T. aus Karbonatgestein) und dem Grundwasser ein Mineral-Gleichgewicht einstellt.

Sofern analytische Ursachen auszuschließen sind, weist die Calcit-Übersättigung auf eine fehlende Gleichgewichtseinstellung hin. Dieser Sachverhalt kann durch die Lösung von Gips und/oder Anhydrit im Untergrund herbeigeführt werden, da hierdurch u. a. die Aktivität der Calciumionen im Grundwasser steigt. Folge dieses Vorgangs ist

die Ausfällung des Minerals Calcit bis zum Erreichen des Gleichgewichts im Grundwasser, sofern ausreichend Zeit für den Kristallisationsvorgang zur Verfügung steht. Daher ist nicht auszuschließen, dass das abgepumpte Grundwasser sulfat-gesteinsführende Gebirgsabschnitte durchströmt, hier Lösungsvorgänge stattfinden und während der Untergrundpassage nicht genügend Zeit für die Ausfällung von Calcit verbleibt (vgl. hierzu die zusammenfassende Bewertung in Kap. 5.6).

5.1.2 EKB 2 (Erfurt-Formation (kuE) und Meißner-Formation (moM), früher Unterkeuper und Oberer Muschelkalk)

Das aus der EKB 2 im Dauerbetrieb übergreifend aus der Erfurt-Formation (kuE, Unterkeuper) und Meißner-Formation (moM, Oberer Muschelkalk) entnommene Grundwasser war **ursprünglich normal erdalkalisch, hydrogenkarbonatisch - sulfatisch** (Probe vom 19.04.2010, roter Punkt in Abb. 5.10) und glich sich im Laufe der Dauerentnahme dem Chemismus des Unterkeuper-Wassers der EKB 2 an (Probe vom 24.01.2011, orangefarbener Punkt: **normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser**). Dies wird auf einen verstärkten Beizug von Grundwasser aus dem Unterkeuper zurückgeführt (vgl. Kap. 5.4).

Eine im März 2010 nach dem Ausbau der EKB 2 entnommene Probe (kuE+moM) war Tritium-frei. Die Tritiumgehalte in den beiden Proben der EKB 2 vom 07.03. und 15.06.2011 weisen auf geringe Jungwasseranteile hin ($1,0 \pm 0,6$ TU). Der Anteil lag in der Probe vom 01.12.2011 bei bis zu 20 % ($1,45 \pm 0,46$ TU). Die geringen Jungwasseranteile in den beiden Proben vom 07.03. und 15.06.2011 wurden auf einen möglichen Beizug von Bohrspülung aus der BB 3 zurückgeführt. Als Bohrspülung wurde Leitungswasser aus dem Versorgungsnetz der Stadt Staufen (quartäres Grundwasser) verwendet. Der Jungwassereinfluss wird anhand der Ergebnisse der Spurengasanalytik bestätigt. Markante Einflüsse von Muschelkalk-Wasser (hier wären geringere C14-Werte zu erwarten, Abb. 5.5) oder Gipskarst-/Schilfsandstein-Wasser (hier wären höhere C14-Werte zu erwarten, Abb. 5.5) deuten sich in den Proben vom 07.03. und 15.06.2011 nicht an.

Nach den Kalium- und Aluminiumgehalten ist die EKB 2 am 07.03.2011 eindeutig durch Bohrspülung beeinflusst. Am 15.06.2011 zeigen sich keine Hinweise mehr darauf (vgl. Abb. 5.12, 5.13 und 5.15).

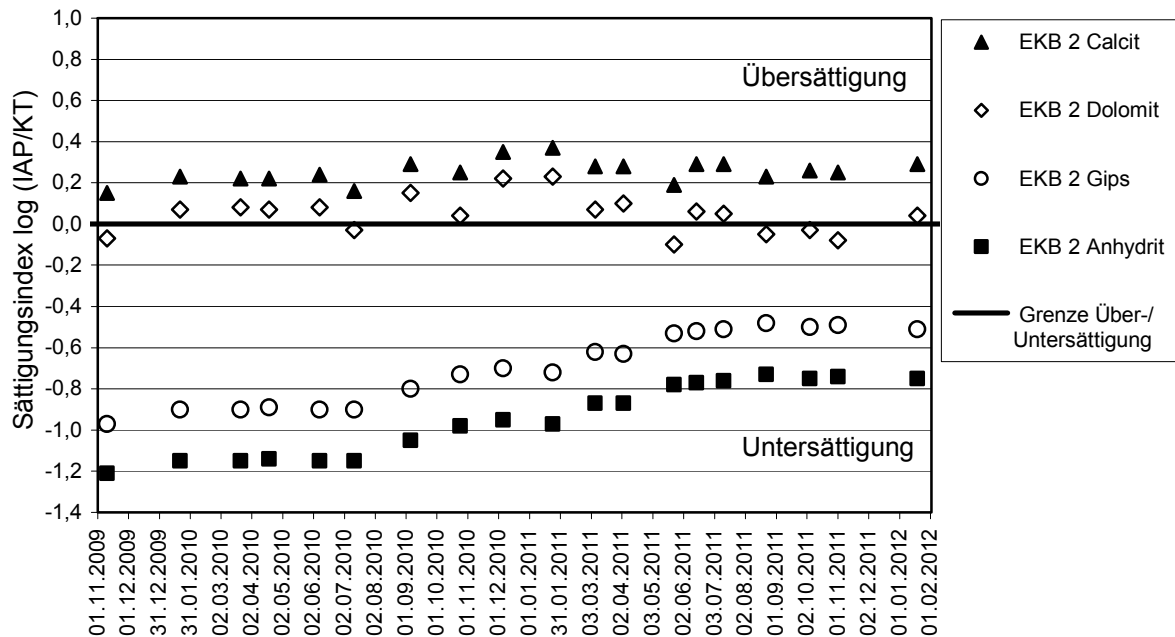


Abb. 5.9: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus der Erfurt-Formation (kuE, Unterkeuper) und Meißner-Formation (moM, Oberer Muschelkalk) der Bohrung EKB 2.

Das stockwerksübergreifend im Unterkeuper und im Oberen Muschelkalk erschlossene Grundwasser des Brunnens EKB 2 ist an Anhydrit und Gips deutlich untersättigt (Abb. 5.9). Die Sättigungscharakteristik entspricht derjenigen des Unterkeuper-Wassers aus der BB 3. Das abgepumpte Grundwasser kann somit aufgrund seiner hydrochemischen Beschaffenheit Anhydrit und Gips lösen. Im Untersuchungszeitraum 2011 zeichnen sich keine nennenswerten Veränderungen ab.

Hinsichtlich des Minerals Dolomit ist eine Sättigung bis leichte Untersättigung festzustellen, während das Grundwasser an Calcit permanent übersättigt ist. Die Übersättigung an Calcit ist wie im Brunnen BB 3 bemerkenswert, da sich im Grundwasserleiter bei längerem Kontakt zwischen dem Gestein (der Unterkeuper besteht z. T. aus Karbonatgestein, der Obere Muschelkalk fast vollständig) und dem Grundwasser ein Mineral-Gleichgewicht einstellt. Die weitere Interpretation entspricht derjenigen des Brunnens BB 3. Auch bei der EKB 2 ist nicht auszuschließen, dass das abgepumpte Grundwasser sulfatgesteinsführende Gebirgsabschnitte durchströmt, Lösungsvorgänge stattfinden und während der Untergrundpassage nicht genügend Zeit für die Ausfällung von Calcit verbleibt (vgl. hierzu die zusammenfassende Bewertung in Kap. 5.6).

5.1.3 Weiherhofquellen

Die Fassung der Weiherhofquellen (LGRB Archiv-Nr. Qu 8112/61) besteht aus drei Sammelerschächten, deren Ableitungen in einer Quellstube mit einem betonierten Sammelbehälter zusammengeführt werden. Sie liegen am Hangfuß des Roten Berges, ca. 185 m südöstlich des Erdwärmesondenfeldes. Etwa 125 m östlich vom Sammelbehälter verläuft die Hauptverwerfung. Nach der vorläufigen Geologischen Karte 1 : 25 000 (GK 25, GLA 1992) liegen die drei Sammelerschächte im Verzahnungsbereich von Neumagenschottern zu Umlagerungssedimenten (Hangschutt, Fließerde). Unterlagert werden die quartären Sedimente nach der GK 25 wahrscheinlich von Keupergesteinen. Aufgrund mehrerer parallel zur Hauptverwerfung verlaufender Störungen sind die geologischen Verhältnisse jedoch unklar. Vermutlich wird durch die Quellen am Talrand Grundwasser aus dem geklüfteten Festgestein gefasst, dem eine Grundwasserkomponente aus dem Quartär (Umlagerungssedimente und/oder Neumagenschotter) randlich zusitzt.

Diese Annahme wird durch den hydrochemischen Befund gestützt. Mit elektrischen Leitfähigkeiten zwischen ca. 720 und 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ist der Lösungsinhalt gegenüber den quartären Grundwässern (Laufbrunnen Innenhof Schladerer: ca. 460-490 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Brunnen neu Schladerer: ca. 250-320 $\mu\text{S}/\text{cm}$) deutlich erhöht. Ebenfalls deutlich erhöht sind in den Weiherhofquellen die Kalzium-, Sulfat-, Natrium-, Chlorid- und Hydrogenkarbonatgehalte (vgl. Tab. 5.2 sowie Anl. 5.2 und 5.3). Die erhöhten Konzentrationen werden auf die Grundwasserkomponente aus dem Festgestein zurückgeführt.

Vergleichsweise hohe Nitratwerte von ca. 35 mg/l, die mit dem Weinanbau am Roten Berg in Zusammenhang stehen dürften, belegen eine junge Grundwasserkomponente. Sie tritt wahrscheinlich oberflächennah als Zwischenabfluss in den Umlagerungssedimenten zu.

Im PIPER-Diagramm liegen die Wässer der Weiherhofquellen zwischen dem aus den quartären Neumagenschottern stammenden Grundwasser des Brunnen Schladerer neu und dem Wasser der EKB 2 und des BB 3 (Abb. 5.10). Nach FURTAK & LANGUTH (1967) werden die Grundwässer der Weiherhofquellen als **normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer** klassifiziert.

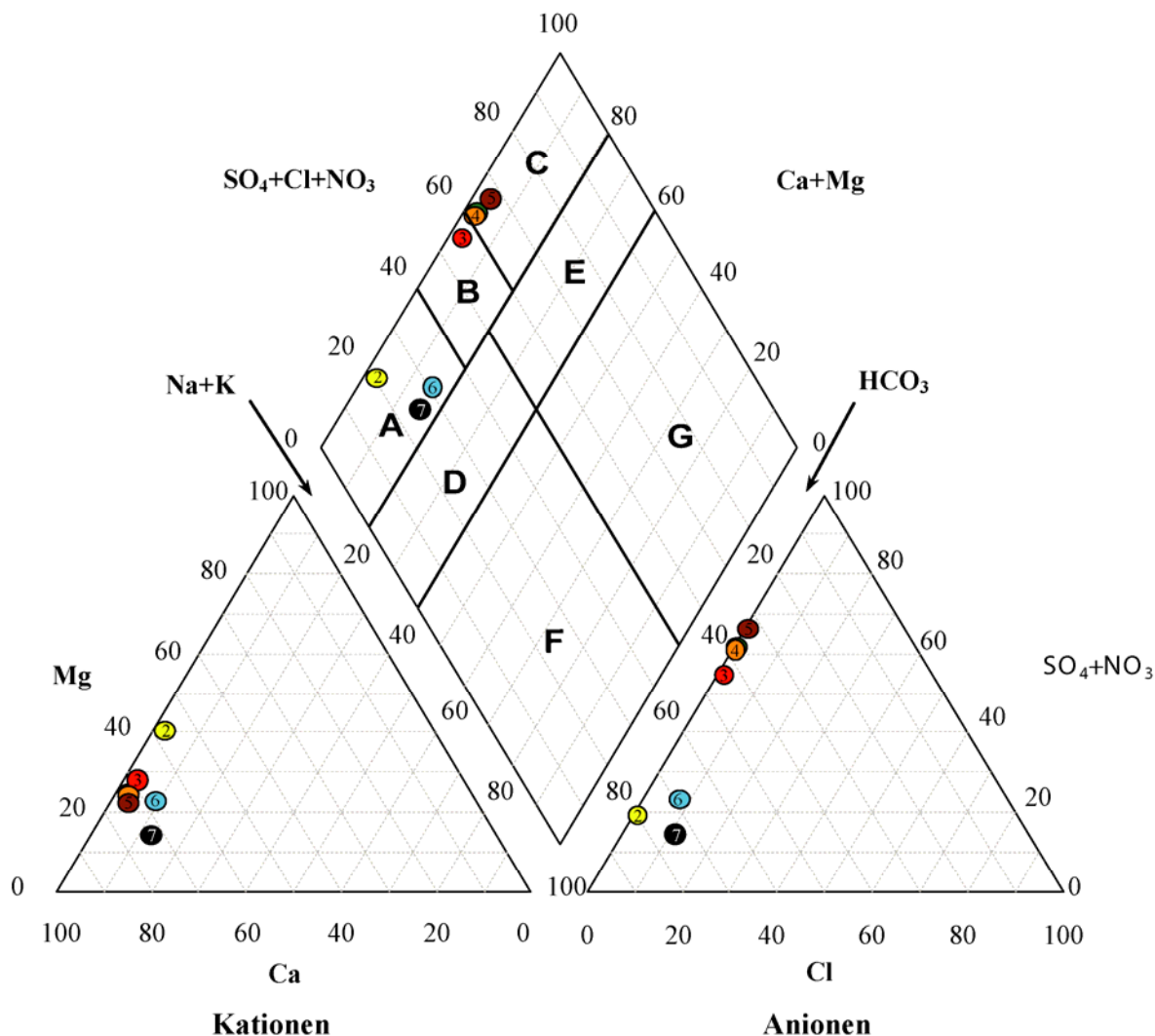
5.1.4 Vergleich der Grundwässer aus EKB 2 und BB 3 (Erfurt- und Meißner-Formation)

Im Piper-Diagramm (Abb. 5.10) sind charakteristische Analysen für Grundwässer dargestellt, die aus der Erfurt-Formation (kuE) und/oder der Meißner-Formation (moM) der Bohrungen EKB 2 und BB 3 sowie aus den Weiherhofquellen und dem Brunnen Schladerer neu entnommen wurden. Sie werden nach FURTAKE & LANGUTH (1967) klassifiziert. Die Grundwässer aus der **EKB 2 (Erfurt-Formation (Unterkeuper) und untergeordnet Meißner-Formation (Oberer Muschelkalk)) und der BB 3 (Erfurt-Formation (Unterkeuper))** (brauner und grüner (teilweise verdeckter) Punkt) gleichen sich in ihrem Chemismus und **sind normal erdalkalisch, überwiegend sulfatisch**, das Grundwasser aus der **Meißner-Formation (Oberer Muschelkalk, gelber Punkt)** ist **normal erdalkalisch, überwiegend hydrogenkarbonatisch**. Die Wässer aus den Pumpbrunnen unterscheiden sich nur gering voneinander (vgl. auch Abb. 5.11).

In Abb. 5.11 sind die Hauptinhaltsstoffe der Wässer aus der EKB 2 und der BB 3, ergänzt durch die der Weiherhofquelle, in einem Schöller-Diagramm dargestellt. Die Zusammensetzung des aus der EKB 2 geförderten Grundwassers hat sich seit Beginn der Pumpmaßnahme (grüne Linien in Abb. 5.11) geringfügig geändert. Dies bildet die fortschreitende Entnahmeverlagerung in dem übergreifend ausgebauten Brunnen EKB 2 (Unterkeuper und Oberer Muschelkalk) auf den Unterkeuper ab (blaue bis dunkelblaue Linien in Abb. 5.11; siehe auch Kap. 5.4).

Isotopisch liegt das Grundwasser der BB 3 seit dem 07.03.2011 im Bereich der Mischproben kuL/mo2 (nach neuer Nomenklatur kuE/moM) aus der EKB 2 (vgl. Abb. 5.4 u. 5.5). Anhand der vorliegenden Ergebnisse sowie der Korrelationen $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ zeigt sich, dass die Wässer aus der EKB 2 und der BB 3 eine vergleichbare Alterstruktur und Komponentenzusammensetzung aufweisen (Abb. 5.6, 5.7).

Einflüsse von Wasser aus dem Schilfsandstein (km2) oder dem Gipskarst (km1) (C13: -13,5 bis -14,5 ‰; C14: 40 bis 43 ‰-modern) zeichnen sich in den Proben der EKB 2 (kuL und mo2) und BB 3 aufgrund der vergleichsweise isotopisch schweren Kohlenstoff-13-Gehalte (-11 bis -12,8 ‰) sowie der vergleichsweise geringen Kohlenstoff-14-Gehalte (19 bis 21,1 ‰-modern) nicht ab (Abb. 5.6).



- EKB 2 kuE, 17.10.2009
- EKB 2, moM, 25.10.2009
- EKB 2, kuE, moM, 19.04.2010
- EKB 2, kuE, moM, 24.01.2011
- BB 3, kuE, 15.04.2011
- Weiherhofquellen, 24.01.2011
- Br. Schladerer neu, Quartär, 23.06.2009

Abb. 5.10: PIPER-Diagramm: Vergleich der Grundwässer der beiden Entnahmestellen EKB 2 und BB 3, der Weiherhofquellen und des Brunnens Schladerer neu (Nomenklatur nach FURTA & LANGUTH (1967): A: normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer, B: normal erdalkalische, hydrogenkarbonatisch-sulfatische Wässer, C: normal erdalkalische, überwiegend sulfatische Wässer, D: erdalkalisch-alkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer, E: erdalkalisch-alkalische, überwiegend sulfatisch-chloridische Wässer, F: alkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer, G: alkalische, überwiegend sulfatisch-chloridische Wässer).

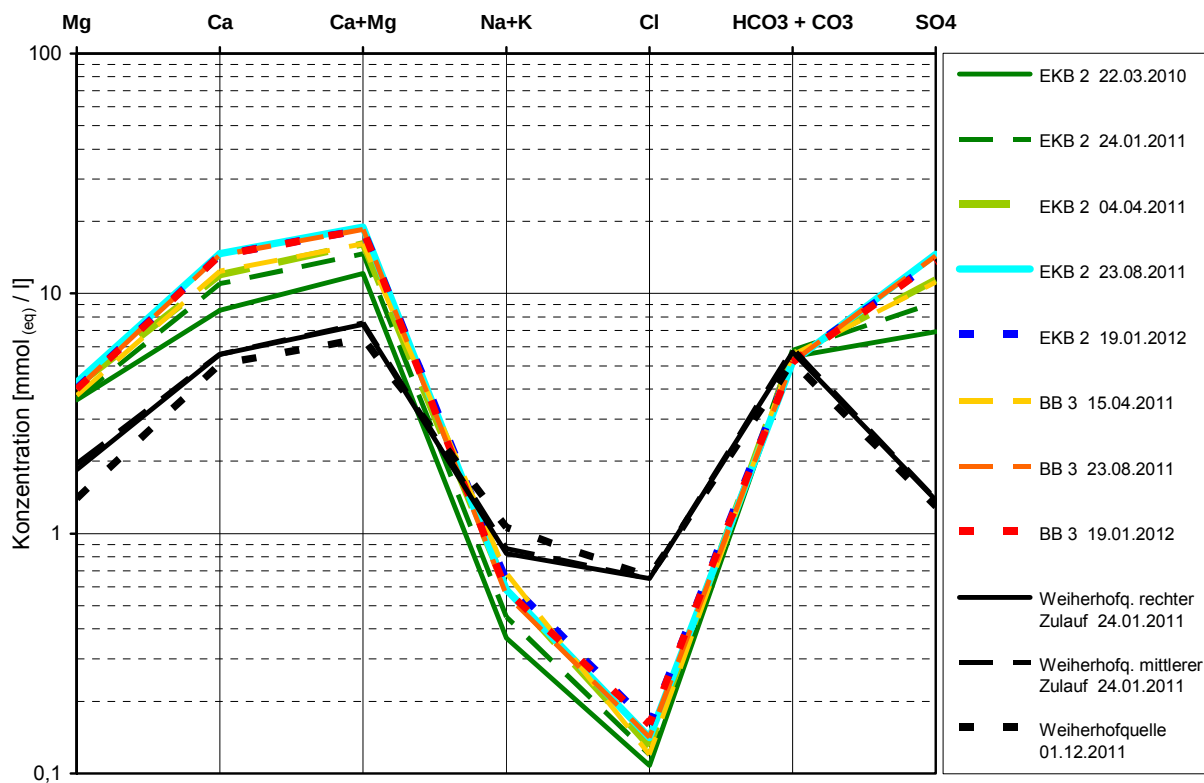


Abb. 5.11: Hauptinhaltsstoffe der Grundwässer aus der EKB 2 und der Brunnenbohrung BB 3 (Analysen seit März 2010; aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden nur ausgewählte Untersuchungsergebnisse dargestellt). Zu Vergleichszwecken wurden ebenfalls die Analysen der Weiherhofquellen dargestellt.

5.2 Zeitliche Entwicklung der hydrochemischen Zusammensetzung der Grundwässer in EKB 2 und BB 3

Während und nach den Bohrarbeiten der BB 3 führten die vergleichsweise großen Verluste an inhibierter Bohrspülung zu Verfälschungen der ursprünglichen Grundwasserchemie sowohl in der BB 3 als auch in der EKB 2.

Deutliche Hinweise auf Spülungsanteile im geförderten Grundwasser ergeben sich aus erhöhten Gehalten an Kalium und Natrium (Abb. 5.12), Cäsium und Aluminium (Abb. 5.13), weniger deutlich aus leicht erhöhten Gehalten an Calcium und Sulfat (Abb. 5.14). Daneben sind die Konzentrationen von Eisen spülungsbedingt erhöht (nicht dargestellt).

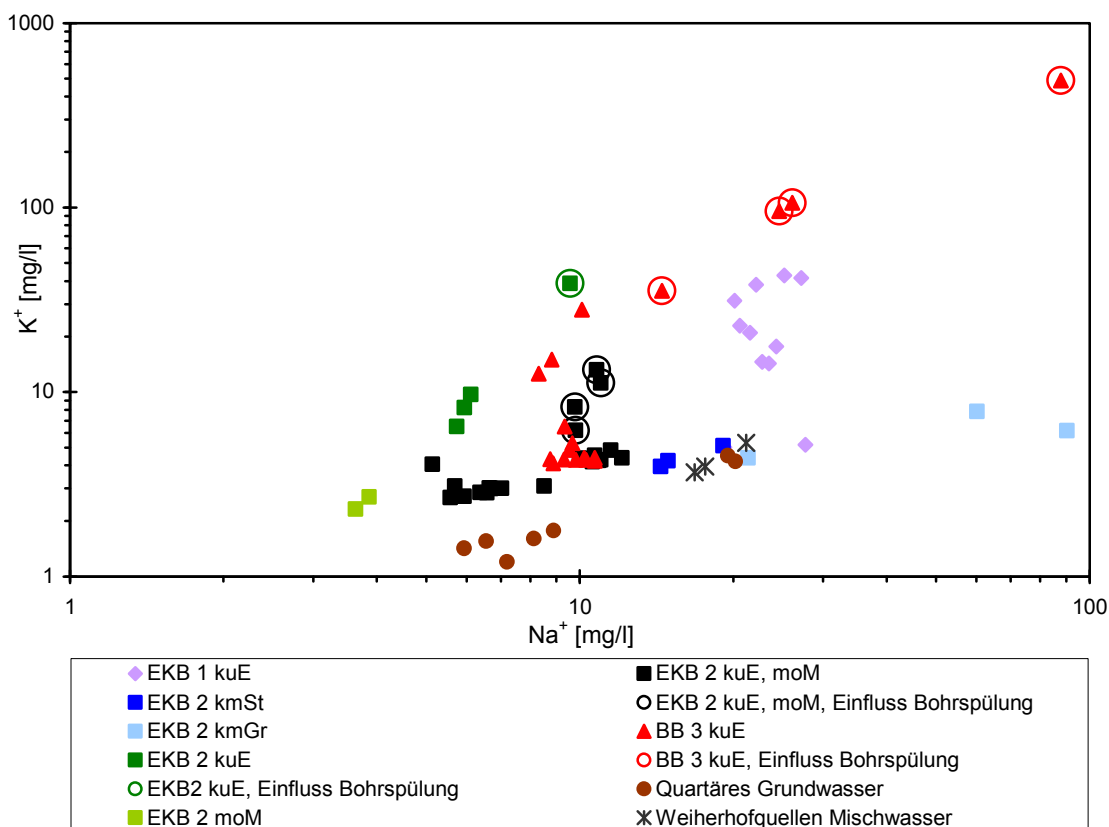


Abb. 5.12: Korrelationsdiagramm Natrium / Kalium (doppellogarithmische Darstellung).

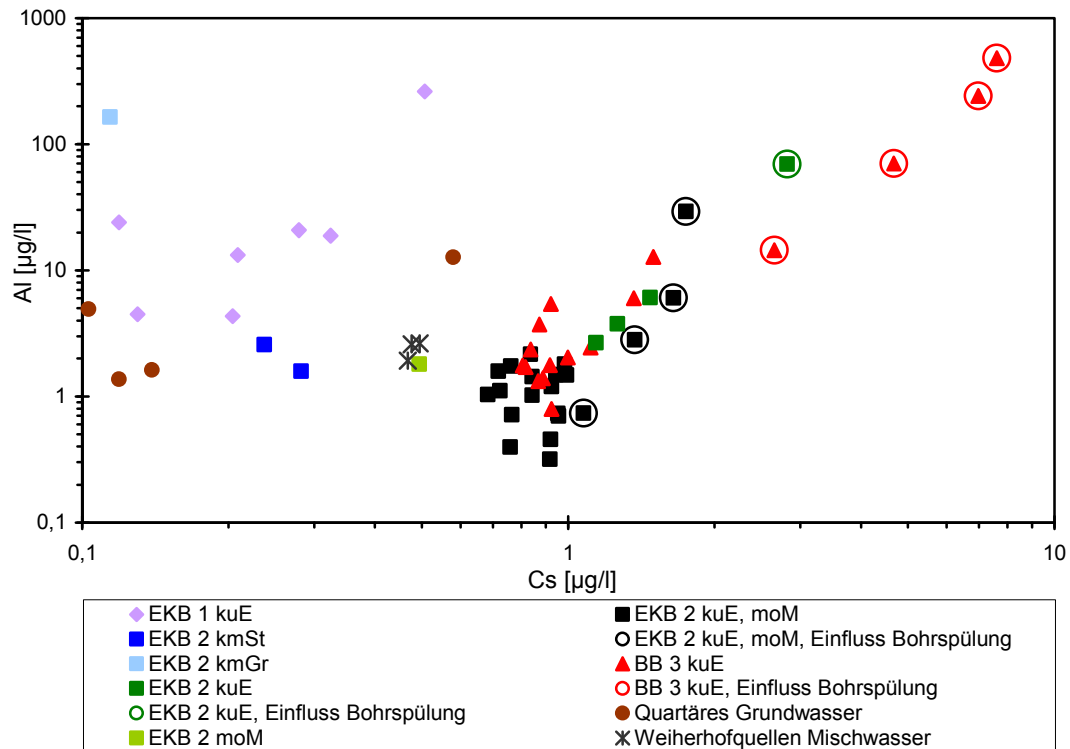


Abb. 5.13: Korrelationsdiagramm Cäsium / Aluminium (doppellogarithmische Darstellung).

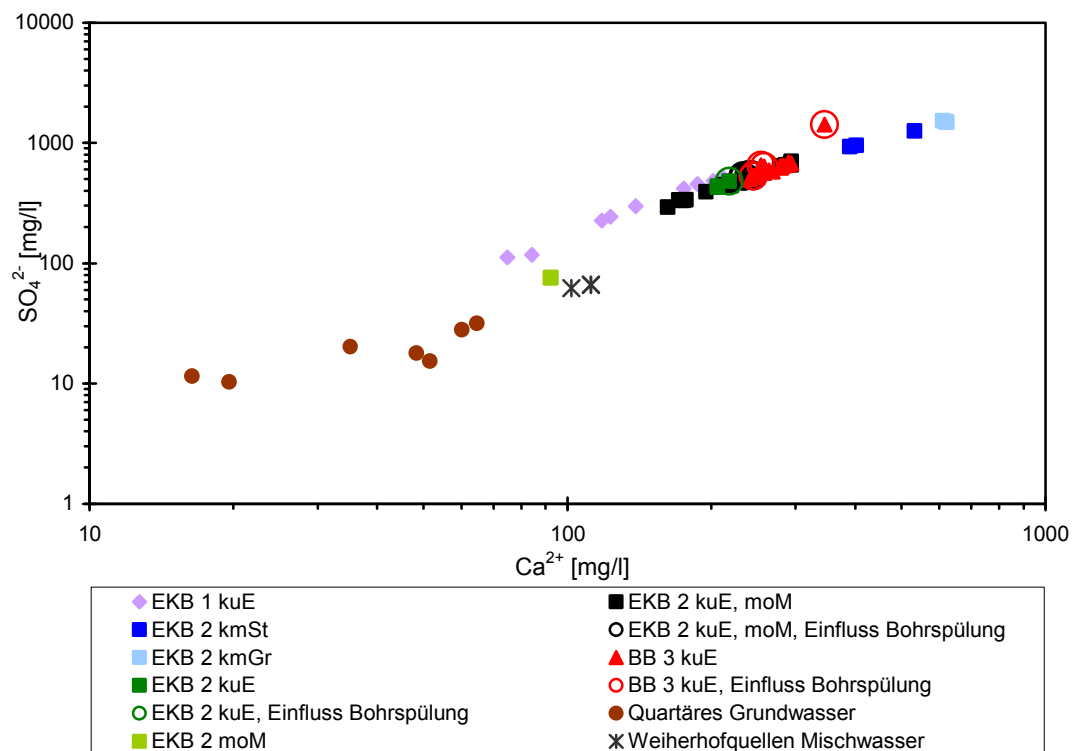


Abb. 5.14: Korrelationsdiagramm Calcium / Sulfat (doppellogarithmische Darstellung).

Die Abb. 5.15 (EKB 2) und Abb. 5.16 (BB 3) zeigen in halblogarithmischer Darstellung die zeitliche Entwicklung der hydrochemischen Zusammensetzung der Grundwässer seit Beginn der Probenahmen.

