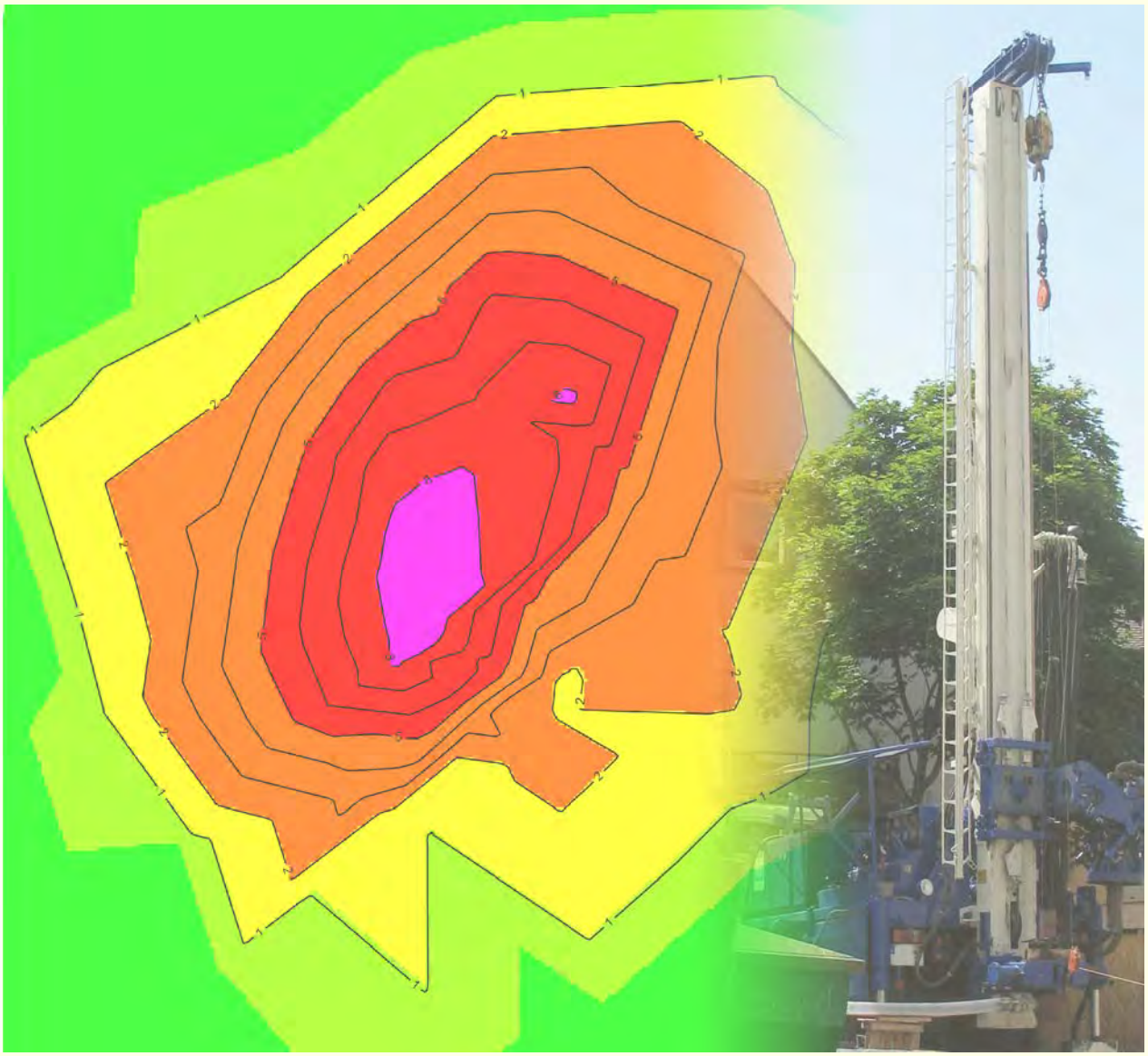
LGRB

LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU

Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br.



Sachstandsbericht

Az.: 94-4763//10-563

01.03.2010

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: [redacted]

Unter Mitarbeit von:

Grafik:

Satz und Layout:

Ausgabe: März 2010

© 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: links: Hebungsfigur Staufen (November 2009 – Januar 2010); rechts: Bohranlage.

Inhaltsverzeichnis **Seite:**

1 Vorbemerkungen und Veranlassung 17

1.1 Antrag und Anzeigen zum Bau der Erdwärmesonden 17
1.2 Fachtechnische Beurteilung durch das RPF/LGRB gemäß Geothermie-Leitfaden Baden-Württemberg 18
1.3 Erlaubnis-Bescheid, Anzeige des Bohrbeginns, nachträgliche Anordnung 18
1.4 Erste Schadensmitteilungen 20
1.5 Beweisverfahren der Stadt Staufen 20
1.6 Einrichtung des Arbeitskreises "Hebungsrisse" 20
1.7 Kabinettsbeschluss und Untersuchungsauftrag 21

2 Arbeitshypothese 22

2.1 Entwicklung der Arbeitshypothese 22
2.2 Erkundungsbohrung 24
2.3 Geologische Grundlagen und Stand der Untersuchungen zum Phänomen des "Gipskeuperquellens" 26

3 Geologischer, tektonischer, hydrogeologischer und ingenieurgeologischer Überblick 29

3.1 Allgemeiner geologischer Rahmen 29
3.2 Geologische Schichtenfolge im Raum Staufen 31
3.3 Tektonik und Schichtlagerung 33
3.4 Baugrundverhältnisse 34
3.5 Hydrogeologische Verhältnisse 35

4 Geländehebungen 37

4.1 Messpunktnetz 37
4.2 Hebungsfigur 37
4.3 Hebungsverlauf 39

5 Erkundungsbohrungen 55

5.1 Erkundungsbohrung EKB 1 55

5.1.1 Stammdaten, Ausbauhinweise 55

5.1.2 Geologische Schichtabfolge EKB 1 59

5.2 Erkundungsbohrung EKB 2 60

5.2.1 Stammdaten, Ausbauhinweise 61
5.2.2 Geologische Schichtabfolge EKB 2 66

5.3 Untersuchungsmethoden 74

5.3.1 Geophysikalische Bohrlochmessungen 74

5.3.1.1 Optischer Bohrlochscanner (ETIBS) 75
5.3.1.2 Akustischer Scanner (BHTV) 75
5.3.1.3 Kalibermessung 76
5.3.1.4 Messung von Neigung und Richtung 76
5.3.1.5 Natürliche Gammastrahlung 76

5.3.2 Hydraulische Messungen 76

5.3.2.1 Pumpversuche 77
5.3.2.2 Ventiltests 77
5.3.2.3 Fluid-Logging 77

5.3.3 Hydrochemische und isotopenhydrologische Messungen 77

5.3.3.1 Haupt- und Spureninhaltsstoffe 77
5.3.3.2 Isotope und Spurengase 78
5.3.3.2.1 Tritium (^{3}H) 78
5.3.3.2.2 Spurengase SF6 und FCKW 78
5.3.3.2.3 Kohlenstoffisotope (^{13}C-, ^{14}C-DIC) 79
5.3.3.2.4 Stabile Isotope des Wassers ($\delta^{18}O$, ^{2}H) 79

5.4 Untersuchungen in der Erkundungsbohrung EKB 1 80

5.4.1 Geophysikalische Bohrlochmessungen 80
5.4.2 Pumpversuch (Unterkeuper, ku) 82
5.4.3 Hydrochemie und Isotope 84
5.4.4 Langzeitbeobachtung des Grundwasserspiegels in der EKB 1 88

5.5 Untersuchungen in der Erkundungsbohrung EKB 2 89

5.5.1 Geophysikalische Bohrlochmessungen (Anl. 5.8 a, Anl. 5.8 b) 89

5.5.1.1 Beschaffenheit der Bohrlochwandung 91
5.5.1.2 Strukturdaten (Akustischer Scanner) 92
5.5.1.3 Lithologische Differenzierung der Bohrung (Gammastrahlung) 92

5.5.2 Hydraulische Versuche 93

5.5.2.1 Pumpversuche 94
5.5.2.2 Ventiltests 116
5.5.2.3 Fluid-Logging-Messungen 130
5.5.2.4 Beobachtungen von Spülungsabgängen 133
5.5.2.5 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der hydraulischen Untersuchungen in der Erkundungsbohrung EKB 2 135

5.5.3 Hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen 139

5.5.3.1 Hydrochemische und isotopenhydrologische Charakterisierung der Grundwässer 139
5.5.3.1.1 Quartär 145
5.5.3.1.2 Schilfsandstein (km2) 146
5.5.3.1.3 Gipskeuper (km1, Gipskarst) 149
5.5.3.1.4 Unterkeuper (ku) 151
5.5.3.1.5 Oberer Muschelkalk (mo) 154
5.5.3.1.6 Mischwasser Unterkeuper/Oberer Muschelkalk 157

5.5.3.2 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen 157

5.5.4 Laboruntersuchungen an Bohrproben der Erkundungsbohrungen Staufen 164

5.5.4.1 Probenentnahme an der Bohrstelle 164
5.5.4.2 Probenvorbereitung 167

5.5.4.3 Durchgeführte Laboruntersuchungen (Indexversuche) 167
5.5.4.3.1 Bestimmung des Wassergehalts 168
5.5.4.3.2 Bestimmung der Reindichte 169
5.5.4.3.3 Bestimmung der Feucht- und Trockendichte 170
5.5.4.3.4 Bestimmung des Porenanteils (Gesamtporosität) .. 171
5.5.4.3.5 Bestimmung des Karbonatgehalts nach Müller (Karbonatbombe) 172
5.5.4.3.6 Bestimmung des Glühverlusts bei 550 °C 172
5.5.4.3.7 Bestimmung des Glühverlusts bei 1150 °C 173
5.5.4.3.8 Bestimmung der Kornverteilung durch Sieb- und Sedimentationsanalyse von Lockergesteinen 174
5.5.4.3.9 Bestimmung der Konsistenzgrenzen (Fließ- und Ausrollgrenze) 175
5.5.4.3.10 Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens (Enslin-Versuch) 176
5.5.4.4 Röntgenographische Untersuchungen 178
5.5.4.4.1 Röntgen-Pulverdiffraktometrie- Analyse (RDA) 178
5.5.4.4.2 Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) 179
5.5.4.4.3 Ergebnisse der röntgenographischen Untersuchungen 179
5.5.4.5 Dünnschliffe 183
5.5.4.6 Darstellung der Laborergebnisse 185
5.5.4.6.1 Probentabelle 185
5.5.4.6.2 Graphische Auswertung 185
5.5.4.7 Gliederung der in EKB 1 und EKB 2 analysierten Profilabschnitte in Homogenbereiche 186
5.5.4.7.1 Homogenbereiche der EKB 1 187
5.5.4.7.2 Homogenbereiche der EKB 2 189
5.5.4.8 Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Gesteinen der EKB 2 193
5.5.4.9 Analysenergebnisse zur Ringraumverfüllung der EWS 5 (Probe: EKB 2/138) 194
5.5.4.10 Bewertung der Untersuchungen 195

6 Untersuchungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 199

6.1 Technische Angaben zu den Erdwärmesonden 199
6.2 Geologische Schichtenabfolge der Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 3 204
6.3 Bohrlochgeophysikalische Messungen in den Erdwärmesonden 206

6.3.1 Messungen der natürlichen Gammastrahlung (Gamma-Log) 207
6.3.2 Messungen von Inklination und Azimut der EWS 1 bis EWS 7 208

6.3.3 Temperaturmessungen 216
6.3.3.1 Vorbemerkungen zu Temperaturmessungen in Erdwärmesonden 216
6.3.3.2 Temperaturprofilmessungen in den Erdwärme-Sonden EWS 1 bis EWS 7 219
6.3.3.2.1 Zielsetzungen der Temperaturmessungen, eingesetzte Verfahren 219
6.3.3.2.2 Ergebnisse der Temperaturprofilmessungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 219
6.2.3.3 Aufheiz-Temperaturprofile in den EWS 3 und EWS 7 242
6.2.3.4 Thermal-Response-Test in der EWS 7 245
6.2.3.5 Bewertung der Temperaturuntersuchungen 248

7 Geologisches und hydrogeologisches Untergrundmodell 250

7.1 Geologischer Kenntnisstand vor Beginn der Erkundungsmaßnahmen 250

7.1.1 Geologische Verhältnisse 250
7.1.2 Hydrogeologische Verhältnisse 253

7.2 Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen 254

7.2.1 Erkundungsbohrungen und Erdwärmesondenbohrungen 254
7.2.2 Messungen der natürlichen Bodenunruhe 254

7.2.2.1 Messverfahren und Auswertung 254
7.2.2.2 Ergebnisse 255

7.2.3 Seismische Erkundung 257

7.2.3.1 Messverfahren 257
7.2.3.2 Auswertung 261

7.3 Geologisches Untergrundmodell 266
7.4 Hydrogeologisches Modell 274

7.5 Modellvorstellung zur Entstehung der Hebungsvorgänge in der Altstadt von Staufen 276

7.5.1 Hydraulische Verhältnisse vor dem Abteufen der EWS-Bohrungen 277
7.5.2 Veränderungen des natürlichen hydraulischen Systems durch die Erdwärmesondenbohrungen als Auslöser der Gipskeuperquellung 278

8 Bisherige Maßnahmen zur Schadensbegrenzung 280

8.1 Dauerpumpmaßnahme (Hydraulischer Abwehrbetrieb) in der EKB 2 ... 281
8.2 Nachverpressung der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 285

9 Zusammenfassung 292
10 Literatur 301

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Synoptische Darstellung zur Arbeitshypothese.

Abb. 3.1: Geologische Karte von Staufen und Umgebung (Ausschnitt aus GROSCHOPF et al. 1996). Die Lage des Erdwärmesondenfeldes zwischen dem Rathaus und dem Bauamt der Stadt Staufen ist mit einem roten Kreis markiert.

Abb. 3.2: Geologische Karte von Staufen und Umgebung (Detailvergrößerung, kombiniert mit dem digitalen Geländemodell. Die Lage des Erdwärmesondenfeldes zwischen dem Rathaus und dem Bauamt der Stadt Staufen ist rot markiert (Legende siehe Abb. 3.1)).

Abb. 4.1: Lage der Höhenmesspunkte mit Angabe des Messpunktalters und den Messpunkten mit 14-tägigem Messrhythmus.

Abb. 4.2: Hebungsfigur Februar 2008 - Mai 2008.

Abb. 4.3: Hebungsfigur Mai 2008 - Juni 2008.

Abb. 4.4: Hebungsfigur Juni 2008 - August 2008.

Abb. 4.5: Hebungsfigur August 2008 - Oktober 2008.

Abb. 4.6: Hebungsfigur Oktober 2008 - Dezember 2008.

Abb. 4.7: Hebungsfigur Dezember 2008 - Januar 2009.

Abb. 4.8: Hebungsfigur Januar 2009 - März 2009.

Abb. 4.9: Hebungsfigur März 2009 - Mai 2009.

Abb. 4.10: Hebungsfigur Mai 2009 - Juli 2009.

Abb. 4.11: Hebungsfigur Juli 2009 - September 2009.

Abb. 4.12: Hebungsfigur September 2009 - November 2009.

Abb. 4.13: Hebungsfigur November 2009 - Januar 2010.

Abb. 4.14: Absolutbeträge der Hebungen im Zeitraum 23. März 2009 bis 23. November 2009.

Abb. 4.15: Darstellung der Messpunkte ohne (grün) bzw. mit (rot) signifikanter Hebungsbewegung.

Abb. 4.16: Zeitliche Entwicklung der absoluten Hebungsbeträge an ausgewählten Messpunkten.

Abb. 4.17: Zeitliche Entwicklung der Hebungsgeschwindigkeit an ausgewählten Messpunkten.

Abb. 4.18: Lage der Schnittlinien 1 und 2.

Abb. 4.19: Höhenentwicklung in zwei Schnitten parallel zu den Hauptachsen des elliptischen Hebungsbereiches.

Abb. 4.20: Darstellung des Zentral- und des Gesamtbereiches für die Hebungsvolumenberechnung.

Abb. 4.21: Quellungsbedingte Volumenzunahme für den Gesamtbereich zwischen 06. Mai 2008 und 25. Januar 2010.

Abb. 4.22: Quellungsbedingte Volumenzunahme für den Zentralbereich zwischen 06. Mai 2008 und 25. Januar 2010.

Abb. 5.1: Lageplan mit Eintrag der Erdwärmesonden EWS 1 bis 7 und der Erkundungsbohrung EKB 1.

Abb. 5.2: Vergleich der in der EKB 1 angetroffenen Schichtabfolge mit der im benachbarten Erdwärmesondenfeld.

Abb. 5.3: Schematische graphische Darstellung der Erkundungsbohrung EKB 1.

Abb. 5.4: Lageplan mit Eintrag der Erdwärmsonden EWS 1 bis EWS 7 und den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2.

Abb. 5.5: Bohrkern der EKB 2 von 117,5 m u. GOK bis 118,1 m u. GOK, angebohrte EWS 5 mit Ringraumverfüllung und Sondenschlauch.

Abb. 5.6: Graphische Darstellung des schematischen Schichtenprofils der Erkundungsbohrung EKB 2.

Abb. 5.7 links: EKB 2: Schilfsandstein, km2; Intraklast-Konglomerat aus Tonstein- und Schluffstein-Geröllen bis ca. 6 cm, überwiegend gut gerundet, in Sandmatrix, mit einzelnen Sandstein-Brocken.

Abb. 5.7 rechts: EKB 2: Schilfsandstein, km2; Sandstein-Schluffstein-Wechsellagerung, einzelne Lagen 1 – 4 mm dick, unten in Flaserschichtung übergehend, grau; von brecciösen Klüften durchsetzt, in der Mitte ca. 5 cm hohe Stauchfalte.

Abb. 5.8 links: EKB 2: Untere Bunte Estherienschichten, km1; knollig ausgebildeter Gipsstein in Tonsteinmatrix.

Abb. 5.8 rechts: EKB 2: Untere Bunte Estherienschichten, km1; massig ausgebildeter Gipsstein mit dünnen Tonflasern, ab 39,95 m knollig-brecciös.

Abb. 5.9 links: EKB 2: Mittlerer Gipshorizont, km1; Anhydritstein, tonig, brecciös, mit mm-großen Sulfat- und Tonstein-Knötchen, einzelne, gipsverheilte Schichtfugen und steilstehende Klüfte; Kern polyrdrisch zerfallend Schichtneigung 40°.

Abb. 5.9 rechts: EKB 2: Mittlerer Gipshorizont, km1: feinschichtige Wechsellagerung von Anhydritstein, grau und Tonstein, dunkelgrau, einzelne Lagen leicht enterolithisch verfaltet; Kern z. T. an Tonfugen aufgequollen.

Abb. 5.10 links: EKB 2: Mittlerer Gipshorizont, km1; bis 79,80 m: Anhydritstein, schlierig-flaserig geschichtet, im feinschichtigen Wechsel mit Tonstein, dunkelgrau; bei 79,75 steilstehende Kluft mit hellrotem Anhydritstein (2 - 3 mm), bis 79,95 m: Tonstein, schwarzgrau mit rotbraunen Schlieren, erdfeucht-trocken, bröckelig, stückig, einzelne Gips-/Anhydritsteinlagen, Marienglas, Fasergips.

Abb. 5.10 rechts: EKB 2: Weinsberg-Horizont, km1; Tonstein, dunkelgrau, Gipstapeten auf Trennflächen; 89.05 – 89.15 m steil stehende Kluft, mit blassrosa Gips verheilt; Kern platzt entlang Schichtfugen auf.

Abb. 5.11 links: EKB 2: Grundgipsschichten, km1; Wechsellagerung von Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, in Lagen von 1 - 3 cm, mit Dolomitmergelstein, grau, in Lagen zu 0,5–2 cm; Fasergips vorwiegend auf Schichtfugen, Gips ca. 60 %, Einfallen ca. 40°.

Abb. 5.11 rechts: EKB 2: Grundgipsschichten, km1; Gipsauslaugungsschluff, tonig, z. T. kalkig, beige bis grau, nach unten zunehmend feinschichtig, lagenweise Dolomitstein-Bröckchen bis 2 cm Dicke.

Abb. 5.12 links: EKB 2: Sandige Pflanzenschiefer, ku; Feinsandstein, schwach dolomitisch, mittelgrau.

Abb. 5.12 rechts: EKB 2: Trigonodusdolomit, mo2D: Dolomitstein, feinkristallin, wellig feinlaminiert (Algenlaminat), weißlichgrau bis hellbeige, bei 158,4 m hellgraue bis weißlichgraue Hornsteinlinse.

Abb. 5.13: Schematische Übersichtsdarstellung der geologischen Schichtfolge (EKB 1, EWS 1 bis 3 und EKB 2).

Abb. 5.14: Akustisches Bohrlochfernsehen: Ergebnisse der Befahrung in der EKB 1.

Abb. 5.15: Pumpversuch EKB 1: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

Abb. 5.16: Pumpversuch EKB 1: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.17: Pumpversuch EKB 1: Auswertung der Absenkung nach COOPER-JACOB.

Abb. 5.18: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Unterkeuper (ku) der EKB 1.

Abb. 5.19: Kreisdiagramm zur Darstellung der hydrochemischen Inhaltsstoffe nach UDLUFT (Unterkeuper der EKB 1, Analyse vom 14. März 2009).

Abb. 5.20: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus dem Unterkeuper (ku) der EKB 1.

Abb. 5.21: EKB1: Tiefenprofil der Temperatur und Leitfähigkeit in der ausgebauten Grundwassermessstelle (Ausbauzeichnung: Fa. Anger's Söhne).

Abb. 5.22: Korrelation des Grundwasserspiegels in der EKB 1 mit den Niederschlagshöhen der Messstation Müllheim (273 m NN).

Abb. 5.23: Pumpversuch PV1/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

Abb. 5.24: Pumpversuch PV1/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.25: Pumpversuch PV1/EKB 2: pH-Wert und Sauerstoffgehalt im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.26: Pumpversuch PV1/EKB 2: Auswertung der Absenkung nach COOPER-JACOB.

Abb. 5.27: Pumpversuch PV2/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

Abb. 5.28: Pumpversuch PV2/EKB 2: Verlauf der Absenkung in den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 während des Pumpversuches PV2 in der Erkundungsbohrung EKB 2.

Abb. 5.29: Pumpversuch PV2/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.30: Pumpversuch PV2/EKB 2: Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS.

Abb. 5.31: Übersicht über die Pumpversuche vom 24. September bis 12.Oktober 2009 in der Erkundungsbohrung EKB 2 im Tiefenabschnitt 145,2 m u. GOK bis 153,0 m u. GOK.

Abb. 5.32: Pumpversuch PV3/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

Abb. 5.33: Pumpversuch PV3/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.34: Pumpversuch PV3/EKB 2: pH-Wert und Sauerstoff im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.35: Pumpversuch PV3a/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

Abb. 5.36: Pumpversuch PV3a/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.37: Pumpversuch PV3a/EKB 2: Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS.

Abb. 5.38: Pumpversuch PV3b/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

Abb. 5.39: Pumpversuch PV3b/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.40: Pumpversuch PV3b/EKB 2: pH-Wert und Sauerstoff im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.41: Pumpversuch PV3b/EKB 2: Wasserstandsänderungen in der EKB 2 und der EKB 1.

Abb. 5.42: Pumpversuch PV3b/EKB 2: Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS.