In der EKB 2 lassen sich vier Phasen unterscheiden (Abb. 5.15, vgl. hierzu auch Abb. 4.2 und 4.13: kontinuierliche Messung der elektrischen Leitfähigkeit):

- **I)** Bis Juli 2010 sind die elektrische Leitfähigkeit sowie die übrigen Parameter im Rahmen der üblichen Schwankungen konstant (beispielhaft: el. LF: 1030 - 1070 $\mu\text{S/cm}$, Ca: ca. 170 mg/l, K: ca. 3 mg/l, Na: ca. 5 - 7 mg/l, SO_4^{2-} : 330 - 335 mg/l, B: ca. 60 $\mu\text{g/l}$, Cs: ca. 0,70 - 0,75 $\mu\text{g/l}$).
- **II)** Mit der Entnahmeratensteigerung aus der EKB 2 (vgl. Abb. 4.2) von ca. 1,35 l/s auf ca. 2,35 l/s nehmen ab Juli 2010 bis etwa Dezember 2010 die Konzentrationen einiger Inhaltsstoffe zu und pendeln sich danach bis März 2011 auf einem höheren Niveau ein (in Abb. 5.15 blau hinterlegt, el. LF: 1130 - 1230 $\mu\text{S/cm}$, Ca: 195 - 220 mg/l, K: unverändert, Na: weitgehend unverändert, SO_4^{2-} : 392 - 470 mg/l, B: ca. 60 - 80 $\mu\text{g/l}$, Cs: ca. 0,75 - 0,85 $\mu\text{g/l}$).
- **III)** Ende Februar und im März 2011 nehmen die Konzentrationen einiger Inhaltsstoffe stark zu (in Abb. 5.15 gelb hinterlegt, el. LF: ca. 1320 $\mu\text{S/cm}$, K: 8,31 - 13,20 mg/l, Ca: 240 mg/l, Al: bis 29,26 $\mu\text{g/l}$, Cs: bis 1,75 $\mu\text{g/l}$). In dieser Phase ist das aus der EKB 2 entnommene Grundwasser deutlich durch die inhibierte Bohrspülung, die beim Abteufen der BB 3 eingesetzt werden musste, beeinflusst (vgl. unten).
- **IV)** Im April 2011 stieg die Konzentration einiger Inhaltsstoffe bis Juni 2011 weiter an, um danach weitgehend konstant zu bleiben. Diese Tendenz weisen z. B. die el. Leitfähigkeit (bis 1490 $\mu\text{S/cm}$), Sulfat (bis 700 mg/l), Calcium (bis 294 mg/l), Natrium (bis 11,5 mg/l) und Chlorid (bis 5,7 mg/l) auf. Hinweise auf einen Beizug jüngeren Grundwassers aus dem Schilfsandstein bzw. Gipskarst, das beim Abteufen der EKB 2 angetroffen wurde, sind nicht gegeben. In diesem Fall müssten die Sulfatgehalte in der EKB 2 im Laufe der Zeit abgenommen haben (vgl. Tab. 5.2). Auch isotopisch gibt es für diese Annahme keinen Beleg (s. o.). Möglicherweise wird durch den gemeinsamen Pumpbetrieb aus EKB 2 und BB 3 mit einer deutlich höheren Gesamtenahme von 6 l/s aus dem vergrößerten Absenkbereich eine Komponente beigezogen, die beim alleinigen Betrieb der EKB 2 hydraulisch nicht erreicht wurde.

In der BB 3 lassen sich zwei Phasen unterscheiden (Abb. 5.16, vgl. hierzu auch Abb. 4.13: kontinuierliche Messung der elektrischen Leitfähigkeit):

- I) Seit Pumpbeginn am 01.03.2011 bis zur Probenahme am 04.04.2011 ist das Grundwasser hydrochemisch anfangs stark, später zunehmend schwächer durch die inhibierte Bohrspülung beeinflusst (beispielhaft: K, Cs, B). Nach den Aluminiumwerten wäre auch die Probe vom 11.04.2011 noch leicht spülungsbeeinflusst (vgl. unten).
- II) Seit dem 11.04.2011 (evtl. 04.04.2011) ist nur noch ein geringer bis kein Spülungseinfluss mehr zu erkennen und die Proben spiegeln die natürliche Grundwasserbeschaffenheit wider.

Eine weitere markante Veränderung in der Grundwasserbeschaffenheit der BB 3 zeichnet sich im Zusammenhang mit der wartungsbedingten Pumppause in der BB 3 zwischen dem 16.11. und dem 01.12.2011 ab (grüner Balken in Abb. 5.16, vgl. hierzu Abb. 4.13).

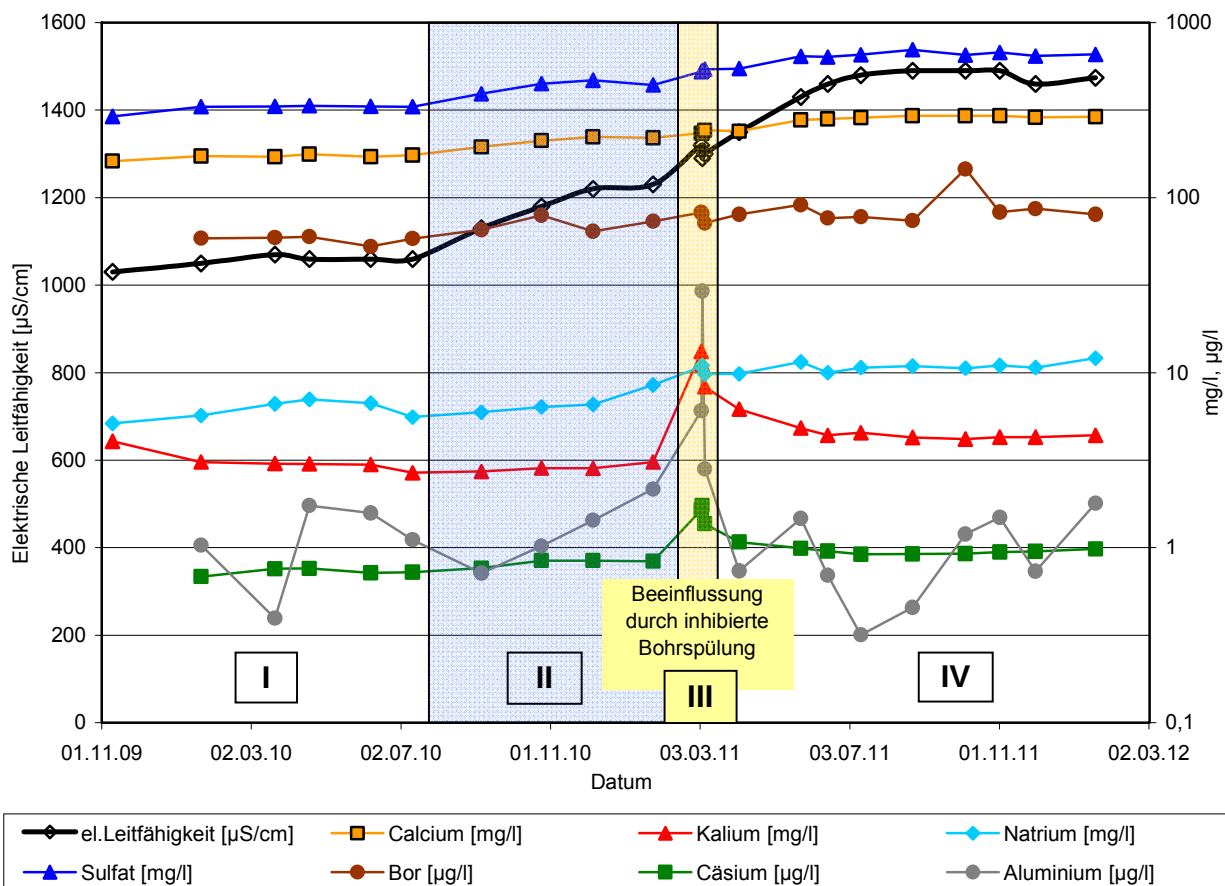


Abb. 5.15: Zeitliche Entwicklung der hydrochemischen Zusammensetzung des Grundwassers der EKB 2 (Erfurt-Formation, kuE, Unterkeuper und Meißner-Formation, moM, Oberer Muschelkalk).

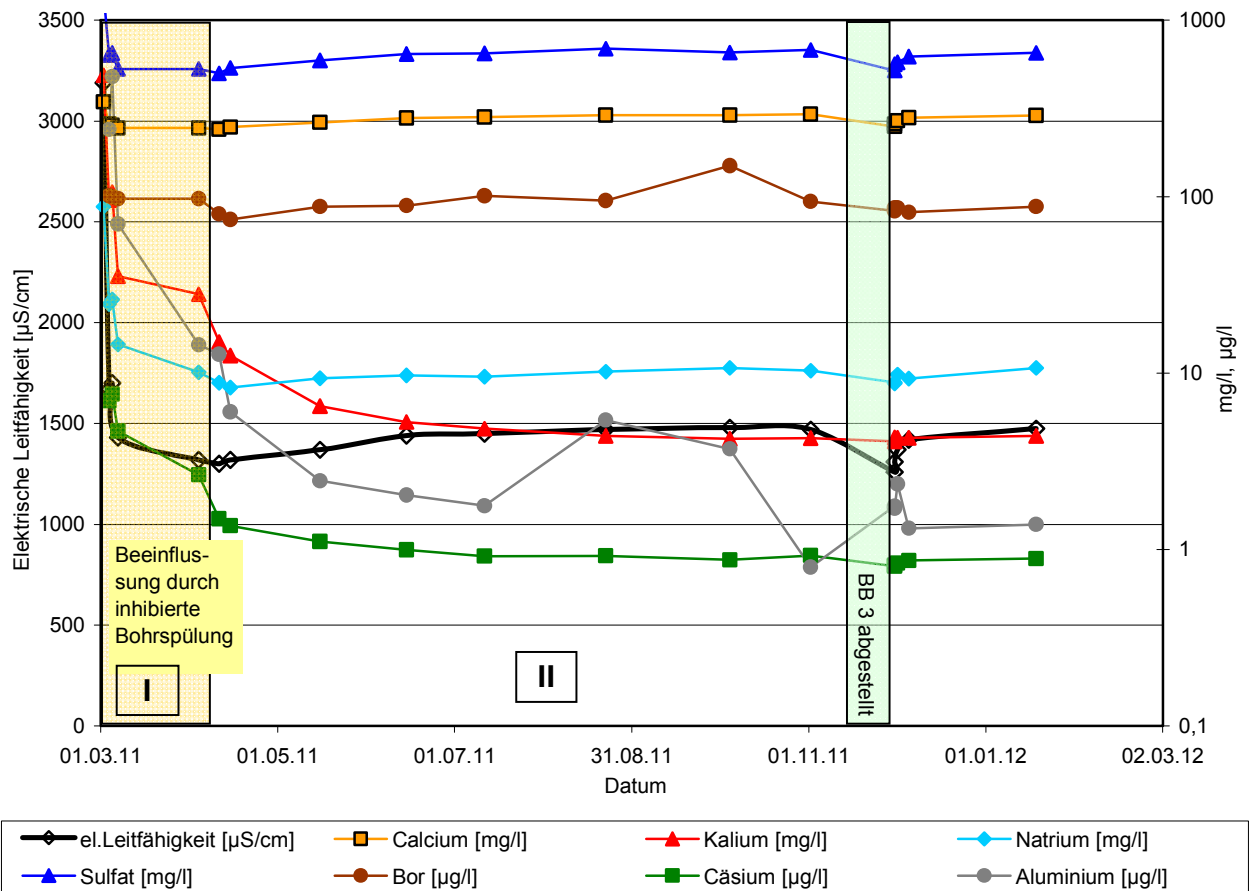


Abb. 5.16: Zeitliche Entwicklung der hydrochemischen Zusammensetzung des Grundwassers der BB 3 (Erfurt-Formation, kuE, Unterkeuper).

5.3 Korrelation von elektrischer Leitfähigkeit und Sulfatgehalt der Grundwässer

Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,99$ (EKB 2) bzw. $0,93$ (BB 3) korreliert der Sulfatgehalt sehr hoch mit der elektrischen Leitfähigkeit (Abb. 5.17, Abb. 5.18). Dies bedeutet, dass die elektrische Leitfähigkeit zu einem sehr hohen Anteil durch den Sulfatgehalt bestimmt wird, so dass sie als ein schnell zu bestimmender, zuverlässiger Parameter zum Monitoring des Sulfataustrages geeignet ist.

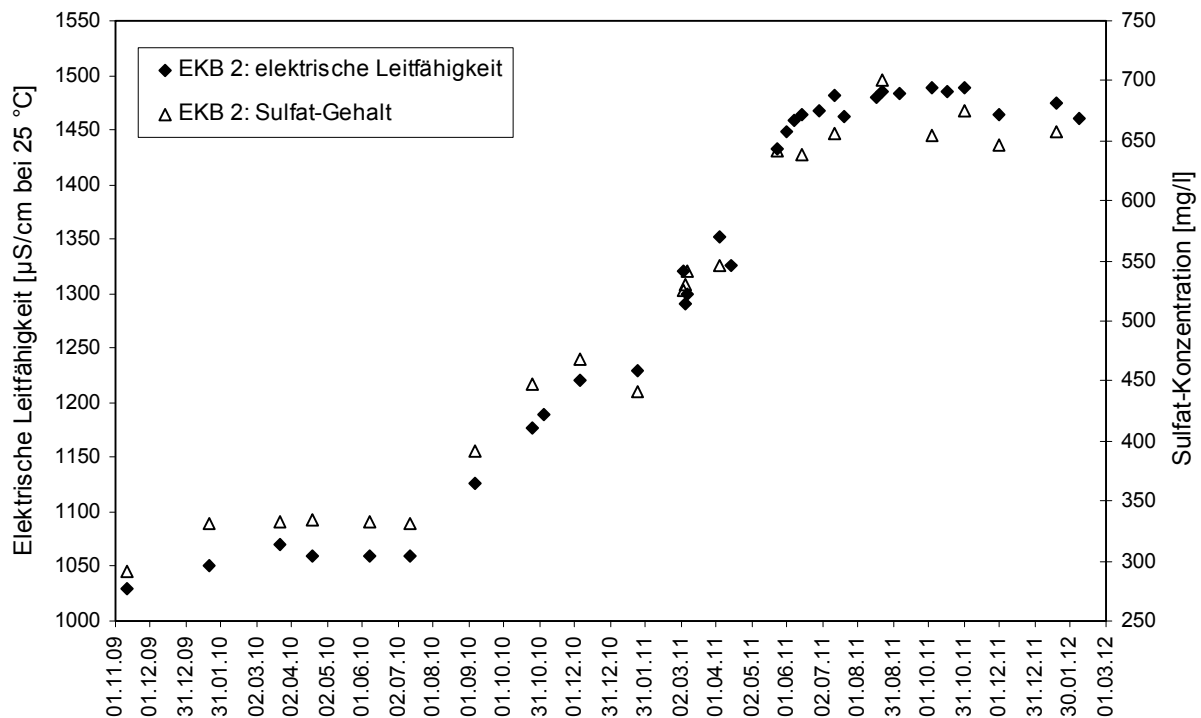


Abb. 5.17: Dauerabsenkbetrieb in der EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Sulfatgehalt der entnommenen Grundwasserproben vom 10.11.2009 bis 08.02.2012.

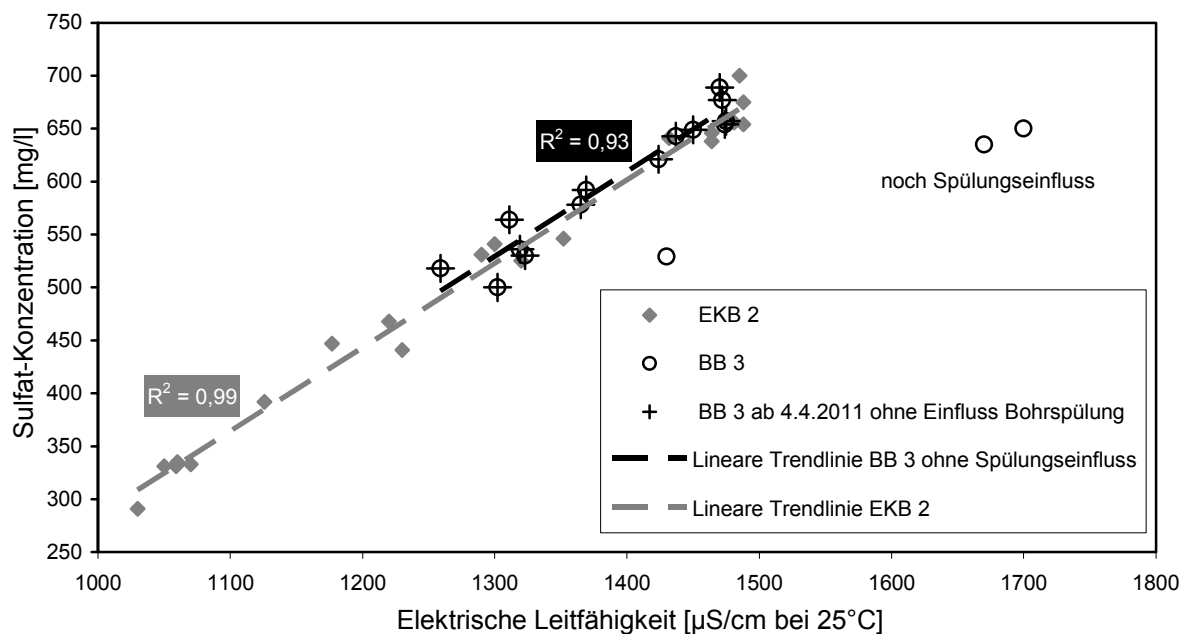


Abb. 5.18: Korrelation zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Sulfatgehalt der entnommenen Grundwasserproben (Bestimmtheitsmaße Korrelation EKB 2: $R^2 = 0,99$, BB 3: $R^2 = 0,93$). Die Proben der BB 3 vom 04., 05. und 07.03.2011 zeigen noch Einfluss der Bohrspülung, deshalb wurden sie in die Korrelation nicht mit einbezogen (die Daten vom 02.03.2011 sind nicht dargestellt, da sie sehr stark durch die Bohrspülung beeinflusst sind).

5.4 Anteil der Grundwasserkomponenten aus der Meißner-Formation (Oberer Muschelkalk) bzw. der Erfurt-Formation (Unterkeuper) an der Gesamtförderung aus der EKB 2

Legt man für das aus der Meißner-Formation (Oberer Muschelkalk) entnommene Grundwasser eine elektrische Leitfähigkeit von 715 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und für das aus der Erfurt-Formation (Unterkeuper) eine mittlere elektrische Leitfähigkeit von 1240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zu Grunde (vgl. Tab. 5.2), so ermitteln sich für verschiedene Probenahmezeitpunkte verschiedene Mischungsanteile an Muschelkalk- und Unterkeuperwasser (Tab. 5.3).

Tab. 5.3: Anteilige Grundwasserkomponenten aus dem Oberen Muschelkalk bzw. Unterkeuper an der Gesamtförderung aus der EKB 2, ermittelt durch Mischungsrechnung anhand der elektrischen Leitfähigkeiten.

Probenahmedatum	elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Grundwasserkomponente aus dem Oberen Muschelkalk [%]	Grundwasserkomponente aus dem Unterkeuper [%]
10.11.2009	1030	40	60
19.04.2010	1060	35	65
06.12.2010	1220	4	96

Zu Beginn der Pumpmaßnahme aus der EKB 2 (beispielhaft 10.11.2009) lag der Anteil der Muschelkalk-Komponente an der Gesamtförderung bei ca. 40 %, der der Unterkeuper-Komponente bei ca. 60 %. Mit fortschreitender Entnahmedauer kam es bei zeitgleicher Steigerung der Entnahmerate zu einer Verlagerung der Förderung aus dem Unterkeuper. Seit Dezember 2010 beträgt der Anteil an Unterkeuperwasser rechnerisch 96 %, der an Muschelkalkwasser nur noch 4 % an der Gesamtförderung. Diese Verschiebung zu dominanten Anteilen der Unterkeuper-Komponente am geförderten Grundwasser zeigt sich auch im Korrelationsdiagramm $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ (Abb. 5.6).

Als Ursache für diese Verschiebung kommt ein mit zunehmender Pumpdauer verbesserter hydraulischer Anschluss des Unterkeupers in Betracht. Darüber hinaus sind Abdichtungsvorgänge im Kluftsystem des Oberen Muschelkalks denkbar.

Ein Beizug von Grundwasser aus dem Gipskarst-/Schilfsandstein, der ebenfalls zu den leicht ansteigenden Leitfähigkeitswerten und Sulfatgehalten führen könnte, lässt sich aufgrund der Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen ausschließen. Dies wäre mit einem Anstieg der C14-Werte verbunden, der jedoch nicht zu beobachten ist (vgl. Abb. 5.5).

Ab dem 01.03.2011 nimmt die elektrische Leitfähigkeit in der EKB 2 zeitgleich mit dem Beginn der Pumpmaßnahme in der BB 3 erneut zu (vgl. Abb. 4.13). Die Werte der elektrischen Leitfähigkeiten stiegen über die aus dem Unterkeuper der EKB 2 bekannten Werte an und erreichen heute Werte von ca. 1450 - 1490 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

5.5 Quantifizierung des Sulfataustrags

Die Sulfatfracht und die seit Beginn der Absenkmaßnahme geförderte Sulfatmenge aus dem an den Entnahmestandorten in über einhundert Metern unter Gelände liegenden Unterkeuper und Oberen Muschelkalk (Erfurt- und Meißner-Formation) wurden abgeschätzt. Grundlage hierfür waren die zeitlich differenzierte Auswertung der Phasen unterschiedlicher Entnahmeraten aus der EKB 2 und dem BB 3 sowie die zeitlich variierenden Sulfatgehalte der entnommenen Grundwässer (Tab. 5.4 und Tab. 5.5). Für die Dichte von Gips wurde ein Wert von 2,3 g/cm^3 angesetzt.

Als Hintergrundwert für die Sulfatfracht des Grundwasser wurden festgelegt:

- EKB 2: 333 mg/l (entspricht dem annähernd konstanten Niveau der ersten Messungen in der EKB 2 zwischen Januar und Juli 2010),
- BB 3: 430 mg/l (basierend auf der Beprobung der Erfurt-Formation beim Abteufen der EKB 2 im Oktober 2009).

Zwischen dem 01. und dem 08.03.2011 sind die Sulfatgehalte in der BB 3 wegen der stark schwankenden Pumprate und der Beteiligung von Bohrspülung verfälscht. Für diesen Zeitraum wurde eine gemittelte Entnahmerate von 3,1 l/s und ein um 100 mg/l über dem Hintergrundwert von 430 mg/l SO_4 liegender, gemittelter Sulfatgehalt des geförderten Grundwassers angenommen (Tab. 5.5).

Nach diesem überschlägigen Bilanzierungsansatz wurden bis zum 01.02.2012 aus der EKB 2 (seit dem Beginn des Dauerpumpbetriebes am 01.11.2009) und der BB 3 (seit dem Pumpbeginn am 01.03.2011) insgesamt ca. 33 m^3 Gips (ca. 19 m^3 aus der EKB 2 und ca. 14 m^3 aus der BB 3) ausgetragen. Bei einer stark vereinfachenden Annahme einer flächenhaften, schichtgebundenen Sulfatlösung entspricht die Lösung von 33 m^3 Gips auf einer Fläche von ca. 150 x 150 m einer heraus gelösten Schicht von lediglich ca. 1½ mm Dicke. Ungeklärt bleibt, ob bzw. in welcher Größenordnung eine Kluftgrundwasserkomponente am geförderten Grundwasser beteiligt ist.

Tab. 5.4: Eingangsdaten für die Bilanzierung der aus der EKB 2 geförderten Sulfatfracht.

Dauer		Pumprate EKB 2 [l/s]	SO ₄ -Gehalt abzüglich Hintergrundwert [mg/l]
01.11.2009	03.05.2010	1,3	2
03.05.2010	13.07.2010	1,4	2
13.07.2010	12.08.2010	1,5	59
12.08.2010	07.09.2010	1,75	59
07.09.2010	30.09.2010	2,2	67
30.09.2010	06.11.2010	2,3	114
06.11.2010	01.03.2011	2,35	135
01.03.2011	08.03.2011	2,1	199
08.03.2011	31.03.2011	2,3	208
31.03.2011	11.04.2011	2,0	213
11.04.2011	04.05.2011	2,2	213
04.05.2011	10.05.2011	2,3	308
10.05.2011	26.06.2011	2,2	308
27.06.2011	11.07.2011	2,2	305
11.07.2011	01.08.2011	2,1	323
01.08.2011	16.11.2011	2,1	343
16.11.2011	01.12.2011	2,3	313
01.12.2011	01.02.2012	2,1	324

Tab. 5.5: Eingangsdaten für die Bilanzierung der aus der BB 3 geförderten Sulfatfracht.

Dauer		Pumprate BB 3 [l/s]	SO ₄ -Gehalt abzüglich Hintergrundwert [mg/l]
01.03.2011	08.03.2011	3,1	100
08.03.2011	01.04.2011	0	0
01.04.2011	15.04.2011	3,6	100
15.04.2011	18.04.2011	0	0
18.04.2011	03.05.2011	3,8	106
03.05.2011	10.05.2011	0	0
10.05.2011	14.06.2011	3,65	162
14.06.2011	11.07.2011	3,7	213
11.07.2011	30.07.2011	3,65	219
30.07.2011	30.09.2011	3,6	259
30.09.2011	27.10.2011	3,55	227
27.10.2011	16.11.2011	3,4	247
16.11.2011	01.12.2011	0	0
01.12.2011	12.12.2011	3,6	191
12.12.2011	01.02.2012	3,5	224

Der Bilanzierung liegt die Annahme zugrunde, dass der beobachtete Sulfatanstieg über die Hintergrundwerte entnahmebedingt ist. Eine alternative Erklärung für die bis Juli 2011 zu beobachtenden leicht zunehmenden Sulfatgehalte könnte der Beizug einer weiteren Grundwasserkomponente mit höherem Sulfatgehalt sein, die erst durch die erhöhte Entnahmerate und den gemeinsamen Pumpbetrieb aus beiden Entnahmestellen hydraulisch erreicht wurde. Dies würde dazu führen, dass der entnahmebedingte Sulfataustrag überschätzt wird.

5.6 Zusammenfassende Bewertung

Aufgrund der über den langen Pumpzeitraum weitgehend konstanten Grundwasserbeschaffenheit sowie der hohen Dauerergiebigkeit des Grundwasservorkommens ist von einem großen Einzugsgebiet der Entnahmefunnen auszugehen. Sofern der beobachtete Sulfatanstieg entnahmebedingt ist, dürften sich die damit verbundenen Lösungsvorgänge über ein großes Gebiet erstrecken.

Wie die unter natürlichen Bedingungen artesisch gespannten Grundwasserverhältnisse im Unterkeuper/Oberen Muschelkalk belegen, muss von einem orographisch hoch gelegenen Einzugsgebiet ausgegangen werden. Hierfür kommen insbesondere die in der Staufen-Sulzburger Vorbergzone ausstreichenden höher gelegenen Muschelkalk- und Buntsandsteinflächen sowie der östlich anschließende Grundgebirgsrahmen in Betracht. Das Grundwasser im Muschelkalk und Buntsandstein folgt dem nordnordwestlichen Schichteinfallen und gelangt somit unmittelbar in den Einzugsbereich der Pumpmaßnahme. Als hydraulisch wirksam anzunehmen sind außerdem die Störungselemente der Hauptverwerfung und die senkrecht dazu verlaufende Rote Berg Störung, in deren südöstlicher Verlängerung eine prägnante Geländemulde anschließt. Demzufolge wird bei der langen Pumpdauer erwartungsgemäß ein zunehmender Anteil einer Jungwasserkomponente aus diesem östlich der Brunnen liegenden Einzugsgebiet beigezogen. Dies deutet sich auch bei Veränderungen des Pumpregimes in den beobachteten Druckreaktionen des Wasserstandes der Weiherhofquellen an.

Eine durch den Dauerpumpbetrieb aus dem tief liegenden Grundwasserleiter des Unterkeupers verursachte zusätzliche Erdfallgefahr wird in Anbetracht der vergleichsweise geringen ausgetragenen Sulfatfracht nicht gesehen. Andererseits ist seit langem bekannt, dass im Altstadtgebiet von Staufen auf Grund der allgemeinen Baugrundsituation (unterschiedlich setzungsfähige Deck- bzw. Verwitterungsschich-

ten, auslaugungsbedingte Hohlräume im oberflächennahen Gipskarst, Auffüllungen etc.) allfällige Schadensbilder, insbesondere Setzungserscheinungen, grundsätzlich zu erwarten und auch tatsächlich eingetreten sind. Zahlreiche ältere Schadensbilder können hierfür als Beleg gelten (nicht zuletzt wurden auch das Rathaus und das Bauamt vor dem Bau der sieben Erdwärmesonden aufwändig saniert). Auch die Erkundungsbohrungen belegen das Vorhandensein des oberflächennahen hohlraumträchtigen Sulfatkarstes. Von daher wird es im Staufener Altstadtgebiet auch in Zukunft Setzungen, Senkungen bzw. Erdfälle geben, die völlig unabhängig von den aktuellen Baugrundverformungen und den eingeleiteten Abwehrmaßnahmen auftreten. Wie die bisherigen geodätischen Messungen ergeben haben, ist besonders an der südlichen bis südöstlichen Peripherie der Hebungsfigur mit derartigen Verformungen zu rechnen, aber auch in anderen Bereichen der Altstadt sind Bauschäden möglich und sichtbar (z. B. Frickstraße, Jänergasse).

Bei der Förderung des Grundwassers aus den Entnahmefrünnen haben sich keine Hinweise auf einen Beizug aus den darüber liegenden Grundwasserstockwerken (Oberer Gipskarst der Grabfeld-Formation bzw. Stuttgart-Formation (Schilfsandstein)) ergeben. Dies müsste eine Veränderung der isotopischen Zusammensetzung der geförderten Grundwässer zur Folge haben.

6 Untersuchungen in den Erdwärmesonden

In den Erdwärmesonden wurden im Berichtszeitraum die Temperaturmessungen fortgeführt. Außerdem wurden die Wasserstände in ausgewählten EWS-Rohren beobachtet.

6.1 Temperaturmessungen

Die Grundlagen zur Interpretation von Temperaturmessungen sind im ersten Sachstandsbericht des LGRB (LGRB 2010) beschrieben.

6.1.1 Zielsetzung der Temperaturmessungen und eingesetzte Verfahren

Die Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden wurden mit folgenden Zielsetzungen fortgeführt (vgl. LGRB 2010):

- Messung der vertikalen Temperaturverteilung in den Erdwärmesonden
- Überwachung der zeitlichen Temperaturentwicklung in den Erdwärmesonden

Bereits bei den früheren Messungen waren die Sondenrohre mit der kabelgebundenen Temperatursonde wegen Querschnittsverengungen z. T. nicht mehr bis zur Endtiefe befahrbar. Da sich diese Tendenz im Laufe der weiteren Messungen fortsetzte, wurden seit Februar 2010 in ausgewählten Erdwärmesonden (EWS 1-2 (EWS *Sonde-Schlauch*), 3-4, 5-4, 6-4 und 7-3) faseroptische Temperaturmessungen in einem Schenkel einer U-Sonde mit temporärem Einbau von Glasfaserkabeln durchgeführt. Seit Abschluss der Verpressmaßnahmen im April 2010 sind in den drei Erdwärmesondenrohren EWS 1-2, 3-4 und 6-4 die Glasfaserkabel stationär eingebaut. Somit ist gewährleistet, dass in diesen Sonden auch weiterhin eine Messung bis zur mit Glasfaserkabel versehenen Tiefe möglich ist.

Mit der kabelgebundenen Sonde wird die Temperatur in den Erdwärmesondenrohren ortsgenau mit einer vertikalen Auflösung von 1 cm mittels Platinsonden gemessen. Die Messgenauigkeit beträgt 0,01 K. Die kabelgebundenen Temperaturmessungen wurden durch das Büro Voutta Grundwasserhydraulik durchgeführt.

Das Messprinzip der faseroptischen Temperaturmessung basiert auf der Rückstreuung eines in die Glasfaser eingekoppelten, kurzen Laserpulses (< 10 ns). Die Temperaturbestimmung erfolgt mittels Ramanspektroskopie am zurückgestreuten Licht.