Abb. 5.43: Pumpversuch PV4/EKB 2: Wasserstandsänderung (EKB 2) und Entnahmeraten.

Abb. 5.44: Pumpversuch PV4/EKB 2: Verlauf der Absenkung in den Erkundungsbohrungen EKB 2 im Oberen Muschelkalk und im Unterkeuper (gemessen im Ringraum oberhalb des Packers).

Abb. 5.45: Pumpversuch PV4/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.46: Pumpversuch PV4/EKB 2: pH-Wert und Sauerstoff im entnommenen Grundwasser.

Abb. 5.47: Messprotokoll zum Pulse-Test am 21. April 2009.

Abb. 5.48: Auswertung des Pulse-Tests vom 21. April 2009 (Tiefenabschnitt 19,0 m u. GOK bis 22,0 m u. GOK).

Abb. 5.49: Messprotokoll zum Slug-Test am 22. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 49,5 m u. GOK bis 52,0 m u. GOK).

Abb. 5.50: Auswertung des Slug-Tests vom 22. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 49,5 m u. GOK bis 52,0 m u. GOK).

Abb. 5.51: Messprotokoll zum Slug-Test am 27. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 49,5 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK).

Abb. 5.52: Auswertung des Slug-Tests vom 27. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 49,5 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK).

Abb. 5.53: Messprotokoll zum Slug-Test am 27. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 55,0 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK).

Abb. 5.54: Auswertung des Slug-Tests vom 27. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 55,0 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK, Anmerkung: Packersitz von 54,0 bis 55,0 m u. GOK).

Abb. 5.55: Messprotokoll zum Slug-Test am 08. Juni 2009 (Tiefenabschnitt 62,5 m u. GOK bis 75,0 m u. GOK).

Abb. 5.56: Auswertung des Slug-Tests vom 08. Juni 2009 (Tiefenabschnitt 62,5 m u. GOK bis 75,0 m u. GOK).

Abb. 5.57: Messprotokoll zum Pulse-Test am 02. Juli 2009 (Tiefenabschnitt 69,0 m u. GOK bis 92,0 m u. GOK).

Abb. 5.58: Auswertung des Pulse-Tests vom 02. Juli 2009 (Tiefenabschnitt 69,0 m u. GOK bis 92,0 m u. GOK, Anmerkung: Packersitz von 68,0 m u. GOK bis 69,0 m u. GOK).

Abb. 5.59: Messprotokoll zum Pulse-Test am 17. Juli 2009 (Tiefenabschnitt 72,0 m u. GOK bis 95,0 m u. GOK).

Abb. 5.60: Auswertung des Pulse-Tests vom 17. Juli 2009 (Tiefenabschnitt 72,0 m u. GOK bis 95,0 m u. GOK).

Abb. 5.61: Messprotokoll zum Pulse-Test am 06. August 2009 (Tiefenabschnitt 100,0 m u. GOK bis 120,0 m u. GOK).

Abb. 5.62: Fluid-Logging (Tiefenabschnitt 60,0 m u. GOK bis 75,0 m u. GOK, 08. Juni 2009).

Abb. 5.63: Fluid-Logging (Tiefenabschnitt 140,0 m u. GOK bis 163,0 m u. GOK, 22. Oktober 2009).

Abb. 5.64: Beobachtung der Spülungsabgänge zwischen dem 10. und 15. Juni 2009 (Bohrabschnitt 32,20 m u. GOK bis 76,40 m u. GOK).

Abb. 5.65: Beobachtung der Spülungsabgänge zwischen dem 14. und 17. September 2009 (Bohrabschnitt 98,0 m u. GOK bis 148,0 m u. GOK).

Abb. 5.66: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der hydraulischen Untersuchungen.

Abb. 5.67: Ergebnisse der Tritium-Messungen (aus dem Bericht der Fa. Hydroisotop vom 17. Dezember 2009).

Abb. 5.68: Ergebnisse der $\delta^{13}C$-Messungen (aus dem Bericht der Fa. Hydroisotop vom 17. Dezember 2009).

Abb. 5.69: ^{14}C-Gehalte der Grundwasserproben der EKB 1 und EKB 2 Staufen (aus dem Bericht der Fa. Hydroisotop vom 17. Dezember 2009).

Abb. 5.70: Ergebnisse der $\delta^{18}O$-Messungen (aus dem Bericht der Fa. Hydroisotop vom 17. Dezember 2009).

Abb. 5.71: PIPER-Diagramm: Grundwasser des quartären Kiesgrundwasserleiters im Stadtgebiet von Staufen.

Abb. 5.72: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Schilfsandstein (km2) der EKB 2 Staufen.

Abb. 5.73: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus dem Schilfsandstein (km2) der EKB 2.

Abb. 5.74: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Gipskeuper (km1) der EKB 2 Staufen.

Abb. 5.75: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus dem Gipskeuper (km1) der EKB 2 Staufen.

Abb. 5.76: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Unterkeuper (ku) der EKB 2 Staufen.

Abb. 5.77: Mineral-Sättigungszustände im Grundwasser aus dem Unterkeuper der EKB 2.

Abb. 5.78: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Oberen Muschelkalk (mo) der EKB 2 Staufen.

Abb. 5.79: Mineral-Sättigungszustände im Grundwasser aus dem Oberen Muschelkalk der EKB 2.

Abb. 5.80: SCHÖLLER-Diagramm mit jeweils einer repräsentativen Grundwasserprobe aus den vier Grundwasserstockwerken der EKB 2.

Abb. 5.81: PIPER-Diagramm mit jeweils einer repräsentativen Grundwasserprobe aus den untersuchten Grundwasservorkommen in Staufen.

Abb. 5.82: Korrelationsdiagramm $^{13}C/^{14}C$ (aus dem Bericht der Fa. Hydroisotop vom 17. Dezember 2009).

Abb. 5.83: Korrelationsdiagramm $^{18}O/^{14}C$ (aus dem Bericht der Fa. Hydroisotop vom 17. Dezember 2009).

Abb. 5.84: Synoptische Darstellung der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungsergebnisse in der Erkundungsbohrung EKB 2

Abb. 5.85: Dünnschliff an Kernprobe aus EKB 2 bei 66,3 m.

Abb. 5.86: Dünnschliff an Kernprobe aus EKB 2 bei 66,3 m.

Abb. 5.87: Dünnschliff an Kernprobe aus EKB 2 bei 70,55 m.

Abb. 6.1: Graphische Darstellung der Schichtabfolge der EWS 1 bis 3; Gips- und Anhydrit-Anteile (halbquantitativ) in der Erdwärmesondenbohrung EWS 3, Rathaus Staufen.

Abb. 6.2: Korrelation der Bohrprofile und der Ergebnisse der natürlichen Gammastrahlung in den EWS 3 und EWS 7 sowie in der EKB 2.

Abb. 6.3: Messsonde für die Raumlagemessungen in den EWS-Schläuchen.

Abb. 6.4: Grundrissdarstellung der EWS-Bohrspuren durch das RPF/LGRB (Inklinometer-/ Azimutmessung).

Abb. 6.5: Räumlicher Verlauf der Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 7.

Abb. 6.6: Beispiel für ein ungestörtes vertikales Ruhetemperaturprofil (Quelle: Fa. systherma).

Abb. 6.7: Beispiele für Ruhetemperaturprofile, z. T. mit Grundwassereinfluss (GEOWATT 2008).

Abb. 6.8: Ruhetemperaturprofile in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 (12. Juni 2008).

Abb. 6.9: Kabelgebundene Temperaturmesssonde des Büros VOUTTA.

Abb. 6.10: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 1.

Abb. 6.11: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 2.

Abb. 6.12: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 3.

Abb. 6.13: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 4.

Abb. 6.14: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 5.

Abb. 6.15: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 6.

Abb. 6.16: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 7.

Abb. 6.17: EWS 3: Zeitliche Entwicklung der Temperaturen in vier Referenztiefen auf der Grundlage der Ruhe-Temperaturprofile.

Abb. 6.19: EWS 7: Zeitliche Entwicklung der Temperaturen in drei Referenztiefen auf der Grundlage der Ruhe-Temperaturprofile. In 130 m Tiefe konnte nach dem 16. November 2010 auf Grund der Arbeiten zur Nachverpressung nicht mehr gemessen werden.

Abb. 6.20: Vergleichende Darstellung der zeitlichen Entwicklung der maximalen Temperaturen in der Temperaturanomalie in EWS 1 bis EWS 7.

Abb. 6.21: Temperaturverteilung im Untergrund des Erdwärmesondenfeldes am Stichtag 12. Februar 2009 (Tiefenbezug: Maximaltemperatur der Temperaturanomalie, die Bezugspunkte wurden lagekorrigiert).

Abb. 6.22: Raumlage der Temperaturmaxima in den Temperaturanomalien

Abb. 6.23: Stratigraphische Gliederung der EWS-Bohrungen auf Basis der Temperaturprofile vom 12. Februar 2009, der Gamma-Logs, der geologischen Profilaufnahmen und des 3D-Modells.

Abb. 6.24: Aufheiztemperaturprofile in den EWS 3 und EWS 7.

Abb. 6.25: Auswertung des Thermal-Response-Tests in der EWS 7 vom 24. Juli bis 28. Juli 2009.

Abb. 6.26: Temperaturentwicklung in der EWS 7 nach dem Thermal-Response-Test (24. - 28. Juli 2009).

Abb. 7.1: Schematischer geologischer Profilschnitt vom Roten Berg über den Schloßberg in Staufen, verändert nach SCHREINER (1991) und GENSER (1992).

Abb. 7.2: Gruppierung der Frequenzspektren (Kartenhintergrund: Geologische Karte nach GENSER (1959)).

Abb. 7.3: Seismische Untergrunderkundung mit Hilfe eines beschleunigten Fallgewichts (Typ Fallgewicht VAKAIMPAKT & SAWD) als Energiequelle zur Auslösung des seismischen Impulses im Untergrund.

Abb. 7.4: Lageplan der reflexionsseismischen Profile 09STAUF-1 bis 09STAUF-5 in der Altstadt.

Abb. 7.5: Raumlage der hybridseimischen Profile mit Lage der Erdwärmesondenbohrungen, der Erkundungsbohrungen sowie mit den Bohrspuren.

Abb. 7.6: Reflexionsseismisches Tiefenprofil 09STAUF-1.

Abb. 7.7: Reflexionsseismisches Tiefenprofil 09STAUF-2.

Abb. 7.8: Reflexionsseismisches Tiefenprofil 09STAUF-3.

Abb. 7.9: Abgedeckte geologische Karte der Altstadt Staufen (Bezugsniveau ca. 230 m NN bzw. ca. 50 m u. GOK).

Abb. 7.10: Höhenlinienplan des Anhydritreflektors (bezogen auf m NN).

Abb. 7.11: Schematischer geologischer Schnitt durch das Hebungszentrum Staufen, Schnittverlauf siehe Abb. 7.9. Die Bohransatzpunkte der EKB 1 und EKB 2 wurden auf die Schnittlinie projiziert.

Abb. 7.12: Abgedeckte geologische Karte der Altstadt von Staufen (Bezugsniveau ca. 230 m NN bzw. ca. 50 m u. GOK) mit den störungsparallel verlaufenden Hauptrisslinien (Bezugsniveau: Geländeoberfläche, nach Büro für Baukonstruktion, BfB, Karlsruhe).

Abb. 7.13: Hebungsfigur, schematisiertes geologisches Profil durch das Hebungszentrum und Hebungsprofil durch das Zentrum der Hebungsfigur Staufen.

Abb. 7.14: Blockbild zur Verdeutlichung der Prozesse, die zur Hebung im Bereich des EWS-Feldes Rathaus Staufen führen.

Abb. 8.1: Dauerentnahme während des Absenkbetriebes in der EKB 2; Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

Abb. 8.2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser während der Dauerentnahme in der EKB 2.

Abb. 8.3: Dauerentnahme während des Absenkbetriebes in der EKB 2; Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

Abb. 8.4: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser während der Dauerentnahme in der EKB 2.

Abb. 8.5: Temperaturprofile in EWS 7 vor (schwarz) und nach Ringrauminjektionen.

Abb. 8.6: Temperaturprofile in EWS 3 vor (schwarz) und nach drei Ringrauminjektionen, davon eine in EWS 3 (blau) und zwei überlagernde aus EWS 7 (rot und grün).

Abb. 8.7: Übersichtsgrafik zu den Injektionsmengenaufnahmen in den EWS 1 bis EWS 7 (Stand Februar 2010).

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1: Stammdaten der Erkundungsbohrung EKB 1 (Datum der Einmessung: 11. Januar 2010).

Tab. 5.2: Stammdaten der Erkundungsbohrung EKB 2 (Datum der Einmessung: 23. September 2009).

Tab. 5.3: Zusammenstellung der in EKB 2 eingebauten Standrohr-/Sperrrohrtouren.

Tab. 5.4: Zusätze und Parameter der inhibierten Bohrspülung.

Tab. 5.5 Geophysikalische Bohrlochmessungen in der Erkundungsbohrung EKB 1.

Tab. 5.6: Pumpversuchsablauf in der Erkundungsbohrung 1 (EKB 1).

Tab. 5.7: Ergebnisse der isotopenhydrologischen Messungen im Grundwasser aus dem Unterkeuper (ku) der Erkundungsbohrung 1 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Tab 5.8: Bohrlochgeophysikalische Messungen in der Erkundungsbohrung EKB 2.

Tab. 5.9: Strukturen in der Bohrlochwandung der EKB 2.

Tab. 5.10: Übersicht über die hydraulischen Versuche in der Erkundungsbohrung EKB.

Tab. 5.11: Pumpversuchsablauf PV1/EKB 2 am 31. März 2009 in der Erkundungsbohrung 2 (EKB 2).

Tab. 5.12: Pumpversuchsablauf PV2/EKB 2 am 23. April 2009 in der Erkundungsbohrung 2 (EKB 2).

Tab. 5.13: Pumpversuchsablauf PV3 am 24. September 2009 in der Erkundungsbohrung 2 (EKB 2).

Tab. 5.14: Pumpversuchsablauf PV3a/EKB 2 vom 25. September bis 12. Oktober 2009 in der Erkundungsbohrung 2 (EKB 2).

Tab 5.15: Pumpversuchsablauf PV3b/EKB 2 vom 12. Oktober 2009 bis 17. Oktober 2009 in der Erkundungsbohrung 2 (EKB 2).

Tab. 5.16: Pumpversuchsablauf PV4/EKB 2 vom 22. Oktober bis 26. Oktober 2009 in der Erkundungsbohrung 2 (EKB 2).

Tab. 5.17: Hydrochemische und isotopenhydrologische Beprobungen.

Tab. 5.18: Ergebnisse der isotopenhydrologischen Untersuchungen der Grundwässer in Staufen (aus dem Bericht der Fa. Hydroisotop vom 17. Dezember 2009).

Tab. 5.19: Wichtigste Hauptinhaltsstoffe der Grundwässer in Staufen.

Tab. 5.20: Ergebnisse der Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Quartär im Stadtgebiet von Staufen sowie im Trinkwasser (überwiegend Quellwasser aus dem Münstertal) (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Tab. 5.21: Ergebnisse der Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Schilfsandstein (km2) der Erkundungsbohrung EKB 2 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Tab. 5.22: Ergebnisse der Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Gipskeuper (km1) der Erkundungsbohrung EKB 2 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Tab. 5.23: Ergebnisse der Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Unterkeuper (ku) der Erkundungsbohrung EKB 2 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Tab. 5.24: Ergebnisse Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Oberen Muschelkalk (mo) der Erkundungsbohrung EKB 2 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Tab. 5.25: Übersicht über Art und Anzahl der durchgeführten Laboruntersuchungen.

Tab. 5.26: Bewertung der Bereiche des Wasseraufnahmevermögens.

Tab. 5.27: Gliederung der EKB 1 in Homogenbereiche (*= Wert entspricht der halben Nachweisgrenze).

Tab. 5.28: Gliederung der EKB 2 in Homogenbereiche (*= Wert entspricht der halben Nachweisgrenze).

Tab. 5.29: Zuordnung der Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen (λ, trocken) an Gesteinen der EKB 2 zu den Homogenbereichen.

Tab. 6.1: Koordinaten, Ansatzhöhen und Archivnummern des LGRB der Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 7 (Datum der Einmessung: 23. September 2009).

Tab. 6.2: Fertigstellungsberichte zu den EWS 1 (S1) bis EWS 7 (S7) (auszugsweise Angaben).

Tab. 6.3: Verrohrungslängen der EWS-Bohrungen.

Tab. 6.4: Befahrbarkeit der EWS am 3./4. August 2009 mit der Messsonde zur Bestimmung der Raumlage.

Tab. 6.5: Temperaturmessungen bei erreichter Sondentiefe (ET) in den EWS 1 bis 7 (Messung mit der Kabelsonde (Ø 15 mm), in blau: Temperaturmessungen während der schadensbegrenzenden Maßnahmen).

Tab. 6.6: Maximale Temperatur in den Erdwärmesonden im Bereich der Temperaturanomalie, Tiefe bezogen auf die Sondenlängen.

Tab. 6.7: Referenztiefen in den Erdwärmesonden EWS 3, 6, und 7 zur Auswertung der Temperaturmessungen als Zeitreihen.

Tab. 7.1: Bezeichnung und Länge der seismischen Profile.

Anlagenverzeichnis

Anlage 3.1: Stratigraphische Gliederung der relevanten Keuper- und Muschelkalkabfolge
Anlage 3.2: Geologische Karte
Anlage 3.3: Tektonisches Inventar im Stadtgebiet von Staufen
Anlage 3.4: Hydrogeologische Gliederung des Buntsandstein (LGRB 2002)
Anlage 3.5: Hydrogeologische Gliederung des Muschelkalks (LGRB 2002)
Anlage 3.6: Hydrogeologische Gliederung des Keupers

Anlage 5.1: Bauzeitenplan EKB 1 und EKB 2
Anlage 5.2: EKB 1: Ausbauzeichnung der Fa. H. Anger`s Söhne
Anlage 5.3 a: Bohrprofil der Erkundungsbohrung EKB 1
Anlage 5.3 b: EKB 1: Graphische Darstellung der Schichtabfolge
Anlage 5.4: Fotodokumentation der Erkundungsbohrung EKB 1
Anlage 5.5: EKB 2: Ausbauzeichnung der Fa. H. Anger`s Söhne
Anlage 5.6 a: Bohrprofil der Erkundungsbohrung EKB 2
Anlage 5.6 b: EKB 2: Graphische Darstellung der Schichtabfolge
Anlage 5.7: Fotodokumentation der Erkundungsbohrung EKB 2
Anlage 5.8 a: EKB2: Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen (Ing.-Büro Prof. Fecker und Partner)
Anlage 5.8 b: EKB2: Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen (Fa. terratec)
Anlage 5.9: Ergebnisse der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen (Zusammenstellung der Fa. Hydroisotop).
Anlage 5.10: Probentabelle der EKB 1
Anlage 5.11: Graphische Darstellung der im Labor ermittelten Boden und Gesteinskennwerte der EKB 1
Anlage 5.12: Probentabelle der Erkundungsbohrung EKB2
Anlage 5.13: Graphische Darstellung der im Labor ermittelten Boden und Gesteinskennwerte der EKB 2
Anlage 5.14: Prüfbericht der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt der Universität Karlsruhe (TH) vom 23.09.2009

Anlage 6.1: Bohrprofil EWS 1
Anlage 6.2: Bohrprofil EWS 2
Anlage 6.3: Bohrprofil EWS 3

Anlage 7.1: Stammdaten der Bohrungen im Stadtgebiet von Staufen und in der näheren Umgebung
Anlage 7.2: Kurzprofile tieferer Bohrungen im Stadtgebiet von Staufen

1 Vorbemerkungen und Veranlassung

Baden-Württemberg setzt im Hinblick auf den Klimaschutz und zur Schonung fossiler Energieträger auf die verstärkte Nutzung regenerativer Energien. Einen wichtigen Beitrag hierzu liefert die oberflächennahen Geothermie. In der Stadt Staufen wurde deshalb beabsichtigt, das denkmalgeschützte renovierte Rathaus mit Erdwärmetechnologie zu heizen und zu kühlen. Hierzu wurden im September 2007 Bohrungen für sieben Erdwärmesonden (EWS 1 bis EWS 7) ausgeführt, die heute im Verdacht stehen, im Untergrund Prozesse auszulösen, die zu den seit Ende 2007 zunehmenden Schäden an Gebäuden und Infrastruktur im historischen Altstadtbereich führen.

Das Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RPF/LGRB), erhielt von der baden-württembergischen Landesregierung den Auftrag, die geologischen Ursachen der Schadensvorgänge in Staufen zu untersuchen und Möglichkeiten für schadensbegrenzende Maßnahmen aufzuzeigen. Die bislang gewonnenen Erkenntnisse werden im vorliegenden Sachstandsbericht zusammengefasst.

1.1 Antrag und Anzeigen zum Bau der Erdwärmesonden

Die Stadt Staufen hat für ihr Rathaus den Bau von anfangs insgesamt 14 Erdwärmesonden (EWS) vorgesehen. Für den Bau und Betrieb sind wasserrechtliche Genehmigungen einzuholen. Einen Antrag auf Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis hat die Stadt mit Schreiben vom 28. März 2007 beim zuständigen Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald gestellt. Für die zugehörigen Bohrungen bestehen auch außerhalb des Wasserrechts Anzeigepflichten. Im Auftrag der Stadt Staufen hat die Firma s. zwölf Bohrungen mit der Az. Ra vom 02. April 2007 nach § 4 Lagerstättengesetz und – da die Bohrungen mehr als 100 Meter in den Untergrund eindringen sollten – auch nach § 127 BBerG dem Regierungspräsidium Freiburg angezeigt.

Die Landesbergdirektion am RPF/LGRB hat nach Prüfung vor benannter Anzeige am 11. Mai 2007, Az. 4712/2007 003246 die Einhaltung der Betriebsplanpflicht für das Bohrvorhaben für nicht erforderlich erklärt (§ 127 BBerG). Der feststellende, mit Auflagen versehene Bescheid wurde an das Bürgermeisteramt Staufen und nachrichtlich an das zuständige LRA Breisgau-Hochschwarzwald versandt. Die Firma s. hat ihn nachrichtlich per E-Mail erhalten.

Die Anzeige nach § 4 Lagerstättengesetz ermöglicht dem Geologischen Dienst am RPF/LGRB bei Bedarf die Übernahme von Bohrungsdaten für Zwecke der Landesaufnahme.

1.2 Fachtechnische Beurteilung durch das RPF/LGRB gemäß Geothermie-Leitfaden Baden-Württemberg

In dem wasserrechtlichen Verfahren beim zuständigen Landratsamt hat das Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RPF/LGRB) das Vorhaben nach den ihm vorliegenden Fachinformationen geprüft. Seine Einbindung erfolgt gemäß "Geothermie-Leitfaden des Landes Baden-Württemberg" (UM 2005) in dem wasserrechtlichen Verfahren für Erdwärmesondenanlagen und RP-intern zusätzlich bei Bohranzeigen nach §127 BBergG.

Entsprechend dem Geothermie-Leitfaden ist im Fall Staufen eine Einzelfallprüfung im RPF/ LGRB durchgeführt worden. Der Bohrplatz in Staufen liegt nach Leitfaden in der Zone "D". Geologisch wird die Einzelfallprüfung mit der Lage der geplanten Bohrungen im Bereich der Vorbergzone am östlichen Rand des Oberrheingrabens zum angrenzenden Festgesteinsrahmen des kristallinen Grundgebirges (s. u.) begründet.