Die räumliche Zuordnung des Messwertes erfolgt anhand einer sehr genauen Zeitmessung, unter Berücksichtigung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in der Glasfaser. In einer nur wenige Minuten dauernden Messung erhält man das Temperaturprofil entlang der gesamten Glasfaserleitung. Die Methode erlaubt die Messung mit einer Ortsauflösung von ca. 0,5 m bei einer Absolutgenauigkeit der Messung bis zu $\pm 0,1$ K (http://www.gtc-info.de/_downloads/Faseroptik.pdf (Zugriff: Dez. 2011)). Die faseroptischen Temperaturmessungen wurden durch das Büro GTC, Karlsruhe durchgeführt.

Die kabelgebundenen Messungen haben eine höhere Absolutgenauigkeit, die faseroptischen Messungen eine bessere vertikale Auflösung. Deshalb und wegen des stationären Einbaus des Kabels zeigen die faseroptischen Messungen einen etwas „unruhigeren“ Verlauf als die kabelgebundenen Messungen. Das stationär eingebaute Glasfaserkabel ist über die gesamte Länge an die lokale, tiefenabhängige Umgebungstemperatur angepasst. Bei der kabelgebundenen Messung erfolgt dagegen die Messung mit einer Sonde, die eine gewisse Zeit zur thermischen Anpassung an die Umgebungstemperatur benötigt. In der Regel ist dies - trotz der angewandten niedrigen Fahrgeschwindigkeit der Messsonde - nicht vollständig gewährleistet.

6.1.2 Ergebnisse der Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden

Die seit dem 09.02.2010 durchgeführten Temperaturmessungen sind in der Tab. 6.1 zusammengestellt und in den Abb. 6.1 bis 6.7 graphisch dargestellt. Die Abbildungen zeigen in der Regel alle Temperaturmessungen seit dem 18.11.2009, da im ersten Sachstandsbericht (LGRB 2010) die Messungen nur bis zum Beginn der schadensbegrenzenden Maßnahmen abgebildet sind (vgl. Tab. 6.5, LGRB 2010). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Temperaturprofile für jede Erdwärmesonde auf zwei Grafiken verteilt. In jeder Grafik sind als Referenz die Temperaturprofile vom 12.02.2009 und, falls gemessen, vom 17.10.2009 dargestellt.

Die Temperaturen, die mit den beiden Verfahren ermittelt wurden, stimmen bis zum 17.11.2010 im Rahmen der Messgenauigkeit gut überein. Danach sind die mit der Kabelsonde ermittelten Temperaturen vom 20.04. und 05.07.2011 im Vergleich zu den Ergebnissen der faseroptischen Messungen vom 29.06. und 19.12.2011 über die gesamte Tiefe etwas zu niedrig. Die faseroptischen Messungen wurden mit einer 20 Meter langen Messkette mit Platinsensoren im Meterabstand kalibriert (Messgenauigkeit 0,05 K). Hierzu wurde jeweils in den obersten 20 Metern eines benachbarten Sondenschlauchs eine Temperaturmessung mit der Messkette durchgeführt.

Aufgrund dieser Kalibrierung wird bei den faseroptischen Messungen von einer hohen Absolutgenauigkeit ausgegangen. Möglicherweise hat sich bei den kabelgebundenen Messungen eine Drift des Sensors eingestellt.

Generell nimmt die Absoluttemperatur im Laufe der zuletzt durchgeführten Messreihen geringfügig ab. Dies gilt für beide Messverfahren.

Die seit dem 09.02.2010 gemessenen Temperaturprofile zeigen im Vergleich mit den früheren Messungen einen grundsätzlich ähnlichen Verlauf mit der typischen Dreigliederung (Abb. 6.1 bis 6.7, vgl. auch LGRB 2010):

- Oberer, von jahreszeitlichen und längerfristigen klimatischen Auswirkungen sowie durch die städtische Bebauung beeinflusster Abschnitt,
- Mittlerer, durch eine markante positive Temperaturanomalie gekennzeichnete Abschnitt,
- Unterer, vom geothermischen Tiefengradienten bestimmter Abschnitt.

Die glasfaseroptischen Messungen bis zum 27.04.2010 zeigen meist noch deutlich den Einfluss der Hydratationswärme des nachträglich eingebrachten Abdichtungsmediums. Dies äußert sich durch ein generell wesentlich höheres Temperaturniveau im Vergleich zu den Messungen vor der Injektion sowie durch abschnittsweise aufgesetzte Temperaturspitzen, die Bereiche mit erhöhter Aufnahme von Injektionsgut kennzeichnen. Die bis zum 19.12.2011 gemessenen Temperaturen liegen insbesondere im mittleren, durch die Temperaturanomalie gekennzeichneten Abschnitt noch meist über denen, die vor der nachträglichen Injektion gemessen wurden bzw. in einem vergleichbaren Temperaturniveau. Die aufgesetzten Temperaturspitzen hingegen haben sich nahezu vollständig zurückgebildet.

Die durch wiederholte geodätische Messungen nachgewiesene Verlangsamung des Hebungsprozesses zeichnet sich bisher nicht in einer signifikanten Abnahme der Temperaturen im Bereich der positiven Temperaturanomalie ab. Offensichtlich reagiert das Temperatursystem stark verzögert, da die Wärme, die bei der exothermen Reaktion (Umwandlung von Anhydrit in Gips) frei wird, nur langsam abgeführt werden kann. Bei zusätzlichem Wärmeabtransport durch Grundwasser wäre eine schnellere Abkühlung des Gebirges zu erwarten. Lediglich bei der EWS 3 zeichnet sich ein leichter Temperaturrückgang im Bereich der positiven Temperaturanomalie (zwischen ca. 60 und 85 m Sondenlänge) ab (Vergleich zwischen den glasfaseroptischen Messungen vom 29.06. und 19.12.2011: um etwa 0,2 K, Abb. 6.3).

Tab. 6.1: Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 seit dem 09.02.2010 (davor durchgeführte Messungen siehe LGRB 2010). Angegeben sind Methode (Profilmessung mit Kabelsonde (15 mm) oder glasfaseroptische Messung (Glasfaserkabel 11 oder 3 mm Durchmesser)), die erreichten Messtiefen (ET, Bezugspunkt GOK) und das gemessene Sondenrohr (EWS - Rohr, z.B. 1-2). In Rot: Temperaturmessungen, die stark durch die Hydratationswärme der Verpress-Maßnahmen in den Erdwärmesonden beeinflusst sind.

	EWS 1		EWS 2		EWS 3		EWS 4		EWS 5		EWS 6		EWS 7	
	Methode	Rohr und ET (m)	Methode	Rohr und ET (m)	Methode	Rohr und ET (m)	Methode	Rohr und ET (m)	Methode	Rohr und ET (m)	Methode	Rohr und ET (m)	Methode	Rohr und ET (m)
09.02.10	Kabel-sonde	1-3: 50,6	Kabel-sonde	2-1: 65,7	Kabel-sonde	3-3: 85,1	Kabel-sonde	4-3: 68,7	Kabel-sonde	5-4: 101,8	Kabel-sonde	6-2: 111,0	Kabel-sonde	7-3: 88,9
10.02.10					Glas-faser 11	3-4: 96,9			Glas-faser 11	5-4: 102,5	Glas-faser 11	6-1: 109,2	Glas-faser 11	7-3: 87,7
22.02.10					Glas-faser 11	3-4: 93,5							Glas-faser 11	7-3: 84,6
02.03.10	Kabel-sonde	1-3: 50,5	Kabel-sonde	2-1: 67,2	Kabel-sonde	3-3: 85,4	Kabel-sonde	4-3: 69,4	Kabel-sonde	5-4: 102,3	Kabel-sonde	6-2: 85,7		
18.03.10	Glas-faser 3	1-2: 91,5			Glas-faser 11	3-4: 91,5					Glas-faser 3	6-4: 115,5		
27.04.10	Glas-faser 3	1-2: 126,0			Glas-faser 11	3-4: 92,5					Glas-faser 3	6-4: 115,5		
19.05.10					Kabel-sonde	3-2: 85,6	Kabel-sonde	4-2: 69,1	Kabel-sonde	5-4: 49,9	Kabel-sonde	6-2: 85,3	Kabel-sonde	7-3: 63,0
09.11.10	Glas-faser 3	1-2: 131,4			Glas-faser 11	3-4: 97,4					Glas-faser 3	6-4: 116,0		
17.11.10	Kabel-sonde	1-3: 50,6 1-4: 50,8			Kabel-sonde	3-1: 40,5 3-3: 61,0			Kabel-sonde	5-1: 49,5 5-3: 49,5	Kabel-sonde	6-1: 65,3 6-2: 86,4	Kabel-sonde	7-3: 63,2
20.04.11	Kabel-sonde	1-3: 50,1	Kabel-sonde	2-2: 50,6	Kabel-sonde	3-3: 86,1	Kabel-sonde	4-1: 70,1	Kabel-sonde	5-2: 49,8	Kabel-sonde	6-2: 85,5	Kabel-sonde	7-2: 62,6
29.06.11	Glas-faser 3	1-2: 130,0			Glas-faser 11	3-4: 93,0					Glas-faser 3	6-4: 114,0		
05.07.11	Kabel-sonde	1-3: 50,7	Kabel-sonde	2-3: 61,5	Kabel-sonde	3-3: 85,9	Kabel-sonde	4-1: 69,5	Kabel-sonde	5-2: 49,7	Kabel-sonde	6-2: 86,0	Kabel-sonde	7-3: 62,9
19.12.11	Glas-faser 3	1-2: 129,0			Glas-faser 11	3-4: 93,0					Glas-faser 3	6-4: 112,0		

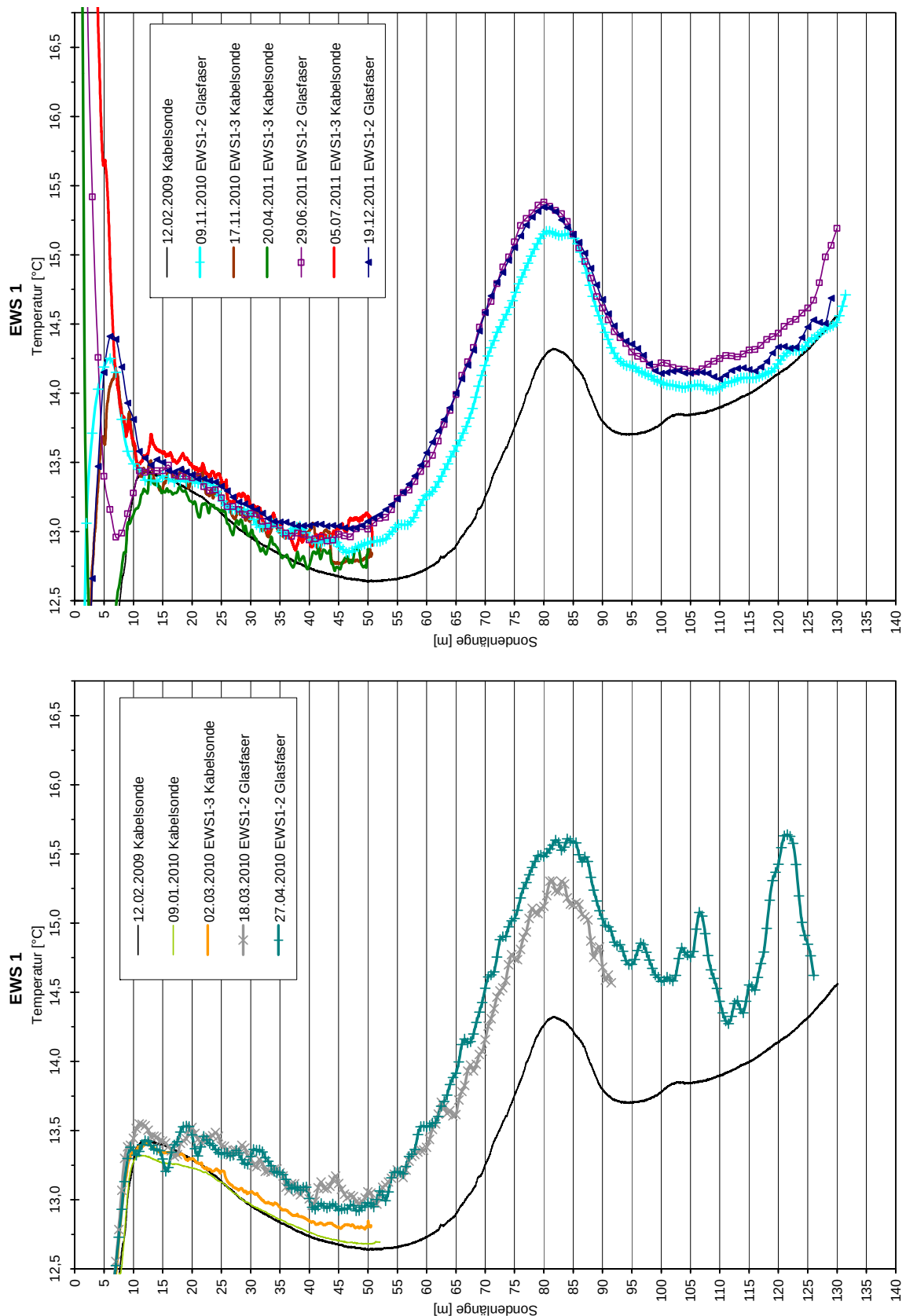


Abb. 6.1: Temperaturprofile EWS 1. Die Messung vom 09.02.2010 ist über die gesamte Tiefe stark durch Hydratationswärme beeinflusst (0 - 50,6 m u. GOK zwischen etwa 16,0 und 18,5 °C) und deshalb nicht dargestellt.

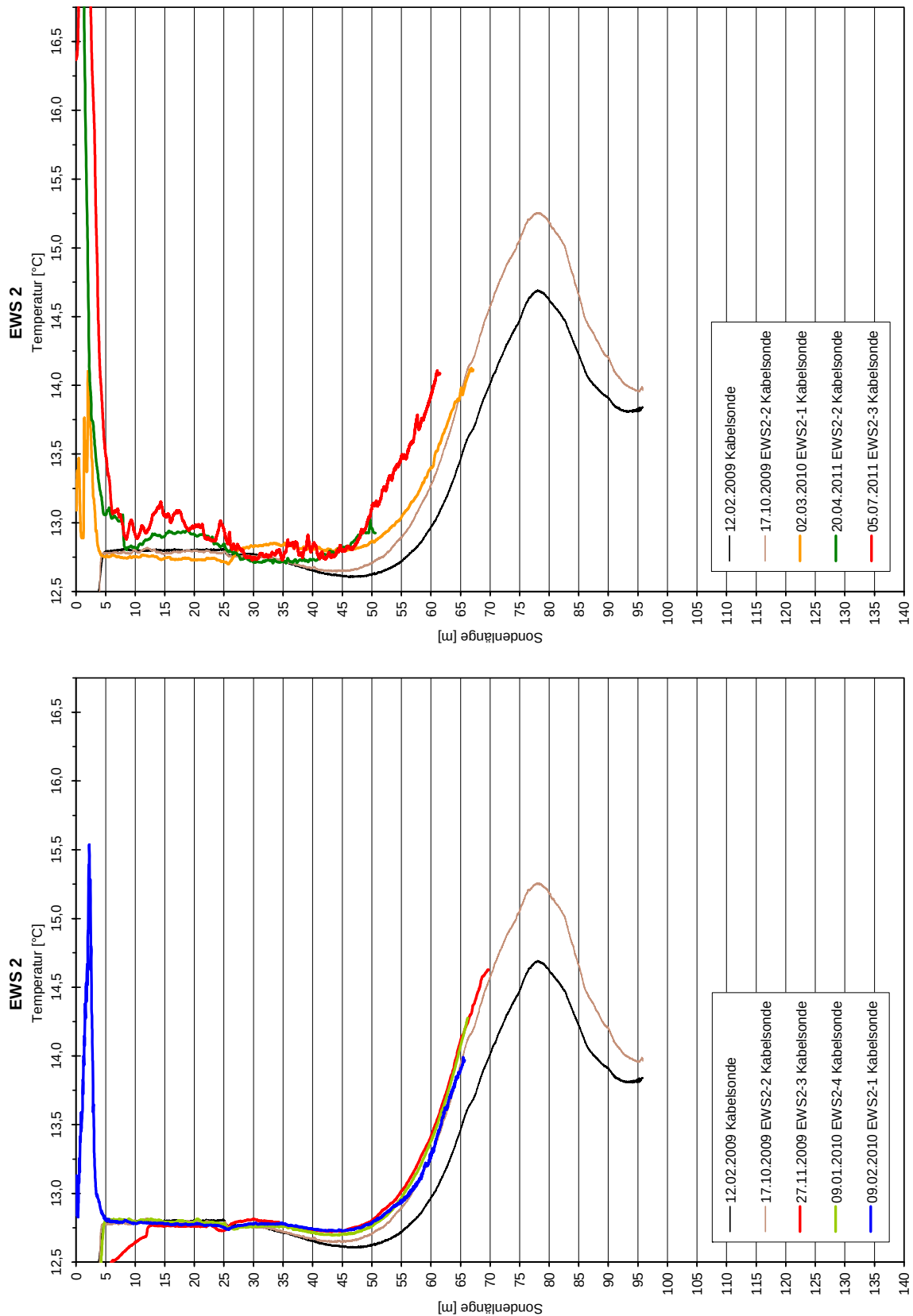


Abb. 6.2: Temperaturprofile EWS 2.

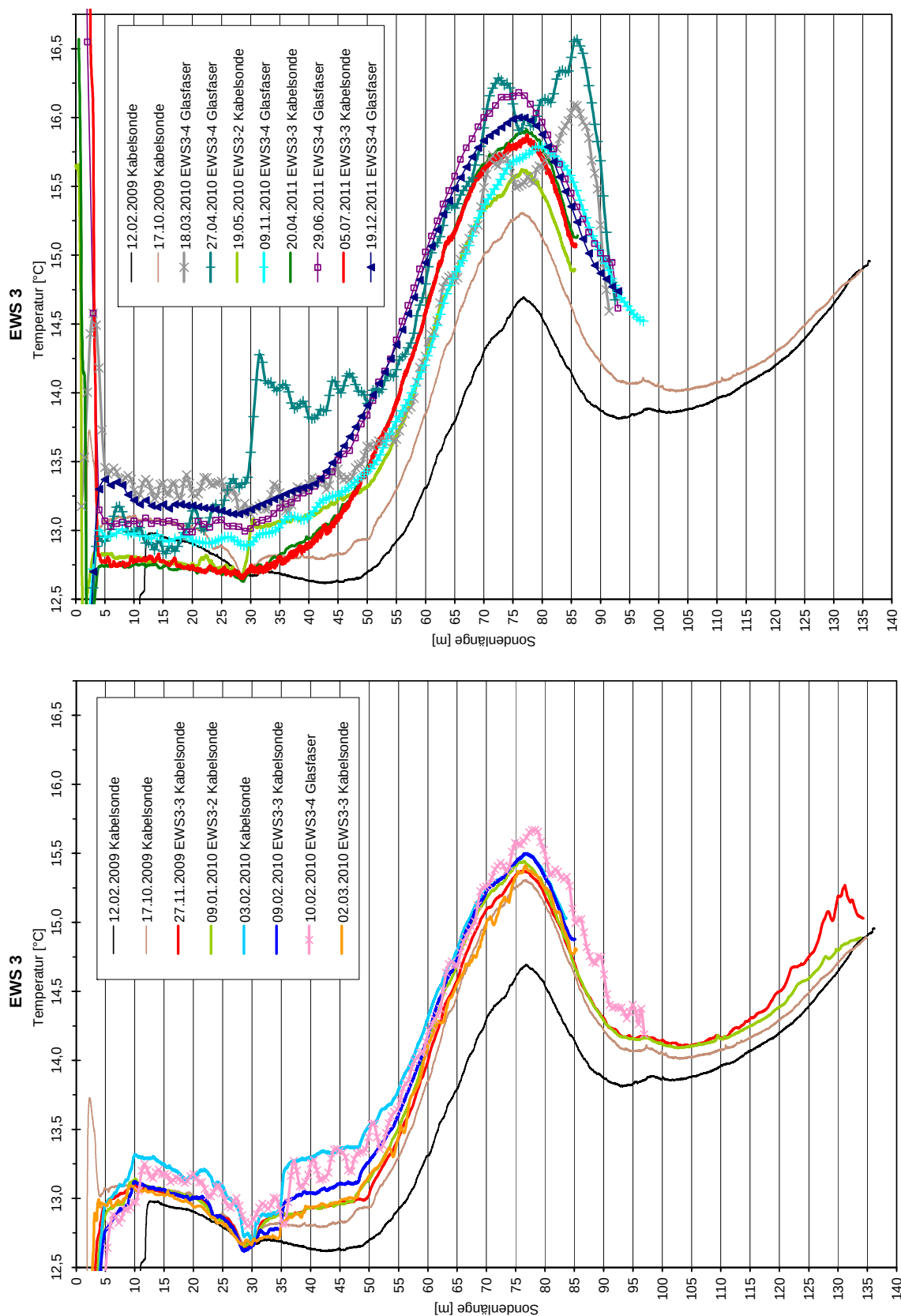


Abb. 6.3: Temperaturprofile EWS 3. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Messungen vom 22.02. und 17.11.2010 nicht dargestellt.

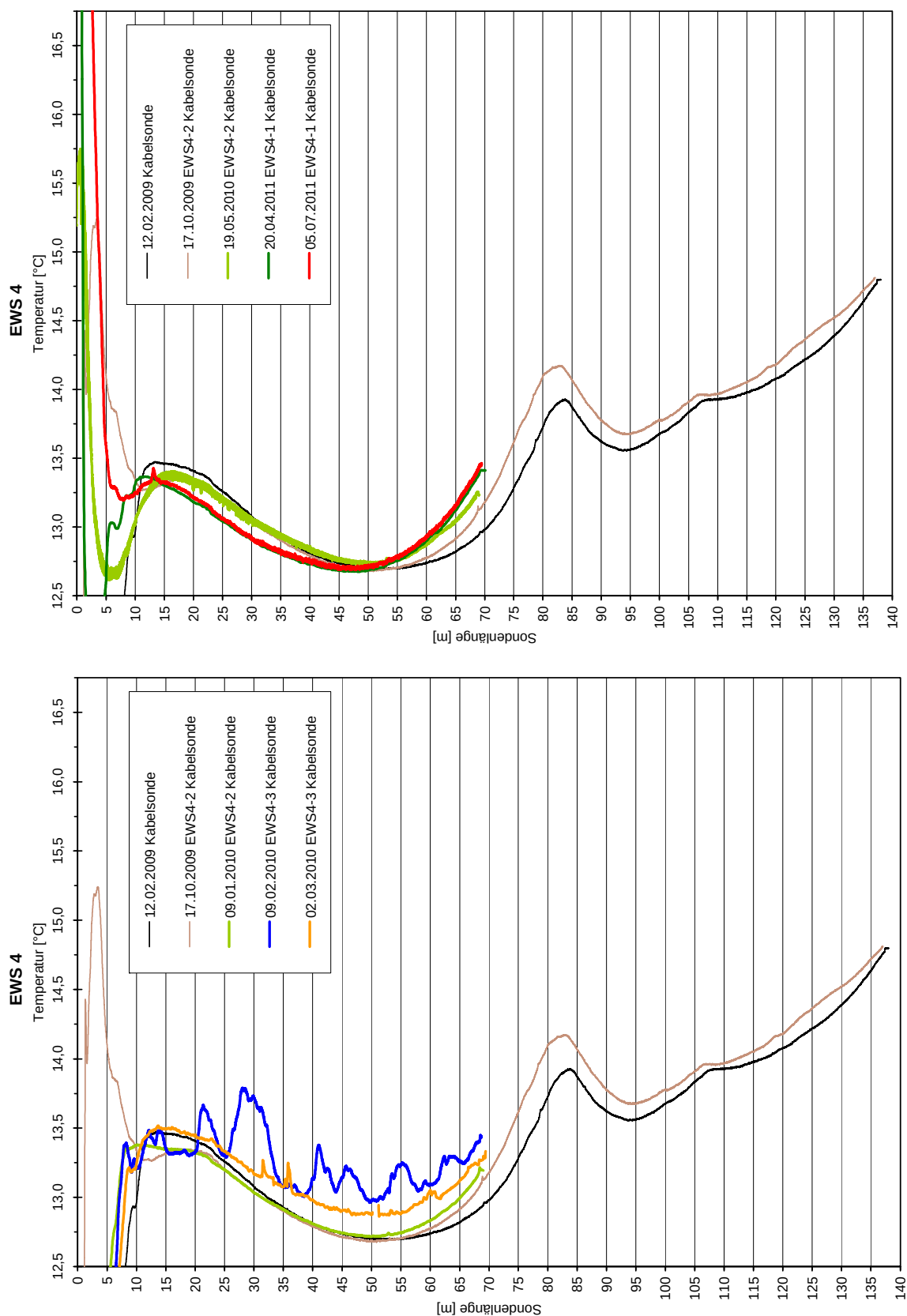


Abb. 6.4: Temperaturprofile EWS 4.

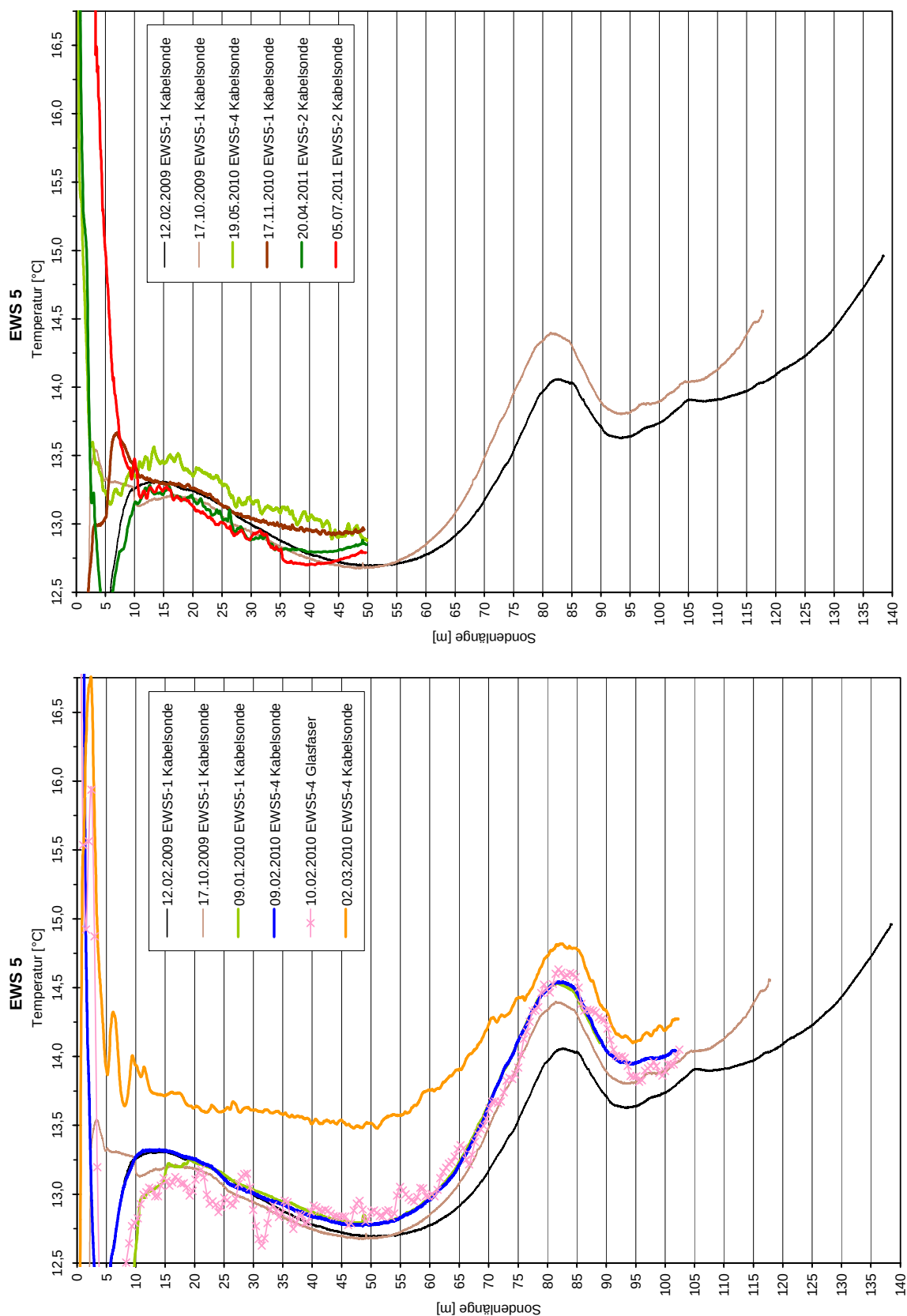


Abb. 6.5: Temperaturprofile EWS 5.

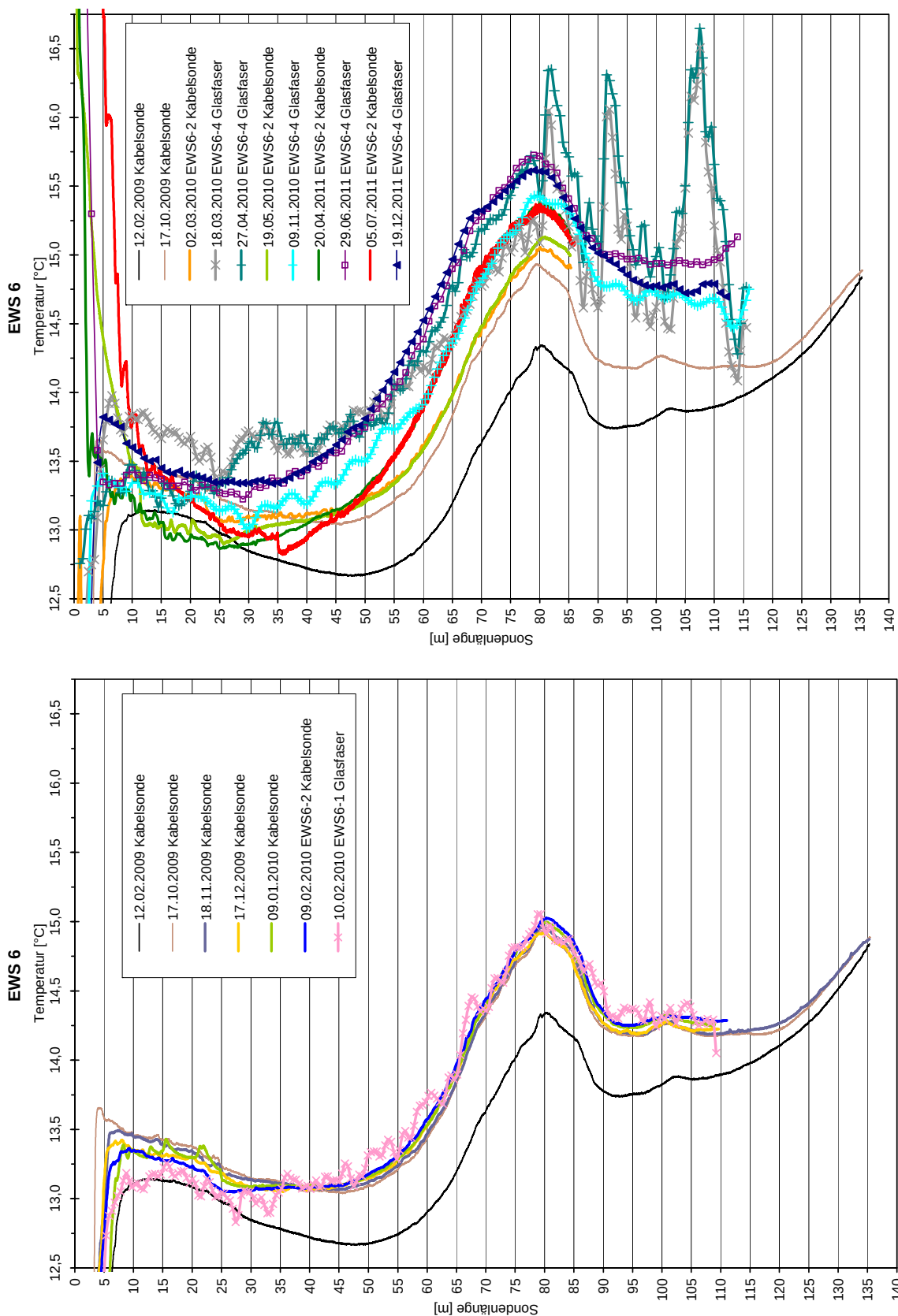


Abb. 6.6: Temperaturprofile EWS 6. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Messungen vom 03.12.2009, 03.02. und 17.11.2010 nicht dargestellt.