1.3 Erlaubnis-Bescheid, Anzeige des Bohrbeginns, nachträgliche Anordnung

Das LRA Breisgau-Hochschwarzwald hat am 04. Mai 2007 die wasserrechtliche Erlaubnis für den Bau und Betrieb der Erdwärmesonden erteilt. Die Erlaubnis wurde bis zum 31. Dezember 2027 befristet. Sie nimmt auf die Stellungnahme des RPF/LGRB vom 13. April 2007 ausdrücklich Bezug (enthalten im übermittelten Formular "Auftrag für eine hydrogeologische Beurteilung von Erdwärmesonden").

Als geplanter Bohrbeginn wurde Montag, der 03. September 2007, mitgeteilt. Die Bohrarbeiten erfolgten im Zeitraum 03. September 2007 - 21. September 2007.

Die Firma s. hat das LRA Breisgau-Hochschwarzwald durch E-Mail vom 05. September 2007 über das Anbohren artesisch gespannten Grundwassers am 03. September 2007 (gemäß Bohrprotokoll) informiert (vgl. Bescheid LRA Breisgau-Hochschwarzwald vom 06. September 2007). Die Nachricht enthält eine Mitteilung über Bohrbeginn und Antreffen artesisch gespannten Grundwassers.

Außerdem wurde mitgeteilt, dass die Firma W. den Arteser mit einer entsprechenden Zement-Bentonit-Suspension kontrollieren konnte.

In telefonischer Abstimmung mit dem LGRB, Ref. 94, erging eine nachträgliche Anordnung des LRA Breisgau-Hochschwarzwald gemäß § 5 Abs.1 Nr. 1a i. V. m. § 4 Abs. 2 Nr. 2a WHG vom 06. September 2007, Zeichen 430.15-692.226. Der Bescheid ging an das Bürgermeisteramt Staufen. Er wurde dem RPF/LGRB nachricht-

lich zur Kenntnis gegeben (Eingang: 10. September 2007). Daraus resultierten die folgenden Auflagen:

1. "Für die Herstellung der Zementsuspension zur Verpressung des Ringraums ist sulfatbeständiger Zement (DIN 4030) zu verwenden und dessen Eignung unverzüglich nachzuweisen."

2. Mitteilung über verwendetes Material, soweit Bohrlöcher bereits verpresst wurden.

3. Unverzügliche Vorlage einer detaillierten Beschreibung der Abdichtung des/der artesischen Wasseraustritte bei der Unteren Wasserbehörde und RPF/LGRB.

Am 24. September 2007 erfolgte die routinemäßige Übernahme der Bohrproben in Form von Bohrklein (Cuttings in Splitt-Korngröße) der EWS 2, EWS 3 und EWS (ohne Bezeichnung) nach Lagerstättengesetz durch das RPF/LGRB für eine spätere Bearbeitung im Rahmen der geologischen Landesaufnahme.

Der Fertigstellungsbericht der Fa. W. zu den Erdwärmesonden stammt vom 03. Dezember 2007 und enthält im Schichtenverzeichnis aller Bohrungen den Vermerk "32,0 m artesisch, ca. 10 l/min" sowie das Abdichtungsprotokoll. Im Zuge des Beweisverfahrens erging ein berichtigter Fertigstellungsbericht zu den Erdwärmesonden vom 20. März 2008 der Fa. W. (Eingang beim RPF/LGRB am 08. April 2008, vgl. Kap. 6). Darin wird der Befund "artesisch" für die Bohrungen 2 bis 7 geändert.

"...

Bohrung 1:	artesisch ca. 10 l/min,
Bohrung 2:	Wassereintritt bei 32,0 m kurzfristig artesisch (10 l/min, Kopfdruck 0,1 bar, bei Gestängeausbau jedoch kein Wasserzutritt aus Bohrloch),
Bohrung 3b-7:	kein Hinweis auf Arteser im Bohrprotokoll ..."
Vorgelegt wurden:	Schichtenverzeichnisse, Verpressprotokolle, Druckprüfungsprotokolle

Die Bohrung "3b" wurde einen Meter neben der Bohrung "3a" angesetzt, die eine Teufe von 38 m erreicht hatte, aufgrund Meißeldefekts jedoch aufgegeben und verfüllt wurde (Bohrbericht vom 20. März 2008).

1.4 Erste Schadensmitteilungen

Etwa zwei Wochen nach Fertigstellung der Erdwärmesonden wurden Anfang Oktober 2008 vom Ortsbauamt der Stadt Staufen erstmals Risse im neu renovierten Rathaus und benachbarten Gebäuden festgestellt. Daraufhin hat die Ingenieurgruppe Geotechnik Kirchzarten im Auftrag der Stadt am 31. Januar 2008 eine geotechnische Stellungnahme abgegeben und darin Untersuchungen vorgeschlagen, die den Schadensverlauf, -umfang und die Schadensursache klären und Möglichkeiten einer Sanierung aufzeigen sollten. U. a. wurde eine Untersuchungsbohrung geplant, zu der das RPF/ LGRB eine Stellungnahme abgab (Az. 4764//08-1092 vom 13. Februar 2008).

1.5 Beweisverfahren der Stadt Staufen

Das Landgericht Freiburg hat am 26. Februar 2008 nach Antrag der Stadt Staufen auf Einleitung eines selbständigen Beweisverfahrens den Sachverständigen [redacted], MPA Stuttgart, für das Beweisverfahren Stadt Staufen ./. Bohrfirma und Planungsbüro (Az.: 14 OH 5/08) mit der gutachterlichen Beantwortung vorgelegter Fragen beauftragt. Die vorläufige Beantwortung dieser Fragen erfolgte mit Gutachten der MPA Stuttgart Az.: 510/901 5261 vom 19. September 2008. Der Untersuchungsbohrung hat der Sachverständige aus Sicherheitsgründen nicht zugestimmt.

1.6 Einrichtung des Arbeitskreises "Hebungsrisse"

In Folge der zunehmenden Bauwerksschäden wurde in Staufen am 20. November 2008 der Arbeitskreis AK "Hebungsrisse" eingerichtet. Die Stadt sitzt diesem Arbeitskreis vor. Neben ihren Rechts- und Fachberatern (RA [redacted] Staufen, Ingenieurgruppe Geotechnik, Kirchzarten, Büro für Baukonstruktion, Karlsruhe) sind darin Vertreter der Landesbehörden (Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung 9 - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Regierungspräsidium Tübingen, Referat 26 - Landesstelle für Bautechnik, Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald, Fachbereich Vermessung und Geoinformation sowie Untere Umweltbehörde) vertreten. Die Aufgaben dieses Arbeitskreises bestehen darin, ein Erkundungsprogramm zu erarbeiten und dessen Durchführung fachlich zu begleiten, auf der Basis der Erkundungsergebnisse Sanierungsvarianten zu bewerten, konkrete Maßnahmen zur Schadensbegrenzung zu beschließen und diese schließlich zu veranlassen. Daneben befasst sich der Arbeitskreis mit der Aufnahme von Gebäudeschäden sowie deren baustatischer Sicherung.

Der Arbeitskreis "Hebungsrisse" berichtet der betroffenen Bevölkerung sowie der Presse in monatlichen Abständen vom jeweiligen Sachstand der Erkundung.

1.7 Kabinettsbeschluss und Untersuchungsauftrag

Herr Wirtschaftsminister [redacted] hat mit Schreiben vom 23. Januar 2009, Az. 4-4715/57, Herrn Regierungspräsident [redacted] die Zusage der Landesregierung zur Übernahme von Kosten für die in Staufen durchzuführenden Erkundungsmaßnahmen übermittelt und das RPF/LGRB, beauftragt, die Erkundungsbohrung fachtechnisch zu begleiten. Ziel der Untersuchungen ist es, mit einer Erkundungsbohrung und den begleitenden Untersuchungen eine belastbare Daten- und Informationsgrundlage zu schaffen, anhand derer geeignete schadensbegrenzende Maßnahmen aufgezeigt werden können, deren Kosten abzuschätzen und dem Wirtschaftsministerium darüber zu berichten. Dem Schreiben liegt die Kabinettsentscheidung vom 12. Januar 2009, Tagesordnungspunkt 7, zu Grunde.

2 Arbeitshypothese

2.1 Entwicklung der Arbeitshypothese

Der vom Landgericht Freiburg am 26. Februar 2008 für das Beweisverfahren Stadt Staufen ./. Bohrfirma W. und Planungsbüro s. beauftragte Gutachter [redacted], MPA Stuttgart, sieht in seinem Bericht vom 19. September 2008 als Ursache für die Verformungen der Geländeoberfläche mit sehr großer Wahrscheinlichkeit das so genannte "Gipskeuperquellen". Als mögliche Ursache für den Quellungsprozess im zentralen Altstadtbereich von Staufen kommen in Betracht:

- Natürliche Veränderungen der geologischen Verhältnisse, die zu einer Veränderung der Wasserwegsamkeiten führen,

- Induzierung von Wasserwegsamkeiten durch die Sondenbohrungen.

Der Gutachter kommt u. a. zum Schluss, dass "nach dem gegenwärtigen Stand der Untersuchungen und Messungen die Wahrscheinlichkeit, dass die Sondenbohrungen den Hebungsprozess ausgelöst haben, größer ist als die Auslösung durch natürliche Bewegungen. Wenn man die Wahrscheinlichkeit in Quoten angibt, ergibt sich ein Verhältnis von 2:1 für die Sondenbohrungen". Belegt wird diese Einschätzung nicht.

Zur Planung der im vorliegenden Bericht vorgestellten Untersuchungen hat das RPF/LGRB nach Vorliegen des Sachverständigengutachtens auf Grundlage aller bis dahin verfügbaren Einzelhinweise die nachstehende Arbeitshypothese aufgestellt (s. auch Abb. 2.1):

a) Die Gebäudeschäden werden durch Hebungen des Untergrundes verursacht.

   Zum Zeitpunkt des Beweissicherungsbeschlusses (26. Februar 2008) ging man zunächst von Setzungen als Schadensursache aus, da diese in Gebieten mit Gipskeuper im Untergrund erfahrungsgemäß die häufigsten Bauschäden verursachen. Spätestens ab März 2008 war auf Grund der feinnivellitischen Messungen eindeutig belegt, dass ein Teilbereich der Staufener Altstadt einer anhaltenden Hebungsbewegung unterworfen ist.

b) Für die Hebungen verantwortlich sind in Schichten des Gipskeupers eingelagerte sulfatführende Abschnitte (Anhydrit) und begleitende quellfähige Tonminerale (insbesondere Corrensit). Geologische und mineralogisch-petrographische Untersuchungen des RPF/LGRB an rückgestellten Bohrproben (Cuttings) der Erdwärmesonden-Bohrungen EWS 1 bis EWS 3 haben dies nachgewiesen.

Dem RPF/LGRB wurden routinemäßig vom Bauherrn die Bohrproben (Cuttings) der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 3 zu Zwecken der geologischen Landesaufnahme überlassen, wie dies in den Auflagen zur wasserrechtlichen Genehmigung von Erdwärmesonden unter Bezugnahme auf das Lagerstättengesetz vorgesehen ist und praktiziert wird. Das RPF/LGRB hat diese Bohrproben lithostratigraphisch soweit möglich ausgewertet und eine generelle stratigraphische Schichtenabfolge rekonstruiert (vgl. Abb. 2.1). Dies war anhand der dem RPF/LGRB übergebenen Schichtenverzeichnisse der Bohrfirma nicht möglich.

c) Die beobachteten Hebungen (vertikale Hebungsgeschwindigkeit gemessen an Nivellementpunkten im Schadenszentrum bis zu 10 mm/Monat, absoluter Hebungsbetrag am Messpunkt MP 9 Rathausgasse 22,5 cm, Stand Februar 2010) sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Quellvorgänge im Gipskeuper (sogenanntes "Gipskeuperquellen") zurückzuführen (s. u.).

Im Fall von Staufen sind abweichend zu allen bislang bekannten, untersuchten und teils modellierten Fällen (z. B. WITTKE et al. 2007) Hebungsprozesse zu untersuchen und zu bewerten, die völlig unabhängig von Straßeneinschnitten oder von Tunnelbaumaßnahmen auftreten.

d) Die räumliche Nähe sowie die zeitliche Abhängigkeit der eingetretenen Verformungen legen einen Zusammenhang mit den Erdwärmesonden-Bohrungen EWS 1 bis EWS 7 nahe.

Im fraglichen Zeitraum wurden vom RPF/LGRB, Ref. 98 Landeserdbebendienst, keine Erdbeben aufgezeichnet, die eine plötzliche Wasserwegsamkeit hätten verursachen können. Kleinstbeben, also solche, deren Magnituden vom Landeserdbebendienst nicht aufgezeichnet werden, bzw. neotektonische Bewegungen, wie sie an der Hauptverwerfung bekannt und messtechnisch nachgewiesen sind, dürften aufgrund ihrer geringen und schon seit geologischen Zeiträumen ablaufenden Bewegungsbeträge kaum als kausal für die ab September 2007 eingetretene Wasserwegsamkeit in Frage kommen.

e) Die Quellungsvorgänge im Gipskeuper werden aktiviert, wenn Wasser in vormals "trockene" quellfähige Abschnitte des Gipskeupers eindringt. Wichtig ist daher zu klären, auf welche Weise das Wasser zutritt und wie es zu einer flächenhaften Ausbreitung im Bereich der bekannten Hebungsfigur kommt.

f) Einen wichtigen Baustein bei der Formulierung der Arbeitshypothese stellen die im Juni 2008 in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 gemessenen Temperaturprofile dar (Abb. 2.1 und Abb. 6.8). Sie zeigen, dass der Temperaturgradient im unteren Abschnitt der EWS 7 deutlich von dem in den übrigen Erd-

wärmesonden abweicht. Den Temperaturprofilen der EWS 1 bis EWS 6 gemeinsam ist eine ausgeprägte positive Temperaturanomalie in einer Tiefe zwischen 60 m und 90 m, die deutlich von dem zu erwartenden geothermischen Gradienten abweicht und auf eine exotherme Reaktion in diesem Abschnitt hindeutet. Es wird angenommen, dass die Temperaturanomalie durch freigesetzte Wärme bei der Hydratation von Anhydrit in Gips hervorgerufen wird. Wahrscheinlich führt der Aufstieg von gespanntem Grundwasser aus dem Unterkeuper über die undichte Ringraumhinterfüllung der EWS 7 und der Übertritt des Wassers in quellfähige Abschnitte des Gipskeupers zu den beobachteten Quellvorgängen.

2.2 Erkundungsbohrung

Zur Überprüfung der Arbeitshypothese, deren wichtigste Elemente in Abb. 2.1 synoptisch zusammengestellt sind, wurde nach Vorlage des Kabinettsbeschlusses der baden-württembergischen Landesregierung (s. o.) entschieden, den Untergrund im Bereich der Rathausgasse, dem zentralen Bereich der Hebung, geologisch-hydrogeologisch eingehend zu erkunden. Mit einer zunächst auf 150 m Bohrtiefe projektierten Kernbohrung sollten der genaue geologische Schichtenaufbau, die petrographische Ausbildung der einzelnen Schichtglieder, die tektonischen Verhältnisse, der hydrogeologische Stockwerksbau einschließlich der angetroffenen Druckpotenziale sowie das Alter und die Beschaffenheit der Grundwässer als belastbare Daten- und Bewertungsgrundlage für schadensbegrenzende Maßnahmen erhoben werden.

Im quellenden Untergrund ist das Abteufen einer Kernbohrung nur unter ständiger geologischer Betreuung und unter Einhaltung strengster bohrtechnischer Sicherheitsvorkehrungen möglich. Die erwartete hydrogeologische Stockwerkstrennung musste im Zuge der Bohrarbeiten durch eine entsprechende Teleskopierung der Bohrung mit Einbau von Sperrverrohrungen dauerhaft erhalten werden. Die Erkundungsbohrung war so zu konzipieren, dass in ihr im Idealfall ein Abwehrbetrieb gefahren werden kann, um den Druckspiegel des stark gespannten Grundwassers im Unterkeuper mindestens bis unter den in Quellung befindlichen anhydritführenden Profilabschnitt im Gipskeuper abzusenken.

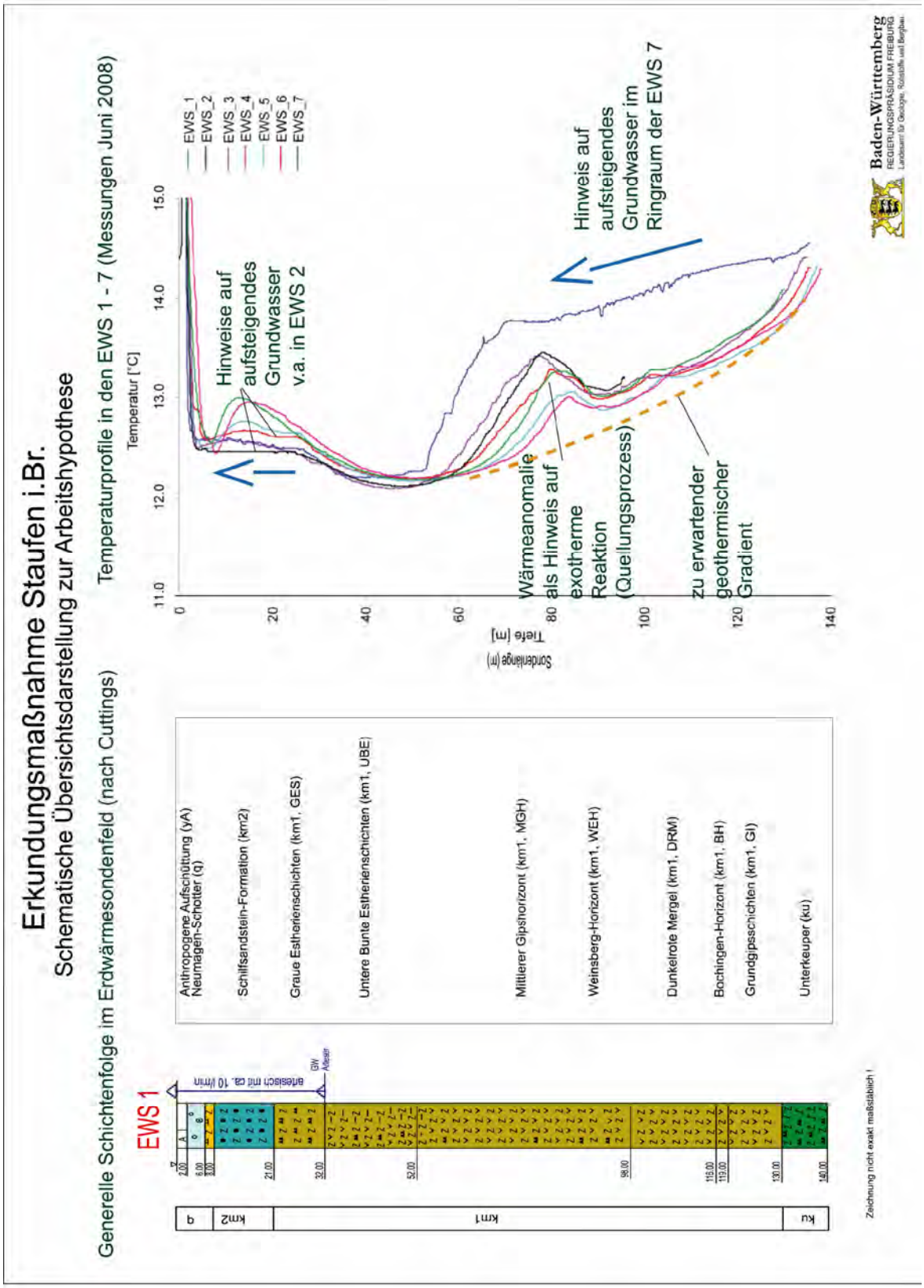


Abb. 2.1: Synoptische Darstellung zur Arbeitshypothese.

2.3 Geologische Grundlagen und Stand der Untersuchungen zum Phänomen des "Gipskeuperquellens"

Unter dem Eindruck teils spektakulärer Gebirgsverformungen, wie sie insbesondere im Einflussbereich von Untertage-Bauwerken in den sulfatführenden Gesteinen des Gipskeupers zu verzeichnen waren und dort sowohl zu Bauverzögerungen als auch zu erheblichen Kostensteigerungen und Folgekosten geführt haben, wurde in Baden-Württemberg bereits seit den 1970er Jahren dem Thema "Gipskeuperquellen" in zahlreichen Untersuchungen intensive Beachtung gewidmet.

In einem interdisziplinären Forschungsprojekt "Sohlhebungen beim Tunnelbau im Gipskeuper" wurden die Ursachen und Mechanismen untersucht und in einem 1975 erschienenen Bericht, herausgegeben vom Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr Baden-Württemberg, veröffentlicht (HENKE et al. 1975). Auch in der Schweiz hat man sich mit dem Thema "Tonminerale und Sulfate als Ursache für druckhaftes Verhalten von Gesteinen – Ursachen und Wirkungen des Quellvorganges" in einem Forschungsvorhaben des Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Straßen befasst (HAUBER et al. 2005).

In den Arbeiten von ANAGNOSTOU (1992), HAUBER et al. (2005), WITTKE (2007) sowie RAUH (2009) sind die Ursachen und Mechanismen zum Quellungsverhalten von Anhydrit und Tongesteinen im Tunnelbau unter Einbezug zahlreicher Einzelarbeiten, insbesondere für Großbauvorhaben (z. B. Freundenstein-Tunnel, Engelberg-Basistunnel, Stuttgart 21) zusammengestellt, so dass auf diese Ergebnisse im Hinblick auf den bisherigen allgemeinen Kenntnisstand zum Themenkomplex Quellhebungen verwiesen werden kann. REIMANN (1991) näherte sich dem Phänomen unter dem Aspekt der Rohstoffgewinnung. Für den vorliegenden Fall Staufen werden daher nur die wichtigsten zum Verständnis notwendigen Grundlagen wiedergegeben.

In der nicht ausgelaugten Gipskeuper-Formation (km1) kommen mit Ausnahme des oberen Teils der Grauen Estherienschichten (GES) das quellfähige Tonmineral Corrensit (Mixed-Layer Tonmineral Chlorit/ Smektit) und vor allem im Niveau des Mittleren Gipshorizonts (MGH) bis in das Niveau der Grundgipsschichten (GI) Calciumsulfat in Form von Anhydrit und Gips vor. Es ist bekannt, dass bei gleichzeitiger Anwesenheit von Anhydrit der Corrensit in nicht gequollenem Zustand vorliegt (LIPPMANN in HENKE et al. 1975). Nach bisherigem Stand der Erkenntnisse zu den Ursachen und Mechanismen des Gipskeuperquellens kommt der Anhydrit-Corrensit-Theorie (LIPPMANN in HENKE et al. 1975) die größte Wahrscheinlichkeit zu, die von einem primär wasserarmen Zustand des Gebirges ausgeht. Das häufigste quellfähige Tonmineral im Keuper ist der Corrensit, der bei (physikalischer) Wasseraufnahme sehr hohe Quellungsdrücke bei einer Quellung von 10 Vol. % entwickeln kann (LIPPMANN in HENKE et al. 1975). Der Corrensit kann nur dann maximal quellen, wenn er zuvor noch

nicht mit Wasser in Berührung gekommen ist. HENKE et al. (1975) sieht aufgrund von Laborversuchen im Gehalt an quellfähigem Corrensit letztlich den eigentlichen Auslöser der Quellerscheinungen.