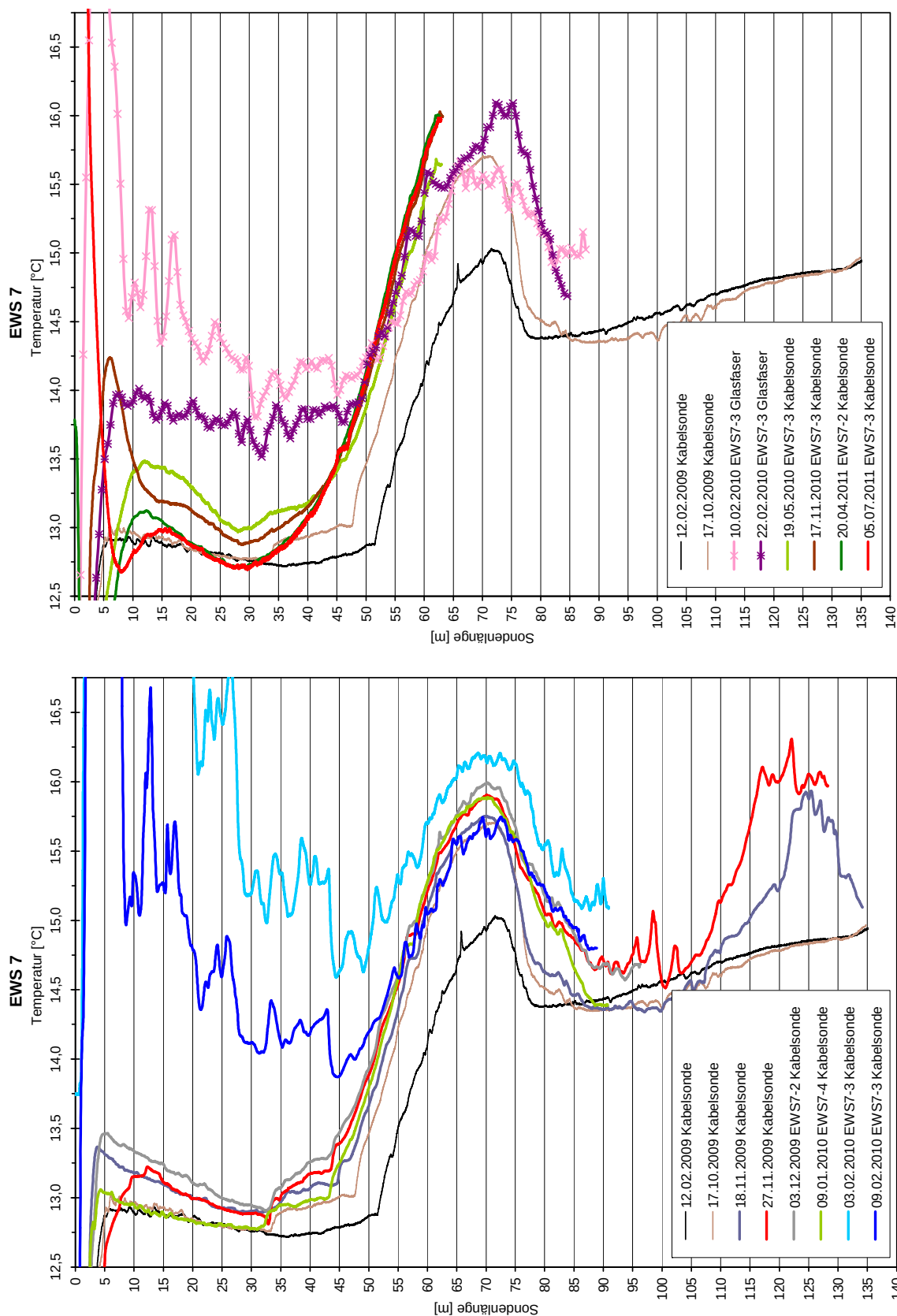


Abb. 6.7: Temperaturprofile EWS 7.

6.2 Wasserstandsmessungen

Im Rahmen der wiederholten Befüllung der EWS-Rohre mit Wasser und der Überwachung der Wasserstände durch manuelle Messungen im Jahr 2010 fiel auf, dass die Wasserstände in den EWS-Rohren Schwankungen unterliegen. Die Befüllung der Sondenrohre zwischen dem 29.04. und 08.06.2010 war für erforderlich gehalten worden, da befürchtet wurde, dass sie ohne den hydrostatischen Gegendruck der Wassersäule in den Schläuchen aufgrund des hohen Umgebungsdruckes zusammengedrückt werden könnten. Im weiteren Verlauf zeichnete sich ab, dass dies nicht eintrat, so dass auf die Wiederbefüllung verzichtet wurde.

Im Jahr 2011 wurden Wasserstandsmessungen in verdichteter Zeitfolge händisch durchgeführt (Lichtlotmessungen). Sie dienten dazu, das Ausmaß und die Ursachen der Wasserstandsschwankungen insbesondere während der Pumpmaßnahmen in der EKB 2 und der BB 3 näher zu untersuchen und damit gegebenenfalls Hinweise auf hydraulische Verbindungen zwischen den Entnahmebrunnen und den Erdwärmesonden sowie zum hydraulischen Gesamtsystem zu erhalten. Die Messungen erfolgten vom 03.03.2011 bis 08.03.2011 täglich, danach bis 01.04. mehrtäglich. Während der Pumpmaßnahme in EKB 2 und BB 3 vom 01.04. bis zum 21.04.2011 wurde der Messabstand wieder auf täglich verringert, danach wurde in ein- bis zweiwöchentlichem bzw. im September/ Oktober 2011 in sechswöchentlichem Abstand gemessen. Vom 16.11. bis 19.12.2011, während und kurz nach der wegen Umbauarbeiten erforderlichen Pumppause in der BB 3, wurde wieder verdichtet gemessen (Messintervalle zwischen einem und sieben Tagen). Ab dem 19.12.2011 wird monatlich gemessen.

Das EWS-Rohr EWS 2-1 wurde ab dem 25.03., die Rohre EWS 3-1, EWS 4-3 und EWS 5-1 ab dem 26.05.2011 mit Drucksonden zur kontinuierlichen Registrierung des Wasserstandes ausgestattet.

Die Ergebnisse der Wasserstandsmessungen sind in der Tab. 6.2 zusammengefasst.

Die meisten Erdwärmesonden-Rohre lassen sich grundsätzlich aufgrund der Wasserstände und der Dynamik der Wasserstandsänderungen klassifizieren, wobei Reaktionen auf den Pumpbetrieb den stationären Zustand oder fallenden Trend überlagern können:

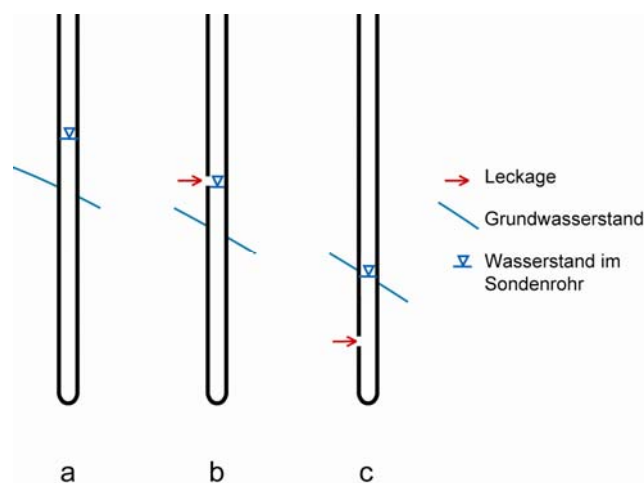
- EWS-Rohre mit stationärem Wasserstand
- EWS-Rohre mit kontinuierlich sinkendem Wasserstand
- EWS-Rohre mit Reaktionen auf den Pumpbetrieb

Die EWS-Rohre 4-3, 4-4 und 6-1 lassen sich nicht eindeutig zuordnen. In ihnen fiel zunächst der Wasserspiegel seit Beginn der Messungen kontinuierlich. Seit Juni 2011 steigt der Wasserstand in der EWS 6-1, seit Januar 2012 in den EWS 4-3 und 4-4 an.

Bei einigen EWS-Rohren sank der Wasserspiegel unter eine für das Lichtlot passierbare Engstelle ab. Danach konnten keine weiteren Aussagen zur Lage und Dynamik des Wasserspiegels gemacht werden. Daneben sind in einigen EWS-Rohren Glasfaserkabel, Zugschnüre oder Ausblassschläuche eingebaut, die bei Bedarf eine nachträgliche Instrumentalisierung bzw. ein nachträgliches Entleeren der Sondenrohre ermöglichen sollen (vgl. Tab. 6.2). In diesen Rohren sind derzeit keine Wasserstandsmessungen möglich.

Zur Erklärung der beobachteten Trends in den EWS-Rohren kommen folgende Ursachen in Frage:

- stationärer Wasserstand

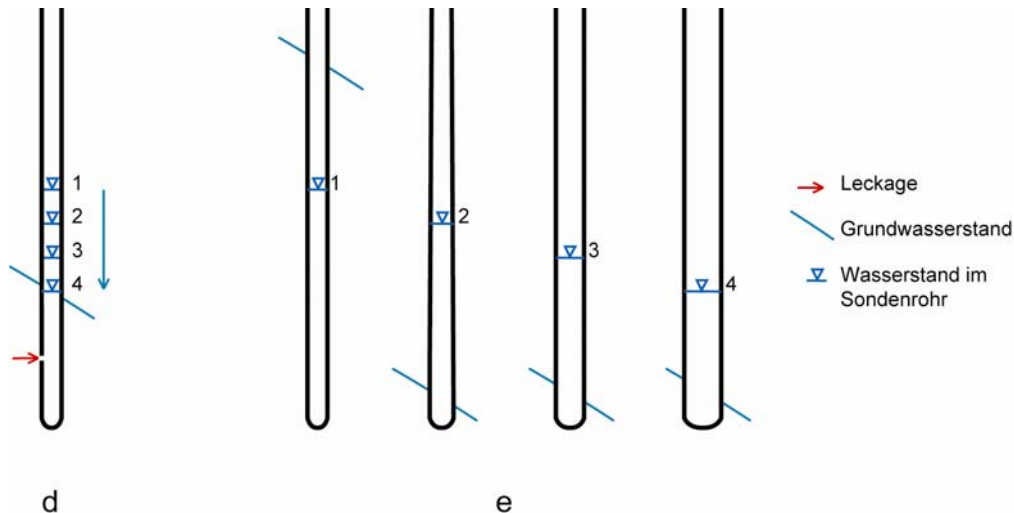


- o vollständig dichtes EWS-Rohr (Fall a)
- o die Undichtigkeit des EWS-Rohres liegt oberhalb des (hydraulisch abgesenkten) Grundwasserstandes (Fall b)
- o die Undichtigkeit des EWS-Rohres liegt unterhalb des stationären (hydraulisch abgesenkten) Grundwasserstandes (Fall c)

Tab. 6.2: Ergebnisse der Wasserstandsmessungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 (2011-2012). Mehrfachnennung bei der Kategorisierung möglich.

		Reaktion auf Pumpbe- trieb	Fallender WSP	annähernd konstan- ter WSP	annähernd konstanter WSP knapp unterhalb ROK	WSP unterhalb max. erreichbarer Lichtlot-Tiefe	Nicht eindeutig zuordenbar	Keine / nicht genügend Informationen	Bemerkungen	Frühere Beobachtung bis Juni 2010
EWS1-1								X	Zugschnur	-
EWS1-2	verpresst							X	Glasfaserkabel	ca. 121 m
EWS1-3						X (tiefer als 50m)				ca. 29-30 m
EWS1-4	verpresst					X (tiefer als 50m)				ca. 29-30 m
EWS2-1	verpresst	X	X							ca. 3,20 - 3,50 m
EWS2-2	verpresst	X	X							ca. 3,20 - 3,50 m
EWS2-3			X			X (tiefer als 60,5 m seit 18.11.11)				sinkend, letzter Wert 45m
EWS2-4	abgesichert?					X (tiefer als 60m)				tiefere als 61,20 m
EWS3-1	verpresst	X	X							ca. 1,5 m (Sonde dicht)
EWS3-2	verpresst		X							ca. 1,5 m (Sonde dicht)
EWS3-3		X		X (seit Juli 2011)						0 - 1 m (Sonde dicht)
EWS3-4								X	Glasfaserkabel	-
EWS4-1				X (nach T-Messung)	X (vor T-Messung)					~ 0,7
EWS4-2				X (nach T-Messung)	X (vor T-Messung)					~ 0,7
EWS4-3	verpresst	X					X		Einfluss Stark- niederschläge?	nicht konstant, letzter Wert ~5,5 m
EWS4-4	verpresst	X					X			nicht konstant, letzter Wert ~5,5 m
EWS5-1	verpresst	X		X (~ seit Anfang Juni 2011)					Anstieg um 20cm 19.12.11-17.1.12	~ 1,80- 2,0 m (dicht)
EWS5-2			X							kontinuierlich sinkend, letzter Wert ~20 m
EWS5-3	verpresst					X (tiefer als 49m)				~ 68-70 m (stationär)
EWS5-4								X	Ausblassschlauch	~ EWS 5-3 bis Ausblasen
EWS6-1	verpresst						X (Ansteigend seit Juni 2011)			~11 - 12 m
EWS6-2	verpresst		X (seit Ende April 2011)							~ 11 - 12 m
EWS6-3								X	Zugschnur	leicht sinkend, 100,5 m
EWS6-4								X	Glasfaserkabel	-
EWS7-1	verpresst							X	Ausblassschlauch	-
EWS7-2				X (nach T-Messung)	X (vor T-Messung)					~ 0,2 m
EWS7-3				X						~ 0,9 m
EWS7-4	verpresst							X	Ausblassschlauch	-

- Kontinuierlich sinkender Wasserstand



Anmerkung: (d) Absinkender Wasserstand infolge von "Auslaufen" der EWS
(e) Absinkender Wasserstand mit zunehmender "Aufweitung" des EWS-Rohres
(nähere Erläuterungen siehe Text).

- o Undichtigkeit des EWS-Rohres (in Folge der nachträglichen Perforation beim Nachverpressen oder der hebungsbedingten Längung der EWS-Rohre) in einer Tiefe unterhalb des (abgesenkten) Grundwasserstandes und allmähliches „Auslaufen“ der EWS bis sich der Wasserstand im Rohr auf das Niveau des abgesenkten Wasserstandes oder der Undichtigkeit eingestellt hat (d).

Es wurden Erdwärmesonden mit einem Rohr-Außendurchmesser von DN 32 und einer Wandstärke von 2,9 mm eingebaut. Bei nicht miteinander kommunizierenden Rohren einer U-Sonde entspricht bei solchen Abmessungen ein Absinken des Wasserstands um einem Meter einem Wasserverlust von ca. 0,54 l. Bei den über den bisher beobachteten langen Zeitraum von nahezu 2 Jahren gemessenen Absenkungsbeträgen von bis zu ca. 70 Metern sind die austretenden Wassermengen vernachlässigbar gering (siehe unten). Durch den Quellhebungsprozess haben sich die Querschnitte der EWS-Rohre stark verjüngt. Deshalb ist von noch weitaus geringeren Wasserverlustmengen auszugehen.

- o Volumenänderung der Rohre (e). Aufgrund der Druckwasserspiegelabsenkung durch den Pumpbetrieb in den Brunnen EKB 2 und BB 3 nimmt der hydrostatische Druck, der auf die EWS-Rohre wirkt, ab. Dies könnte

zu einer Ausdehnung der EWS-Rohre führen. Das beobachtete Absinken des Wasserspiegels in den Erdwärmesonden um bis zu 70 Meter bedürfte jedoch einer unrealistisch großen Ausdehnung der Rohre.

In den EWS-Rohren mit *annähernd konstantem Wasserstand* sind die Wasserspiegel seit Beginn der Messungen im April 2010 bzw. nach der Beeinträchtigung durch den Einsatz der Temperaturkabelsonde (siehe unten) nahezu stationär bzw. allenfalls nur noch geringfügig fallend (EWS 3-3, EWS 4-1, EWS 4-2, EWS 5-1, EWS 7-2, EWS 7-3). In einigen EWS-Sonden lassen sich die abgesunkenen Wasserstände eindeutig auf Wasserverluste infolge Befahrung der Rohre mit der Temperaturkabelsonde zurück führen (vgl. Abb. 6.8).

Die Möglichkeit, dass die EWS-Rohre über Undichtigkeiten mit einem der hoch gespannten Grundwässer in hydraulischem Kontakt stehen und die Wasserstandsschwankungen in den Rohren eine Folge von luftdruckbedingten Druckschwankungen im Aquifer sind, wurde durch einen Vergleich mit dem vor Ort aufgezeichneten barometrischen Luftdruck ausgeschlossen.

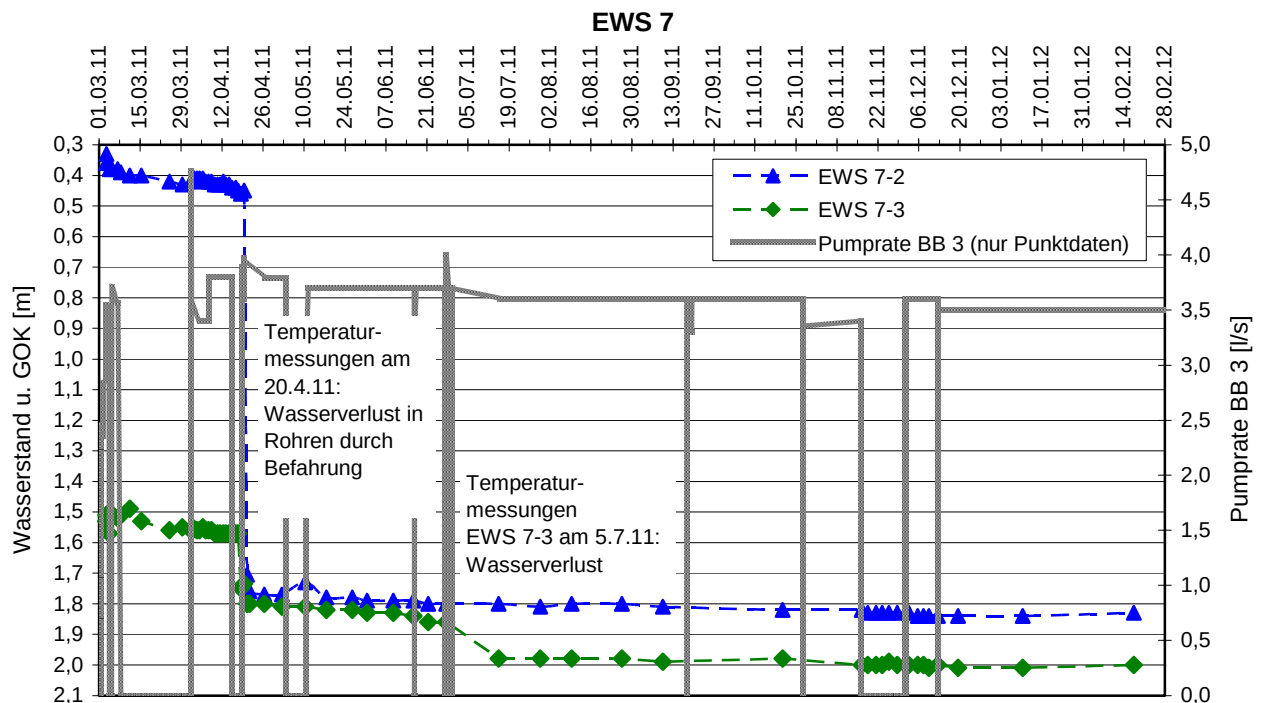


Abb. 6.8: Beispiele für konstante Wasserstände in vollständig dichten EWS-Rohren: Erdwärmesonderohre 7-2 und 7-3 (03.03.2011 bis 17.02.2012). In den Rohren kam es bei den Temperaturmessungen am 20.04. und 05.07.2011 durch die Befahrung mit der Temperaturkabelsonde zu Wasserverlusten (plötzliches Absinken des Wasserstands).

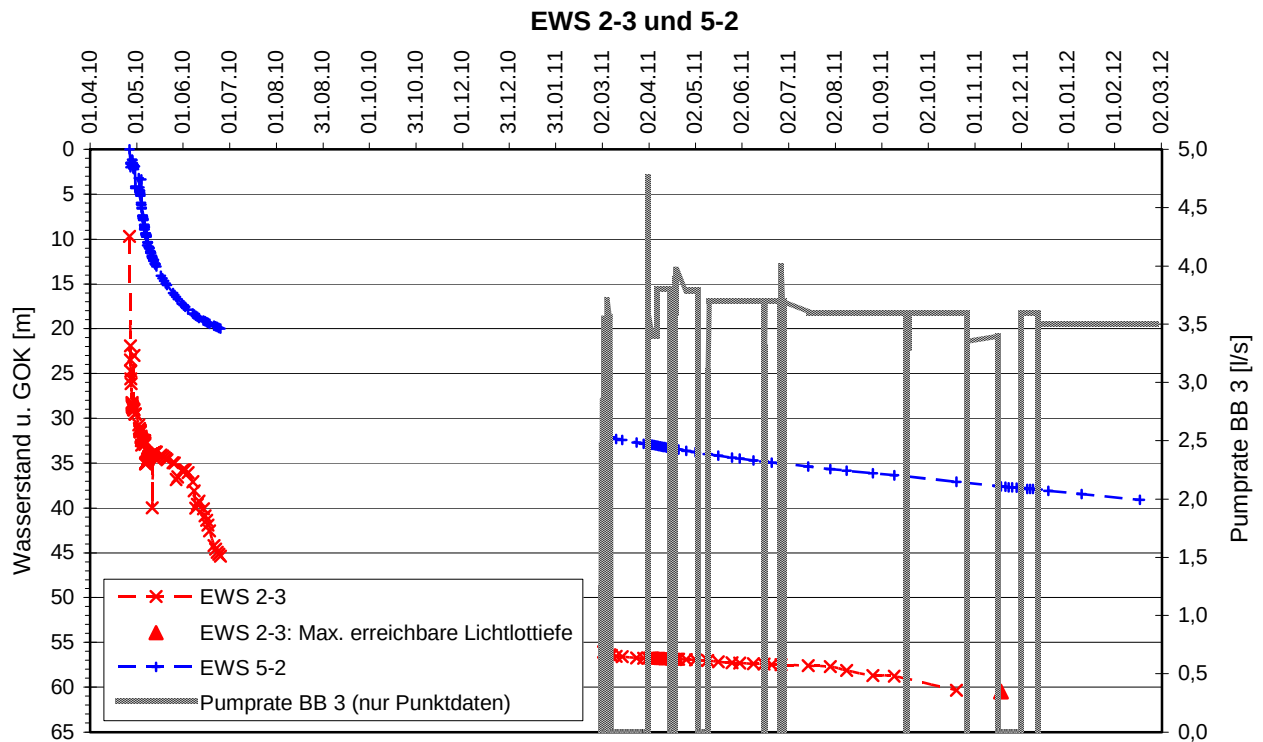


Abb. 6.9: Beispiele für fallende Wasserstände: Erdwärmesondenhre EWS 2-3 und EWS 5-2 vom 26.04.2010 bis 17.02.2012. Bei der EWS 2-3 liegt der Wasserspiegel seit dem 18.11.2011 unterhalb 60,5 m u. GOK, einer für das Lichtlot nicht passierbaren Engstelle.

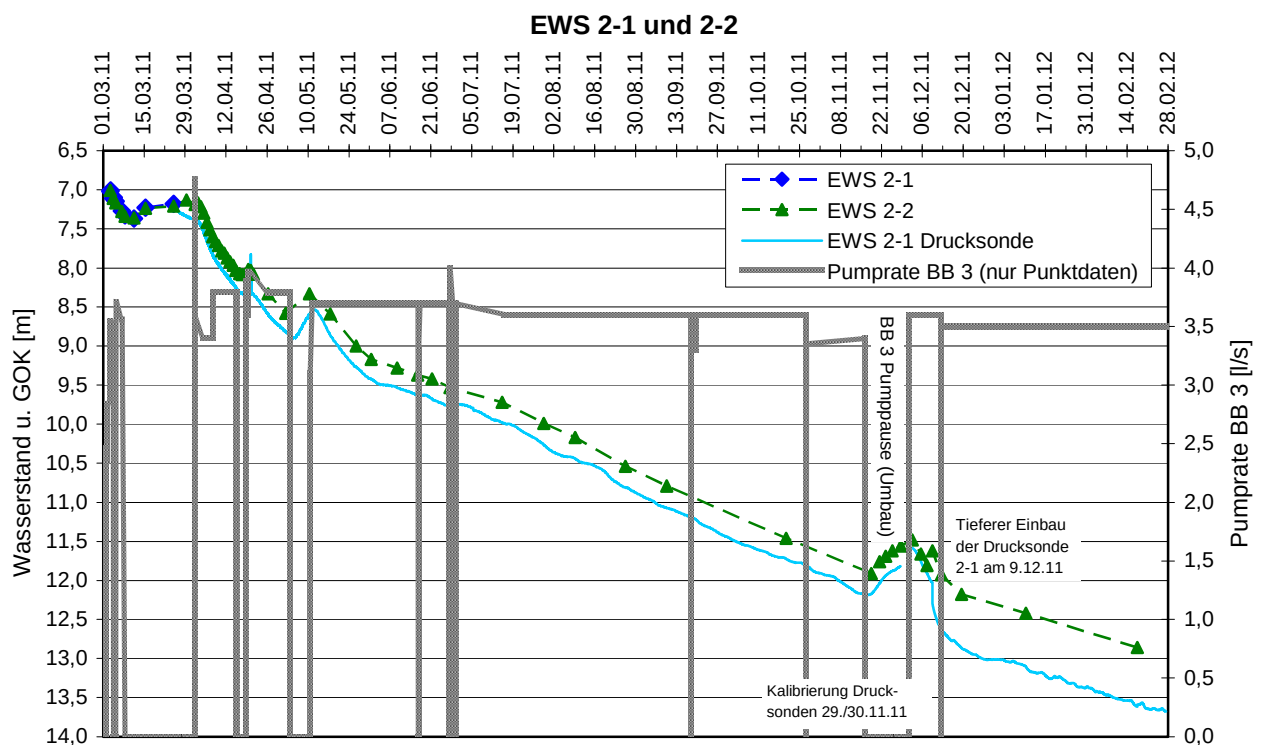


Abb. 6.10: Beispiele für fallende Wasserstände mit Überlagerung durch Pumpbetrieb: Erdwärmesondenhre EWS 2-1 und EWS 2-2 vom 03.03.2011 bis 27.02.2012. Die Drucksonde in der EWS 2-1 wurde am 09.12.2011 10 m tiefer gehängt, was eine plötzliche Abnahme des Wasserstandes verursachte.

In den EWS-Rohren mit *fallenden Wasserständen* (EWS 2-1, EWS 2-2, EWS 2-3, EWS 3-1, EWS 3-2, EWS 5-2 und, seit Ende April 2011, EWS 6-2) wird eine Anfangsphase mit starkem Absinken des Wasserstandes beobachtet, an die sich eine Phase anschließt, in der der Wasserstand weniger stark absinkt (Abb. 6.9 und 6.10). Dieses Niveau liegt in den verschiedenen Sondenrohren in unterschiedlicher Tiefe. Vermutlich weisen diese Erdwärmesondenrohre in dem darunter liegenden Abschnitt geringfügige Undichtigkeiten auf, über die das Wasser langsam austritt (Fall d, siehe oben). Bezogen auf den fast zweijährigen Beobachtungszeitraum sind die austretenden Wassermengen vernachlässigbar gering.

In den EWS-Rohren, die *Reaktionen auf den Pumpbetrieb* zeigen, verlaufen die Wasserstandsschwankungen synchron und relativ spontan zu den Entnahmeratenänderungen. Deutliche Reaktionen auf den Pumpbetrieb machen sich z.B. in den Wasserständen der EWS-Rohre EWS 3-1 und EWS 5-1 bemerkbar (Abb. 6.11, siehe auch Abb. 6.10). Daneben verlaufen die Wasserstände zeitweise nahezu parallel (wobei das spontane Absinken des Wasserspiegels Ende Mai 2011 mit Einsatz der Druckdosen als messtechnischer Effekt interpretiert wird). Der längerfristige Trend wird von kurzfristigen Schwankungen überlagert, deren Ursache nicht geklärt werden konnte. Ebenfalls ungeklärt ist die Ursache für die gegenläufige Entwicklung seit Ende Dezember 2011 in den beiden Sondenrohren der EWS 3-1 und EWS 5-1.

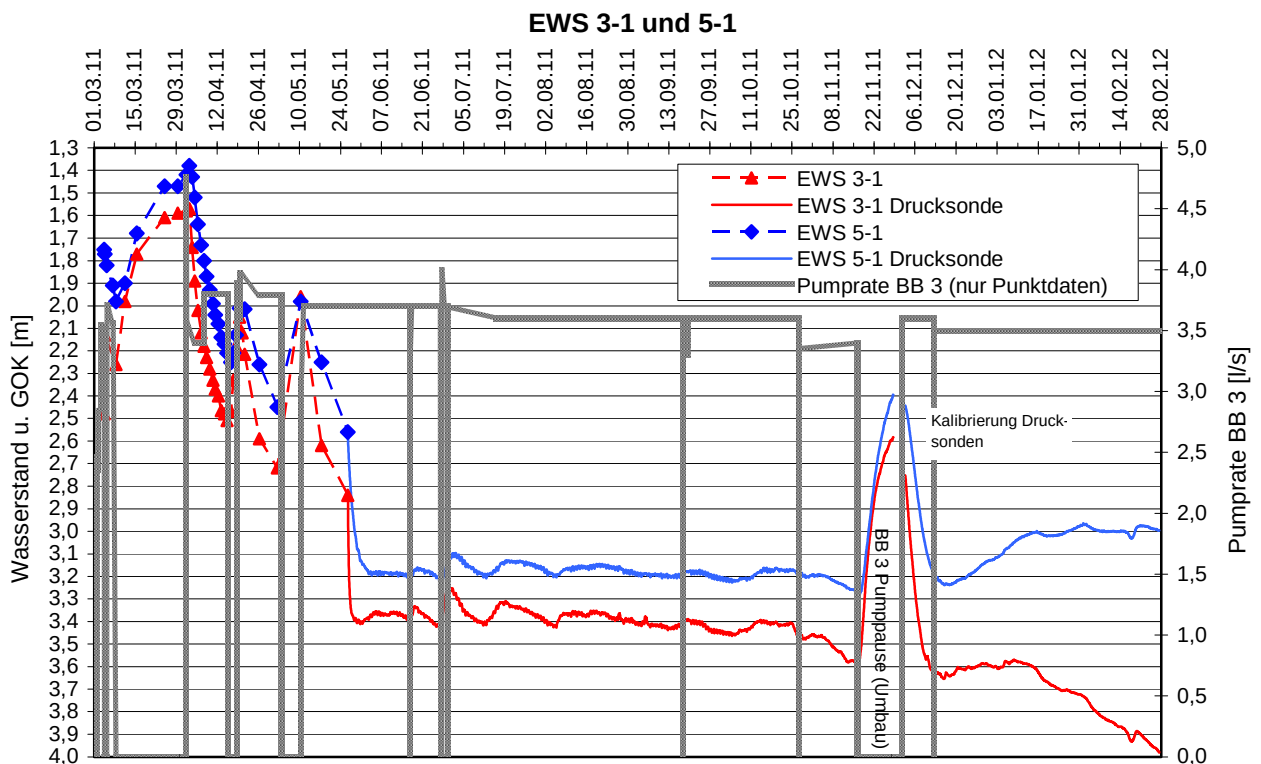


Abb. 6.11: Vergleich der Wasserstände in den Erdwärmesondenrohren EWS 3-1 und EWS 5-1 vom 03.03.2011 bis 27.02.2012.

Einen Sonderfall stellt die Entwicklung der Wasserstände in den EWS 6-1 und 6-2 dar (Abb. 6.12). Bis zum 21.04.2011 sind die Wasserstände in den beiden zu einer U-Sonde gehörenden Rohren nahezu identisch (ca. 15 - 16 m u. GOK). Danach fällt der Wasserstand in der EWS 6-2 ab (am 17.02.2012 bei ca. 70 m mit weiterhin fallendem Trend), wogegen er in der EWS 6-1 ansteigt (am 17.02.2012 bei ca. 6 m mit nur noch geringfügig steigendem Trend). Es wird vermutet, dass die beiden Rohre der U-Sonde bis Ende April 2011 miteinander kommunizierten, danach war die Sonde in ihrem unteren Abschnitt so stark eingeschnürt, dass die beiden Schenkel der Sonde voneinander hydraulisch entkoppelt sind. Diese Annahme wird durch den Befund gestützt, dass die Sondenrohre während der nachträglichen Injektionsarbeiten jeweils nur noch bis ca. 115 m zugänglich waren. Der unterschiedliche Trend in den beiden Rohren würde voraussetzen, dass das Rohr EWS 6-2 eine Undichtigkeit im unteren Abschnitt aufweist, über die der Wasserstand im Sondenrohr hydraulisch durch das aufgrund der Pumpmaßnahme abgesenkte Grundwasser aus dem Unterkeuper/ Oberen Muschelkalk beeinflusst wird (Fall d, siehe oben). Das Rohr EWS 6-1 müsste dagegen eine Undichtigkeit im oberen Abschnitt aufweisen, über die das Sondenrohr hydraulisch an das Grundwasser des Gipskarst (km2) oder des Schilfsandstein (km3) angebunden ist.

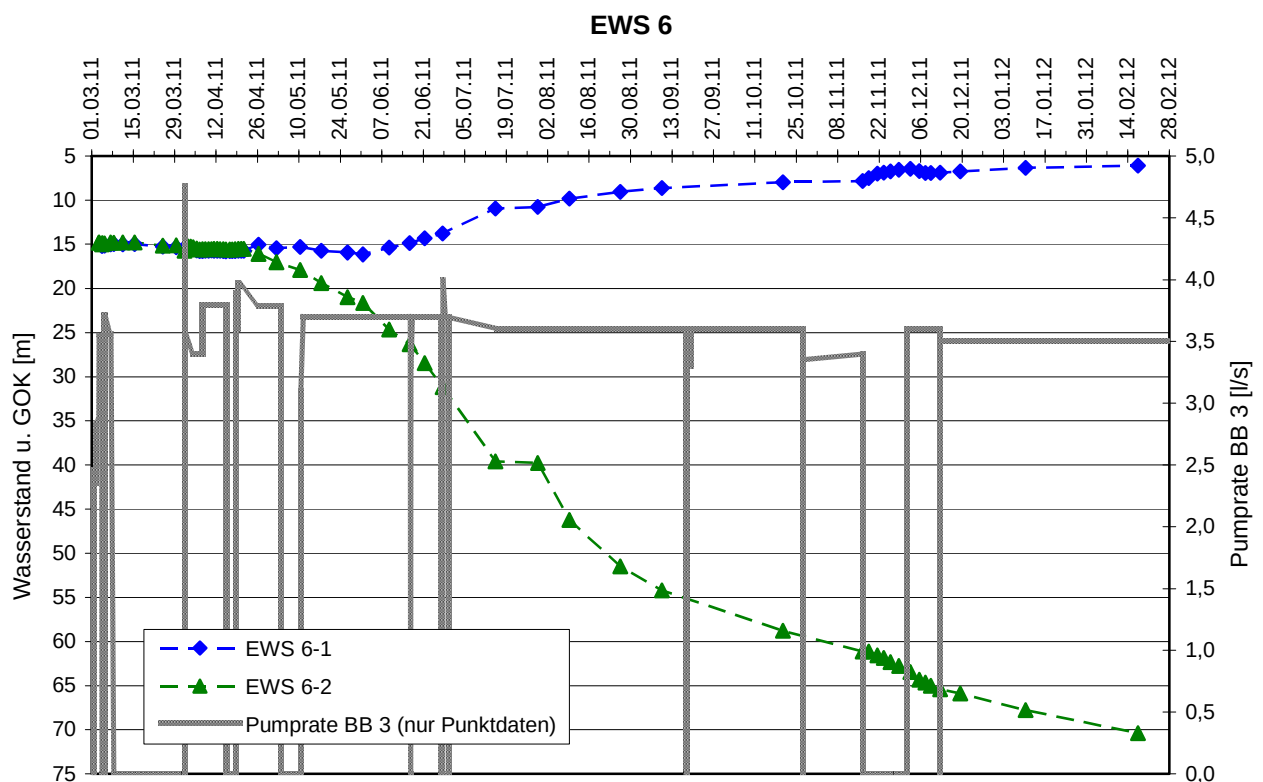


Abb. 6.12: Wasserstand in den Erdwärmesonderrohren EWS 6-1 und EWS 6-2 vom 03.03.2011 bis 17.02.2012.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Wassermengen, die während der annähernd zweijährigen Beobachtungsdauer vom April 2010 bis Februar 2012 aus den EWS-Rohren in den Untergrund übergetreten sind, je EWS-Rohr bei maximal ca. 35 l liegen (EWS 2-3 und EWS 6-2, ermittelt über den Rohrquerschnitt und die abgesunkene Wassersäule von max. ca. 70 m). In den meisten Rohren lagen die Wasserverluste ganz erheblich unter diesem Maximalwert. Da die Wasserstände in den EWS-Rohren mehrheitlich in den letzten Monaten deutlich langsamer abfielen als in der Anfangsphase, werden die Übertrittsmengen in der Zukunft deutlich geringer sein. Die Messungen belegen somit, dass die Erdwärmesonden bzw. die nachträglich verpressten Ringräume als weitestgehend abgedichtet betrachtet werden können.

6.3 Hydrochemie und Isotope

Vor, während und in den ersten Wochen nach dem Verpressen der Erdwärmesonden wurden alle Sondenrohre mit Wasser gefüllt und permanent in diesem Zustand gehalten. Dadurch wurde ein Einengen bzw. Zusammendrücken der EWS-Rohre aufgrund des Gebirgs- und Quelldrucks verhindert und somit der weitere Zugang für (Temperatur-) Messungen in den Rohren gewährleistet. Zum Auffüllen wurde sowohl Wasser aus dem Hydranten (Trinkwasser aus dem Versorgungsnetz der Stadt Staufen) als auch das in der EKB 2 geförderte Wasser (aus dem Oberen Muschelkalk und Unterkeuper) verwendet.

In der Zeit vom 29.04. bis 08.06.2010 wurde das in den Erdwärmesondenrohren stehende Wasser mehrfach ausgeblasen, beprobt und auf die hydrochemische und isotopische Zusammensetzung analysiert. Anhand der Ergebnisse wurde versucht, die Wässer mit denen in den vier erbohrten Grundwasserleitern Schilfsandstein (km2, Stuttgart-Formation), Gipskeuper (Gipskarst km1, Grabfeld-Formation), Unterkeuper (kuE, Erfurt-Formation) und Oberer Muschelkalk (moM, Meißner-Formation) in Beziehung zu setzen und so Rückschlüsse auf die Herkunft der Wässer in den EWS-Rohren zu ziehen.

Eine Zuordnung anhand der Inhaltsstoffe gelang nicht. Dies lag zum einen daran, dass die Wässer in den EWS-Rohren hydrochemisch z. T. sehr stark durch aus dem Injektionsgut frei gesetzte Ionen beeinflusst waren. Andererseits zeigte sich, dass die Wässer der EWS-Rohre teilweise stark durch die Wässer beeinflusst waren, mit denen die Rohre während und nach der Injektionsmaßnahme befüllt wurden.

7 Zusammenfassung

Die Hebungsfiguren wurden seit Januar 2010 fortgeschrieben. Sie zeigen, dass die Hebungsgeschwindigkeit seit Beginn der Abwehrmaßnahmen im September 2009 (Dauerpumpmaßnahme, Verpressen der Erdwärmesondenbohrungen) bis Januar 2012 nahezu linear abnimmt.

Die Messungen belegen für den Zeitraum Mai 2008 bis Januar 2012 einen absoluten Hebungsbetrag von insgesamt 35 cm im Bereich der Rathausgasse (Messpunkt 42). Hinzu kommt ein weiterer Betrag von einigen Zentimetern für den Zeitraum zwischen Abschluss der Erdwärmesonden - Bohrarbeiten (September 2007) bis Mai 2008. Die maximale Hebungsgeschwindigkeit lag anfangs bei rd. 11 mm/Monat und hat sich zwischenzeitlich (Januar 2012) auf knapp über 4 mm/Monat reduziert. Der Hebungsprozess (Volumenzunahme des Hebungskörpers) hat sich im Zentralbereich bisher um rd. 62 % verlangsamt, mit weiter rückläufiger Tendenz.

Die Beobachtungen belegen die Wirksamkeit der Abwehrmaßnahmen. Durch sie konnte verhindert werden, dass weiteres Grundwasser in den quelfähigen Gebirgsabschnitt aufsteigt. Der Quellvorgang dürfte noch so lange anhalten, bis das in das ehemals trockene Gebirge eingedrungene Grundwasser aufgezehrt ist.

Die Absenkmaßnahme wurde durch die Errichtung und Inbetriebnahme (April 2011) eines weiteren Brunnens (BB 3) in ihrem Wirkungsgrad optimiert und abgesichert.

Der Bohrpunkt der BB 3 liegt in der Kirchstraße und damit in südöstlicher Verlängerung der in den EWS 1 bis 7 gemessenen Bohrspuren. Die Bohrarbeiten für BB 3 begannen nach Einrichten des Bohrplatzes am 04.11.2010 und waren am 29.03.2011 abgeschlossen. Die Bohrung erfolgte überwiegend im Vollbohrverfahren. Zur Untersuchung der geologischen Schichtenfolge wurde in verschiedenen Bohrabschnitten auf ein Kern gewinnendes Bohrverfahren umgestellt.

In der BB 3 wurden geometrische Größen wie Neigung und Richtung (Azimut) der Bohrung, Kaliber (Bohrlochdurchmesser) sowie Struktur der Bohrlochwandung (Schichtung, Klüfte, jeweils mit Orientierung) ermittelt. Des Weiteren wurden Profile der natürlichen Gammastrahlung (lithologische Differenzierung), Temperatur, elektrischen Leitfähigkeit sowie die vertikale Strömungsgeschwindigkeit des Wassers gemessen. Mit den drei letztgenannten Größen wurden Wasserzutritte (Tiefenlage und anteilige Menge) bestimmt. Der Hauptwasserzutritt wurde innerhalb der Erfurt-Formation (Unterkeuper) in etwa 116,0 bis 116,7 m u. GOK festgestellt.

Die ursprüngliche hydrogeologische Stockwerksgliederung (Neumagenschotter, Gipskarst, Erfurt-Formation (Unterkeuper)) wurde in der BB 3 durch Setzen von drei teleskopierten hinterzementierten Sperrverrohrungen aufrecht erhalten.

In das 122,2 m tiefe Bohrloch wurde bis 114,5 m u. GOK eine VA-Edelstahlverrohrung ($\varnothing$ 340 mm) eingebaut. Von der Endtiefe bis 113,6 m u. GOK wurde das Bohrloch in die Edelstahlverrohrung hinein aufgekiest. Der Ringraum wurde zwischen dem Sandgegenfilter (von 114,5 bis 113,7 m u. GOK) bis ca. 2 m u. GOK hinterzementiert. Die Brunnenbohrung BB 3 erschließt die Dolomitregion der Erfurt-Formation (Unterkeuper) zwischen 114,5 und 122,2 m u. GOK.

Die in der BB 3 angetroffene Schichtenfolge entspricht unter Berücksichtigung des Schichteinfallens von 45 - 50° nach Nordnordwesten der mit der EKB 2 verifizierten Abfolge im Bereich des Erdwärmesondenfeldes. Schichtlagerungsbedingt fehlt die Stuttgart-Formation (Schilfsandstein) in der BB 3. Der Obere Gipsspiegel wurde in der BB 3 bei 18,5 m u. GOK, der Obere Anhydritspiegel bei 73,5 m u. GOK festgelegt. Der Untere Anhydritspiegel liegt bei 105,75 m u. GOK, der Untere Gipsspiegel bei 112,1 m u. GOK. Der sulfatführende Gebirgsabschnitt wird von Gipsauslaugungsgesteinen über- und unterlagert.

Seit September 2009 erfolgten aus der EKB 2 längere Entnahmephasen im Rahmen hydraulischer Tests (LGRB 2010). Seit dem 04.11.2009 wird aus der im Unterkeuper (Erfurt-Formation) und im Oberen Muschelkalk zwischen 145,2 und 163,0 m u. GOK (Endtiefe) als Brunnen ausgebauten Bohrung EKB 2 mit Ausnahme von einigen technisch bedingten Pumpspausen kontinuierlich Grundwasser entnommen. Seit dem 18.04.2011 erfolgt aus den beiden Entnahmestellen EKB 2 und BB 3 ein gemeinsamer Dauerabsenkbetrieb, der nur durch einige kurzzeitige Ausfälle der Pumpen unterbrochen wurde. Die Grundwasserstände, Entnahmeraten und der Leitparameter elektrische Leitfähigkeit werden kontinuierlich registriert, die digital erfassten Parameter werden online übermittelt.

Im Zeitraum zwischen Dezember 2009 und Mai 2010 sowie zwischen November 2010 und März 2011 blieb der Grundwasserstand in der EKB 2 trotz einer Erhöhung der Pumprate von ca. 1,35 l/s auf ca. 2,35 l/s annähernd gleich und lag meist zwischen ca. 128 und 132 m u. GOK. Dies wird darauf zurückgeführt, dass es durch die Dauerentnahme zu Freispülvorgängen im Kluftgrundwasserleiter kam. Sie wurden möglicherweise durch das zwangsläufig wiederholte Anfahren der Pumpe und der damit verbundenen kurzzeitigen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers im näheren Umfeld der EKB 2 begünstigt.

Seit Beginn des gemeinsamen Dauerabsenkbetriebs (18.04.2011) werden aus der EKB 2 nahezu kontinuierlich 2,1 - 2,2 l/s, aus dem Brunnen BB 3 3,3 - 3,8 l/s entnommen. Durch die Überlagerung der beiden Absenkbereiche wird der Druckwasserspiegel in der EKB 2 auf 131 - 137 m u. GOK, in der BB 3 auf 102 - 107 m u. GOK abgesenkt.

Die elektrische Leitfähigkeit in der BB 3 ist Anfang März 2011 aufgrund des Einflusses der Bohrspülung noch stark erhöht. Seit Ende Juni 2011 ist die Leitfähigkeit in beiden Brunnen im Rahmen der Messgenauigkeit annähernd konstant. Dabei liegt sie bis zum 16.11.2011 im Grundwasser der EKB 2 immer um bis zu ca. 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ über dem Wert der BB 3 (Probenahmen und Analytik durch LGRB-Labor).

Die Grundwasserdruckverhältnisse im Umfeld der dauerhaft betriebenen EKB 2 und BB 3 wurden mit einem stark schematisierten hydraulischen Prinzipmodell für stationäre Verhältnisse numerisch simuliert. Die Überlagerung der beiden Absenktrichter der EKB 2 und der BB 3 führt im Bereich zwischen den beiden Entnahmestellen dazu, dass der Druckwasserspiegel im Sondenfeld unter den derzeit in Quellung befindlichen Gebirgsabschnitt abgesenkt wird. Dies gilt auch für den Bereich der EWS 2, die im Abschnitt zwischen 140 und 105 m u. GOK verstürzt ist, so dass sie nicht mehr für eine nachträgliche Ringraumabdichtung aus den perforierten EWS-Schläuchen heraus zugänglich war. Der alleinige Betrieb einer der beiden Entnahmestellen würde nicht zu dem gewünschten Absenkziel führen.

Aufgrund der über den langen Pumpzeitraum weitgehend konstanten Grundwasserbeschaffenheit sowie der hohen Dauerergiebigkeit des Grundwasservorkommens ist von einem großen Einzugsgebiet der Entnahmefrünnen auszugehen.

Wie die unter natürlichen Bedingungen artesisch gespannten Grundwasserverhältnisse im Unterkeuper/Oberen Muschelkalk belegen, muss von einem orographisch hoch gelegenen Einzugsgebiet ausgegangen werden. Hierfür kommen insbesondere die in der Staufen-Sulzburger Vorbergzone ausstreichenden höher gelegenen Muschelkalk- und Buntsandsteinflächen sowie der östlich anschließende Grundgebirgsrahmen in Betracht. Das Grundwasser im Muschelkalk und Buntsandstein folgt dem nordnordwestlichen Schichteinfallen und gelangt somit in den Einzugsbereich der Pumpmaßnahme. Als hydraulisch wirksam anzunehmen sind außerdem die Störungselemente der Hauptverwerfung und die senkrecht dazu verlaufende Rote Berg Störung, in deren südöstlicher Verlängerung eine prägnante Geländemulde anschließt. Demzufolge wird bei der langen Pumpdauer erwartungsgemäß ein zunehmender Anteil einer Jungwasserkomponente aus diesem östlich der Brunnen

liegenden Einzugsgebiet beigezogen. Dies deutet sich auch bei Veränderungen im Pumpregime in den beobachteten Druckreaktionen des Wasserstandes der Weiherhofquellen an. Eine durch den Dauerpumpbetrieb aus dem tief liegenden Grundwasserleiter des Unterkeupers verursachte zusätzliche Erdfallgefahr wird in Anbetracht der vergleichsweise geringen ausgetragenen Sulfatfracht nicht gesehen. Andererseits ist seit langem bekannt, dass im Altstadtgebiet von Staufen auf Grund der allgemeinen Baugrundsituation (unterschiedlich setzungsfähige Deck- bzw. Verwitterungsschichten, auslaugungsbedingte Hohlräume im oberflächennahen Gipskarst, Auffüllungen etc.) allfällige Schadensbilder, insbesondere Setzungserscheinungen, grundsätzlich zu erwarten und auch tatsächlich eingetreten sind.

Nach einem überschlägigen Bilanzierungsansatz wurden seit Pumpbeginn bis zum 01.02.2012 aus der EKB 2 und der BB 3 insgesamt ca. 33 m³ Gips ausgetragen. Bei einer stark vereinfachenden Annahme einer flächenhaften, schichtgebundenen Sulfatlösung entspricht die Lösung von 33 m³ Gips auf einer Fläche von ca. 150 x 150 m einer heraus gelösten Schicht von lediglich ca. 1½ mm Dicke.

Zur Messung der vertikalen Temperaturverteilung sowie zur Überwachung der zeitlichen Temperaturentwicklung wurden in den Erdwärmesonden die Temperaturmessungen fortgeführt (vgl. LGRB 2010). Die durch wiederholte geodätische Messungen nachgewiesene Verlangsamung des Hebungsprozesses zeichnet sich bisher nicht in einer signifikanten Abnahme der Temperaturen im Bereich der positiven Temperaturanomalie ab. Offensichtlich reagiert das Temperatursystem stark verzögert, da die Wärme, die bei der exothermen Reaktion (Umwandlung von Anhydrit in Gips) frei wird, nur langsam konduktiv durch das Gestein abgeführt werden kann. Bei zusätzlichem Wärmeabtransport durch Grundwasser wäre eine schnellere Abkühlung des Gebirges zu erwarten.

Seit April 2010 wurden Wasserstandsmessungen in den Erdwärmesondenrohren durchgeführt. Sie dienen dazu, das Ausmaß und die Ursachen der Wasserstandsschwankungen insbesondere während der Pumpmaßnahmen in der EKB 2 und der BB 3 näher zu untersuchen und damit gegebenenfalls Hinweise auf hydraulische Verbindungen zwischen den Entnahmebrunnen und den Erdwärmesonden sowie zum hydraulischen Gesamtsystem zu erhalten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Wassermengen, die während der annähernd zweijährigen Beobachtungsdauer vom April 2010 bis Februar 2012 aus den EWS-Rohren in den Untergrund übergetreten sind, je EWS-Rohr bei maximal ca. 35 l liegen. In den meisten Rohren lagen die Wasserverluste ganz erheblich unter diesem



Maximalwert. Da die Wasserstände in den EWS-Rohren mehrheitlich in den letzten Monaten deutlich langsamer abfielen als in der Anfangsphase, werden die Übertrittsmengen in der Zukunft deutlich geringer sein. Die Messungen belegen somit, dass die Erdwärmesonden bzw. die nachträglich verpressten Ringräume als weitestgehend abgedichtet betrachtet werden können.

8 Literatur

COOPER, H.H. JR., JACOB, C.E. (1946): A generalized graphic method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. - Am. Geophys. Union Transactions, Vol. 27, No. 4, 526-534.

FURTAK, H., LANGGUTH, H.R. (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. - Mem. IAH-Congress, 1965, VII: 86-95, 5 Fig.; Hannover.

GLA (1992): Vorl. Geol. Kt. Baden-Württ., 1 : 25 000, Bl. 8112 Staufen im Breisgau, Beiheft, Freiburg i. Br.

GEOSENS (2011a): Bericht, 10.058a, Pumpversuch in BB 3, Staufen. 11.03.2011, Ebringen.

GEOSENS (2011b): Bericht, 10.058a, 2. Pumpversuch in BB 3, Staufen. 26.04.2011, Ebringen.

STRAYLE, G., STOBER, I., SCHLOZ, W. (1994): Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen.- Informationen 6, 65 S., 11 Tab., 144 S. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br.

LGRB (2010): Geologische Erkundungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Az. 94-4763//10-563 vom 01.03.2010, 304 S., 159 Abb., 37 Tab., 25 Anl., Freiburg. (http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/home/schadensfall_staufen_bericht).

TERRATEC (2011): Bohrlochmessungen in der Bohrung BB 3 in Staufen, 13. Jan. 2011/ 8.-10. März 2011. 12 Seiten mit Anlagen, Heitersheim.

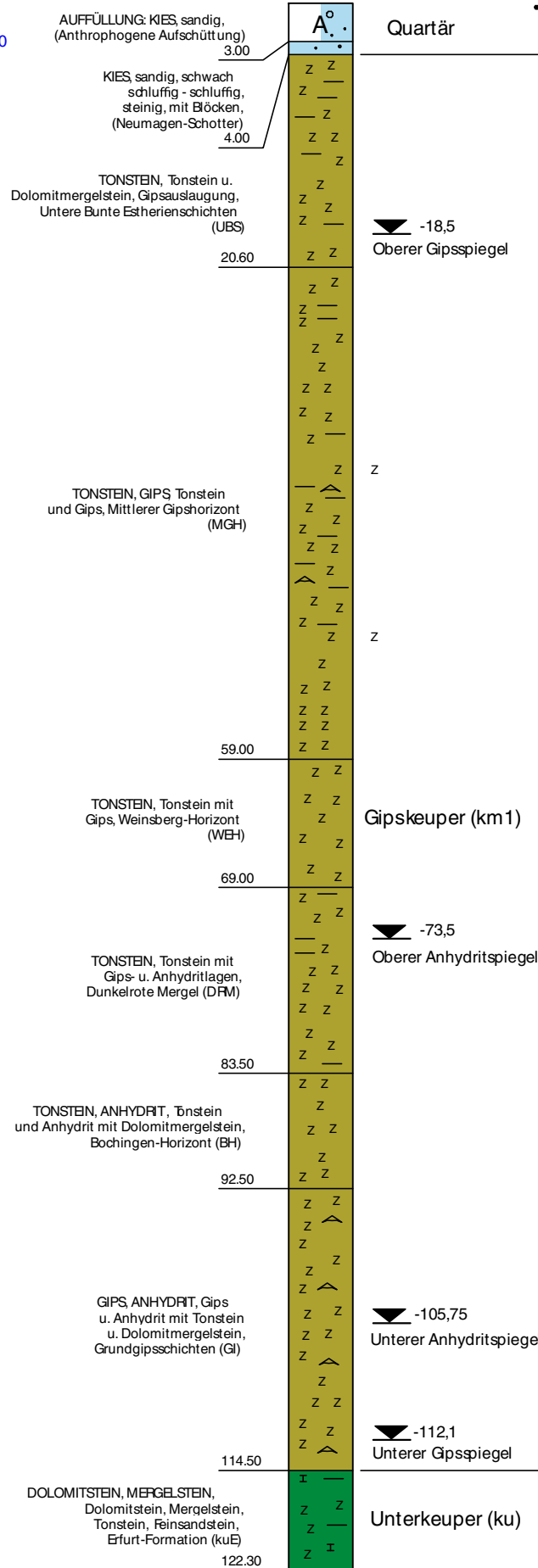
THEIS, C.V. (1935): The relation of lowering the piezometric surface and the rate of duration of discharge of a well using groundwater storage.- Am. Geophys. Union Transactions, Vol. 16, No. 4, 519-524.

BB3

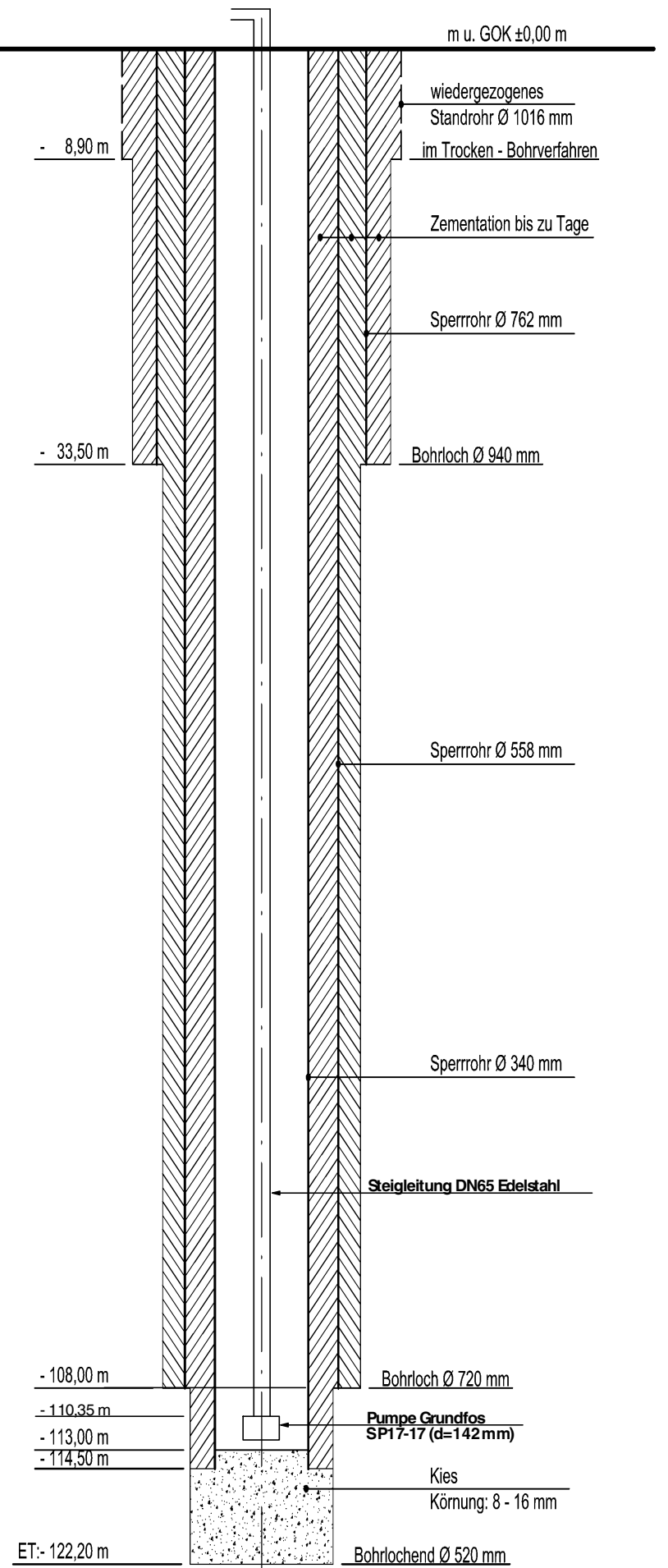
286,66 mNN

Schichtwasser  -3,50

beeinflusst durch
Pumpbetrieb in der EKB2  -12,44
(01.12.11)



Ausbauplan BB3



Ingenieurgruppe
Geotechnik GbR
Lindenbergstr. 12
79199 Kirchzarten
Tel.: (07661) 93 91 - 0
Fax: (07661) 93 91 - 75

Zeichnerische Darstellung von Kernbohrungen nach DIN 4023

Projekt: Hebungen
im Stadtgebiet von
Staufen i. Br.



Az.: 94-4763//12_2487
02. Mai 2012

Maßstab:
M_H: 1 : 500

Anlage 3.1

BOHRPROFIL

Bezeichnung:	BB 3	TK 25 Nr.:	8112	Archiv-Nr.:	301
Projekt:	Hebung Staufen	Blatt:	Staufen		
Lage:	Kirchstrasse	Koordinaten (nach Gauss-Krüger)			
		R:	3405 267,5	H:	5305 597,0
Gemeinde:	Staufen	Höhen (nach Einmessung):			
Teilort:		Ansatzpunkt:	286,66	m ü. NN	
Kreis:	Breisgau-Hochschwarzwald	Messpunkt:		m ü. NN	
Geol. Aufnahme:	12.11.2010 - 15.03.2011	Ruhewasserspiegel:	k. A.	m u. A.	
Bearbeiter/in:	Dr. Franz			m ü. NN	
Bohrfirma:	Anger's Söhne			m ü. NN	
Bohrzeit:	04.11.2010 29.03.2011			m ü. NN	
Bohrverfahren (m u. A./Ø mm):		Endteufe:	122,30	m u. A.	
0 - 7 m	Meißelbohrung				
7 - 13 m	Kernbohrung				
13 34,6 m	Meißelbohrung				
34,6 54,7 m	Kernbohrung				
54,7 111,6 m	Meißelbohrung				
111,6 122,3 m	Kernbohrung				
Filterstrecken (m u. A./Ø mm):					
Abdichtungen (m u. A.): 0 - 114,50					
Bemerkungen: Wasser angebohrt bei 3,50 m u. GOK					

Kurzprofil (mit stratigr. Deutung):

- 0 – 4 m Quartär (Neumagen-Schotter)
- 114,50 m Grabfeld-Formation (kmGr)
 - 20,6 m Untere Bunte Estheriensichten (kmUBE) [nach LOG]
 - 59,00 m Mittlerer Gipshorizont (kmMGH)
 - 69,00 m Weinsberg-Horizont (kmWEH)
 - ca. 83,50 m Dunkelrote Mergel (kmDRM)
 - ca. 92,50 m Bochingen-Horizont (kmBH)
 - 114,50 m Grundgipsschichten
- 122,30 m Erfurt-Formation (kuE)

Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):****Teufe** (m u. A.): Gesteinsart (Haupt-, Nebengemengeteile usw.), Farbe, Gefüge Verwitterungsgrad, Konsistenz, Fossilinhalt, Klüftung u. a.