Die Umwandlung von Anhydrit in Gips ist ein Lösungs-/Fällungsprozess, der die Auflösung des Kristallgitters von Anhydrit und eine räumliche Anordnung von Ca^{2+}, SO_4^{2-} und H_2O zum Kristallgitter des Gipses voraussetzt. Dieser Umwandlungsprozess ist von einer Volumenzunahme bis zu 61 Vol. % begleitet. Bei Fehlen ausreichender Wassermengen kann diese Umwandlung nicht stattfinden. Der Anhydrit bleibt dann metastabil auch in niedrigeren Temperaturbereichen erhalten, in denen eigentlich Gips als stabile Calciumsulfatphase auftreten sollte. Entscheidend für die Umwandlungsgeschwindigkeit ist die Korngröße und Verteilung des Anhydrits im Gestein. Nur bei feiner Verteilung von Anhydrit kann wegen der dann sehr viel größeren Gesamtoberfläche und der durch die Beimengungen anderer Minerale eventuell erhöhten Durchlässigkeiten die Umwandlung rascher vonstatten gehen. Massige Anhydritlagen oder -bänke bieten wegen ihres kompakten Gefüges dagegen nur eine sehr kleine reaktionsfähige Oberfläche und wirken durch ihre Festigkeit stabilisierend gegenüber Sohlhebungen. Während quellfähige Tonminerale ihre maximale Quellung innerhalb von Stunden oder wenigen Tagen erreichen, beansprucht die Umwandlung von Anhydrit in Gips wesentlich längere Zeiträume (HENKE et al. 1975).

HENKE et al. (1975) beschreiben den Quellvorgang im Gipskeuper als Kettenreaktion, die ausgelöst wird, wenn Wasser in das zuvor trockene Gebirge gelangt: "Zunächst beginnen die in Betracht kommenden Minerale - gleichgültig, ob dies eine chemische Umwandlung von Anhydrit zu Gips oder ein Wassereinbau in den Corrensit oder aber beides zugleich ist - ihr Volumen zu vergrößern. Gleichzeitig wird die Gebirgsfestigkeit durch die lösende und aufweichende Wirkung des Wassers lagenweise reduziert. Infolge dieser Festigkeitsverringerung und infolge der Quellwirkung … kommt es zu lagenweisen Brüchen des Gipskeupers. Diese eintretenden Brüche sind mit einer erheblichen Dilatation verbunden ... Durch die Auflockerung des Gebirges wird die Wasserwegsamkeit heraufgesetzt, wodurch wiederum neue Gebirgsbereiche dem Wasserangriff ausgesetzt werden ... Parallel zur Entfestigung und zur Dilatation kommt es schließlich im wasserbeeinflussten Bereich zu sekundären Gipsabscheidungen in Spalten und Schichtfugen".

EINSTEIN et al. (1972) zeigen für Stollensohlen in quellendem Mergelstein auf, dass das Quellen vom dreidimensionalen Spannungszustand abhängt, die Behinderung des Quellens zu Gegenspannungen und reduzierten Verformungen in der unbehinderten Richtung führt und beim Erreichen des ursprünglichen Gleichgewichts (Primärzustand) das Quellen aufhört.

Als Hauptfaktoren, die den zeitlichen Verlauf des Quellprozesses möglicherweise beeinflussen, nennt ANAGNOSTOU (1992) die Verfügbarkeit von Wasser, die Gebirgsdurchlässigkeit sowie die Geschwindigkeit der Gipsbildung.

HAUBER et al. (2005) gehen für tonige Gesteine, bei denen es auf Grund der Einlagerung von Wasser in das Schichtgitter quellfähiger Tonminerale zur Schwellung kommt (osmotische Tonquellung), je nach deren Anteil am Gesamtgestein von einem Quellmaß- bzw. Quelldruckpotential von bis 2,5 –

3 MPa aus. Die Tonquellung wird verursacht durch eine physikalisch-chemische Reaktion der Tonoberfläche mit Wasser und ist prinzipiell ein reversibler Prozess.

Bei zusätzlicher Anhydritführung können durch den Quelldruck bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips (unter Laborbedingungen) Drücke bis 7 MPa auftreten. Bei der Anhydrit-/Gipsumwandlung handelt es sich um thermodynamische Prozesse als Funktion von der Temperatur, Umgebungsdruck und der Gesamtmineralisation der zirkulierenden Lösungen. Damit das Volumen zunimmt und sich ein Quelldruck einstellt, muss nach HAUBER et al. (2005) der neu auskristallisierte Gips mehr Volumen einnehmen als der gelöste Anhydrit. Wird Wasser von außen zugeführt und kein Sulfat weggeführt, erfolgt bei vollständiger Lösung des Anhydrits und Ausfällung von Gips sowie bei unbehinderter Quellung eine Volumenzunahme von ca. 61%. Das Gipsquellen ist unter den in Frage kommenden Bedingungen ein irreversibler Prozess.

Während tonfreie Anhydritgesteine kaum quellen, sprengen nach HAUBER et al. (2005) quellende Tonminerale das dichte Anhydritgestein, erhöhen die Wasserwegsamkeit und damit die Sulfatlösung. Die retardierende und absorbierende Wirkung der Tonminerale begünstigt zudem die Gipsfällung. Auch HAUBER et al. (2005) sehen den Umfang des Wasserzutritts als entscheidend für den Fortgang von Ton- und Gipsquellen an und halten zudem eine Wechselwirkung zwischen Tonquellen und Gipsbildung für denkbar. Dabei ziehen die Tonminerale osmotisch Wasser an (abhängig vom Abstand zwischen den wasserzugänglichen Oberflächen der Tonminerale, der Anzahl und der Wertigkeit ihrer gebundenen Kationen) und führen durch Quellen zu einer ersten Auflockerung, welche Wasserzutritt, Anhydritlösung und Gipsbildung ermöglicht.

Die Voraussetzungen für eine großräumig auftretende, flächenhafte Volumenzunahme sieht REIMANN (1991) in einem hinreichend undurchlässigen, aber nicht zu mächtigem Deckgebirge und in einer Position des Sulfatlagers über dem Grundwasser.

Nur unter diesen Bedingungen ist nach REIMANN (1991) gewährleistet, dass nur soviel oder jedenfalls nicht viel mehr Wasser an den Sulfatkörper gelangt, wie gerade zur Umwandlung des Anhydritgesteins benötigt wird. Nach Auswertungen von REIMANN (1991) nimmt die Volumenzunahme proportional zur ansteigenden Deckgebirgsmächtigkeit ab. Die maximale Volumenzunahme von ca. 61 % kann nur bis zu einer Deckgebirgsmächtigkeit von ca. 10 m eintreten; bei höheren Überlagerungsdicken geht der realisierte Ausdehnungsfaktor mehr oder weniger stetig zurück. Er beträgt bei 20 m Deckgebirge nur noch bis 40 % und bei 40 m weniger als 30 %. Ab einer Gebirgsauflast um 100 m bis max. 110 m kann nach REIMANN (1991) keine Volumenzunahme mehr auftreten, da dann der Kristallisationsdruck des Gipses hierfür nicht mehr ausreicht. Bei einer durchschnittlichen Deckgebirgswichte von gamma = 25 kN/m³ ruht dann eine Gesteinssäule von 2,5 MPa auf dem Sulfatkörper. Dieser Grenzwert ist aus Studien an natürlichen Gips-/Anhydritvorkommen abgeleitet und liegt deutlich unter den in Laborversuchen festgestellten maximalen Quelldrücken von 7 MPa.

3 Geologischer, tektonischer, hydrogeologischer und ingenieurgeologischer Überblick

Das RPF/LGRB hat bereits am 11. April 2008 im Auftrag des Sachverständigen [redacted] im Rahmen des selbständigen Beweisverfahrens (Landgericht Freiburg) einen geologischen, tektonischen, hydrogeologischen und ingenieurgeologischen Überblick erstellt (Az.: 94-4763//08-2761 vom 11.04.2008).

3.1 Allgemeiner geologischer Rahmen

Das Stadtgebiet von Staufen liegt geologisch und geomorphologisch am Ostrand des südlichen Oberrheingrabens in der Sulzburg-Staufener Vorbergzone (GENSER 1992). Sie wird im Osten durch die Schwarzwaldrandverwerfung (Hauptverwerfung) vom kristallinen Schwarzwald getrennt, der östlich von Staufen aus Paragneisen mit eingelagerten Gangporphyren besteht (GKV 1992, GROSCHOPF et al. 1996). Westlich von Staufen geht die überschotterte randliche Vorbergzone in die Äußere Grabenzone und die Grabenrandscholle über (Abb. 3.1).

Zwischen den steil stehenden mesozoischen und den auf dem Schloßberg darüber liegenden tertiären Schichten der Vorbergzone bei Staufen im Norden und dem ebenfalls aus mesozoischen und tertiären Sedimenten aufgebauten Fohrenberg südlich von Grunern erstreckt sich der Schwemmfächer des Neumagens. In seinem Verbreitungsgebiet werden die Festgesteine von bis zu mehreren Zehnermetern mächtigen Kiesen und Sanden quartären Alters überdeckt, die aus dem Schwarzwald geschüttet wurden (Abb. 3.1 und Abb. 3.2). Das Erdwärmesondenfeld EWS 1 bis EWS 7 in der historischen Altstadt von Staufen i.Br. befindet sich im Grenzbereich zwischen dem Neumagenschwemmfächer im Südwesten und quartären Umlagerungssedimenten (Hangschutt, Lehm) im Nordosten, die in der Geländesenke zwischen dem Roten Berg und dem Schloßberg den mesozoischen Festgesteinsuntergrund verhüllen.

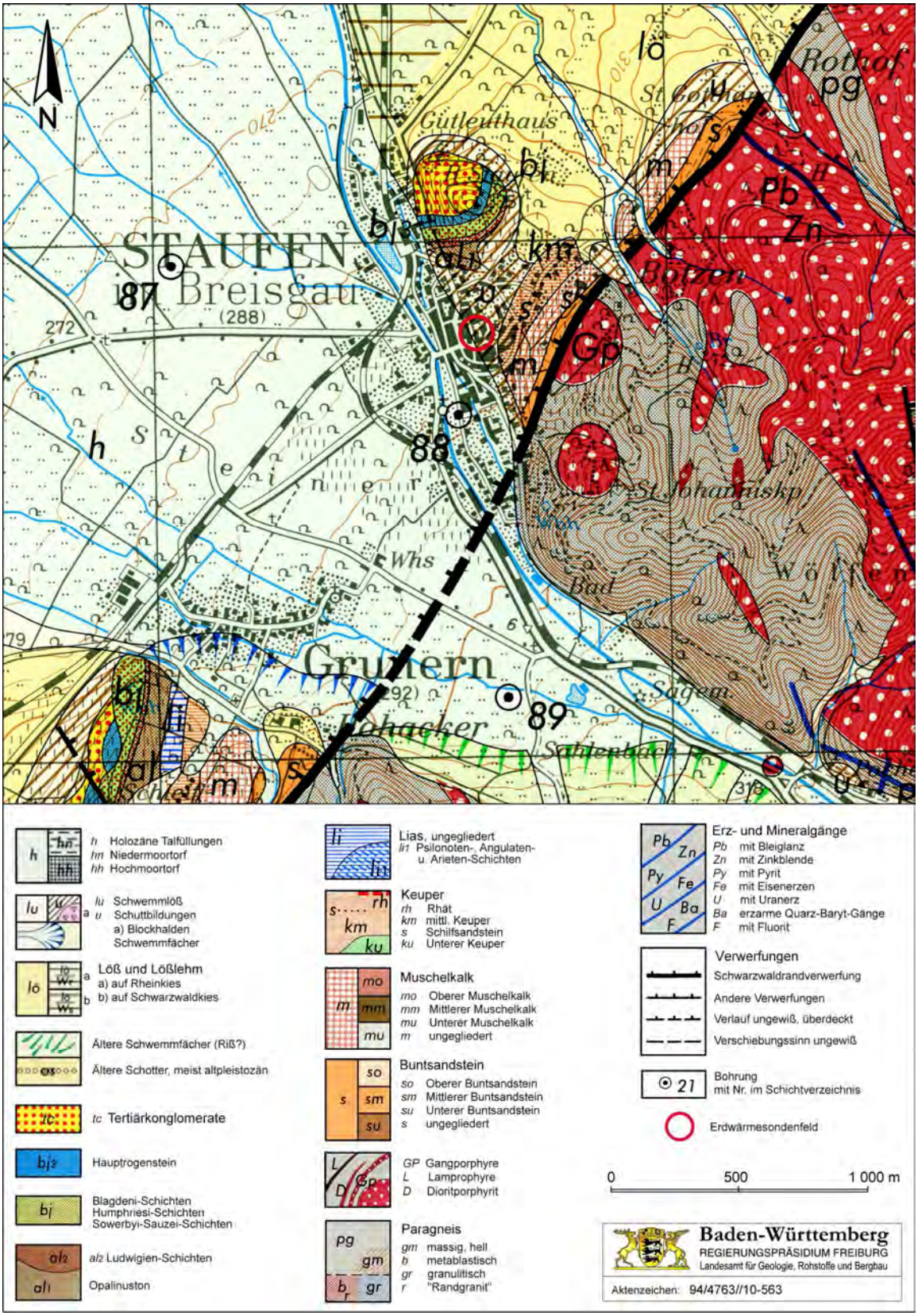


Abb. 3.1: Geologische Karte von Staufen und Umgebung (Ausschnitt aus GROSCHOPF et al. 1996). Die Lage des Erdwärmesondenfeldes zwischen dem Rathaus und dem Bauamt der Stadt Staufen ist mit einem roten Kreis markiert.

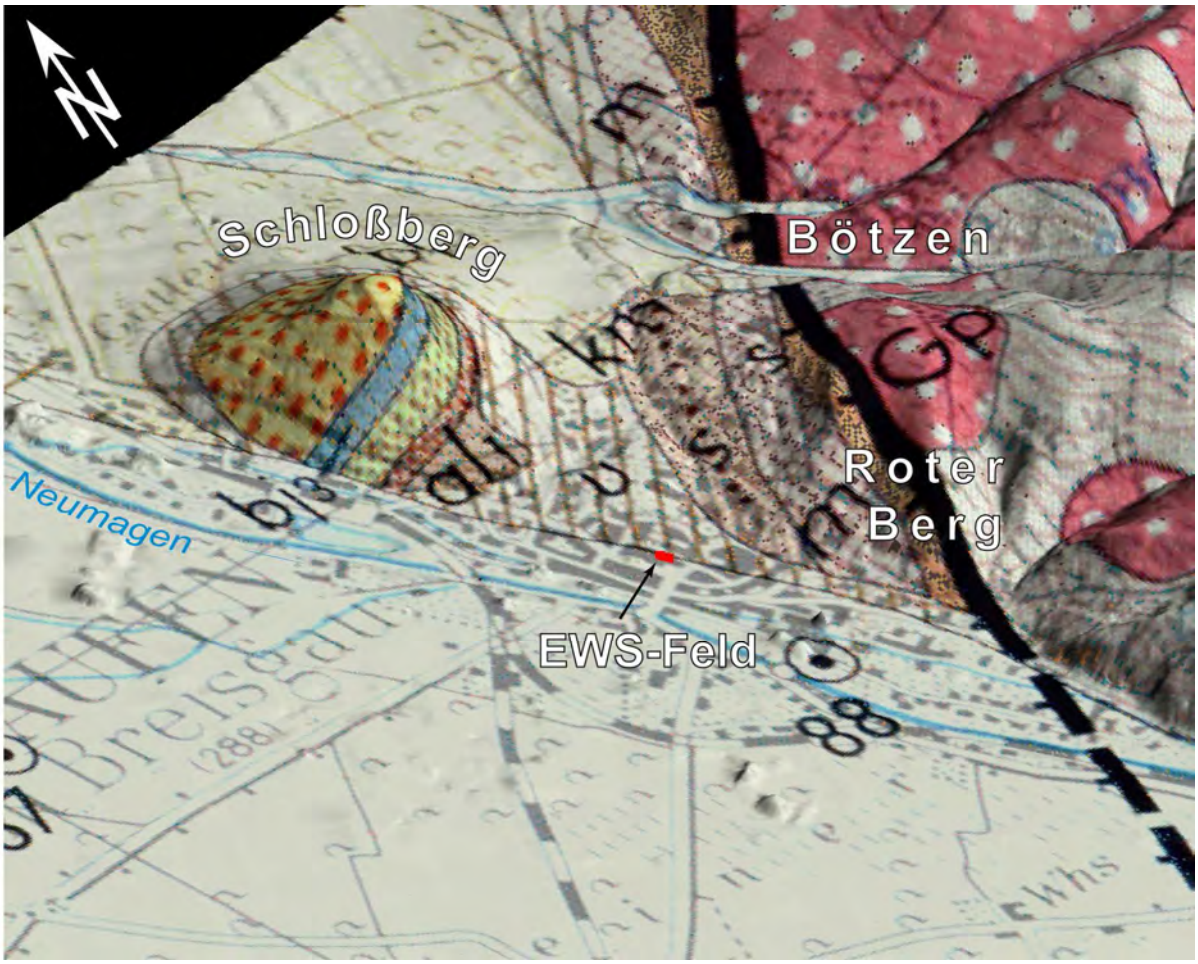


Abb. 3.2: Geologische Karte von Staufen und Umgebung (Detailvergrößerung, kombiniert mit dem digitalen Geländemodell. Die Lage des Erdwärmesondenfeldes zwischen dem Rathaus und dem Bauamt der Stadt Staufen ist rot markiert (Legende siehe Abb. 3.1)).

3.2 Geologische Schichtenfolge im Raum Staufen

Die geologische Schichtenfolge im Raum Staufen wird von GENSER (1957, 1958, 1959) sowie von GROSCHOPF et al. (1996) beschrieben. Weitere Hinweise geben die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen im Stadtgebiet von Staufen, die in der Aufschlussdatenbank des RPF/LGRB dokumentiert sind (vgl. auch Anl. 7.1 und Anl. 7.2). Eine stratigraphische Gliederung der relevanten Keuper- und Muschelkalkabfolge ist als Anl. 3.1 beigefügt.

Die Schichtenfolge in der Vorbergzone bei Staufen reicht über dem kristalllinen Grundgebirge vom triassischen Buntsandstein bis zum tertiären (oligozänen) Küstenkonglomerat.

Die Sedimente des Buntsandsteins bestehen aus bis 200 m mächtigen Sandsteinen, Konglomeraten und Tonsteinen. Der oberste Abschnitt des Mittleren Buntsandsteins (früher Hauptbuntsandstein) ist nach GENSER (1958, 1959) nördlich des Bötzen bis zum St. Gotthardhof und im Osten des Neuenberges südlich von Grunern aufgeschlossen (Anl. 3.2). Am Bötzen, am Roten Berg sowie im bebauten Gebiet von Staufen fehlt der Buntsandstein nach GENSER (1958, 1959). Dagegen wurde er nach GROSCHOPF et al. (1996) am Bötzen in Baugruben angetroffen (Abb. 3.1, 3.2 und 7.1).

Der darüber folgende Muschelkalk ist in der Staufener Vorbergzone ca. 120 m mächtig (GENSER, 1992). Bei vollständiger, ungestörter Ausbildung erreichen die Schichten des Muschelkalks folgende Mächtigkeiten:

- Unterer Muschelkalk (Ton- und Kalkmergelsteine mit Dolomitsteineinschaltungen): 35 m bis 40 m;
- Mittlerer Muschelkalk (Dolomitsteine, Zellendolomite, Rauhwacken, bereichsweise (in Staufen nicht bekannt) Gips, Anhydrit, Steinsalz), je nach Auslaugungsgrad: 25 m bis 100 m;
- Oberer Muschelkalk (Dolomitsteine, Kalksteine, dolomitische Mergelsteine): 65 m bis 80 m.

Die Gesteine des Keupers (Tonsteine, Mergelsteine, Sandsteine und Sulfatgesteine) sind im nicht ausgelaugten Zustand bis zu 160 m, im ausgelaugten 110 m bis 120 m mächtig (GKV 1992). Davon entfallen auf den Oberkeuper (Rhät) 2 m, auf den Mittelkeuper 150 m (unausgelaugt) bzw. 100 m bis 110 m (ausgelaugt) und auf den Unterkeuper 5 m bis 10 m (GKV 1992). In der Baugrube Hotel Kreuz-Post (ca. 100 m west-südwestlich des Erdwärmesondenfeldes, s. u.) wurden in den Baugrubenbohrungen (LGRB-Nr. 8112/229 - 234) die sulfatfreie Steinmergelkeuper - und Schilfsandstein-Formation angetroffen. Ebenso wurden in den Bohrmeisterprofilen von Erdwärmesondenbohrungen, die ca. 350 m nördlich des Erdwärmesondenfeldes Rathaus Staufen abgeteuft wurden (LGRB-Nr. 8112/144 - 146, Anl. 3.2 und Anl. 7.2) im Gipskeuper keine Sulfatgesteine beschrieben. Deshalb war davon auszugehen, dass der Untergrund aufgrund tektonischer Beanspruchung stark zerlegt ist, was eine Gipslösung fördert.

Die Sedimente des Unterjura (Lias) bestehen aus 75 m bis 80 m mächtigen Ton- und Mergelsteinen mit Kalksteinlagen. Der untere Mitteljura (Unterer Dogger) beginnt mit dem ca. 80 m bis 100 m mächtigen Opalinuston, darüber folgen dolomitische Eisenerzlager sowie der 60 m bis 80 m mächtige Hauptrogenstein. Diese oolithischen Kalksteine treten als "Härtlinge" in mehreren Erhebungen der Vorbergzone des Markgräflerlandes zutage. Mit dem Hauptrogenstein endet die mesozoische Schich-

tenfolge der Staufener Vorbergzone. Die einst darüber abgelagerten Korallenkalke des Oberjura wurden in der anschließenden Festlandsphase erodiert.

Mit der beginnenden Bildung des Oberrheingrabens im Obereozän und Unteroligozän entstand am Grabenrand ein Schollenmosaik mit einem bedeutenden Reliefunterschied gegenüber den mit Trias- und Jurasedimenten bedeckten kristallinen Grabenflanken. Die Sedimente auf den Grabenflanken wurden erodiert und auf den abgesunkenen Schollen am Grabenrand nahezu konkordant abgelagert. Sie bestehen überwiegend aus umgelagerten Hauptrogensteingeröllen. Diese alttertiären Küstenkonglomerate bilden vielfach die Kuppen über den randlichen Erhebungen der Vorbergzone und schützen diese vor der Erosion. Dies trifft auch für den Staufener Schloßberg zu. Im Oberoligozän und Miozän kommt es im Zuge einer neu auflebenden Grabentektonik zu einer Verkippung der abgesunkenen Schollen.

Im südwestlichen Stadtgebiet von Staufen werden die mesozoischen und tertiären Schichten von quartären Schichten überlagert. Es handelt sich um ältere, teilweise zersetzte Schotter (Breisgau-Formation) und darüber folgende junge Talschotter des Neumagen (Neuenburg-Formation). Die Verbreitungsgrenze dieser quartären Sedimente verläuft im Stadtgebiet ca. 200 m östlich vom Neumagen. In der Geländemulde zwischen dem Roten Berg und dem Bötzen im Osten sowie am Hangfuß des Schloßberg im Westen liegen über dem Festgestein Hangschutt und Lehme unbekannter Mächtigkeit (Abb. 3.1, Abb. 3.2).