- | | | | | |
|---|---|-------|---|---|
| 0 | – | 4 | m | Fein- bis Grobkies, stark sandig, schwach schluffig bis schluffig, Steine und Blöcke, braun |
| | – | 5 | m | Schlufftonstein, grünlichgrau und dunkelgrau, plastifiziert, steif bis halbfest |
| | – | 6 | m | Schlufftonstein, grau, mit GAR-Lagen, hellgrau, stark plastifiziert, weich |
| | – | 7 | m | Schlufftonstein, grünlichgrau mit GAR, kalkig, weißgrau bis hellrosa, halbfest bis fest |
| | | | | Kernbohrung: |
| | – | 7,33 | m | Dolomitstein, mikritisch, grünlichgrau |
| | – | 7,38 | m | Schlufftonstein, graugrün, stark plastifiziert, weich, mit Dolomitsteinbrocken bis 4 cm wie zuvor |
| | – | 7,40 | m | Schlufftonstein, braunrot, plastifiziert, weich bis steif |
| | – | 7,52 | m | Schlufftonstein, grünlichgrau, nesterweise GAR, kalkig |
| | – | 7,61 | m | Schlufftonstein, braunrot, grünlichgrau marmoriert |
| | – | 7,67 | m | Schlufftonstein, rotbraun |
| | – | 7,83 | m | Schlufftonstein, grünlichgrau, untere 10 cm mit GAR und Dolomitstein, grau |
| | – | 7,90 | m | Dolomitstein, mikritisch, löchrig – porös, hell bräunlichgrau und hell rötlichbraun |
| | – | 8,10 | m | Schlufftonstein, dunkelgrau und rotbraun, weich, mit Dolomitsteinbrocken wie zuvor, zerbohrt |
| | – | 8,30 | m | GAR-Calcit, grobkristallin, hellgrau bis hellrot, vermischt mit Schlufftonstein, plastifiziert |
| | – | 8,41 | m | Dolomitstein, mikritisch, schluffig, ? feinsandig, hell bräunlichgrau und hell rötlichbraun; Schichtfallen ca. 15° |
| | – | 9,00 | m | Schlufftonstein, überwiegend grau bis grüngrau, rotbraun marmoriert, von 8,60 – 8,67 m GAR-Calcit, grobkristallin, hellgrau bis hellrot |
| | – | 9,10 | m | Schlufftonstein, dunkelgrau, mit GAR, körnig, kalkig, grau |
| | – | 9,35 | m | Schlufftonstein, rotbraun mit GAR, kalkig, hellbeige |
| | – | 9,85 | m | Schlufftonstein, dunkelgrau, mit GAR, körnig, kalkig, grau |
| | – | 10,00 | m | GAR-Calcit, grobkristallin, porös, grau bis dunkelgrau, brockig zerlegt |
| | – | 10,25 | m | Schlufftonstein, dunkelgrau, brecciös, mit feinen weißen Dolomit-Äderchen |
| | – | 10,44 | m | GAR-Calcit, grobkristallin, porös, grau bis dunkelgrau, mit schwarzen Schlufftonsteinlagen; Schichtfallen ca. 15 - 20° |

Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):**

- 10,80 m Schlufftonstein, schwarz, durchsetzt mit GAR, kalkig, überwiegend zerbohrt
- 10,98 m Dolomit, gekröseartig, schmutzig bräunlichgrau bis gelblichgrau, durchsetzt mit Schlieren und Drusen aus Calcit, weiß und Tonstein-Flasern, dunkelgrau-schwarz
- 11,00 m Schlufftonstein, schwarz, durchsetzt mit GAR, kalkig, grobkristallin
- 11,34 m GAR-Calcit, grobkristallin, porös, grau bis dunkelgrau
- 11,65 m Schlufftonstein, dunkelgrau, olivfarbene Beläge auf Trennflächen, kleinstückig zerbohrt
- 12,15 m Dolomitstein, mikritisch, hellgrau, überwiegend hellgelblich verwittert, geklüftet, rostbraune Kluftbeläge, z.T. offene Klüfte mit Calcitkristall-Besatz, stückig zerbohrt, ab 12,00 m kleinstückig zerbohrt
- 12,24 m GAR-Calcit, wie oben dunkelgrau
- 12,35 m Schlufftonstein, dunkelgrau mit GAR-Calcit wie zuvor
- 12,86 m Dolomitstein, tonig, dunkelgrau, ab ca. 12,65 m mit Schlufftonstein-Lagen durchsetzt, kleinstückig zerbohrt, einzelne Brocken bis 8 cm
- 13,00 m Schlufftonstein, grau mit GAR-Calcit wie oben [die Meißel-Proben, die bei der Aufweitung des Bohrlochs genommen wurden, enthielten ca. 20% düster rotbraunen Schlufftonstein
Meißelbohrung:
- 14 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, mittel- bis dunkelgrau (70%) und düster rotbraun (30%)
- 15 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, mittel- bis dunkelgrau (75%) und düster rotbraun (20%), GAR, calcitisch, weiß (5%)
- 16 m Schlufftonstein, dolomitisch, mittel- bis dunkelgrau (75%) und düster rotbraun (25%), vereinzelt GAR, calcitisch, weiß
- 17 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, dunkel rotbraun (60%) und mittel- bis dunkelgrau (35%), Dolomitstein, tonig, hellgrau, einzelne dünne rote Lagen (5%)
- 18 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, mittel- bis dunkelgrau (40%) und rotbraun (30%); Dolomitstein, tonig, hellgrau (30%);
- 19 m Schlufftonstein, mittel- bis dunkelgrau, z.T. schwach rot gefleckt (75%); Schlufftonstein, rotbraun (15%); Dolomitstein, tonig, grau (10%); vereinzelt Gips, feinkörnig, weiß
- 20 m Dolomitmergelstein bis Dolomitstein, tonig, grau (50%); Schlufftonstein, mittel- bis dunkelgrau (40%); Gips, feinkörnig, weiß (10%); vereinzelt Tonstein, rotbraun

Bezeichnung/Projekt:

Az.: 94-4763//12_2487

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

- 21 m Schlufftonstein, mittel- bis dunkelgrau (50%) und schwarz (5%); Schlufftonstein, rotbraun (30%), Gips, feinkörnig, z.T. Fasergips, weiß (15%); vereinzelt Dolomitstein, feinbrecciös, zahlreiche schwarze Vertebratenreste; 1 großes Stück Fasergips mit Tonzwischenlagen, grau
- 23 m Gips, weiß (z.T. körnig, kleinknollig u. Fasergips), z.T. mit Tonlagen, dunkelgrau (60%); Schlufftonstein, mittel- bis dunkelgrau, feingeschichtet (40%)
- 25 m Gips, weiß (z.T. körnig, kleinknollig u. Fasergips, z.T. brecciös), z.T. mit Tonlagen, dunkelgrau (70 - 80 %); Schlufftonstein, mittel- bis dunkelgrau, feingeschichtet (20 - 30%)
- 25 m Gips, weiß (z.T. körnig, kleinknollig u. Fasergips), z.T. mit Tonlagen, dunkelgrau (60%); Schlufftonstein, mittel- bis dunkelgrau, feingeschichtet (40%); Dolomit
- 28,5 m Schlufftonstein, schwach karbonatisch, dunkelgrau, lagenweise Gips und Faserdolomit
Röntgenbeugungsuntersuchung der Probe 23,5-24,5 m ergab in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit: Dolomit, **Gips**, Calcit, wenig Tonminerale, sehr wenig Quarz, **kein Anhydrit**; Gesamtkarbonatgehalt 49%
- 29,5 m Schlufftonstein, grau mit Gips in kleinen Knötchen (bis 2 mm)
- 30,5 m Wechsellagerung aus Schlufftonstein, dunkelgrau (60%) und Gips, weiß (40%)
- 31,5 m Schlufftonstein wie bis 29,5 m (50%) und Wechsellagerung wie bis 30,5 m (50%)
- 34,5 m Schlufftonstein, dunkelgrau (85-90%), mit Lagen und Knoten aus Gips (10-15%)
Kernbohrung:
- 35,12 m Schlufftonstein, dunkelgrau, einzelne Gipslagen bis 0,5 cm, zahlreiche feine Gips-gefüllte Risse und Klüfte bis 1 cm
- 35,77 m Wechsellagerung von Gips (Lagen 1 – 5 cm) und Schlufftonstein, dunkelgrau, zahlreiche regellos verteilte Gipsrisse (bis 5 mm)
- 35,85 m Schlufftonstein, dunkelgrau mit Gips, z.T. in welligen bis verfalteten Lagen
- 35,95 m Schlufftonstein, dunkelgrau mit kleinknolligem Gips
- 36,74 m Wechsellagerung von Gips und Schlufftonstein, 36,50 – 36,57 m überwiegend Gips; Schichtfallen ca. 40°
- 36,93 m Schlufftonstein, dunkelgrau, vereinzelt Gipslagen bis max. 3 mm (besonders in oberen 4 cm)
- 37,00 m Gips, kleinknollig, grau
- 37,30 m Schlufftonstein, dunkelgrau mit knollig-flaserigem Gips, kleinstückig zerbohrt (Kerngewinn ca. 20%)

Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):**

- 37,47 m Gips, kleinknollig, grau
- 37,80 m Schlufftonstein, dunkelgrau mit knollig-flaserigem Gips; Kernstücke 2 – 5 cm
- 38,35 m Schlufftonstein, dunkelgrau, stückig zerbohrt; soweit erkennbar wenig knollig-flaseriger Gips (geschätzt ca. 10%)
- 38,60 m Schlufftonstein, dunkelgrau, wenig knollig-flaseriger Gips; Kernstücke 5 – 10 cm
- 38,85 m Gips, tonig, geschichtet; Schichtfallen ca. 40 – 50°
- 39,05 m Schlufftonstein, dunkelgrau, wie bis 38,35 m
- 39,40 m Schlufftonstein, dunkelgrau, mit Gips in Knollen und Fasern (ca. 25%), ab 39,15 m stückig zerbohrt
- 39,58 m Gips, tonig, knollig, hellgrau
- 40,15 m Gips, knollig bis massig, hellgrau bis weiß, mit kleinen schwarzen Tonfasern
- 40,90 m Schlufftonstein, dunkelgrau, durchsetzt mit Rissen (parallel und senkrecht zur Schichtung), mit Fasergips bis 1 cm (Zahl und Dicke nach unten abnehmend); ab 40,60 m vermehrt Einschaltung feinstknolliger Gipslagen (Schichtfallen 50 – 60°)
- 41,11 m Schlufftonstein, mit Gipsknollenlagen, oben bis 3 cm, unten bis 1,5 cm dick
- 41,20 m Schlufftonstein, lagenweise dolomitisch, grau bis dunkelgrau, eine Fasergipslage (2 cm dick bei 41,15) und feine Gipsklüfte
- 41,30 m Schlufftonstein, dunkelgrau, durchsetzt mit Rissen (parallel und senkrecht zur Schichtung)
[41,00 - 41,30 m in der nächsten Kernkiste Zement]
- 42,06 m Tonstein, grau bis dunkelgrau, lagenweise Gipsknollen; Gipsklüfte bis 4 mm
- 42,24 m Gips, tonig, massig, nach unten kleinknollig
- 42,44 m Tonstein, dunkelgrau mit Gipsknollen, weiß bis hellrosa
- 42,59 m Gips, weiß bis hellrosa, einzelne dunkelgraue Tonfasern
- 43,00 m Gips, hellgrau mit Tonlagen, dunkelgrau, stark wellig (enterolithisch); Schichtung senkrecht
- 44,26 m Tonstein, dunkelgrau, z.T. polyedrisch zerfallen, z.T. (durch Bohrvorgang) schwach plastifiziert; zahlreiche weiße Gipsklüfte, bei 43,24 - 43,25 m und 43,82 - 43,83 m Gipslagen, weiß; ab 44,00 m zerbohrt, Gips schmutzig hellrosa (Kerngewinn ca. 20%)
- 44,75 m Wechsellagerung aus Tonstein, dunkelgrau und Gips, hellgrau; Schichtfallen 40 – 60°
- 45,00 m Tonstein, grau, mit kleinknolligem Gips durchsetzt; Gipsanteil ca. 25%

Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):**

- 45,25 m Tonstein, grau, rotbraun marmoriert, mit kleinknolligem Gips durchsetzt; Gipsanteil ca. 20%
- 45,40 m Tonstein, rotbraun, mit kleinknolligem Gips durchsetzt, einzelne dünne Gipslagen und Gipsklüfte; Gipsanteil ca. 20%
- 45,70 m Wechsellagerung aus Gips, hellgrau und Tonstein, grau, bis 45,60 m einzelne rote Lagen bis 2 cm Dicke
- 46,49 m Tonstein, dunkelgrau, zahlreiche regellose Gipsklüfte, weiß bis hellrosa
- 46,64 m Gips, massig, weiß bis hellgrau
- 46,73 m Gips, fein tonflaserig, bräunlichgrau
- 46,98 m Gips, tonig, hell bräunlichgrau
- 47,33 m Wechsellagerung aus Tonstein, dunkelgrau und Gips, mehrere dünne Fasergipslagen und Gipsklüfte, Schichtfallen ca. 40°, Gipsanteil ca. 20%
- 47,37 m Gipsknollen, hellrosa
- 48,50 m Tonstein, dunkelgrau, mit einzelnen Gipsknollen, hellrosa, Fasergipslagen und Gipsklüften, weiß
- 48,69 m Gips, massig, weiß bis zartrosa, einzelne tonig belegte, steilstehende Klüfte (0,5 - 2 mm breit)
- 49,24 m Tonstein, dunkelgrau, bis 48,85 m rotbraun marmoriert, mit einzelnen Gipsknollen, hellrosa, Fasergipslagen und Gipsklüften, bei 49,10 m z.T. mit Horizontal-Harnischen
- 49,43 m Gips, hellgrau, ab 49,36 m knollig mit graubraunen Tonfasern
- 50,00 m Tonstein mit Gips-Knollen und Fasern, von 49,79 - 49,88 m wellig verfaltet (enterolithisch), mehrere Gipsklüfte (45° und 75°) und Fasergipslagen (meist um 1 mm, selten bis 5 mm dick)
- 50,63 m Gips, kleinknollig, tonig (nach unten etwas zunehmend); 50,00 - 50,25 m steil stehende Gipsklüfte, weiß (1 cm breit), mehrere Gipsklüfte (45° und 90°), zahlreiche „lystrische“ Haarrisse mit Gips
- 50,75 m Gips, lagig, wellig, hellrosa mit Tonstein-Lagen, dunkelgrau
- 51,23 m Tonstein, dunkelgrau, einzelne Gips-Lagen, zahlreiche regellose Gips-Klüfte
- 51,36 m Gips, nach unten zunehmend tonig, feinflaserig, grau, Schichtfallen: 45°
- 51,50 m Gips, dicht, massig, hellgrau
- 51,59 m Gips, tonig, feinflaserig, grau
- 52,00 m Tonstein, grau, leicht grünstichig, einzelne Gipsknollen und Fasergipslagen sowie wellige, z.T. vertikale Gipsklüfte

Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):**

- 52,26 m Wechsellagerung aus Gips, hellgrau und Tonstein grau; zahlreiche, regellose Gipsrisse, einzelne Fasergipsklüfte bis 4 mm
- 52,45 m Tonstein, dunkel grünlichgrau und düster rot marmoriert, mehrere Fasergips-lagen und –klüfte
- 53,03 m Tonstein, düster rot, ab 52,83 m dunkel grünlichgrau marmoriert, vereinzelte Fasergipslagen, rosa und –klüfte, weiß, 52,52 – 52,56 m wenig Gips in kleinen Knöllchen bis 3 mm
- 53,07 m Wechsellagerung aus Tonstein, grau und Gips, weiß
- 53,70 m Tonstein, dunkelgrau, vereinzelte Fasergipslagen, und –klüfte, weiß
- 53,78 m Gips, plattig, weiß, mit Tonstein-Zwischenlagen, dunkelgrau; im Gips Harnisch-striemung auf Schichtflächen
- 53,91 m Tonstein, dunkelgrau mit Gipsknollen und –fasern
- 53,94 m Gips, plattig, weiß, mit Tonstein-Zwischenlagen, dunkelgrau
- 54,70 m Wechsellagerung aus Tonstein, (grünlich)grau und Gips, weiß bis hellgrau, Gipsanteil (geschätzt): 40%; Schichtfallen: 45°
- 56 m Tonstein, grau (75 - 80%) und Gips, weiß bis hellgrau (20 - 25%)
- 57 m Tonstein, dunkelgrau (60%); Gips, tonig, hellgrau (30%); Gips, weiß (10%)
- 59 m Gips, tonig, hellgrau (50%); Gips, weiß (10%); Tonstein, dunkelgrau (40%);
- 61 m Tonstein, z.T. dolomitisch, dunkelgrau (75%); Gips, tonig, hellgrau (20%); Gips, weiß bis hellrosa (5%)
- 62 m Tonstein, z.T. dolomitisch, dunkelgrau (75%); Gips, tonig, hellgrau (20%); Gips, weiß bis hellrosa (5%), vereinzelt Dolomit, feingeschichtet, grau
- 63 m Tonstein, dunkelgrau (50%); Gips, weiß (50%)
- 64 m Gips, weiß und grau (70%); Tonstein, dunkelgrau (30%);
- 68 m Tonstein, dunkelgrau (60 - 70%); Gips, weiß und grau (30 - 40%)
- 69 m Tonstein, dunkelgrau (60%); Gips, hellrosa und grau (40%)
- 70 m Tonstein, rotbraun (60%); Tonstein, grau (20%); Gips, hellrosa und grau (20%)
- 71 m Tonstein, dunkel rotbraun (<90%); Gips, hellrosa und grau (<10%); vereinzelt Tonstein, dunkelgrau
- 72 m Tonstein, dunkel rotbraun (50%); Gips/Anhydrit, rosa (30%); Tonstein, dunkel-grau (20%)
- 73 m Tonstein, dunkel rotbraun (40%); Gips/Anhydrit, rosa (30%); Tonstein dolomi-tisch, dunkelgrau (30%); nach Röntgenanalyse: Anhydrit, Gips, Dolomit, Quarz

Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):**

- 74 m Tonstein, dunkel rotbraun (60%); Gips/Anhydrit, hellgrau (10%); Tonstein dolomitisch, dunkelgrau (30%)
- 76 m Tonstein, dunkel rotbraun (90%); Gips/Anhydrit, hellgrau (5%); Tonstein dunkelgrau (5%)
- 77 m Tonstein dunkelgrau (80%); Tonstein, dunkel rotbraun (15%); Gips/Anhydrit, hellgrau (5%)
- 79 m Tonstein dunkelgrau bis grauviolett (90%); Tonstein, dunkel rotbraun (5%); Anhydrit, hellgrau (5%)
- 80 m Tonstein dunkelgrau bis grauviolett (60%); Tonstein, dunkel rotbraun (40%)
- 81 m Tonstein, dunkel rotbraun bis dunkel rotviolett (60%); Tonstein, grau (25%); Anhydrit, weiß - grau, z.T. rot marmoriert (15%)
- 82 m Tonstein, dunkel rotbraun bis dunkel rotviolett (50%); Tonstein, grau, häufig mit mm-dicken roten Anhydritlagen (25%); Anhydrit, weiß - grau, z.T. rot marmoriert (25%)
- 83 m Tonstein, grau, häufig mit mm-dicken roten Anhydritlagen (40%); Tonstein, dunkel rotbraun bis dunkel rotviolett (30%); Anhydrit, weiß - grau (30%)
- 84 m Tonstein, grau, mit mm-dicken roten Anhydritlagen (50%); Anhydrit, weiß - grau (35%); Tonstein, dunkel rotbraun bis dunkel rotviolett (15%)
- 85 m Tonstein, feingeschichtet, grau (60%); Anhydrit, weiß - grau (35%); Tonstein, dunkel rotbraun bis dunkel rotviolett (5%)
- 86 m Anhydrit, weiß - grau (50%; nach Röntgenbefund wenig Gips); Tonstein, feingeschichtet, grau (50%); vereinzelt Tonstein, dunkel rotbraun bis dunkel rotviolett
- 87 m Anhydrit, weiß - grau (50%; nach Röntgenbefund wenig Gips); Tonstein, z.T. dolomitisch, feingeschichtet, grau (40%); Dolomitmergelstein bis Dolomitstein, tonig (10%); vereinzelt Tonstein, dunkel rotbraun bis dunkel rotviolett
- 88 m Anhydrit, weiß - grau (40%; nach Röntgenbefund wenig Gips); Tonstein, z.T. dolomitisch, feingeschichtet, grau (40%); Dolomitmergelstein bis Dolomitstein, tonig (20%); vereinzelt Tonstein, dunkel rotbraun bis dunkel rotviolett
- 89 m Anhydrit, weiß - grau (50%); Dolomitstein bis Dolomitmergelstein, grünlichgrau, z.T. mit schwarzen Pseudooden (25%); Tonstein, grau bis grünlichgrau (20%); Tonstein, dunkel rotbraun (5%)
- 90 m Anhydrit, weiß - grau, z.T. mit Horizontalharnischen (50%); Dolomitstein bis Dolomitmergelstein, hellgrau bis grünlichgrau (25%); Tonstein, grau bis grünlichgrau (20%); Tonstein, dunkel rotbraun (5%)

Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):**

- 91 m Tonstein, schwach dolomitisch, feingeschichtet, grau, mit Anhydrit-Klüften, weiß, z. T. hellrot (75%) und dunkel rotviolett (10%); Anhydrit, weiß - grau, z.T. mit winzigen Gips-Idioblasten (10-15%); Dolomitstein, hellgrau bis grünlichgrau (<5%)
- 92 m Tonstein, schwach dolomitisch, feingeschichtet, grau, mit Anhydrit-Klüften, weiß, z. T. hellrot (75%), Anhydrit, weiß - grau, z.T. mit winzigen Gips-Idioblasten (25%); vereinzelt Tonstein, rotviolett
- 93 m Tonstein, grau, vereinzelt grauviolett (60%); Tonstein, düster violett (15%); z.T. in feinschichtiger Wechsellagerung mit Anhydrit, weiß - grau, z.T. dunkelrot (25%)
- 94 m Anhydrit, z.T. tonig, weiß - grau, vereinzelt rot, mit winzigen Gips-Idioblasten (40%); z.T. in feinschichtiger Wechsellagerung mit Tonstein, grau (35%) und düster violett; Fasergipsklüfte, weiß (25%)
- 95 m Anhydrit, z.T. tonig, weiß - grau, z.T. mit winzigen Gips-Idioblasten (60%); z.T. in feinschichtiger Wechsellagerung mit Tonstein, grau (20%) und düster violett; Fasergipsklüfte, weiß (20%)
- 96 m Anhydrit, z.T. tonig, weiß - grau, z.T. mit winzigen Gips-Idioblasten (75%); z.T. in feinschichtiger Wechsellagerung mit Tonstein, grau, Fasergipsklüfte, weiß (25%)
- 98 m Gips/Anhydrit, z.T. tonig, hellgrau, vereinzelt hellrot, eben feingeschichtet, z.T. wellig verfaltet, winzige Gips-Idioblasten (60%), z.T. in feinschichtiger Wechsel-lagerung mit Tonstein, dolomitisch, grau (40%), vereinzelt dunkel rotviolett; Fasergips, weiß, in Lagen und auf Klüften (bis mehrere mm dick)
- 99 m Anhydrit, hellgrau, überwiegend massig, z.T. geschichtet mit dünnen Tonstein-lagen, wellig verfaltet, zunehmend Gips-Idioblasten (60%), Tonstein, dolomi-tisch, grau, vereinzelt mit roten Anhydrit-Einschlüssen (40%), vereinzelt dunkel rotviolett; Fasergips, weiß, in Lagen und auf Klüften (bis mehrere mm dick)
- 100 m Gips/Anhydrit, hellgrau, massig bis geschichtet, mit dünnen Tonsteinlagen, Gips-Idioblasten (50%), Tonstein, dolomitisch, grau (45%) und dunkel rotviolett bis grauviolett (5%); Fasergips, weiß und hellrosa, in Lagen und auf Klüften (bis mehrere mm dick)
- 102 m Gips/Anhydrit, hellgrau, massig bis geschichtet, mit dünnen Tonsteinlagen, Gips-Idioblasten (70%), Dolomitmergelstein, grau (30%); Fasergips, weiß, in Lagen und auf Klüften (bis mehrere mm dick)
- 103 m Gips/Anhydrit, z.T. tonig, grau, z.T. auf Schichtflächen sehr fein gesprenkelt (pseudoolithisch?), Fasergips, weiß 70%); Dolomitmergelstein, hellgrau (25%); Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau (5%); Gips/Anhydrit-Verhältnis 3:1

Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):**

- 105,75 m Gips, z.T. tonig, hellgrau bis braungrau, selten rot (80%); Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau, vereinzelt schwach dunkelrot gefleckt (10%); Dolomitmergelstein, hellgrau (10%); vereinzelt Tonstein, rotviolett bis dunkel rotbraun (Nachfall?); Gips/Anhydrit-Verhältnis 9:1
- 106 m Gips, z.T. tonig, z.T. grobkristallin, grau bis graubraun, selten hellrot (60%); Tonstein, grau, vereinzelt mit rotem Gips durchsetzt (20%); Tonstein, grauviolett bis rotviolett (20%, Nachfall); Gips/Anhydrit-Verhältnis 3:1 (Nachfall?)
- 107 m Gips, z.T. tonig, z.T. grobkristallin, grau bis graubraun (80%); Dolomitstein, grau bis hellbraun, z.T. mit Gips durchsetzt (10%); Tonstein, z.T. kalkig, grau (10%); Gips/Anhydrit-Verhältnis >95:<5
- 108 m Gips, z.T. tonig, z.T. grobkristallin, grau bis graubraun (60%); Tonstein, kalkig bis Tonmergelstein, grau (25%); Tonstein, grau, vereinzelt dunkel rotbraun (15%); Gips/Anhydrit-Verhältnis >9:<1
- 109 m Gips, kristallin, weiß, hellgrau und graubraun (70%); Dolomit, mikritisch, tonig, hellbeige bis grau (15%); Tonstein, dolomitisch bis Dolomitmergelstein, grau (10%); Tonstein, dunkel rotviolett (5%; Nachfall); Gips/Anhydrit-Verhältnis >95:<5
- 111 m Gips, kristallin, vereinzelt oolithisch, weiß und hellgrau bis graubraun (85%); Dolomit, mikritisch, tonig, hellbeige bis grau (10%); Tonstein, kalkig bis Tonmergelstein, grau (5%)
- 111,60 m Zement
- 111,72 m Gips, z.T. oolithisch, weiß bis hellgrau, selten rosa mit Dolomitstein, tonig, grau, wenig Dolomitmergelstein, dunkel braunrot/dunkelgrau marmoriert, kleinstückig zerbohrt (Nachfall)
- 112,10 m Gips, eben bis leicht wellig feingeschichtet, dunkelgrau, einzelne Lagen mit kristallinem Gips bzw. Fasergips, weiß (bis 1 cm)
- 112,50 m Tonstein, wellig feingeschichtet, dunkel olivgrau, lagenweise schwarzgrau, vereinzelt dünne Calcitlagen, weiß (bis 2 mm)
- 112,60 m Tonstein im Wechsel mit dünnen calcitischen GAR-Lagen, feingeschichtet, mittel- und dunkelgrau, brecciös
- 112,68 m Tonstein, schwach dolomitisch, dunkelgrau, kleinstückig zerbohrt (Stücke bis ca. 5 cm, mit glatter, gerundeter Oberfläche, evtl. Zusammenhang mit der hangenden Schicht)
- 113,56 m Tonstein, im Wechsel mit dünnen calcitischen GAR-Lagen, feingeschichtet, mittel- und dunkelgrau, 113,18-113,32 m feinbrecciös

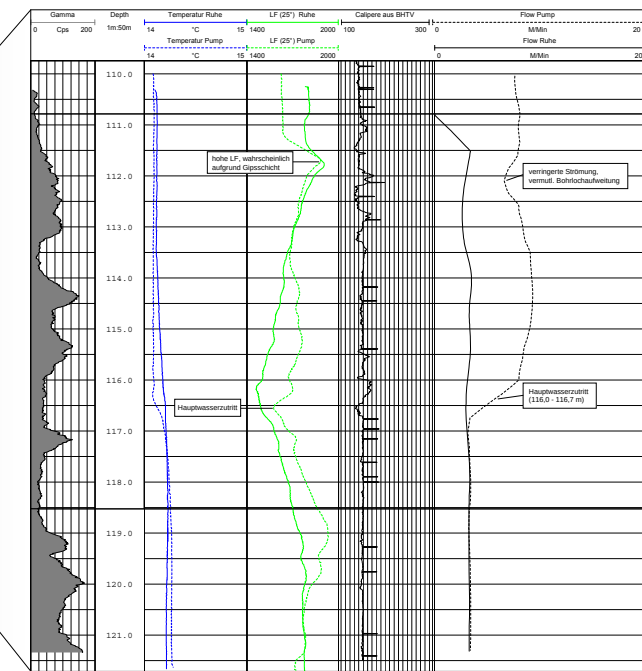
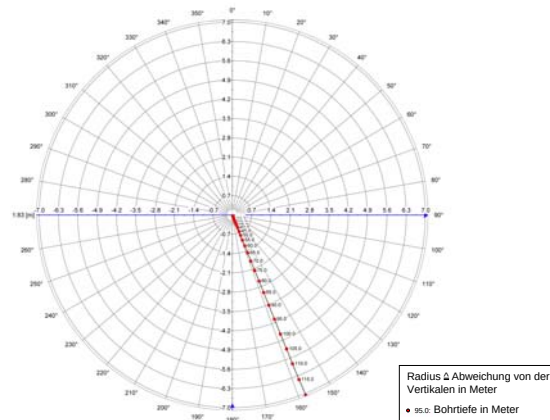
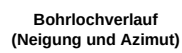
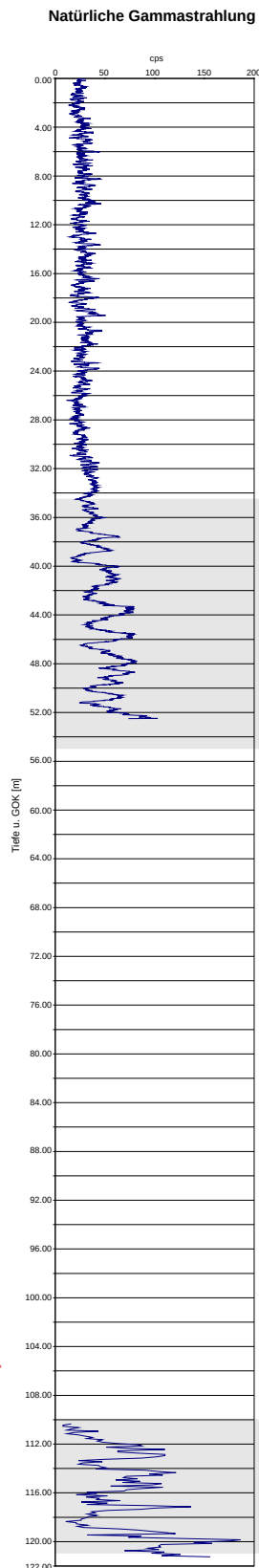
Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):**