3.3 Tektonik und Schichtlagerung

Aufgrund der Lage von Staufen in der tektonisch stark beanspruchten Vorbergzone ist der Untergrund sehr kompliziert aufgebaut und im Detail nicht bekannt.
In der Anl. 3.3 (aus der Stellungnahme des RPF/LGRB 2008a) ist das tektonische Inventar nach GENSER (1958, 1959) und nach der GKV (1992) dargestellt. Außerdem wurde es durch tektonische Lineamente ergänzt, die vom RPF/LGRB durch die Auswertung von Luftbildern und eines hochgenauen digitalen Geländemodells (LGL, Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg) identifiziert wurden.

Die bedeutendste tektonische Struktur im Raum Staufen ist die Schwarzwaldrandverwerfung (Hauptverwerfung), die im Osten des Roten Bergs und des Bötzen mit einem leicht geschwungenen Verlauf etwa 40° (No rdost-Südwest) streicht (Abb. 3.1, Abb. 3.2, Anl. 3.2, Anl. 3.3). Westlich davon verläuft nach GENSER (1958, 1959) am Westhang des Roten Berges innerhalb der mesozoischen Schichtenfolge eine weitere Störung in diese Richtung, die zum Schichtausfall des Oberen Muschelkalkes und des Unterkeupers führt (Anl. 3.2). GROSCHOPF et al. (1996: S. 231) legen

dagegen dar, dass der Verlauf der Hauptverwerfung "aufgrund neuerer Aufschlüsse … beim Bötzen und südlich Staufen ohne Sprünge weitgehend ausgeglichen werden konnte". In der GKV (1992) sind dagegen zwei Störungen westlich der Hauptverwerfung eingezeichnet.

Nach SCHREINER (1992) reicht die - tektonisch ausgedünnte - Schichtenfolge an der Schwarzwaldrandverwerfung am Bötzen bis zum Oberen Buntsandstein (Abb. 7.1).

Das zweite, markante Störungssystem verläuft nach GENSER (1958, 1959) annähernd senkrecht zur Hauptverwerfung in Nordwest – Südost – Richtung (ca. 140°, Abb. 3.1, Anl. 3.2). Eine solche konjugierte Störung versetzt die Schwarzwaldrandverwerfung (Hauptverwerfung) zwischen dem Roten Berg im Süden und dem Bötzen im Norden ("Bötzen - Störung"). Weitere Störungen dieser Richtung beginnen an der Hauptverwerfung und erstrecken sich nach Nordwesten unter Lössbedeckung weiter.

Nach GENSER (1958, 1959) verläuft vom Roten Berg in nordwestliche Richtung bis zur Südspitze des Schloßberges eine SO-NW – orientierte vermutete Abschiebung ("Roter Berg - Störung"), die sich nach der Luftbild- und Geländemodellauswertung des RPF/LGRB (Anl. 3.3) am südwestlichen Hangfuß entlang weiter nach Nordnordwesten verlängern lässt. Zusammen mit einer weiteren vermuteten Störung am nordwestlichen Hangfuß und der verlängerten "Bötzen - Störung" kann eine nach Nordwesten einfallende "Schloßbergscholle" abgegrenzt werden (Anl. 3.3).

Die vermutete "Roter Berg - Störung" quert zwischen der Jägergasse und "Auf dem Rempart" das nordöstliche Stadtgebiet und bildet die Grenze zu einer südlichen Scholle, auf der die Erdwärmesondenbohrungen für das Rathaus liegen (Anl. 3.2).

3.4 Baugrundverhältnisse

Die Baugrundeigenschaften der im Stadtgebiet Staufen oberflächennah anstehenden Gesteine variieren entsprechend ihrer örtlichen Zusammensetzung in weitem Rahmen. Kompressible bindige Böden wechseln mit inkompressiblen rolligen Böden bzw. Festgesteinen ab. Detaillierte Baugrundaufschlüsse liegen nicht vor.

Anthropogene Aufschüttungen vorangegangener Nutzungen oder auch Verfüllungen ehemaliger Wassergräben bilden ebenso wie feinkörnige, teils organisch geprägte Verschwemmungssedimente einen meist ungünstigen Baugrund.

Tonige und tonig-schluffige Verwitterungsbildungen des Keupers und des Juras sowie deren Umlagerungsprodukte (Fließerden) unterliegen oberflächennahen saisonalen Volumenveränderungen (Schrumpfen nach Austrocknung und Quellen nach Wie-

derbefeuchtung) und neigen in Hanglage zu oberflächennahem Kriechen. Ferner dürfte auch seit alters unterirdische Gipsauslaugung den Baugrund von Staufen geprägt haben.

Im Archiv des RPF/LGRB liegen Hinweise über einen Baugrubenaufschluss aus dem Jahre 1995 vor, zu dem das damalige GLA (Geologisches Landesamt) beratend hinzugezogen wurde (GLA 1995). In einer damals etwa 100 m westsüdwestlich vom Rathaus in Richtung Neumagen gelegenen Baugrube des Hotels Kreuz-Post wurde im Südteil der Baugrube ein mit Wasser und Schlamm erfüllter Karsthohlraum angetroffen. Im südlichen Drittel der Baugrube wurde eine etwa West-Ost streichende Flexur aufgeschlossen. In Untersuchungsbohrungen (LGRB-Nr. 8112/229 - 234) wurden unter der quartären Deckschicht und Tertiärablagerungen bis in eine Tiefe von 26,8 m Gesteine der Steinmergelkeuper-Formation (km3) und der Schilfsandstein-Formation (km2) angetroffen. Artesische Grundwasserverhältnisse wurden nicht beobachtet.

Die genannten wechselhaften Baugrundverhältnisse wie auch die seit dem Mittelalter vielfach veränderte Bausubstanz (Um- bzw. Anbauten) mit unterschiedlichsten Gründungs- und Lastabtragungsbedingungen sind vermutlich der Grund für Gebäudeschäden, wie sie durch zahlreiche ältere Risse in/an Gebäuden der historischen Altstadt zu beobachten sind. Sie werden im Bereich der Hebungsfigur (Kap. 4) zunehmend von Schäden als Folge des seit Ende 2007 ablaufenden Quellhebungsprozesses überlagert.

3.5 Hydrogeologische Verhältnisse

Aufgrund der steilen Lagerung der Schichten sowie der tektonisch bedingten kleinräumigen Gliederung in Teilschollen können die hydrogeologischen Verhältnisse im Raum Staufen auf engstem Raum wechseln. Hinzu kommt noch die starke tektonische Zerrüttung der Gesteine, wobei tektonische Störungen entweder als Bereiche erhöhter Wasserwegsamkeiten und Durchlässigkeiten oder aber auch abdichtend wirken können. Die hydrogeologische Gliederung des Buntsandsteins, Muschelkalks und des Keupers in Baden-Württemberg ist in den Anl. 3.4 bis Anl. 3.6 zusammengefasst (aus LGRB 2002). Daraus ergibt sich die nachfolgende allgemeine hydrogeologische Beschreibung der Schichtenfolge in Staufen, die den Kenntnisstand zum Zeitpunkt der hydrogeologisch/geotechnischen Stellungnahme zur Beurteilung des EWS-Vorhabens "Rathaus Staufen" wiedergibt (RPF/LGRB 2008a).

Die *quartären Kiese und Sande des Neumagenschwemmfächers* (Neuenburg-Formation, qN) bilden einen Lockergesteinsgrundwasserleiter mit mittleren Durchlässigkeiten $k_f = 10^{-2}$ m/s bis 10^{-3} m/s. Die Durchlässigkeit der zersetzten Kiesen der

Breisgau-Formation (qBS) dürfte um den Faktor 10 unter der der Kiese und Sande des Neumagenschwemmfächers liegen. Die Grundwasseroberfläche im Neumagenschwemmfächer ist großräumig auf den Neumagen als lokale Vorflut eingestellt. Anthropogene Eingriffe (z. B. Drainagen, Ausleitungen) können zu lokalen Variationen der Grundwasserflurabstände führen.
Die Ton- und Tonmergelsteine des *Mittel- und Unterjura* (jm, ju) werden allgemein als Grundwassergeringleiter ($k_f < 1 \bullet 10^{-5}$ m/s) eingestuft. Eingelagerte Kalk- und Mergelkalkbänkchen sind lokal gering grundwasserführend. Der kalkige Hauptrogenstein bildet einen Karst- und Kluftgrundwasserleiter.

Die Schichten des *Oberkeuper* (ko, identisch mit Rhät) sind meist Grundwassergeringleiter. Im *oberen Mittelkeuper* ist insbesondere der Schilfsandstein (km2) grundwasserleitend. Die Sulfatgesteine des *Gipskeupers* (km1) sind nur im aktiven Auslaugungsbereich des Gipskarstes grundwasserführend. In Bereichen, in denen die Auslaugung noch nicht eingesetzt hat, ist dagegen die Grundwasserführung gering. Eine geringe Grundwasserführung ist im Bochinger Horizont möglich. Im Raum Staufen sind die Gesteine des *Unterkeupers* (ku) als schichtig gegliederter Grundwasserleiter ausgebildet.

Der *Obere Muschelkalk* (mu) steht nach den vorliegenden geologischen Kartierungen im bebauten Stadtgebiet von Staufen oberflächennah nicht an. Die Kalk- und Dolomitsteinabfolge mit Ton- und Mergelsteinlagen ist üblicherweise als geklüfteter, überwiegend schichtig gegliederter, regional verkarsteter Kluft- und Karstgrundwasserleiter ausgebildet. Die Mergelsteine, Tonmergelsteine und Kalksteine des *Unteren Dolomits des Mittleren Muschelkalks (UDL) sowie des Unteren Muschelkalks (mu)* bilden einen geklüfteten, schichtig gegliederten Kluftgrundwasserleiter mit mäßiger bis geringer Grundwasserführung.

Der *Obere Buntsandstein (so, Plattensandstein)* bildet mit dem *Mittleren Buntsandstein* (sm) einen wenig gegliederten Kluftgrundwasserleiter. Die *Rötton-Formation* (sot) am Übergang zum Muschelkalk ist ein Grundwassergeringleiter.

4 Geländehebungen

4.1 Messpunktnetz

Die in Staufen seit Ende 2007 beobachteten Geländehebungen werden seit Anfang 2008 geodätisch vermessen. Hierfür wurde im Altstadtbereich das ab Januar 2008 eingerichtete Messpunktnetz sukzessive durch neu gesetzte weitere Messpunkte verdichtet (Stand Dezember 2009: 89 Messpunkte). An diesen Messpunkten wie auch an neun amtlichen Höhenfestpunkten werden die Geländehebungen in ihrer zeitlichen Entwicklung millimetergenau bestimmt. Im historischen Altstadtkern erfolgen die Messungen aus Beweissicherungsgründen an 50 Messpunkten seit Beginn der geologischen Erkundungsmaßnahme (Bohrbeginn der Erkundungsbohrung EBK 1 am 09. März 2009) 14-tägig, im äußeren Bereich seit Beginn der Messungen in mindestens zweimonatigem Turnus. In Abb. 4.1 ist die Lage der geodätischen Messpunkte (Stand Dezember 2009) im Untersuchungsgebiet – unterschieden nach dem Zeitpunkt der Aufnahme in das Messnetz und Messrhythmus - dargestellt.

Die feinnivellitischen Messungen erfolgten bis einschließlich 28. Februar 2008 durch ein privates Ingenieurbüro. Auf Veranlassung des Gutachters [redacted] ging der Messauftrag seit dem 06. Mai 2008 auf das Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald, Fachbereich Vermessung und Geoinformation, über.

4.2 Hebungsfigur

Nachdem die Messpunkte unterschiedlichen Alters sind (vgl. Abb. 4.1) und somit die gemessenen Absolutbeträge seit Beginn ihrer Messungen untereinander nicht unmittelbar vergleichbar sind, wurden die jeweiligen Hebungsgeschwindigkeiten herangezogen, da sie für jedes beliebige Zeitintervall bestimmt werden können. Anhand der seit Januar 2008 regelmäßig durchgeführten geodätischen Höhenmessungen hat das RPF/LGRB die Hebungsgeschwindigkeit flächenhaft ausgewertet und in Hebungsfiguren dargestellt.

Die nachstehenden Abbildungen (Abb. 4.2 bis 4.13) zeigen die mit einem Geographischen Informationssystem ausgewertete zeitliche Entwicklung der Hebungsfigur. Die Hebungsfigur wird in der Regel in zweimonatigem Abstand aktualisiert.

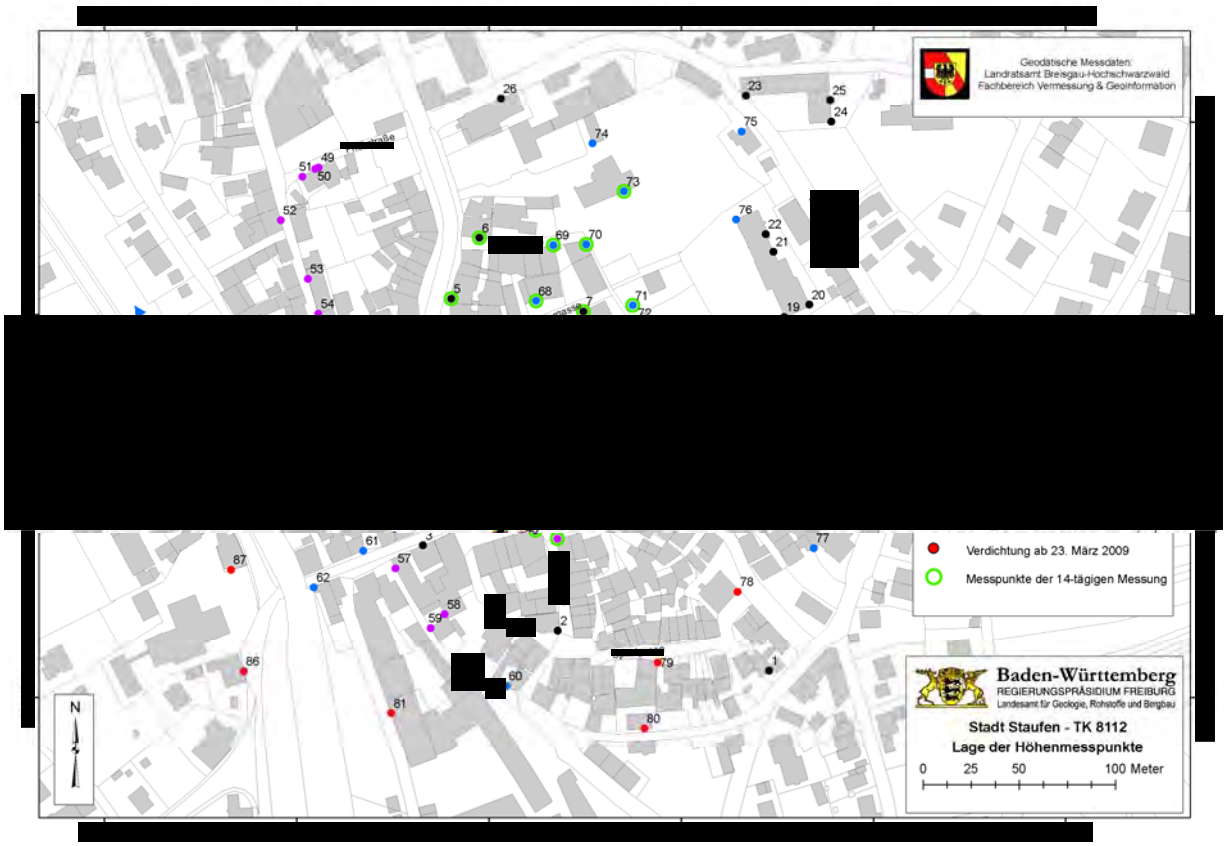


Abb. 4.1: Lage der Höhenmesspunkte mit Angabe des Messpunktalters und den Messpunkten mit 14-tägigem Messrhythmus.

4.3 Hebungsverlauf

In heutiger Rückschau deuteten sich bereits bei den ersten Messungen Anfang 2008 Hebungen an, die man zunächst als Messfehler deutete, da man von Setzungserscheinungen ausging. Spätestens seit Februar 2008 wurde klar, dass die Geländeverformungen im Bereich der historischen Altstadt durch Hebungen des Untergrundes verursacht werden. Von Hebungen betroffen ist ein elliptischer Bereich, dessen Hauptachse eine Nordost-Südwest- und dessen Nebenachse eine Nordwest-Südost-Orientierung aufweisen. Die an der Peripherie des damaligen Messnetzes gemessenen Setzungswerte (Februar - Mai 2008, Abb. 4.2) bestätigten sich nicht weiter. Die mittels Computer-Programm über Triangulation errechnete Hebungsfigur hat eine gemittelte Länge von 280 m und eine gemittelte Breite von 180 m. Aufgrund der anfangs weitständigen und noch nicht regelmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilt angeordneten Messpunkte konnte der Hebungsbereich zunächst nicht in sich geschlossen abgebildet werden (Abb. 4.2 bis 4.4). Dies änderte sich erst mit der sukzessiven Verdichtung und Erweiterung des Messpunktnetzes (Abb. 4.5 ff).

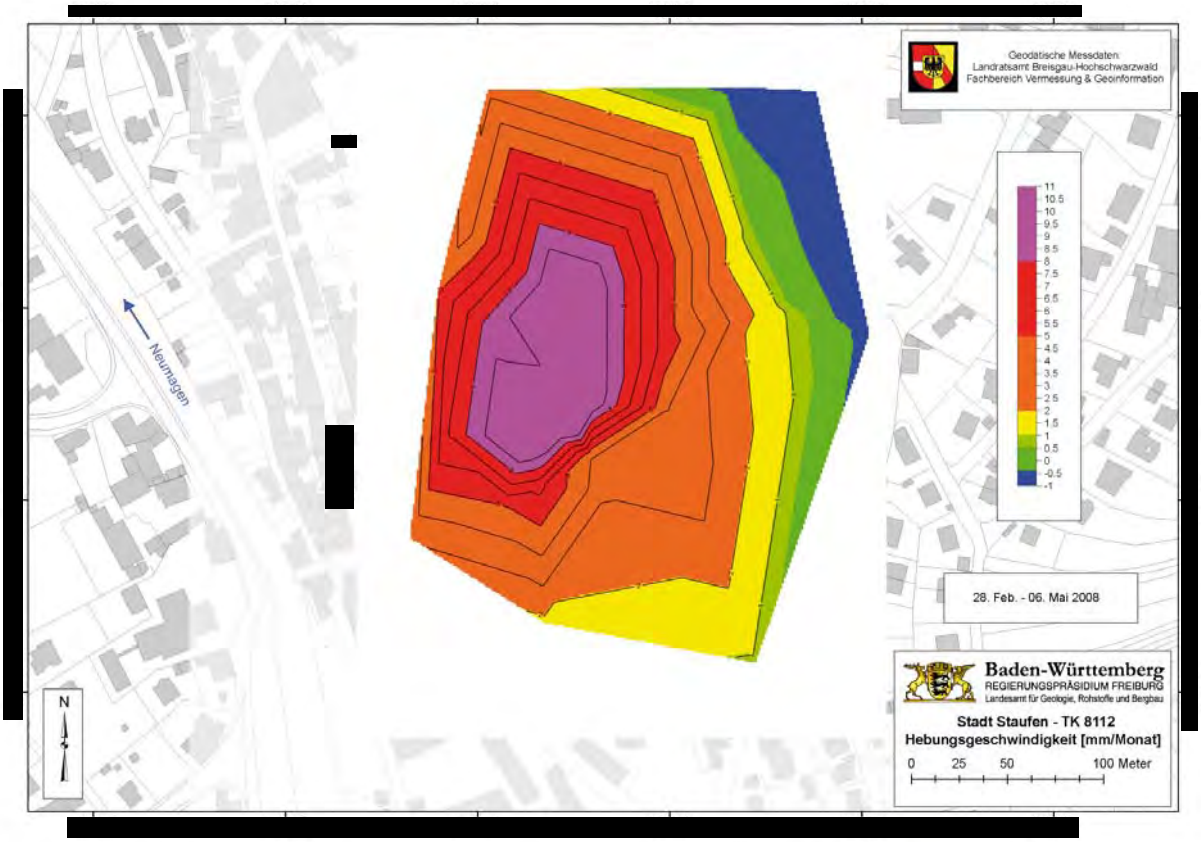


Abb. 4.2: Hebungsfigur Februar 2008 - Mai 2008.

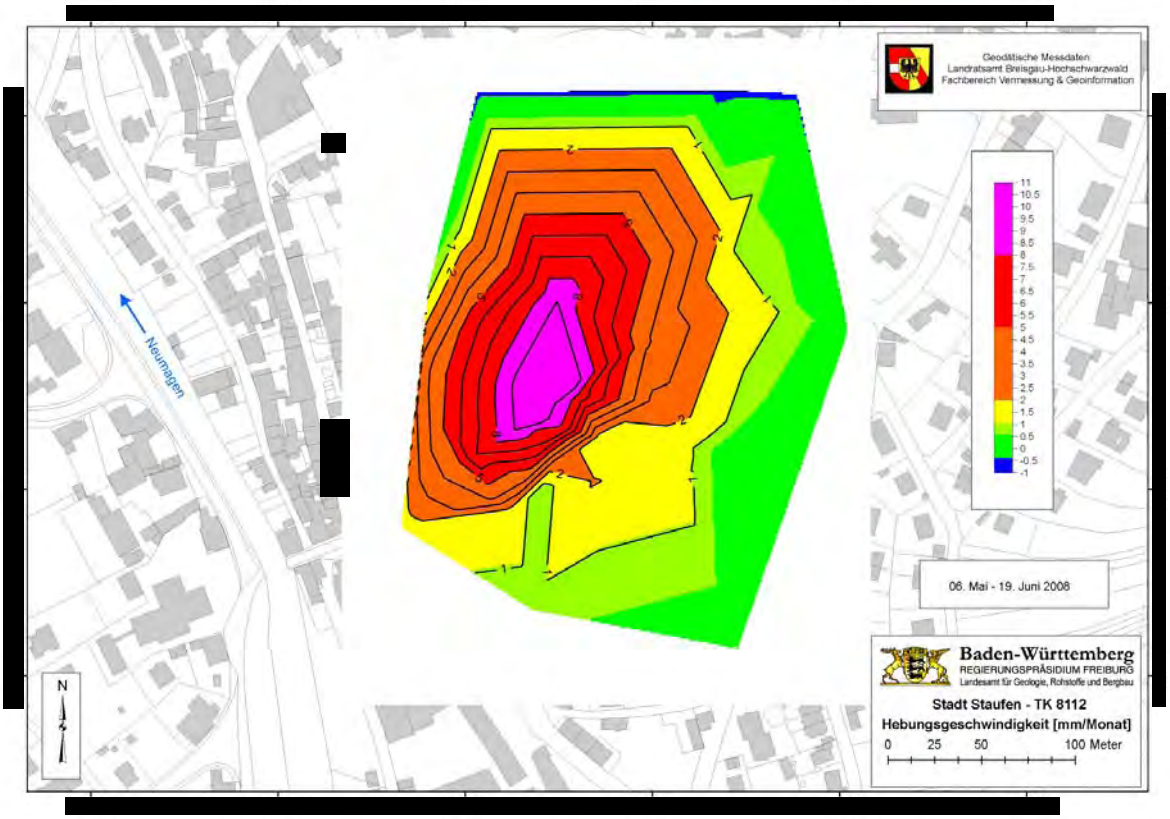


Abb. 4.3: Hebungsfigur Mai 2008 - Juni 2008.

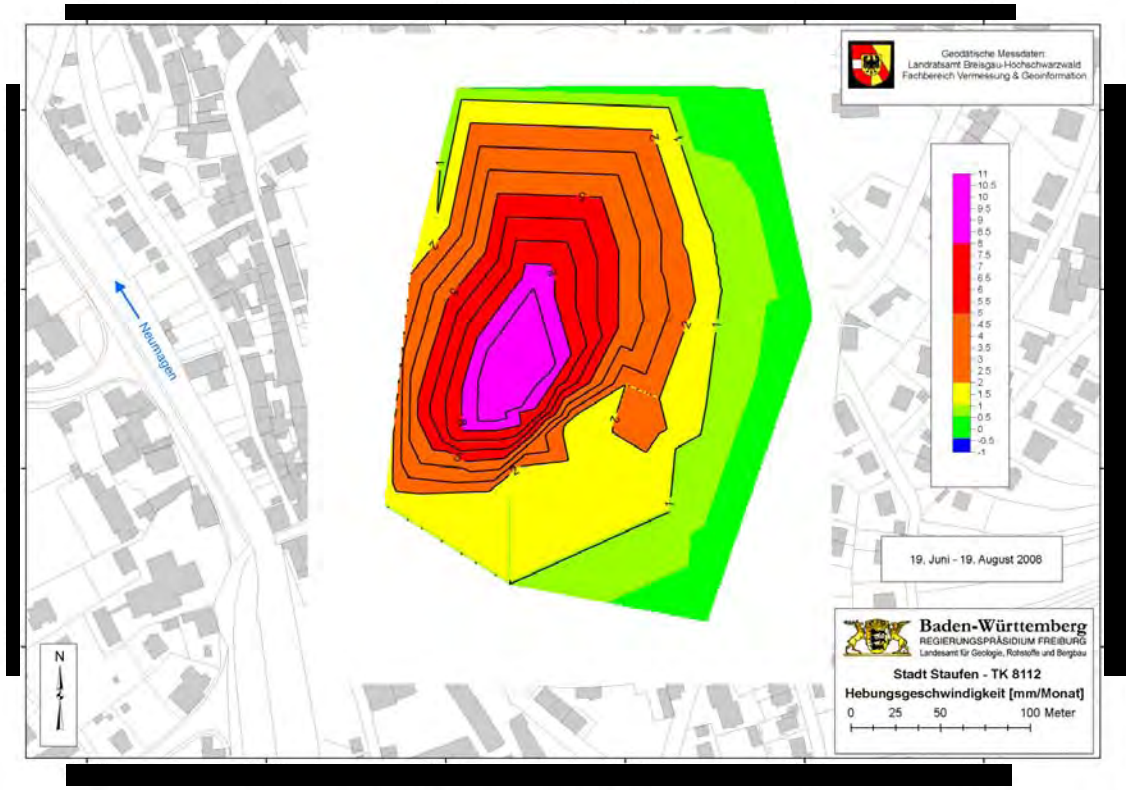


Abb. 4.4: Hebungsfigur Juni 2008 - August 2008

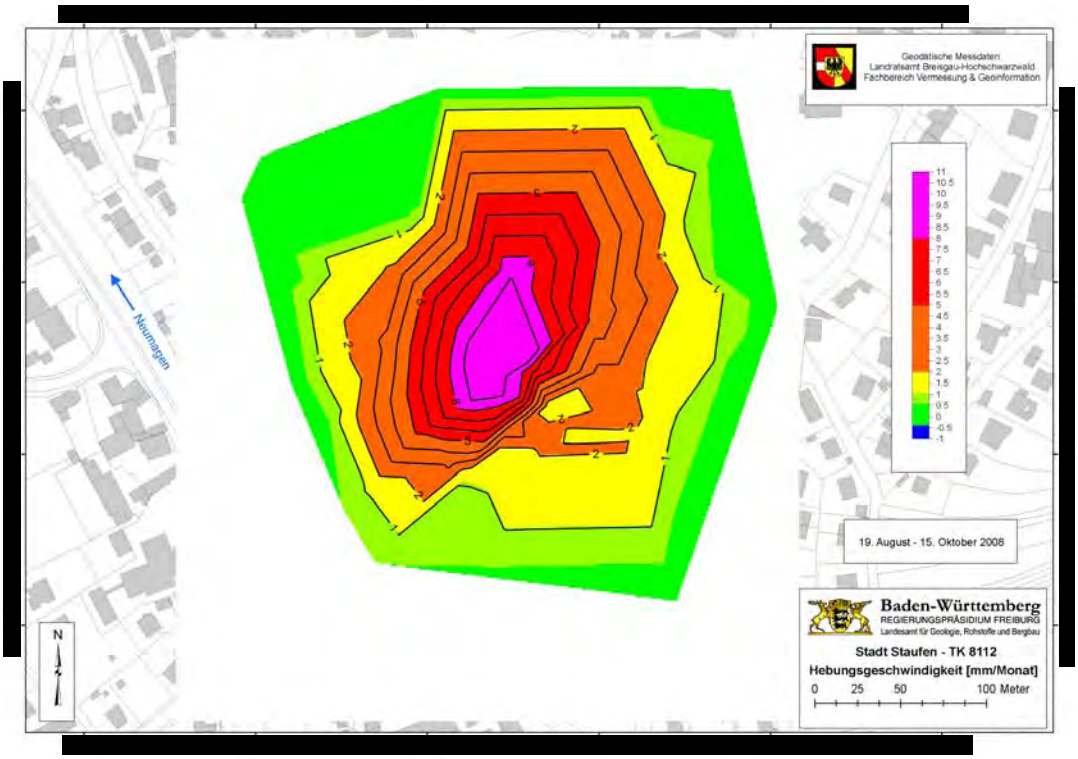


Abb. 4.5: Hebungsfigur August 2008 - Oktober 2008.

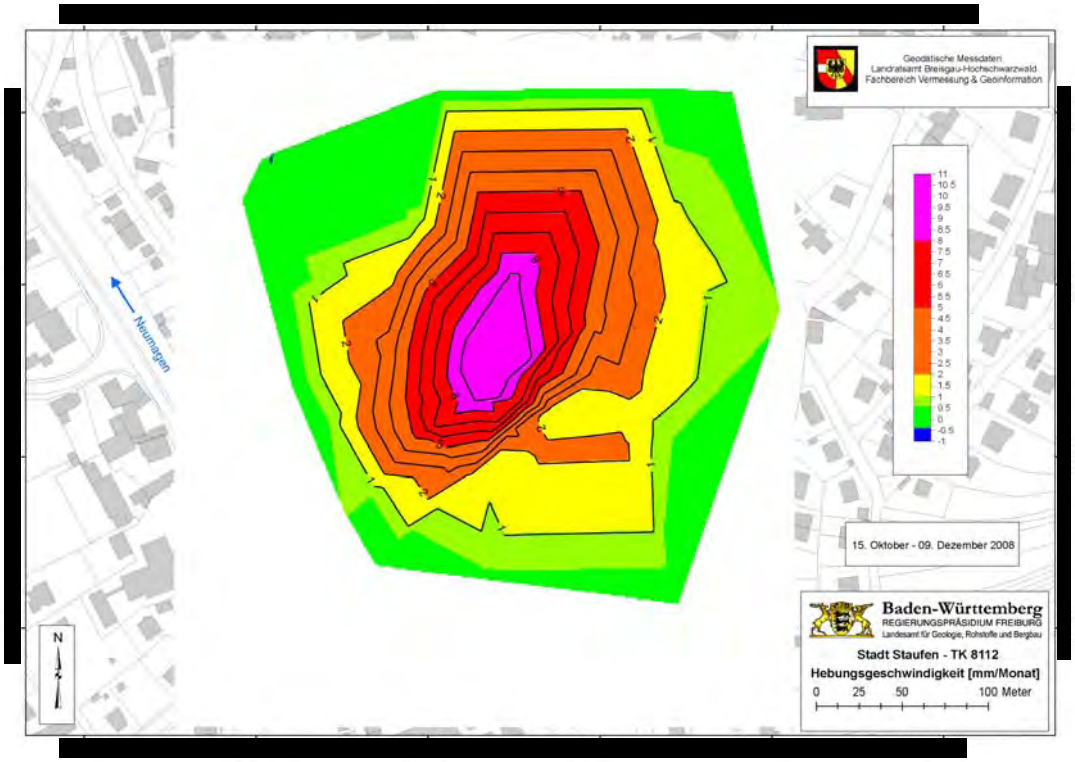


Abb. 4.6: Hebungsfigur Oktober 2008 - Dezember 2008.

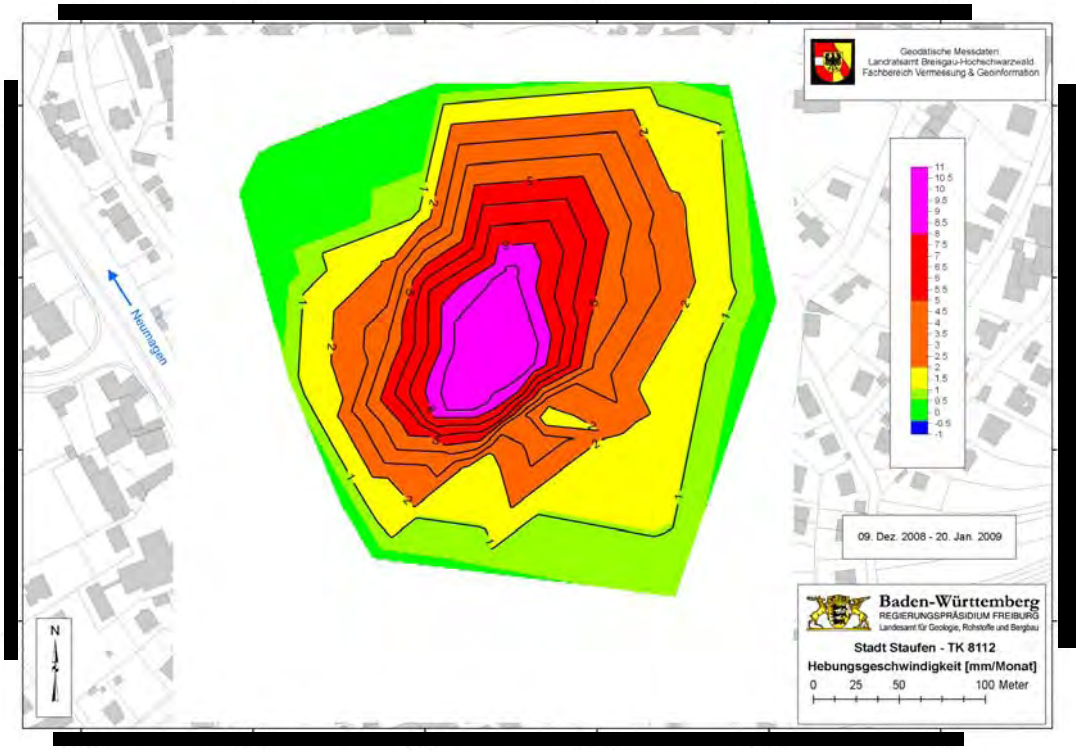


Abb. 4.7: Hebungsfigur Dezember 2008 - Januar 2009.

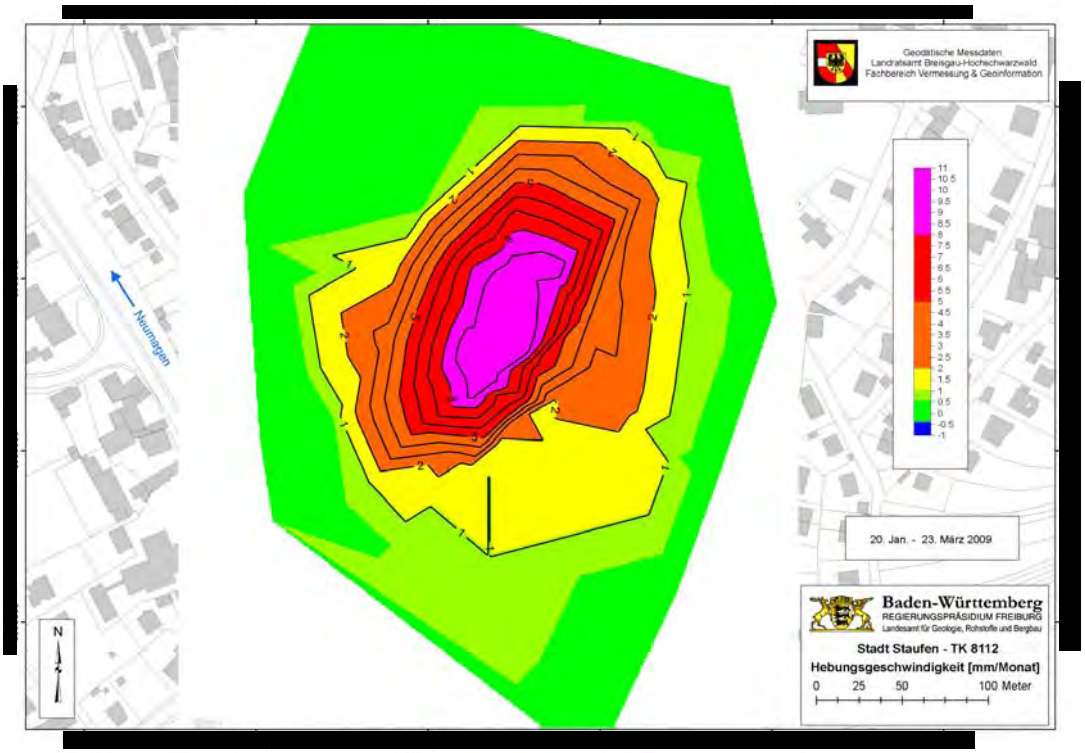


Abb. 4.8: Hebungsfigur Januar 2009 - März 2009.

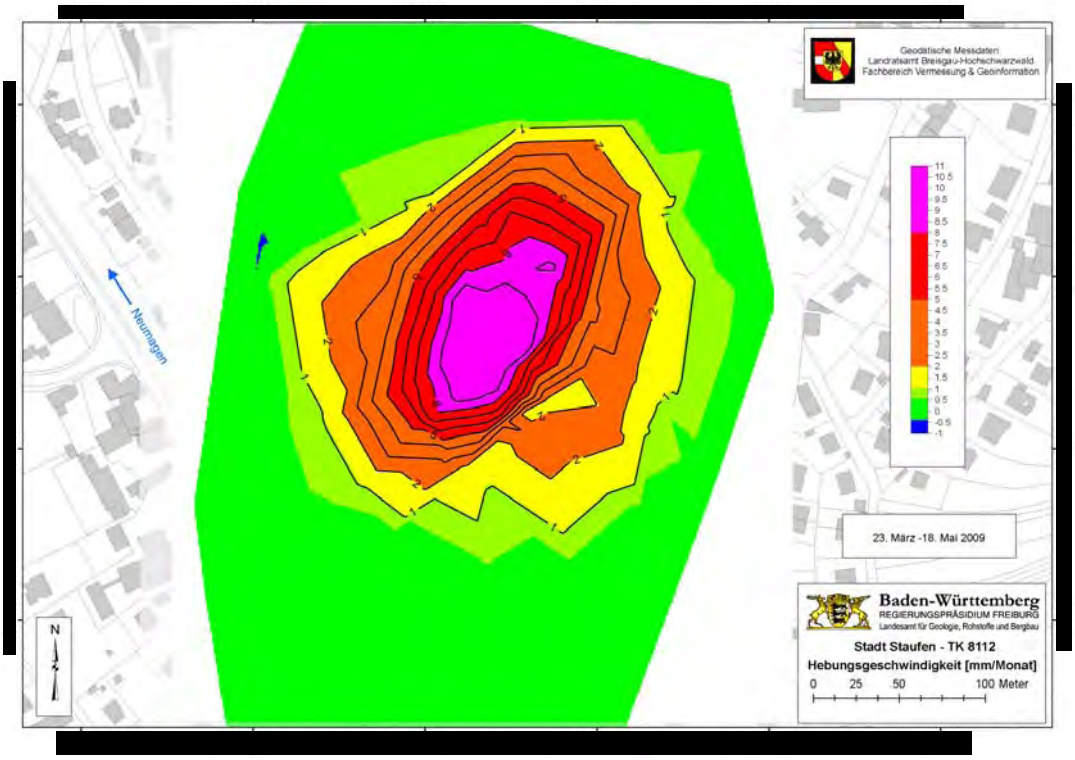


Abb. 4.9: Hebungsfigur März 2009 - Mai 2009.

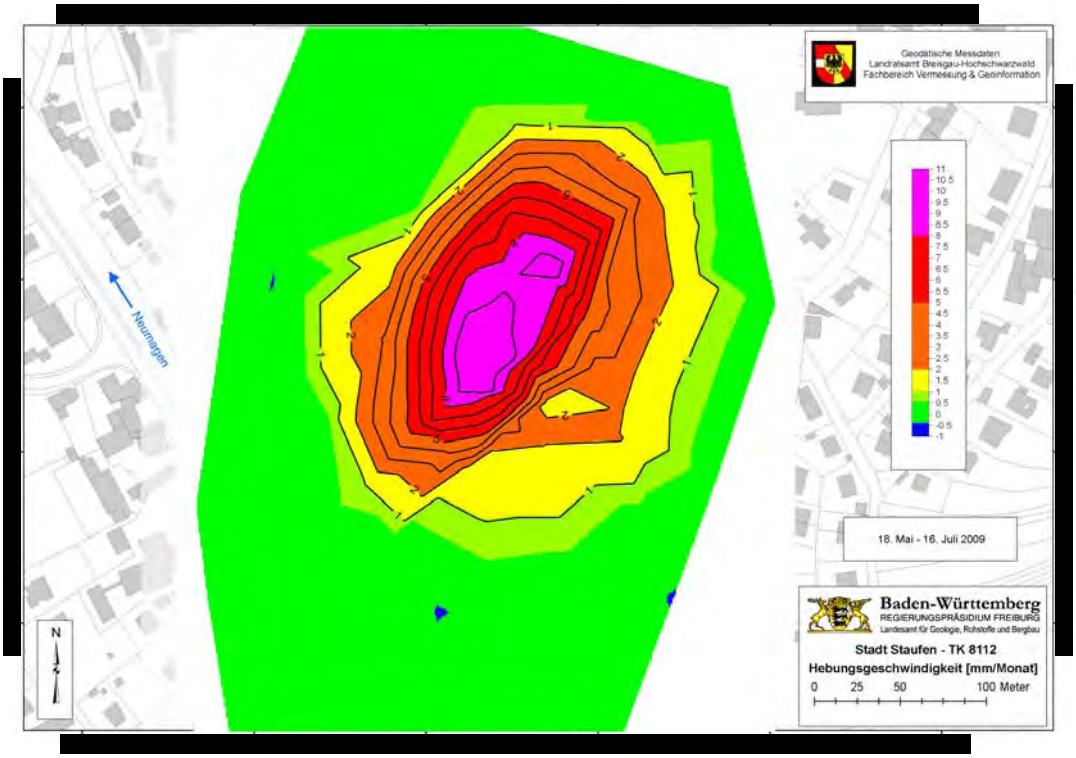


Abb. 4.10: Hebungsfigur Mai 2009 - Juli 2009.

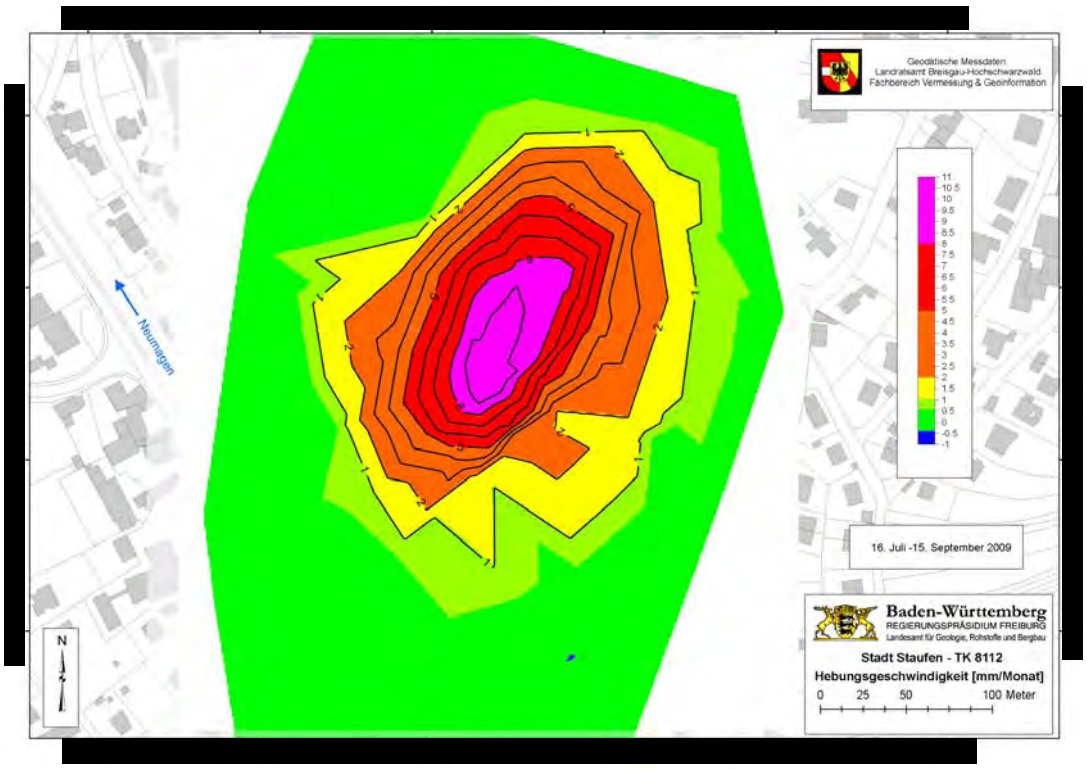


Abb. 4.11: Hebungsfigur Juli 2009 - September 2009.