- 113,79 m Breccie aus Tonstein- und Dolomitstein-Bröckchen und GAR, karbonatisch verbacken, dunkelgrau und hell graubraun
- 114,00 m Dolomitstein, obere 7 cm ? feinoolithisch, dunkelgrau, zerbrochen und calcitisch verheilt, darunter hellgrau bis hellbeige, wellig geschichtet, z.T. zellig-kavernös, mit welligen, z.T. drusigen Calcitlagen bis 5 mm
- 114,50 m Dolomitstein, kristallin, z.T. drusig-kavernös, dunkelgrau, undeutlich wellig geschichtet, einzelne Klüfte senkrecht zur Schichtung; bis 114,15 m stark drusig, kleinstückig zerbohrt
- 115,52 m Dolomitstein, z.T. tonig, dunkelgrau und beige-grau im Wechsel, einzelne mm-dicke, hellbeige oder dunkelgraue Schlufflagen, zwischen 144,95 und 155,25 m vereinzelt flache Calcit-Linsen, weiß (ehem. Gips), bei 144,92 m und 115,07 m je ein kohlig-er Pflanzenrest, z.T. Horizontalharnische auf Schichtflächen, einzelne calcitisch verheilte Klüfte (senkrecht zur Schichtung); Schichtfallen 40-45°
- 116,00 m Dolomitmergelstein, z.T. feingeschichtet, dunkelgrau, einzelne, mm-dicke hellbraune Schlufflagen
- 116,15 m GAR-Schluff, dunkelgrau, durchsetzt mit Dolomitstein-Bröckchen, graubraun, z.T. deutlich brecciös (verstürzt)
- 116,40 m Breccie, aus Dolomitstein-Bröckchen, graubraun, durch kristallinen Calcit verbacken, stark porös
- 117,18 m Dolomitstein, graubraun, bis 116,66 m wellig feingeschichtet, mit dunklen Streifen (Algenlamination); darunter dünnbankig bis plattig mit dunklen tonigen Schichtflächen-Belägen; 116,35 - 116,70 m durchgehende offene Kluft mit Kristallsinter-Bewuchs, grau
- 117,32 m Dolomitstein, graubraun, zerbohrt
- 117,50 m Dolomitstein, graubraun, dünnbankig, an Vertikalkluft zerbrochen
- 117,57 m Dolomitstein, graubraun, porös, mit Calcitknötchen (ehem. Gips ?), weiß, bis 3 mm Ø, z. T. herausgelöst
- 117,60 m Dolomitmergelstein, geschichtet, dunkelgrau
- 117,75 m Tonstein, dolomitisch, im Wechsel mit Dolomitstein, grau, Bankstärke 3-4 cm
- 117,92 m Dolomitstein, leicht wellig feingeschichtet, grau, dunkel gestreift
- 118,50 m Dolomitstein, grau, fein dunkelgrau marmoriert, abschnittsweise porös (herausgelöste Calcitknötchen bis 1 cm Ø), schwarze, tonig belegte Schichtfugen (Bankstärke zwischen 5 und 30 cm schwankend), calcitisch verheilte Haarklüfte (senkrecht zur Schichtung)

Bezeichnung/Projekt:**Az.:** 94-4763//12_2487**Profilbeschreibung (Fortsetzung):**

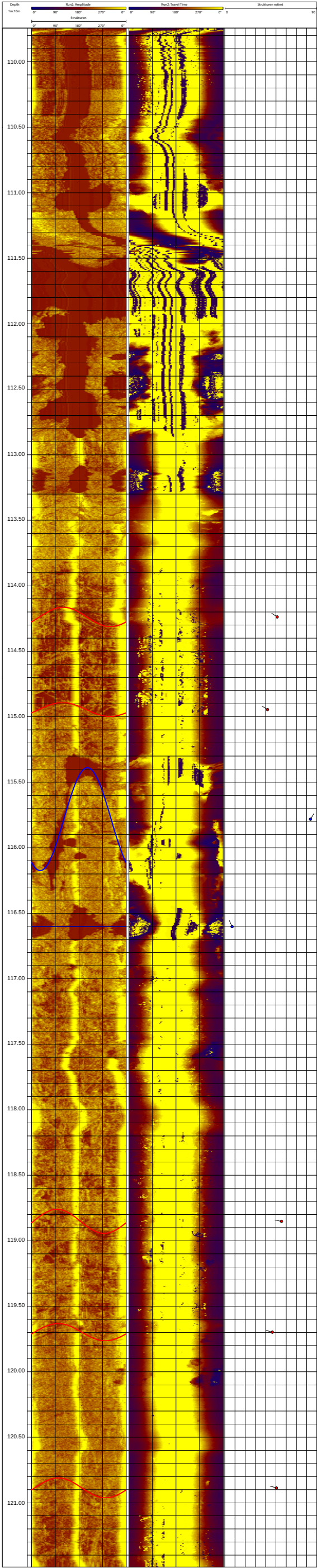
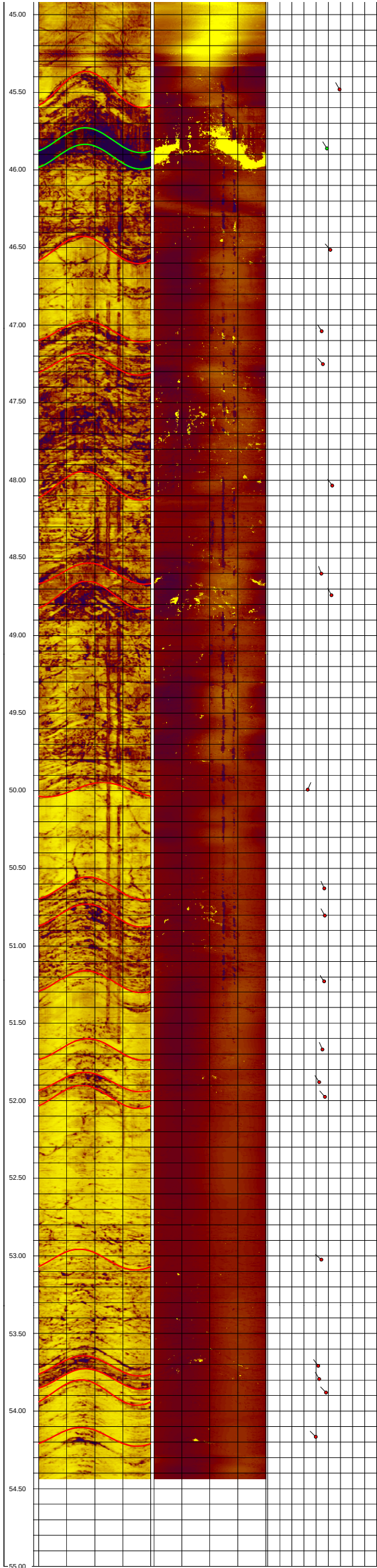
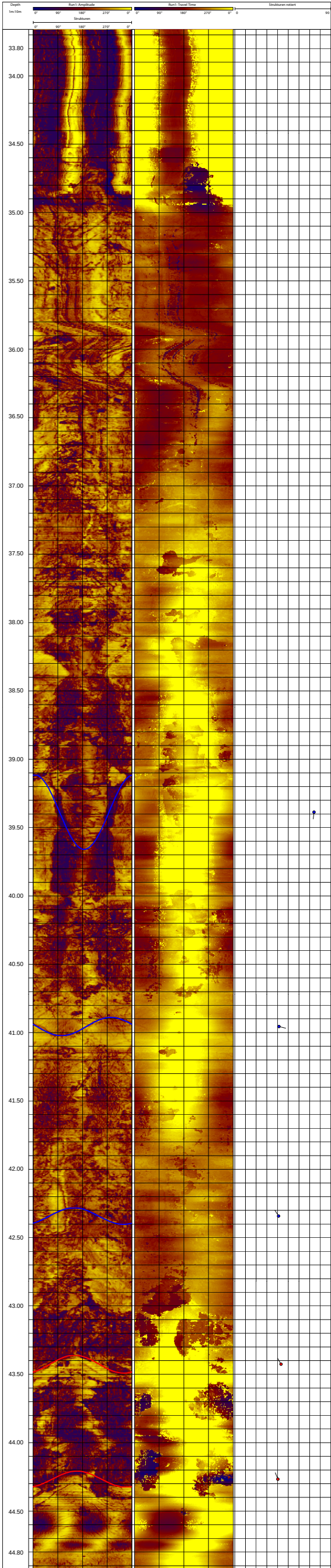
- 118,65 m Dolomitstein, grau, fein dunkelgrau marmoriert, porös, an Trennflächen kleinstückig zerfallen
- 119,25 m Dolomitstein, grau, fein dunkelgrau marmoriert, untere Grenzfläche wellig
- 119,47 m Dolomitstein, grau, fein dunkelgrau marmoriert, ab 119,30 m stark drusig-kavernös; mehrere calcitisch verheilte Kleinstörungen im Abstand 1-2 cm, Untergrenze dadurch mehrfach „abgetrepppt“
- 119,75 m Obere Graue Mergel (OGM):
Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau-schwarz, an der Untergrenze unscharf verzahnt mit:
- 120,19 m Anoplophoradolomit (Ad):
Dolomitstein, grau, einzelne dünne schwarze Tonflasern und -lagen bis 1 cm, 119,95-120,10 m Calcitdrusen (nach unten an Zahl und Größe zunehmend)
- 120,42 m Liegendton (LGT):
Tonstein, eben feingeschichtet, dunkelgrau bis schwarz
- 121,45 m Feinsandstein, schwach dolomitisch, bis 120,50 m stark tonig, leicht bituminös, bräunlichgrau und schwarz, flasrig bis wellig geschichtet, 121,30-121,57 m steilstehende, z.T. klaffende Scherkluft mit Calcitkristall-Besatz (max. Öffnungsweite > 1 cm)
- 121,95 m Schluffstein, feinsandig, graubraun mit Tonsteinlagen, schwarz, wellig-flaserig geschichtet, kohlige Pflanzenreste; bis 121,85 m an steilstehender Kleinstörung um ca. 5 cm versetzt (Störungsbreccie bis 1 cm Dicke)
- 122,02 m Feinsandstein, dolomitisch, grau
- 122,30 m Tonstein, dunkelgrau bis schwarz, vereinzelt dünne Sandlagen und -flasern mit Pyrit

 Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
Aktenzeichen: 94-4763//12_2487 Anlage: 3.3

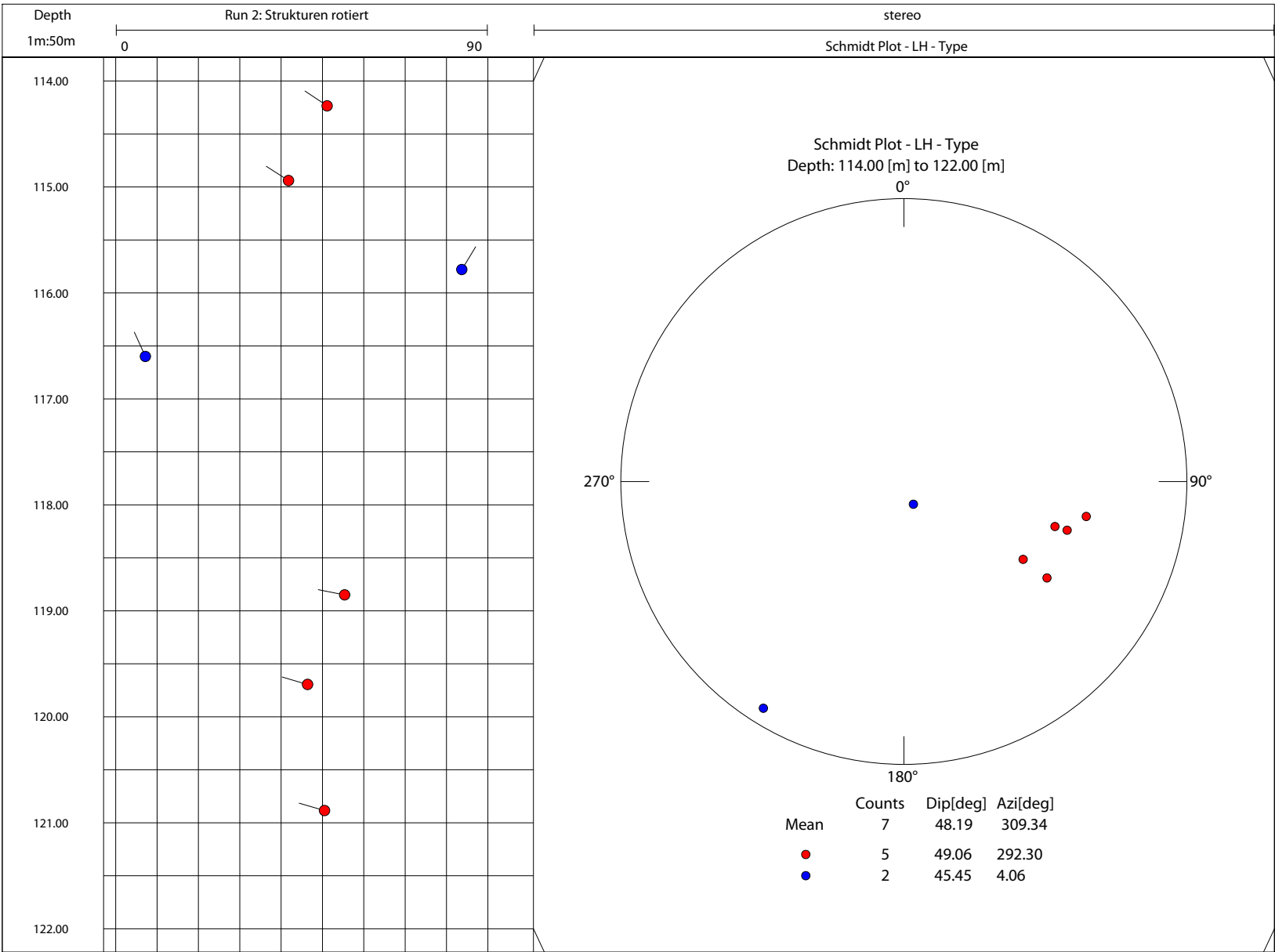
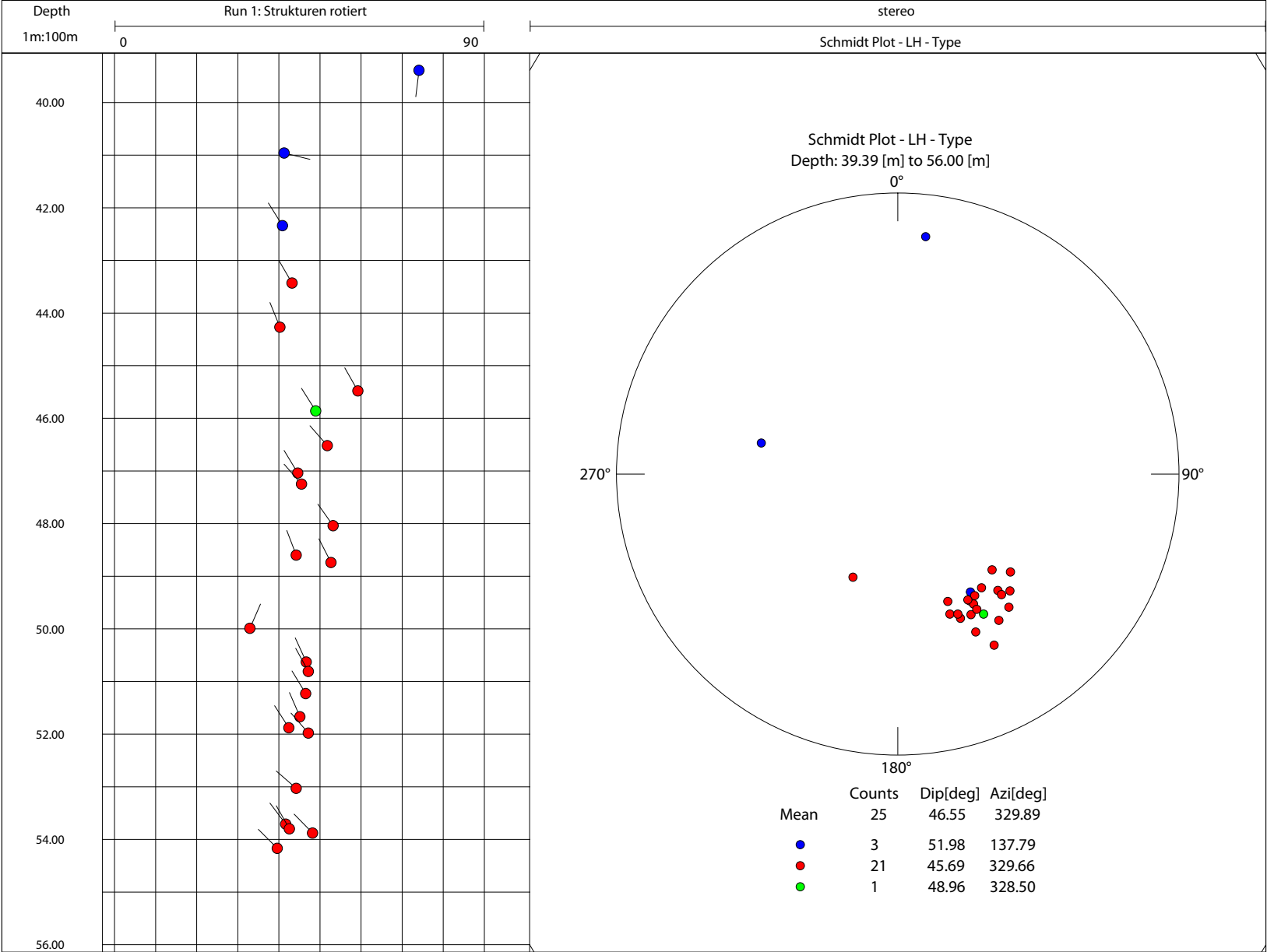




Strukturen:
● Schichtung ● Kluft ● offene Schichtfuge



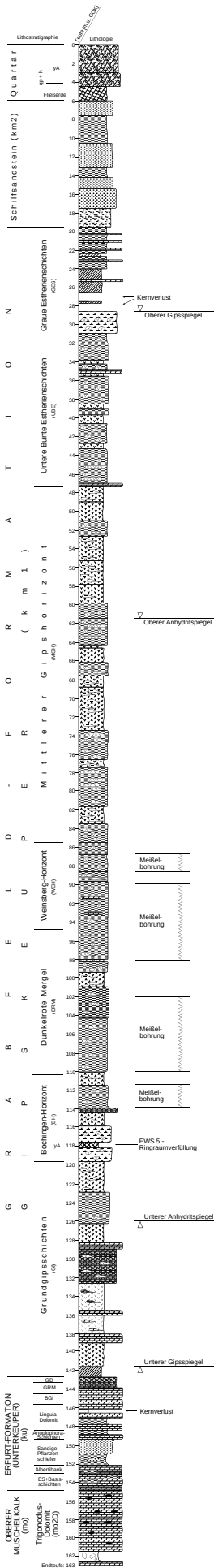
Bohrlochstrukturen BB 3 und Schmidt-Plots
Quelle: Bericht der Fa. terratec (TERRATEC, 2011)



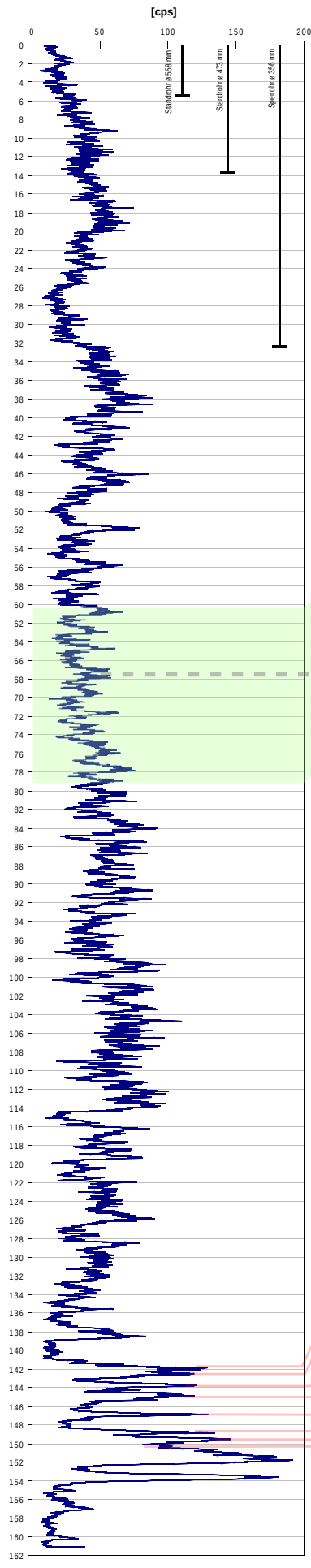
Strukturen:

● Schichtung ● Kluft ● offene Schichtfuge

Bohrprofil EKB 2



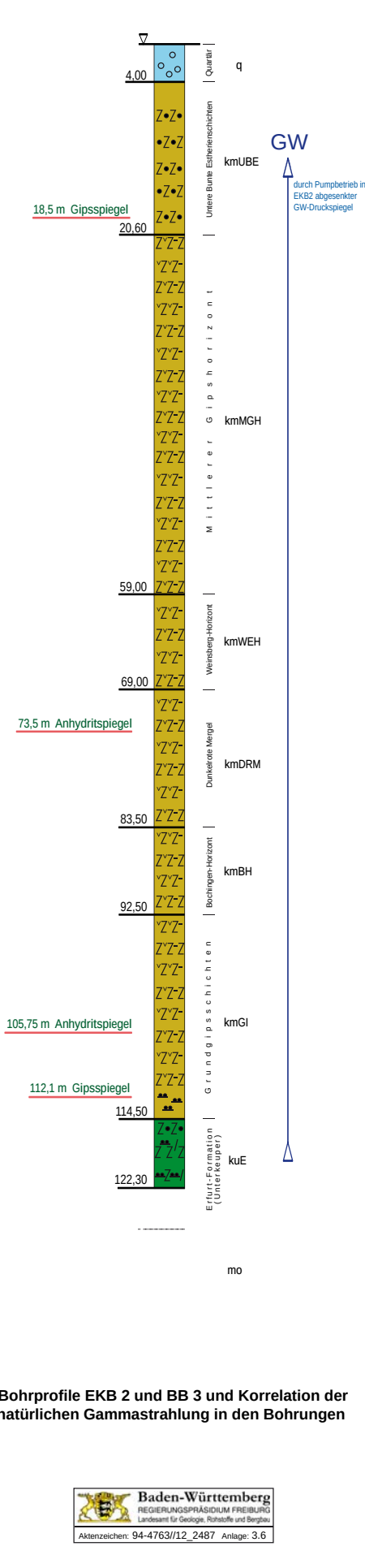
Natürliche Gammastrahlung EKB 2



Natürliche Gammastrahlung BB 3



Bohrprofil BB 3



Bohrprofile EKB 2 und BB 3 und Korrelation der natürlichen Gammastrahlung in den Bohrungen

Bezeichnung	Probe- nahmedatum	Probe- nahmezeit	Proben ID LGRB	Chemie	Geologische Einheit	Entnahme- tiefe (m)	Arlach	TK25	Arnum	el. Leitfähigkeit (25 °C) (µS/cm)	T Wasser (°C)	pH vor Ort	O2 gel. (mg/l)	Eh (mV)	Geruch	Färbung	Trübung qualitativ	Dichte (g/cm3)	Basekapazität bis pH 8.2 (mmol(eq)/l)	Säurekapazität bis pH 4.3 (mmol(eq)/l)
EKB 1	08.06.2010	14:15	73203	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE	10	BO	8112	287	1330	14,5	7,05	<0,5	221	geruchlos	farblos	leicht tontrüb	0,9993	0,8	4,50
EKB 1	06.12.2010	11:00	73275	Süßwasser	kuE	10	BO	8112	287	573	13,5	7,48	1,5	303	geruchlos	farblos	leicht tontrüb	0,9986	0,4	3,40
EKB 1 (PV Anfang)	16.12.2010	9:05	73278	Süßwasser	kuE	15,5	BO	8112	287	541	14,1	7,47	1,4	245	geruchlos	farblos	stark tontrüb	0,9987	0,4	3,50
EKB 1 (PV Ende)	16.12.2010	13:10	73279	Süßwasser	kuE	15,5	BO	8112	287	929	14	7,4	<0,5	234	geruchlos	farblos	leicht tontrüb	0,9987	0,5	4,00
EKB 1	16.12.2010	11:20	73280	Süßwasser	kuE	15,5	BO	8112	287	770	14	7,4	<0,5	244	geruchlos	farblos	tontrüb	0,9987	0,5	3,90
EKB 1	24.01.2011	13:55	73281	Süßwasser	kuE	15	BO	8112	287	832	14,2	7,65	<0,5	235	geruchlos	farblos	leicht tontrüb	0,9988	0,5	4,00
EKB 2	10.11.2009	09:30	72740	Süßwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1030	16,1	7,04	<0,5	-3	nach HS	farblos	klar	0,9991	1	5,80
EKB 2	21.01.2010	09:15	73149	Süßwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1050	15,8	7,11	11	268	leicht mineralisch	farblos	klar	0,999	1	5,75
EKB 2	22.03.2010	09:45	73154	Süßwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1070	16	7,13	1	226	leicht mineralisch	farblos	klar	0,999	0,8	5,45
EKB 2	19.04.2010	10:00	73156	Süßwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1060	16,4	7,1	1,2	330	mineralisch	farblos	klar	0,999	0,7	5,60
EKB 2	08.06.2010	09:00	73193	Süßwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1060	16,7	7,11	1,8	242	leicht mineralisch	farblos	klar	0,999	1	5,50
EKB 2	12.07.2010	09:00	73231	Süßwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1060	17,1	7,02	2,5	361	leicht nach HS	farblos	klar	0,999	0,6	5,80
EKB 2	06.09.2010	10:00	73247	Süßwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1130	16,1	7,15	1,4	271	mineralisch, nach HS	farblos	klar	0,9991	0,9	5,50
EKB 2	25.10.2010	10:30	73271	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1180	15	7,11	1,8	289	leicht nach HS	farblos	klar	0,9991	0,8	5,50
EKB 2	04.11.2010	10:00	73285		kuE, moM		BO	8112	289	1190	16	7,09	1,2	244	leicht nach H2S	farblos	klar		0,8	5,50
EKB 2	06.12.2010	09:00	73274	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1220	15,6	7,18	1,6	325	nach HS	farblos	klar	0,9992	0,7	5,50
EKB 2	24.01.2011	10:30	73282	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1230	14,1	7,2	2	256	geruchlos	farblos	klar	0,9992	0,9	5,50
EKB 2	04.03.2011	09:00	73293	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1320	13,2	7,16	2,2	247	leicht nach HS	farblos	klar	0,999	0,9	5,40
EKB 2	05.03.2011	08:45	73294	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1290	14,5	7,1	<0,5	145	leicht nach HS	farblos	klar	0,999	1	5,45
EKB 2	07.03.2011	09:45	73297	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1300	15,4	7,1	1,8	272	leicht nach HS	farblos	klar	0,999	0,9	5,45
EKB 2	04.04.2011	09:00	73308	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1350	15,3	7,1	1,5	201	nach H2S	farblos	klar	0,9994	1,2	5,55
EKB 2	24.05.2011	14:00	73336	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1430	17,5	6,96	1,5	231	leicht nach H2S	farblos	klar	0,9994	1,3	5,30
EKB 2	01.06.2011		-		kuE, moM		BO	8112	289	1448	16,3	6,94	1,44							
EKB 2	08.06.2011		-		kuE, moM		BO	8112	289	1459	16,5	7,01	1,06							
EKB 2	15.06.2011	09:15	73337	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1460	16,6	7,07	1,8	211	nach H2S	farblos	klar	0,9995	1,2	5,25
EKB 2	29.06.2011		-		kuE, moM		BO	8112	289	1468	16,7	7,04	1,43							
EKB 2	12.07.2011	09:00	73341	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1480	16,7	7,05	1	207	nach H2S	farblos	klar	0,9995	0,8	5,40
EKB 2	20.07.2011		-		kuE, moM		BO	8112	289	1463	16,2	7,08	1,52							
EKB 2	17.08.2011		-		kuE, moM		BO	8112	289	1480	16,4	7,05	2,11							
EKB 2	23.08.2011	08:45	73349	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1490	16,9	7,00	<0,5	249	nach H2S	farblos	klar	0,9995	1	5,20
EKB 2	07.09.2011		-		kuE, moM		BO	8112	289	1484	16,6	7,00	1,45							
EKB 2	05.10.2011	09:00	73378	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1490	16,5	7,01	0,9	220	nach H2S	farblos	klar	0,9997	1,1	5,40
EKB 2	18.10.2011		-		kuE, moM		BO	8112	289	1486	16,1	7,01	1,29							
EKB 2	02.11.2011	09:00	73395	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1490	16,1	7,02	0,9	230	nach HS	farblos	klar	0,9995	0,95	5,25
EKB 2	01.12.2011	09:00	73911	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1460	16,1	7,12	2,1	239	nach HS	farblos	klar	0,9994	0,1	5,35
EKB 2	19.01.2012	11:30	73983	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE, moM		BO	8112	289	1474	16,2	7,06	<0,5	223	nach HS	farblos	klar	0,9998	0,85	5,3
EKB 2	08.02.2012		-		kuE, moM		BO	8112	289	1461	16,0	6,97	0,19							
BB 3	02.03.2011	10:00	73291	Ca K SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE	108,5	BO	8112	301	3190	12,7	7,41	1,9	229	geruchlos	farblos	klar		0,7	7,60
BB 3	04.03.2011	08:30	73292	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE	108,5	BO	8112	301	1670	13,3	7,57	1,9	273	nach HS	farblos	klar	0,9993	0,8	6,35
BB 3	05.03.2011	09:30	73295	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE	108,5	BO	8112	301	1700	13,7	7,32	<0,5	192	leicht nach HS	farblos	klar	0,9994	0,8	6,35
BB 3	07.03.2011	09:00	73296	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE	108,5	BO	8112	301	1430	14	7,29	<0,5	209	leicht nach HS	farblos	klar	0,9992	0,7	6,00
BB 3	04.04.2011	09:45	73309	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1320	14,2	7,18	0,8	202	nach H2S	farblos	klar	0,9994	1,7	5,90
BB 3	11.04.2011	09:30	73310	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1300	14,4	7,11	<0,5	123	leicht nach H2S	farblos	klar	0,9994	1,3	5,85
BB 3	15.04.2011	09:30	73329	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1320	12,8	7,16	1,1	199	nach H2S	farblos	klar	0,9994	1,3	5,55
BB 3	16.05.2011	09:00	73332	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1369	15,1	7,15	1,8	229	leicht nach H2S	farblos	klar	0,9993	0,9	5,50
BB 3	01.06.2011		-		kuE		BO	8112	301	1408	15,1	6,91	1,31							
BB 3	08.06.2011		-		kuE		BO	8112	301	1428	15,4	7,06	1,15							
BB 3	15.06.2011	11:00	73338	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1440	15,7	7,06	2	207	nach H2S	farblos	klar	0,9995	1,2	5,25
BB 3	29.06.2011		-		kuE		BO	8112	301	1447	16,3	7,11	3,15							
BB 3	12.07.2011	10:00	73342	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1450	15,5	7,00	1,1	197	nach H2S	farblos	klar	0,9994	0,9	5,20
BB 3	20.07.2011		-		kuE		BO	8112	301	1450	15,3	7,07	1,35							
BB 3	17.08.2011		-		kuE		BO	8112	301	1464	15,8	7,05	1,84							
BB 3	23.08.2011	09:30	73350	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1470	15,8	7,05	1,1	260	nach H2S	farblos	klar	0,9995	1	5,20
BB 3	07.09.2011		-		kuE		BO	8112	301	1465	15,8	7,07	2,04							
BB 3	05.10.2011	09:30	73379	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1480	15,6	7,03	1,6	223	nach H2S	farblos	klar	0,9996	1,1	5,20
BB 3	18.10.2011		-		kuE		BO	8112	301	1475	15,3	7,07	2,14							
BB 3	02.11.2011	10:00	73396	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1470	15,2	7,01	0,9	216	nach HS	farblos	klar	0,9995	1	5,1
BB 3	01.12.2011	12:55	73912	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1260	15,2	7,1	1,8	227	nach HS	farblos	klar	0,9993	1	5,3
BB 3	01.12.2011	15:00	73913	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1310	15	7,02	1,9	235	nach HS	farblos	klar	0,9994	1	5,35
BB 3	02.12.2011	09:00	73914	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1370	14,7	7,09	1,7	212	nach HS	farblos	klar	0,9994	1	5,35
BB 3	06.12.2011	11:15	73964	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1420	14,3	6,99	1,2	280	nach HS	farblos	klar	0,9994	1	5,1
BB 3	19.01.2012	11:00	73982	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	kuE		BO	8112	301	1474	14,9	7,06	<0,5	289	nach HS	farblos	klar	0,9998	1	5,2
BB 3	08.02.2012		-		kuE		BO	8112	301	1471	14,6	6,95	0,23							
Brunnen Neu Schladerer Staufen	02.02.2009	11:00	66683	Süßwasser			BO	8112	15	249	8	7,02	9,8	527	geruchlos	farblos	klar	0,9984	0,4	1,75
BBR 1 EVC Staufen	02.02.2009	09:30	66685	Süßwasser			BO	8112	1	138	9,3	6,38	10	524	geruchlos	farblos	klar	0,9983	0,15	0,60
Lbr. Innenhof Fa. Schladerer Staufen	02.02.2009	10:30	66686	Süßwasser			BO	8112	280	486	9,2	7,27	6,9	536	geruchlos	farblos	klar	0,9985	0,4	3,60
WP Entnahmebrunnen Staufen Grünmatten	03.02.2009	09:15	66684	Süßwasser			BO	8112	263	155	7,2	7,08	2,8	319	nach Eisen	farblos	klar	0,9983	0,3	1,10
Lbr. Innenhof Fa. Schladerer Staufen	23.06.2009	12																		