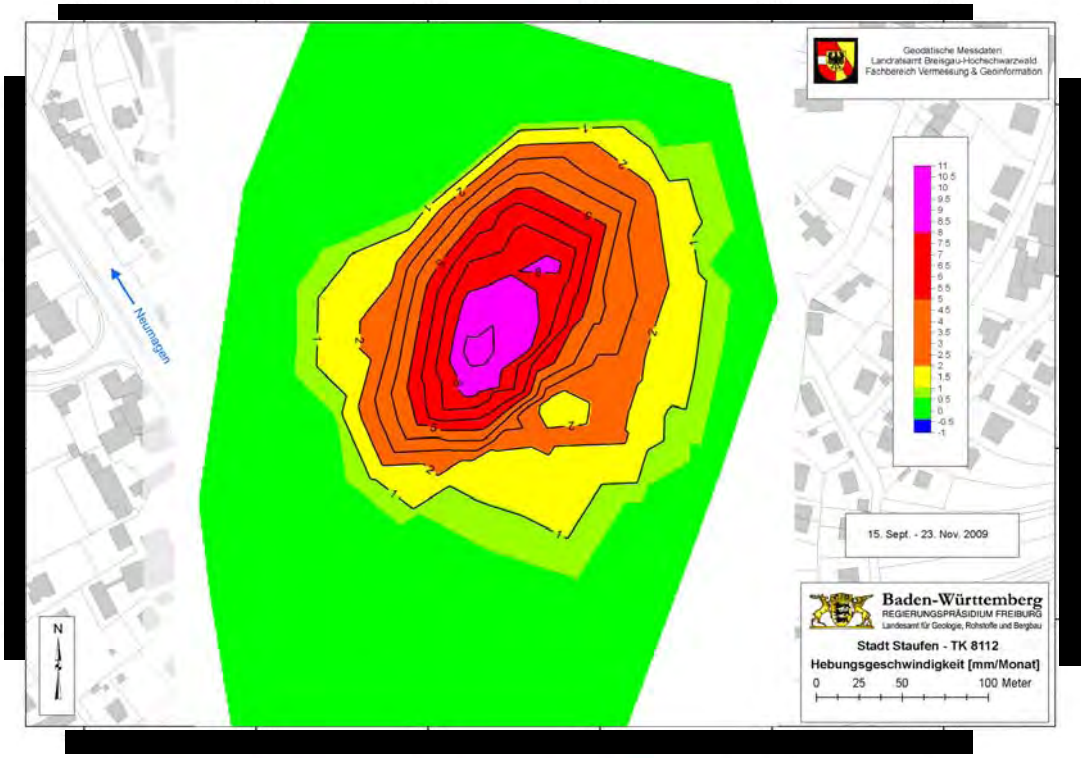


Abb. 4.12: Hebungsfigur September 2009 - November 2009.

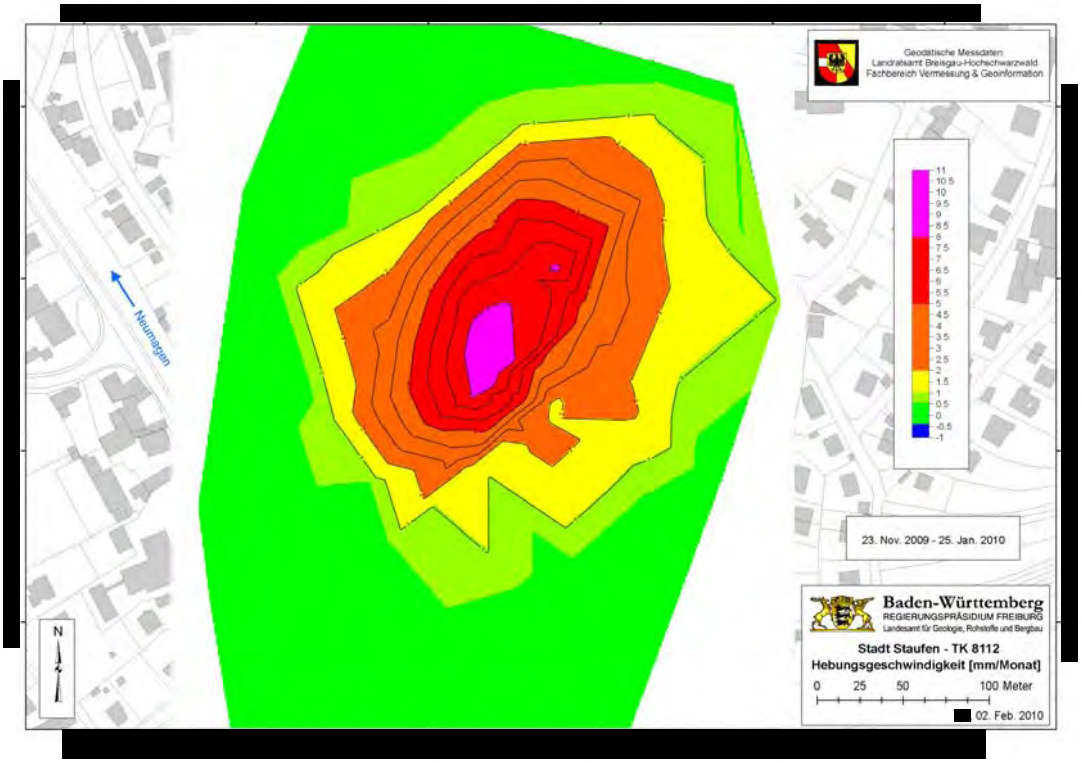


Abb. 4.13: Hebungsfigur November 2009 - Januar 2010.

Wie die Abb. 4.2 bis Abb. 4.13 zeigen, hat die Hebungsfigur bereits seit dem Messintervall Mai bis Juni 2008 weitgehend ortsfest ihre markante elliptische Ausbildung angenommen und zeigt seither nur noch geringfügige, eher von auswertebedingten Rundungseffekten beeinflusste Veränderungen. Die größte Hebungsgeschwindigkeit bildet sich im Intervall Februar bis Mai 2008 ab (Abb. 4.2), im Intervall September bis November 2009 (Abb. 4.12) verlangsamt sich die Hebungsgeschwindigkeit im zentralen Hebungsbereich, was auch im Intervall November 2009 bis Januar 2010 (Abb. 4.13) weiterhin der Fall ist. Die weiteren Kontrollmessungen werden zeigen, ob sich diese Verlangsamung der Hebungsgeschwindigkeiten weiterhin bestätigt.

Die Hebungsfigur konnte zwischenzeitlich unabhängig von der terrestrischen Vermessung vom Karlsruher Institut für Technologie, Geodätisches Institut, durch die wissenschaftliche Auswertungen von 20 Szenen bis in den Millimeter-Bereich auflösender Satelliten-Daten (TerraSAR-X) verifiziert werden. Danach gibt es außerhalb der dargestellten Hebungsfigur im Stadtgebiet Staufens keine weiteren flächenhaften Veränderungen der Geländeoberfläche.

In Abb. 4.14 sind die absoluten Hebungsbeträge im Zeitraum vom 23. März bis 23. November 2009 (acht Monate) graphisch dargestellt. Für dieses Zeitintervall

kann man ein Umrisspolygon abgrenzen, außerhalb dessen es im Stadtgebiet zu keinen über die Messgenauigkeit hinausgehenden Hebungen (1 mm) gekommen ist.

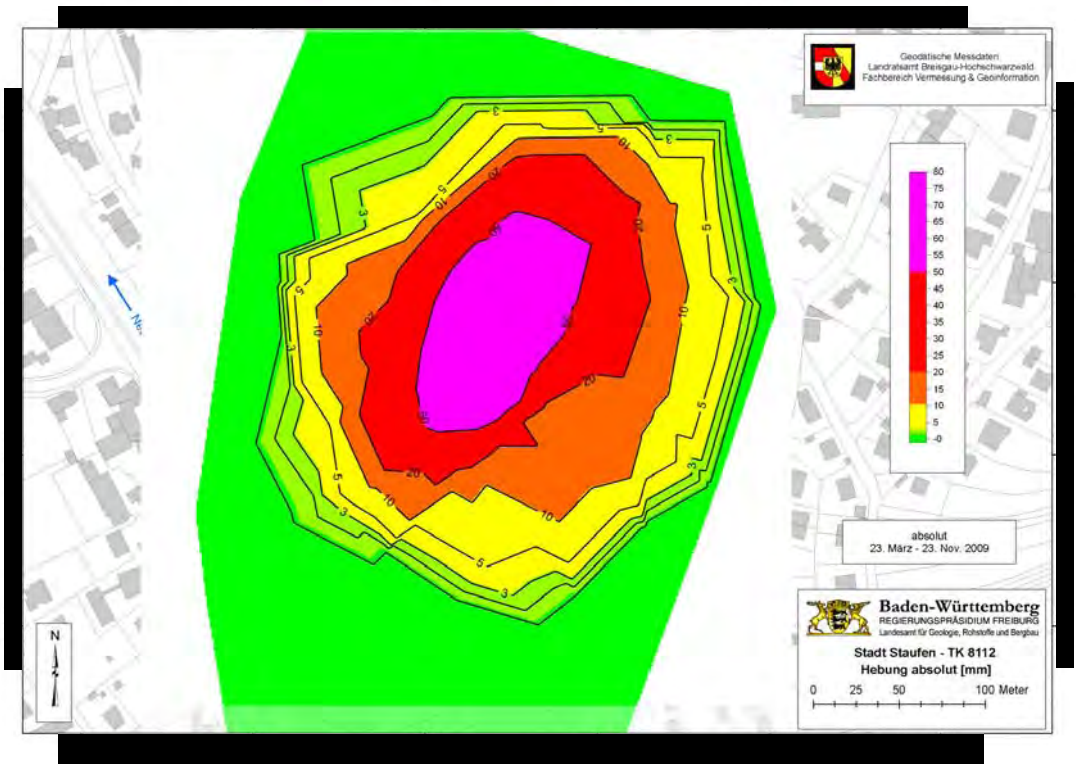


Abb. 4.14: Absolutbeträge der Hebungen im Zeitraum 23. März 2009 bis 23. November 2009.

Das LRA Breisgau-Hochschwarzwald hat die Höhenentwicklung für alle Messpunkte seit Beginn der Messungen ausgewertet. Somit lassen sich diejenigen Messpunkte benennen, an denen sich in mehrmonatiger Rückschau (mindestens sechs Monate, bis zwanzig Monate) bis heute keine messbaren bzw. innerhalb der Messgenauigkeit (1 mm) liegende Höhenänderungen ergeben haben. In Abb. 4.15 sind diese Messpunkte (grün markiert) eingetragen.

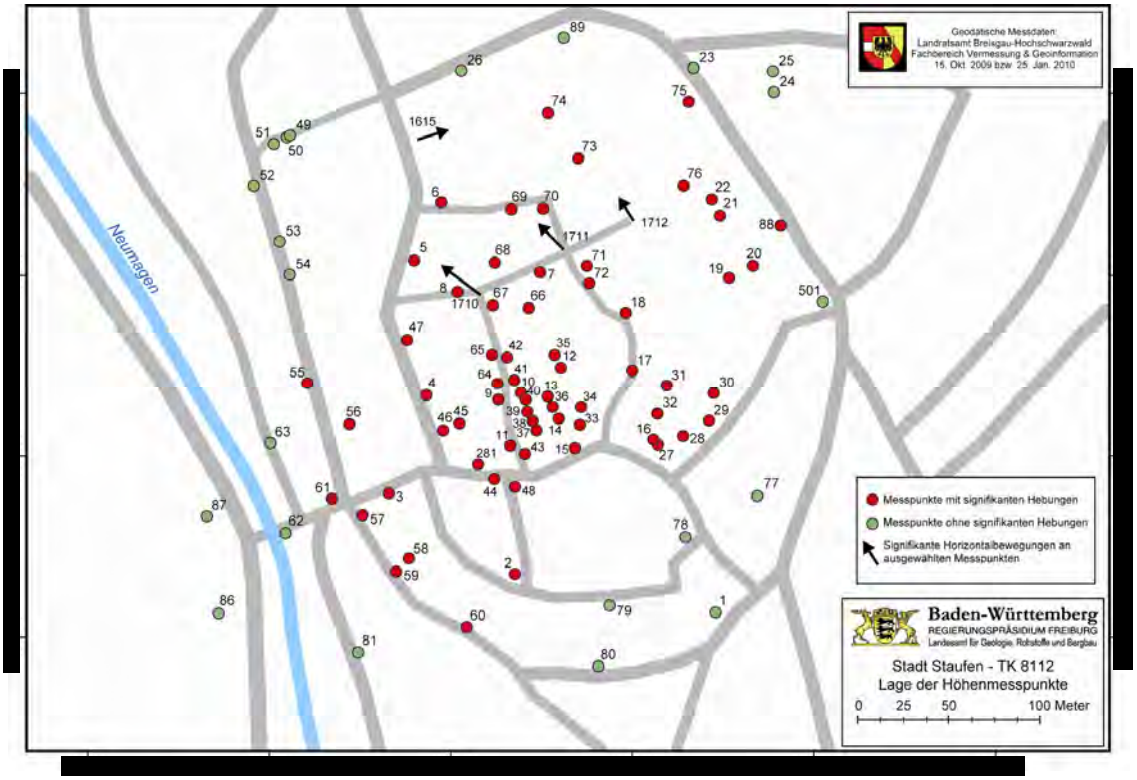


Abb. 4.15: Darstellung der Messpunkte ohne (grün) bzw. mit (rot) signifikanter Hebungsbewegung.

Die Abb. 4.16 verdeutlicht die zeitliche Entwicklung der absoluten Hebungsbeträge von Januar 2008 bis Januar 2010 am Beispiel von fünf ausgewählten Beobachtungspunkten im Zentrum Rathausgasse (MP 9, 8,12 und 13) und an der westlichen Peripherie des zentralen Hebungsbereiches Hauptstraße (MP 4). Für den Zeitraum zwischen Fertigstellung der Erdwärmesonden (Ende September 2007) und Aufnahme der regelmäßigen geodätischen Messungen (Februar 2008) liegen keine Messwerte vor. Seit Beginn der Erkundungsmaßnahmen im März 2009 wurden im inneren Bereich die Beobachtungsintervalle auf 14-tägig verdichtet (s. o.). Diese Verdichtung diente der Beweissicherung und sollte dokumentieren, dass die Erkundungsmaßnahmen zu keiner negativen Beeinflussung des weiterhin ablaufenden Hebungsprozesses führten.

Die Hebung verläuft seit Beginn der Messungen weitgehend linear mit einer im Hebungszentrum maximalen vertikalen Hebungsrate bis zu 10 mm/Monat. Das Hebungszentrum liegt um den Bereich der Rathausgasse (MP 9, Abb. 4.16).

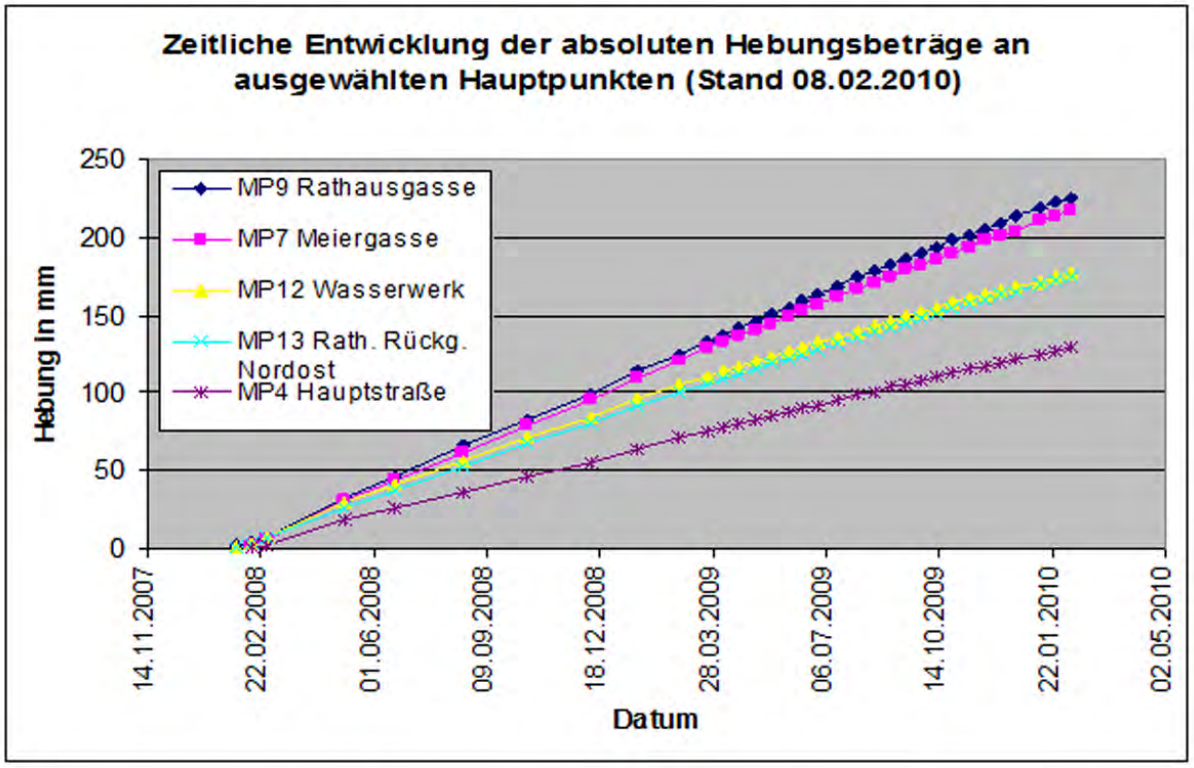


Abb. 4.16: Zeitliche Entwicklung der absoluten Hebungsbeträge an ausgewählten Messpunkten.

Wertet man den Verlauf der Hebungsgeschwindigkeit für die gleiche Messpunkte-Auswahl zeitlich aus, ergibt sich der in Abb. 4.17 dargestellte Verlauf.

Dabei 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 (Meßpunkte MP 9 und MP 7) ansteigt, um anschließend in einer dritten Phase (III) in eine geringere "Plateau-Geschwindigkeit" überzugehen. Dies lässt erkennen, dass der Hebungsprozess weder durch die Erkundungsmaßnahme noch durch etwaige natürlich ablaufende Prozesse (z. B. durch Aufreißen neuer Klüfte und Schichtfugen) eine Beschleunigung erfahren hat. Auch wenn derzeit statistisch noch nicht abgesichert, deutet sich in den letzten 100 Tagen der Beobachtung z. B. bei MP 12 und MP 13 eine eher allmähliche Abnahme der Hebungsgeschwindigkeit an.

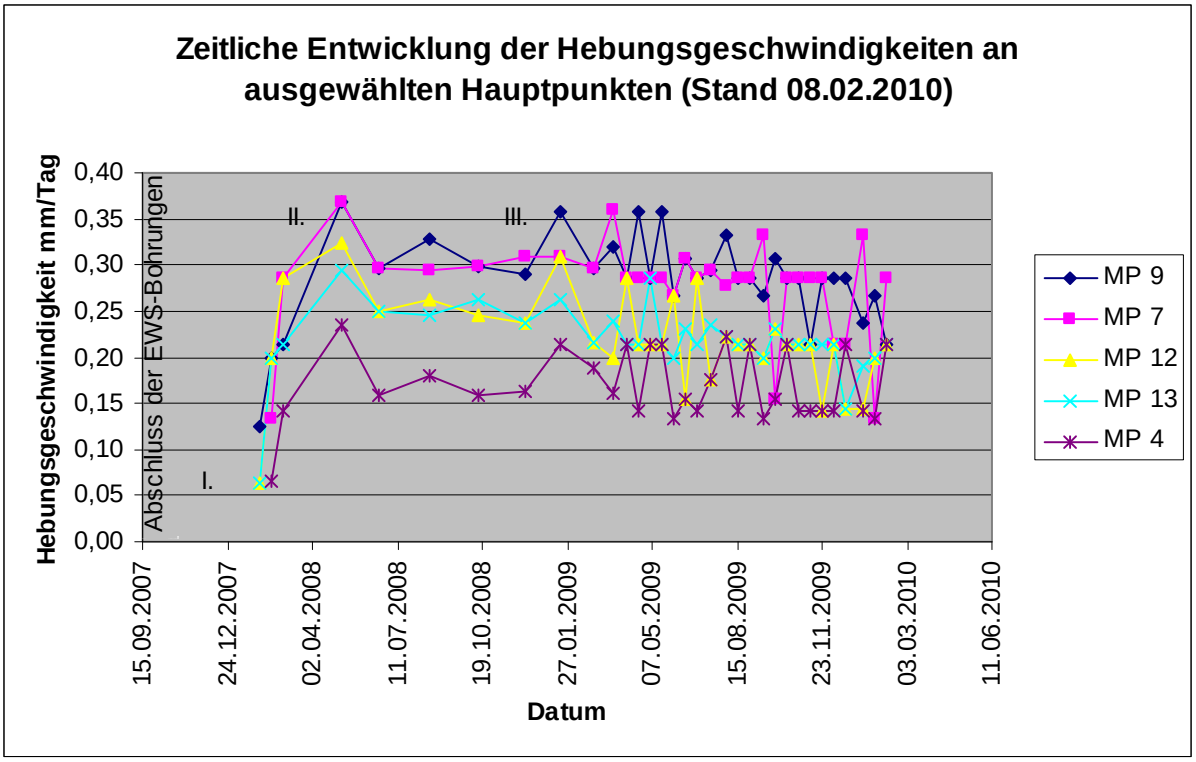


Abb. 4.17: Zeitliche Entwicklung der Hebungsgeschwindigkeit an ausgewählten Messpunkten.

Die Abb. 4.19 veranschaulicht in zwei Schnitten (Lage vgl. Abb. 4.18) die zeitliche Entwicklung der absoluten Hebungsbeträge parallel zu den beiden Achsenrichtungen des elliptischen Hebungsbereiches. Beide Profilschnitte einschließlich der zugehörenden geologischen Interpretation (vgl. Kap.7) liegen der geomechanischen Modellierung des Hebungsbereiches zu Grunde (vgl. Bericht Ingenieurgruppe Geotechnik, Kirchzarten).

Während sich der Hebungsverlauf in Nordost-Südwest-Richtung (Schnitt 1) als eine vergleichsweise symmetrische Aufwölbung darstellt, fällt in Nordwest-Südost-Richtung (Schnitt 2) eine deutliche Asymmetrie der Hebungsfigur auf. Nach einem eher flachen Anstieg im Südosten, der im Bereich der kath. Kirche ein Plateau aufweist, erfolgt eine sehr starke Versteilung, die in einer Spitze kulminiert, um dann insgesamt flacher nach Nordwest abzufallen. Auch in diesen Schnitten kommt die Linearität bei der Höhenentwicklung deutlich zum Ausdruck, wonach sich charakteristische Kurvenpunkte in allen Schnitten gleichmäßig erhöhen.

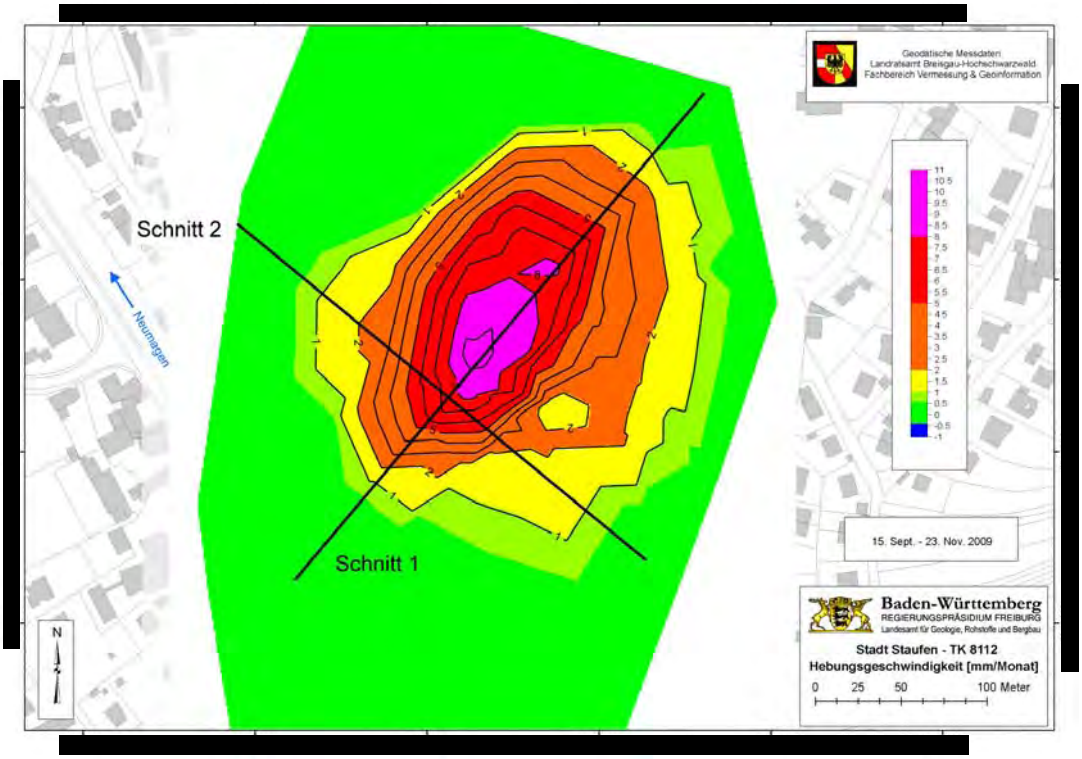


Abb. 4.18: Lage der Schnittlinien 1 und 2.