Bezeichnung	Probe- nahmedatum	Probe- nahmezeit	Ag (µg/l)	Al (µg/l)	As (µg/l)	B (µg/l)	Ba (µg/l)	Be (µg/l)	Bi (µg/l)	Ca (mg/l)	Cd (µg/l)	Ce (µg/l)	Cl - (mg/l)	Co (µg/l)	CO2: freie Kohlensäure (mg/l)	Cr (µg/l)	Cs (µg/l)	Cu (µg/l)	F - (µg/l)	Fe (mg/l)	Fehler el. Leitfähigkeit (%)	Gesamthärte (mmol(eq)/l)	Gesamthärte Fehler (%)	HCO3 - (mg/l)	HS - (µg/l)	Ionen- bilanz- fehler (%)	K (mg/l)	La (µg/l)	Li (µg/l)
EKB 1	08.06.2010	14:15	<0,009	4,474	5,928	72,85	152	<0,014	0,011	246	0,036	0,052	13,50	1,344	35	0,023	0,13	1,639	410	0,101		14,5	3,574	275		0,54	21	0,045	27,28
EKB 1	06.12.2010	11:00	0,015	83,83	3,697	43,58	156	<0,014	0,019	84,2	0,129	0,046	16,00	0,614	18	1,07	0,061	1,216	500	0,062	9,0	5,39	0,609	207		1,68	5,01	0,043	18,13
EKB 1 (PV Anfang)	16.12.2010	9:05	<0,009	67,91	3,721	44,34	112	0,014	0,001	74,8	0,043	0,084	17,40	0,311	18	1,518	0,072	2,025	560	0,064	14,8	4,98	0,589	214		0,39	5,18	0,134	18,09
EKB 1 (PV Ende)	16.12.2010	13:10	0,033	23,98	5,532	65,21	195	<0,014	0,001	139	0,377	0,064	17,00	5,786	22	413	0,119	5,315	450	1,488		9	0,776	244		0,17	17,7	0,15	25,03
EKB 1	16.12.2010	11:20								118			15,60		22				520	<0,016		7,69	0,008	238		0,45	14,3		
EKB 1	24.01.2011	13:55	<0,009	3,755	3,732	53	180	0,016	0,013	123	0,07	0,019	17,00	0,619	22	22,87	0,091	1,218	450	0,092		8,08	0,249	244		0,20	14,6	0,023	19,55
EKB 2	10.11.2009	09:30								162			3,19		44				220			11,9	3,645	354		1,32	4,05		
EKB 2	21.01.2010	09:15	0,011	1,033	1,899	58,51	25,99	0,017	0,02	173	<0,009	0,006	3,01	<0,002	44	0,204	0,683	0,256	240	0,57		12,2	1,547	351	<20,	0,03	3,09	0,004	26,99
EKB 2	22.03.2010	09:45	0,02	0,396	1,485	59,01	28,97	0,019	0,002	171	<0,009	0,003	3,83	<0,002	35	0,228	0,759	0,517	220	0,521		12,5	1,388	333	<20,	1,71	3,02	0,003	34,83
EKB 2	19.04.2010	10:00	0,015	1,74	1,557	59,79	27,41	0,021	0,025	177	<0,009	0,005	7,45	<0,002	31	0,218	0,761	0,357	230	0,586		12,4	1,753	342	<20,	1,83	3,01	0,005	38,46
EKB 2	08.06.2010	09:00	<0,009	1,58	1,382	52,55	30,11	<0,014	0,037	171	<0,009	0,008	3,55	<0,002	44	0,152	0,718	0,946	67	0,344		12,3	2,033	336	<20,	0,81	2,99	0,004	22
EKB 2	12.07.2010	09:00	<0,009	1,11	1,592	58,49	26,3	0,016	0,023	175	0,009	0,003	3,90	<0,002	26	0,186	0,723	0,568	230	0,369		12,3	2,142	354		0,55	2,68	0,006	28,99
EKB 2	06.09.2010	10:00	<0,009	0,714	1,493	65,43	23,42	0,02	<0,001	195	<0,009	0,005	7,80	<0,002	40	0,263	0,765	0,426	225	0,579		13,3	1,995	336		0,20	2,72	0,002	29,75
EKB 2	25.10.2010	10:30	0,01	1,023	1,806	79,39	23,73	0,039	0,036	212	<0,009	0,006	4,25	<0,002	35	1,147	0,843	0,478	250	0,71		14,5	0,021	336	20	0,45	2,85	0,027	32,54
EKB 2	04.11.2010	10:00													35														
EKB 2	06.12.2010	09:00	0,024	1,431	1,899	64,1	22,12	<0,014	0,007	222	0,036	0,006	4,25	0,285	31	29,64	0,843	1,18	240	0,716		15	0,112	336	20	0,16	2,84	0,007	27,36
EKB 2	24.01.2011	10:30	0,012	2,157	1,77	73,42	21,81	0,04	0,006	220	0,084	0,005	4,25	2,086	40	212	0,837	2,432	245	1,417		15,1	1,586	354		1,65	3,09	0,009	28,19
EKB 2	04.03.2011	09:00	<0,009	6,05	1,57	82,39	22,05	0,052	0,025	234	0,019	0,003	4,47	0,224	40	19,12	1,646	0,59	230	0,837		15,9	0,525	330	<20,	1,11	13,2	0,007	33,15
EKB 2	05.03.2011	08:45	<0,009	29,26	1,701	81,04	21,94	0,054	0,031	233	<0,009	0,003	4,47	0,124	44	0,525	1,745	0,255	230	0,851		15,8	1,345	333	60	1,01	11,2	0,005	34,89
EKB 2	07.03.2011	09:45	<0,009	2,813	1,415	71,41	21,87	0,051	0,023	243	<0,009	0,003	4,47	0,14	40	2,555	1,371	0,394	230	0,617		15,9	2,062	333	60	0,15	8,31	0,006	29,11
EKB 2	04.04.2011	09:00	<0,009	0,736	1,921	80,31	20,89	0,027	0,002	240	<0,009	0,003	4,61	0,068	53	2,27	1,076	0,353	220	0,75		16,6	1,473	339	60	0,53	6,19	0,012	31,04
EKB 2	24.05.2011	14:00	<0,009	1,472	1,78	91	21,55	0,024	0,009	278	0,01	0,004	4,61	0,523	57	12,33	0,992	0,776	210	0,755		18,4	0,406	323	40	1,07	4,83	0,051	29,08
EKB 2	01.06.2011																												
EKB 2	08.06.2011																												
EKB 2	15.06.2011	09:15	<0,009	0,696	1,959	76,48	19,95	0,027	0,026	282	<0,009	0,003	4,61	0,411	53	1,8	0,955	0,317	215	0,75		18,7	2,146	320	20	1,11	4,38	0,015	19,88
EKB 2	29.06.2011																												
EKB 2	12.07.2011	09:00	<0,009	0,317	2,157	77,7	19,24	<0,014	0,024	286	<0,009	0,003	4,96	0,467	35	1,733	0,918	0,35	145	0,739		18,7	0,882	329	40	0,37	4,54	0,016	17,25
EKB 2	20.07.2011																												
EKB 2	17.08.2011																												
EKB 2	23.08.2011	08:45	0,014	0,455	1,967	74,02	18,52	0,026	0,039	294	0,022	0,003	5,00	0,616	44	11,74	0,92	0,582	215	0,846		18,9	1,508	317	40	0,52	4,26	0,008	19,18
EKB 2	07.09.2011																												
EKB 2	05.10.2011	09:00	0,009	1,196	2,65	146	19,3	0,041	0,018	294	0,023	0,003	5,67	0,822	48	15,68	0,924	0,5	210	0,895		18,8	0,82	330	40	1,89	4,18	0,006	36
EKB 2	18.10.2011																												
EKB 2	02.11.2011	09:00	0,011	1,486	1,668	82,63	19,54	0,033	0,027	293	0,018	0,005	5,67	0,508	42	16,18	0,944	0,509	220	0,902		18,8	0,91	320	40	1,18	4,28	0,024	30,1
EKB 2	01.12.2011	09:00	<0,009	0,732	1,726	86,56	17,68	0,053	0,026	287	0,253	0,004	6,03	0,729	4	27,93	0,953	0,62	230	0,966		18,5	0,134	326	40	0,61	4,27	0,005	32,3
EKB 2	19.01.2012	11:30	<0,009	1,796	1,74	80,17	19,35	0,032	0,01	290	<0,009	0,004	5,67	0,334	37	0,556	0,984	0,53	205	0,768		18,7	0,059	323	40	1,17	4,39	0,008	28,9
EKB 2	08.02.2012																												
BB 3	02.03.2011	10:00								345			14,80		31				210			21,3	0,667	464		0,37	488		
BB 3	04.03.2011	08:30	<0,009	241	2,27	101	24,95	0,04	0,005	258	0,009	0,036	5,11	0,261	35	0,916	6,97	2,302	250	0,849		16,2	0,544	387	<20,	0,17	95,7	0,05	37,07
BB 3	05.03.2011	09:30	<0,009	480	2,555	100	32,71	0,066	0,006	254	<0,009	0,035	5,60	0,248	35	1,236	7,611	0,707	240	0,941		16	0,808	387	20	1,20	106	0,036	38,6
BB 3	07.03.2011	09:00	<0,009	70,14	2,23	97,61	24,29	0,088	0,019	245	<0,009	0,019	4,47	0,149	31	0,579	4,679	1,046	260	0,76		15,7	1,004	366	20	0,12	35,4	0,024	31,7
BB 3	04.04.2011	09:45	<0,009	14,47	1,697	97,53	20,29	0,025	<0,001	245	<0,009	0,066	3,90	0,083	75	2,363	2,654	0,237	260	0,903		15,7	0,62	360	60	0,38	28	0,059	29,9
BB 3	11.04.2011	09:30	<0,009	12,78	1,517	79,81	17,15	0,02	0,037	241	0,009	0,047	3,90	0,009	57	2,151	1,496	0,627	265	0,82		16	0,913	357	60	1,58	15	0,053	25,8
BB 3	15.04.2011	09:30	0,018	6,02	1,542	74,34	16,82	0,029	0,02	248	0,01	0,033	4,25	0,01	57	2,268	1,363	0,68	270	0,835		16,3	0,667	339	60	1,64	12,6	0,053	23,67
BB 3	16.05.2011	09:00	0,009	2,447	1,414	88,07	12,93	0,03	0,014	264	<0,009	0,022	4,61	0,301	40	1,774	1,112	0,359	255	0,732		17,2	0,689	336	40	0,23	6,49	0,026	26,55
BB 3	01.06.2011																												
BB 3	08.06.2011																												
BB 3	15.06.2011	11:00	<0,009	2,038	1,63	89,12	11,57	0,032	0,017	279	0,016	0,015	4,61	0,556	53	15,38	0,998	0,425	250	0,78		18,4	1,07	314	20	0,51	5,29	0,021	25,26
BB 3	29.06.2011																												
BB 3	12.07.2011	10:00	<0,009	1,767	1,72	101	10,82	0,037	0,015	283																			

Bezeichnung	Probe- nahmedatum	Probe- nahmezeit	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	Mo (µg/l)	Na (mg/l)	NH4 + (mg/l)	Ni (µg/l)	NO2 - (mg/l)	NO3 - (mg/l)	Pb (µg/l)	P(gesamt) (µg/l)	PO4 3- (mg/l)	Rb (µg/l)	SAK254 (m-1)	SAK436 (m-1)	Sb (µg/l)	Se (µg/l)	SiO2 (mg/l)	SO4 2- (mg/l)	Sr (µg/l)	TDS (Fest- stoffgehalt) (mg/l)	TDS Fehler (%)	Th (µg/l)	Ti (µg/l)	Tl (µg/l)	U (µg/l)	V (µg/l)	Y (µg/l)	Zn (µg/l)
EKB 1	08.06.2010	14:15	32	1,741	1,892	21,6	0,6	3,718	<0,005	2,09	0,129	73	0,132	11,92	1,2	<0,10	0,092	0,217	14,7	564	4679	1197,58		0,012	1,048	0,211	2,147	0,243	0,155	20,8
EKB 1	06.12.2010	11:00	14,5	0,825	1,549	19,2	0,13	2,762	0,03	<1,91	0,15		0,083	3,444	0,68	<0,10	0,151	0,176	15,4	118	1120	485,74	15,2	0,023	2,132	0,102	0,354	0,476	0,092	8,54
EKB 1 (PV Anfang)	16.12.2010	9:05	15,2	0,705	1,795	27,7	0,03	2,277	0,005	<1,91	0,141	138	0,077	2,894	0,73	<0,10	0,139	0,117	15,9	112	1060	488,57	9,7	0,013	1,841	0,062	0,49	0,381	0,1	7,536
EKB 1 (PV Ende)	16.12.2010	13:10	25,2	1,315	44,04	24,3	0,35	291	0,005	<1,91	0,288	118	0,098	11,54	1,4	<0,10	0,207	0,997	14,8	297	2490	787,41	15,2	0,007	24,17	0,182	1,191	1,986	0,116	111
EKB 1	16.12.2010	11:20	21,9	0,986		23,5				<1,91		144	<0,012		1,2	<0,10			15	226		678,31	11,9							
EKB 1	24.01.2011	13:55	23,3	0,903	4,904	22,8	0,39	14,71	0,02	<1,91	0,179	113	0,147	7,894	1,2	<0,10	0,173	0,211	14,5	242	1848	707,77	14,9	0,021	1,273	0,131	0,793	0,14	0,078	11,3
EKB 2	10.11.2009	09:30	41,1			5,14	0,2		<0,005	<0,126			<0,008		0,84	<0,20			10,5	291		874,55								
EKB 2	21.01.2010	09:15	43,2	0,03005	1,08	5,69	0,15	0,456	<0,005	0,27	0,104		<0,014	5,001	0,24	<0,20	0,024	0,139	10,2	331	8776	924,75		0,013	<0,068	0,06	0,601	<0,031	0,094	2,697
EKB 2	22.03.2010	09:45	43,7	0,02902	1,082	6,65	0,15	0,344	<0,005	<0,37	0,058	8	<0,008	4,711	0,16	<0,10	0,016	0,2	9,87	333	8622	908,19		<0,002	<0,068	0,125	0,633	<0,031	0,084	2,038
EKB 2	19.04.2010	10:00	43,6	0,02906	1,082	7,02	0,2	0,32	0,02	<0,37	1,202	8	0,017	4,686	<0,10	<0,10	0,026	0,214	10	335	8609	929,40	<0,002	<0,068	0,132	0,652	0,035	0,094	2,09	
EKB 2	08.06.2010	09:00	40,1	0,03098	1,191	6,69	0,15	0,578	<0,005	<1,91	0,317	50	<0,007	4,719	0,25	<0,10	0,028	0,213	9,7	333	9479	906,74		0,019	0,428	0,067	0,764	<0,031	0,096	2,939
EKB 2	12.07.2010	09:00	43,8	0,0321	1,194	5,57	<0,028	0,555	<0,006	<1,91	0,077		0,23	4,806	0,14	<0,10	0,031	0,148	9,73	331	9895	929,70		0,012	<0,068	0,055	0,683	<0,031	0,056	2,238
EKB 2	06.09.2010	10:00	43,6	0,03031	2,095	5,93	0,15	0,538	<0,006	<0,75	0,085		<0,010	5,078	0,21	<0,10	0,018	0,204	9,37	392	10790	996,48		0,003	<0,068	0,04	0,601	<0,031	0,049	2,227
EKB 2	25.10.2010	10:30	44,5	0,0275	1,356	6,37	0,01	1,286	<0,005	<0,52	0,075		<0,009	5,142	0,29	<0,10	0,051	0,194	9,95	447	11190	1067,22		0,021	<0,068	0,037	0,54	<0,031	0,093	3,36
EKB 2	04.11.2010	10:00																												
EKB 2	06.12.2010	09:00	44,8	0,02797	2,202	6,57	0,04	19,6	0,005	<1,91	0,255		<0,011	5,466	0,28	<0,10	0,038	0,408	10,7	468	11020	1099,66		0,017	1,551	0,035	0,578	<0,031	0,117	15,17
EKB 2	24.01.2011	10:30	44,3	0,03916	15,64	8,51	0,02	118	0,005	<1,91	0,458	58	<0,0012	5,034	0,15	<0,10	0,054	0,446	10	441	10350	1090,17		0,023	9,978	0,028	0,584	0,705	0,07	24
EKB 2	04.03.2011	09:00	47,5	0,03212	3,482	10,8	<0,01	11,56	0,005	<0,49	0,455	49	<0,006	9,752	0,87	<0,10	0,035	0,136	10,2	525	10090	1179,67		0,074	1,295	0,029	0,761	0,089	0,067	7,231
EKB 2	05.03.2011	08:45	50,3	0,03101	1,367	11	0,04	0,579	0,005	<0,49	0,699	61	<0,006	10,61	0,84	<0,10	0,044	0,116	10,4	531	10770	1188,98		0,089	1,022	0,032	0,834	<0,031	0,071	1,656
EKB 2	07.03.2011	09:45	47,2	0,02516	1,46	9,79	0,02	1,531	0,005	0,67	0,262	55	<0,006	7,701	0,59	<0,10	0,035	0,14	10,2	541	9518	1201,89		0,069	1,493	0,023	0,720	<0,031	0,062	3,615
EKB 2	04.04.2011	09:00	50,1	0,03185	1,481	9,82	0,01	1,328	<0,005	<0,70	0,12	38	<0,010	6,565	0,38	<0,10	0,032	0,133	9,92	546	11210	1209,95		0,067	0,495	0,033	0,757	<0,031	0,078	3,672
EKB 2	24.05.2011	14:00	51,1	0,03188	3,41	11,5	0,01	8,827	0,005	<0,75	0,114	50	<0,010	5,642	0,19	<0,10	0,026	0,234	10,8	641	10830	1329,46		0,037	2,081	0,037	0,899	0,083	0,075	9,018
EKB 2	01.06.2011																													
EKB 2	08.06.2011																													
EKB 2	15.06.2011	09:15	48,2	0,03295	1,664	10	0,01	1,552	0,005	<0,75	0,283	38	<0,010	5,803	0,1	<0,10	0,045	0,203	10,2	638	11370	1321,77		0,051	1,568	0,036	0,864	<0,031	0,09	3,606
EKB 2	29.06.2011																													
EKB 2	12.07.2011	09:00	48,7	0,03342	1,704	10,7	0,01	1,359	0,005	0,82	0,105	71	0,24	5,545	0,38	<0,10	0,038	0,195	10,5	656	11180	1355,86		0,042	1,246	0,04	0,887	<0,031	0,09	3,658
EKB 2	20.07.2011																													
EKB 2	17.08.2011																													
EKB 2	23.08.2011	08:45	51,9	0,036	3,795	10,9	0,42	8,064	0,012	0,42	0,095	58	<0,01	6,184	0,4	<0,1	0,053	0,198	10,3	700	10630	1398,70		0,064	2,876	0,037	0,92	0,155	0,076	8,927
EKB 2	07.09.2011																													
EKB 2	05.10.2011	09:00	48,8	0,0449	4,1	10,6	0,02	10,1	0,005	<0,90	0,266	62	<0,010	6,59	0,37	<0,10	0,033	0,204	10,1	654	11690	1362,15		0,049	<0,068	0,057	1,208	<0,031	0,066	17,32
EKB 2	18.10.2011																													
EKB 2	02.11.2011	09:00	45,9	0,03788	3,796	11	0,02	10,95	0,005	0,94	0,203	53	0,018	5,972	0,29	<0,10	0,038	0,267	9,86	675	10080	1370,15		0,052	3,158	0,036	0,988	0,055	0,156	8,19
EKB 2	01.12.2011	09:00	47,6	0,03765	2,344	10,7		14,58	0,005	<0,52	0,148	52	<0,010	5,947	0,27	<0,10	0,054	0,386	9,8	646	10340	1341,93		0,056	3,305	0,039	0,881	0,066	0,171	105
EKB 2	19.01.2012	11:30	48,9	0,03884	1,627	12,1	<0,01	0,77	0,005	0,89	0,179	23	<0,010	5,827	0,23	<0,10	0,043	0,248	10,3	657	9423	1356,68		0,024	<0,068	0,036	0,921	<0,031	0,113	2,307
EKB 2	08.02.2012																													
BB 3	02.03.2011	10:00	47,9			87,8						<5,	<0,006						11,3	1420		2882,40								
BB 3	04.03.2011	08:30	36,6	0,02013	1,262	24,6	0,12	1,028	0,012	0,76	0,194	67	<0,006	45,68	2,1	0,16	0,701	0,16	12	635	9852	1460,03		0,057	7,136	<0,013	0,333	0,438	0,123	7,717
BB 3	05.03.2011	09:30	36,2	0,01997	1,334	26,1	0,13	1,064	0,005	0,69	0,182	80	<0,006	50,23	5,5	0,69	1,025	0,177	14,8	650	9468	1486,57		0,07	7,828	0,014	0,356	0,806	0,115	6,242
BB 3	07.03.2011	09:00	37,2	0,02233	1,22	14,5	0,4	0,582	0,005	0,63	0,056	66	<0,006	30,34	0,82	<0,10	0,444	0,278	11,3	529	11160	1248,73		0,101	2,97	<0,013	0,312	0,203	0,123	4,68
BB 3	04.04.2011	09:45	40,2	0,02172	1,267	10,1	0,01	1,325	<0,005	<0,70	0,017	34	<0,010	17,93	0,35	<0,10	0,078	0,07	10,7	530	11520	1232,70		0,067	1,186	<0,013	0,263	<0,031	0,19	7,263
BB 3	11.04.2011	09:30	43,3	0,0211	1,371	8,81	0,02	1,424	<0,005	0,74	0,119	29	<0,010	10,18	0,26	<0,10	0,069	0,095	10,4	500	11570	1184,72		0,08	0,392	<0,013	0,249	<0,031	0,14	8,268
BB 3	15.04.2011	09:30	45,7	0,02424	1,481	8,3	0,03	1,665	0,005	<0,39	0,047	38	<0,010	9,032	0,34	<0,10	0,065	0,083	10,4	536	11920	1208,84		0,047	0,392	<0,013	0,236	<0,031	0,124	7,19
BB 3	16.05.2011	09:00	47,2	0,01793	1,403	9,35	0,22	1,427	0,005	<0,55	0,02	57	<0,008	6,404	0,															

Bezeichnung	Probe- nahmedatum	Probe- nahmezeit	SF6 (fmol/l)	Trichlorfluor- methan (F11) (pmol/l)	Dichlordifluor- methan (F12) (pmol/l)	1,1,2-Trichlortri- fluorethan (F113) (pmol/l)	13C(DIC) (‰ PDB)	14C(DIC) (% modern)	18O(H2O) (‰ VSMOW)	2H(H2O) (‰ VSMOW)	2H-Exzess (‰ VSMOW)	3H(H2O) (TU)
EKB 1	08.06.2010	14:15							-9,29 ± 0,2	-62,19 ± 1		
EKB 1	06.12.2010	11:00							-9,49 ± 0,15			6,4 ± 0,6
EKB 1 (PV Anfang)	16.12.2010	9:05		0,53 ± 0,05	1,9 ± 0,1	5,7 ± 1,2			-9,31 ± 0,15			6,5 ± 0,81
EKB 1 (PV Ende)	16.12.2010	13:10		0,45 ± 0,05	1,6 ± 0,1	4,6 ± 1,0			-9,12 ± 0,15			6,5 ± 0,92
EKB 1	16.12.2010	11:20										
EKB 1	24.01.2011	13:55										
EKB 2	10.11.2009	09:30										
EKB 2	21.01.2010	09:15										
EKB 2	22.03.2010	09:45					-12,3 ± 0,3	13,0 ± 1,5	-9,18 ± 0,15	-63,3 ± 1,5	10,1	<0,6
EKB 2	19.04.2010	10:00										
EKB 2	08.06.2010	09:00							-9,16 ± 0,2	-62,28 ± 1		
EKB 2	12.07.2010	09:00										
EKB 2	06.09.2010	10:00										
EKB 2	25.10.2010	10:30										
EKB 2	04.11.2010	10:00					-12,8 ± 0,3	20,5 ± 1,7				
EKB 2	06.12.2010	09:00										
EKB 2	24.01.2011	10:30										
EKB 2	04.03.2011	09:00										
EKB 2	05.03.2011	08:45										
EKB 2	07.03.2011	09:45	0,5 ± 0,2	0,06 ± 0,05	0,07 ± 0,05	0,1 ± 0,1	-11,00 ± 0,3	20,9 ± 1,6	-9,12 ± 0,15	-63,7 ± 1,5	9,26	1,0 ± 0,6
EKB 2	04.04.2011	09:00										
EKB 2	24.05.2011	14:00										
EKB 2	01.06.2011											
EKB 2	08.06.2011											
EKB 2	15.06.2011	09:15	0,3 ± 0,1	0,01 ± 0,05	0,08 ± 0,05	0,02 ± 0,05	-11,16	21,1 ± 1,6	-9,07	-60,7	11,86	1,0 ± 0,60
EKB 2	29.06.2011											
EKB 2	12.07.2011	09:00										
EKB 2	20.07.2011											
EKB 2	17.08.2011											
EKB 2	23.08.2011	08:45										
EKB 2	07.09.2011											
EKB 2	05.10.2011	09:00										
EKB 2	18.10.2011											
EKB 2	02.11.2011	09:00										
EKB 2	01.12.2011	09:15	0,4 ± 0,1	0,11 ± 0,05	0,15 ± 0,05	0,06 ± 0,05			-9,13	-62,3	10,74	1,45 ± 0,46
EKB 2	19.01.2012	11:30										
EKB 2	08.02.2012											
BB 3	02.03.2011	10:00										
BB 3	04.03.2011	08:30										
BB 3	05.03.2011	09:30										
BB 3	07.03.2011	09:00	0,2 ± 0,1	0,03 ± 0,05	0,03 ± 0,05	0,03 ± 0,05	-12,52 ± 0,3	18,2 ± 1,5	-9,03 ± 0,15	-62,8 ± 1,5	9,44	<0,6
BB 3	04.04.2011	09:45										
BB 3	11.04.2011	09:30										
BB 3	15.04.2011	09:30										
BB 3	16.05.2011	09:00										
BB 3	01.06.2011											
BB 3	08.06.2011											
BB 3	15.06.2011	11:00	0,6 ± 0,1	0,05 ± 0,05	0,06 ± 0,05	0,01 ± 0,05	-11,42	20,2 ± 1,6	-9,13	-62,0	11,04	<0,6
BB 3	29.06.2011											
BB 3	12.07.2011	10:00										
BB 3	20.07.2011											
BB 3	17.08.2011											
BB 3	23.08.2011	09:30										
BB 3	07.09.2011											
BB 3	05.10.2011	09:30										
BB 3	18.10.2011											
BB 3	02.11.2011	10:00										
BB 3	01.12.2011	12:55										
BB 3	01.12.2011	15:00										
BB 3	02.12.2011	09:30							-9,22	-64,8	8,96	1,30 ± 0,54
BB 3	06.12.2011	11:15	0,5 ± 0,1	0,10 ± 0,05	0,16 ± 0,05	0,07 ± 0,05			-9,17	-63	10,36	1,48 ± 0,45
BB 3	19.01.2012	11:00										
BB 3	08.02.2012											
Brunnen Neu Schladerer Staufen	02.02.2009	11:00										
BBR 1 EVC Staufen	02.02.2009	09:30										
Lbr. Innenhof Fa. Schladerer Staufen	02.02.2009	10:30										
WP Entnahmefontänen Staufen Grünmatten	03.02.2009	09:15										
Lbr. Innenhof Fa. Schladerer Staufen	23.06.2009	12:30	2,6 ± 0,3	5,4 ± 0,6	3,4 ± 0,4	16 ± 3			-8,72			
Brunnen Neu Schladerer Staufen	23.06.2009	09:00	2,8 ± 0,3	10 ± 1	4,9 ± 0,5	30 ± 6			-9,04			
Trinkwasser (Staufen)	09.10.2009	10:15	2,3 ± 0,3	12,0 ± 3,0	4,8 ± 0,3	0,49 ± 0,05	-13,27		-9,35	-64,2	10,6	8,4 ± 0,9
Laufbrunnen Freihofgasse	08.06.2010	10:15							n.b.	n.b.		
Bächle auf Höhe Hauptstrasse 25	08.07.2010											
Weiherhofquelle Brunnenstube mittl. Zulauf	24.01.2011	09:30										
Weiherhofquelle Brunnenstube rechter Zulauf	24.01.2011	10:00										
Weiherhofquelle	01.12.2011	11:15							-9,06	-62,5	10,0	7,47 ± 0,53