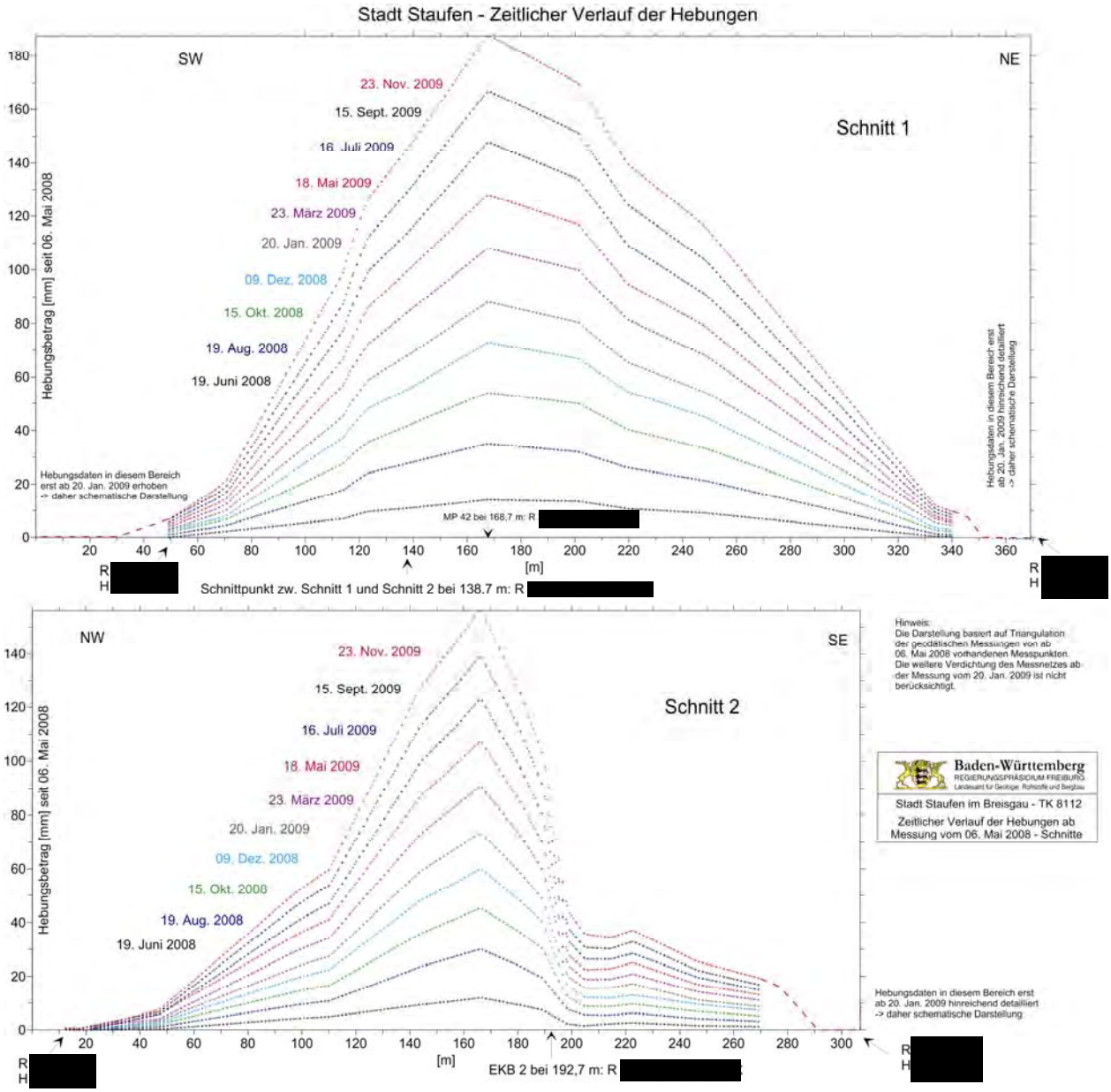


Abb. 4.19: Höhenentwicklung in zwei Schnitten parallel zu den Hauptachsen des elliptischen Hebungsbereiches.

Die **Höhenentwicklung** an Messpunkten lässt sich mit heutiger Messtechnik bei vertretbarem Messaufwand hochgenau (< 1 mm) messen. Der messtechnische Aufwand für hochgenaue **Lagepunktmessungen** ist demgegenüber weitaus größer und in der entsprechenden Messdichte kaum leist- und vertretbar. Wie entsprechende Kontrollauswertungen des Vermessungsamts ergaben, beinhalten die regelmäßig ausgewerteten Hebungsfiguren zwangsläufig nicht dargestellte Horizontalkomponenten, die sich im Hebungsbereich bis zum 15. Oktober 2009 maximal auf ca. 20 cm in Nordwest-Richtung belaufen (Abb. 4.15). Im Zuge der Untersuchungen des Land-

ratsamts Breisgau-Hochschwarzwald anlässlich der Lagerichtigkeit der vorhandenen Aufnahmepunkte (AP) für Katasterzwecke wurden in der Meiergasse Verschiebungen in nordwestlicher Richtung (dem Schichteinfallen folgend, siehe Kap. 7) in den Punkten 1710, 1711, 1712 zwischen 11 cm bis 20 cm festgestellt. An Punkt 1615 ergibt sich eine (derzeit nicht erklärbare) Verschiebung von 14 cm in östliche Richtung. Die restlichen überprüften Anschlusspunkte und Aufnahmepunkte bewegen sich innerhalb der zulässigen Toleranz (fs = 3 cm). Die Lage dieser Messpunkte ist in Abb. 4.15 eingetragen.

Die Richtungsvektoren in der geomechanischen Modellierung (siehe Bericht Ingenieurgruppe Geotechnik) vollziehen sowohl die Vertikal- als auch die Horizontalkomponenten des Hebungsprozesses nach und führen zu dem Ergebnis, dass die Horizontalkomponente in Teilbereichen um den Faktor von ca. 1,7 größer ist als die Vertikalkomponente.

Entsprechend der Kategorisierung der geodätischen Messpunkte im Zentralbereich (Messrhythmus seit Erkundungsbeginn 14-tägig) und im Gesamtbereich (Messrhythmus zweimonatig) wird das Untersuchungsgebiet für **Hebungsvolumenberechnungen** in zwei Flächen unterteilt (Abb. 4.20):

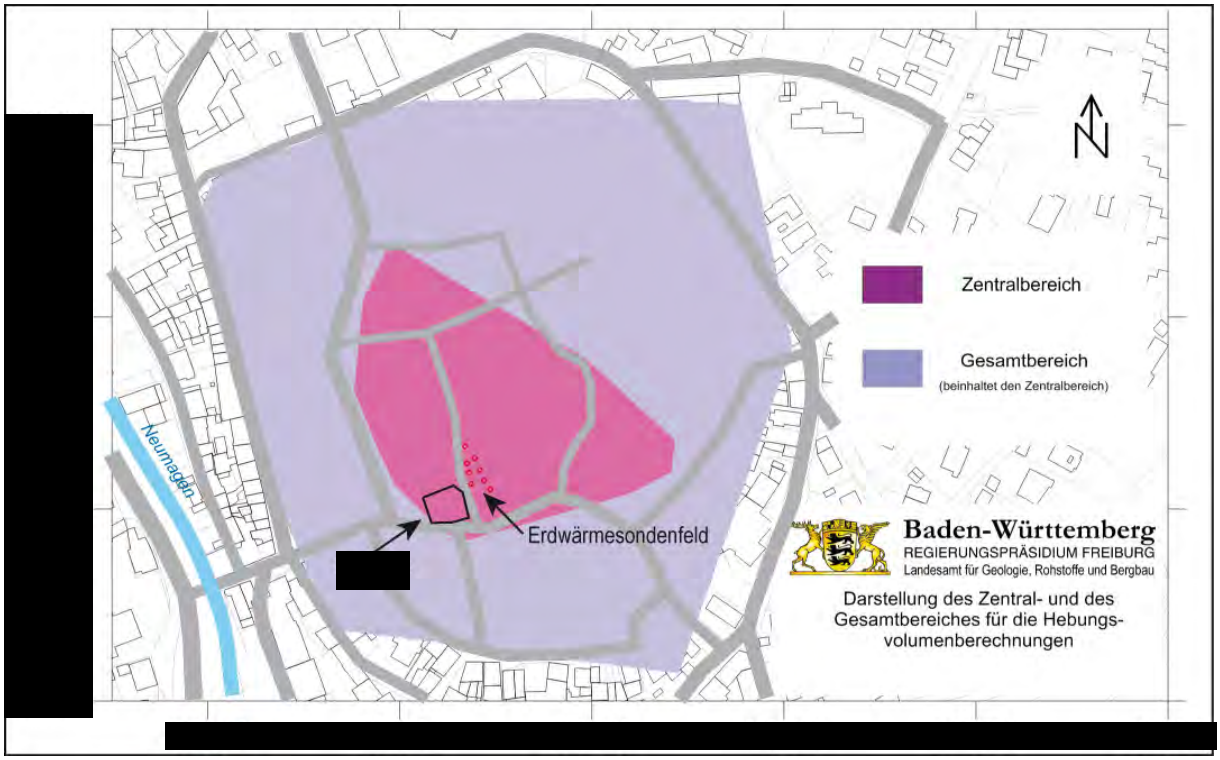


Abb. 4.20: Darstellung des Zentral- und des Gesamtbereiches für die Hebungsvolumenberechnung.

Das im Untersuchungszeitraum von 06. Mai 2008 bis 25. Januar 2010 (629 Tage) für den annähernd gesamten Hebungsbereich ermittelte **Hebungsvolumen beträgt ca. 3500 m³** (Abb. 4.21), entsprechend im Mittel **5,6 m³/Tag**. Wenn man die Hebungsprozesse allein auf Quellung (Anhydrit, Tonminerale) zurückführt, ergibt sich überschlagsmäßig eine für den Quellungsvorgang erforderliche Wasserzufuhr von 3 bis 4 l/min (bei einem Wasserbedarf von ca. 780 l für die Umwandlung von 1 m³ Anhydrit in Gips).

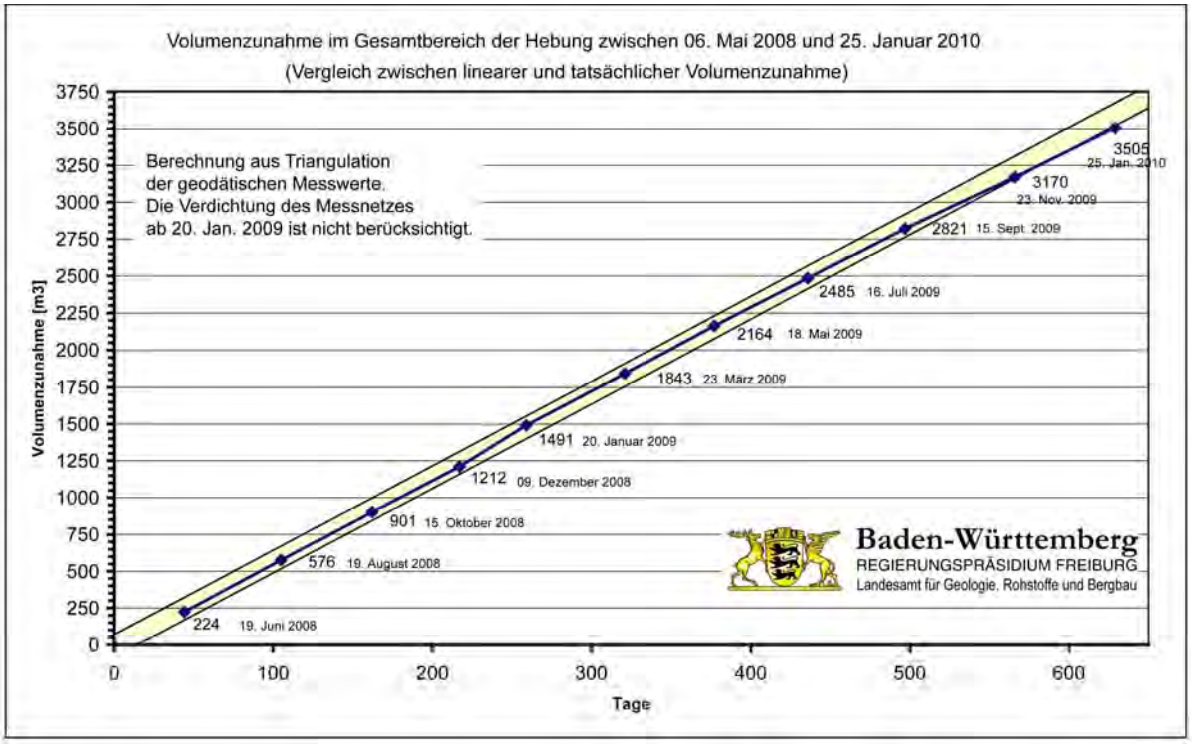


Abb. 4.21: Quellungsbedingte Volumenzunahme für den Gesamtbereich zwischen 06. Mai 2008 und 25. Januar 2010.

Für den Zentralbereich des Hebungsgebiets ergibt die für den Zeitraum 06. Mai 2008 bis 08. Februar 2010 erfolgte Auswertung an 38 Meßpunkten ein Hebungsvolumen von ca. 1640 m³ (Abb. 4.22).

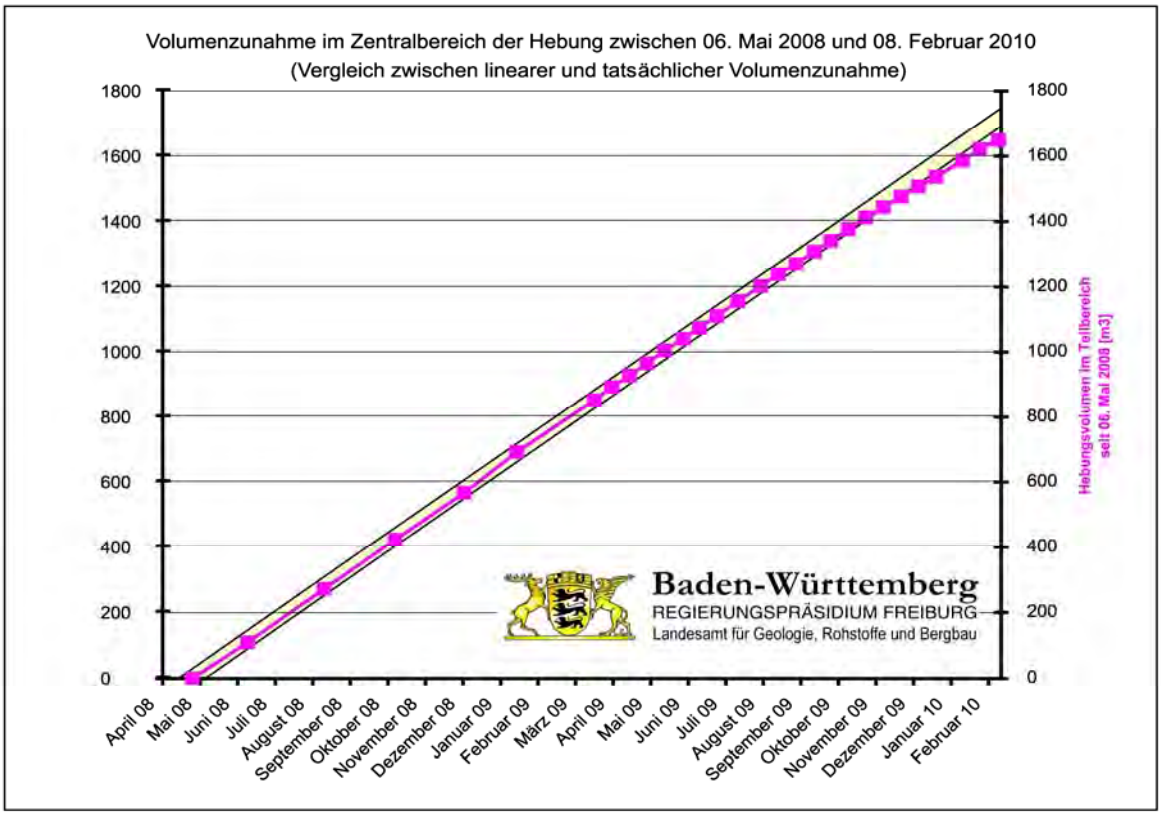


Abb. 4.22: Quellungsbedingte Volumenzunahme für den Zentralbereich zwischen 06. Mai 2008 und 08. Februar 2010.

Aus den Abb. 4.21 und 4.22 ist zu entnehmen, dass die Linearität bei der Volumenzunahme seit Ende September 2009 gebrochen wird und sich die Volumenzunahme seither verlangsamt. Dieser Trendwechsel fällt mit dem Beginn der ergriffenen Abwehrmaßnahmen (Pumpmaßnahmen im Unterkeuper/Oberer Muschelkalk ab 25. September 2009, vgl. Kap. 8) zusammen. Hier werden die weiteren Messungen zeigen, ob sich dieser Trend bestätigt.

Die Messungen der räumlichen und zeitlichen Entwicklung des Hebungsverlaufs stellen die wesentliche Grundlage zum Nachweis der Wirksamkeit der eingeleiteten schadensbegrenzenden Maßnahmen dar und werden fortgesetzt.

5 Erkundungsbohrungen

Im Zeitraum vom 02. März bis 30. Oktober 2009 erfolgte die geologische Erkundung der Untergrundverhältnisse im Bereich des Erdwärmesondenfeldes der EWS 1 bis EWS 7.

Ziel war es, mittels einer zunächst auf 150 m Bohrtiefe konzipierten Kernbohrung und den Begleituntersuchungen einen belastbaren geologischen, mineralogischen und hydrogeologischen Datensatz zu gewinnen, die in Kap. 2 beschriebene Arbeitshypothese zu überprüfen, sowie parallel zu den Erkundungen geeignete Maßnahmen zur Schadensbegrenzung prüfen und einleiten zu können. Im Laufe der geologischen Erkundung wurde es erforderlich, die zuerst am Nordrand des Erdwärmesondenfeldes platzierte Erkundungsbohrung EKB 1 nach 18,20 m Bohrmetern zu beenden und am Südrand des Erdwärmesondenfeldes die Erkundungsbohrung EKB 2 anzusetzen. Sie wurde bis 163 m unter GOK abgeteuft.

Die Untersuchungsmaßnahmen wurden vom RPF/LGRB sowie der Ingenieurgruppe Geotechnik, Kirchzarten, fachtechnisch begleitet und sind in einem Bauzeitenplan (Anl. 5.1) der Ingenieurgruppe Geotechnik synoptisch dargestellt. Er gibt die im Zuge der geologischen Erkundung erbrachten Leistungen wieder.

Die Ergebnisse der Erkundungsmaßnahmen werden im Folgenden beschrieben.

Bedingt durch das vorhandene Schichteinfallen sind sämtliche Mächtigkeitsangaben nur scheinbare Mächtigkeiten.

5.1 Erkundungsbohrung EKB 1

5.1.1 Stammdaten, Ausbauhinweise

Die Fa. Anger´s Söhne, Hessisch Lichtenau, hat im Auftrag der Stadt Staufen am 02. März 2009 mit der Einrichtung der Bohrstelle in der Rathausgasse begonnen. Der Bohrpunkt der EKB 1 liegt nördlich des Erdwärmesondenfeldes (Abb. 5.1). Er wurde gewählt, um einerseits möglichst nahe am geodätisch gemessenen Hebungszentrum zu liegen und um andererseits noch engen Bezug zum Erdwärmesondenfeld aufzuweisen. Nachdem zu diesem Zeitpunkt zwar grundsätzlich zu vermuten, aber messtechnisch noch nicht näher belegbar war, dass die im Meißelbohrverfahren mit Druckluftspülung abgeteuften Erdwärmesonden-Bohrungen EWS 1 bis EWS 7 gewisse Abweichungen von der Vertikalen aufweisen würden und man mit der Erkundungsbohrung EKB 1 keine Erdwärmesonde anbohren wollte, wurde ein Sicherheitsabstand von ca. 10 m zum Erdwärmesondenfeld eingehalten.

Im Lageplan der Abb. 5.1 ist der Bohransatzpunkt der EKB 1 in Bezug zum Erdwärmesondenfeld dargestellt. Die Stammdaten zur Erkundungsbohrung EKB 1 sind in Tab. 5.1 zusammengestellt.

Tab. 5.1: Stammdaten der Erkundungsbohrung EKB 1 (Datum der Einmessung: 11. Januar 2010).

Bezeichnung	**LGRB-Nr.**	**Rechtswert**	**Hochwert**	**Geländeoberkante [m NN]**	**Messpunktoberkante (OK PVC-Rohr) [m NN]**
Erkundungsbohrung EKB 1/09 Rathaus Staufen	8112/287	[redacted]	[redacted]	285,97	285,76

Die Baustelleneinrichtung war am 06. März 2009 abgeschlossen, so dass am 09. März mit den Bohrarbeiten begonnen werden konnte. Zum Einsatz kam ein Bohrgerät vom Typ DBA 2-3. Dabei wurde bis 6,50 m u. GOK mit einer Fräsrohrtour Ø 178 mm und bis zur Endteufe mit einem Bohrdurchmesser Ø 146 mm im Seilkernbohrverfahren (SK 6 L) bei vollständigem Kerngewinn gebohrt.

Die Erkundungsbohrung EKB 1 wurde am 12. März 2009 bei 18,20 m u. GOK eingestellt, da die geologische Profilaufnahme erbrachte, dass am Standort der EKB 1 der im Bereich des Erdwärmesondenfeldes EWS 1 bis EWS 7 anhand des Bohrkleins (Cuttings) erst in ca. 130 m Tiefe zu erwartende Unterkeuper (ku) (vgl. Schichtenverzeichnisse Anl. 6.1 bis Anl. 6.3) bereits in 8,9 m Tiefe angetroffen worden war und somit die unter der Quartär-Überdeckung (qu) erwartete Schilfsandstein-Formation (km2) völlig und die Gipskeuper-Formation (km1) weitestgehend ausfällt. Dies bedeutet, dass bei einem lateralen Abstand von knapp 10 m zwischen der Erkundungsbohrung EKB 1 und der nächstgelegenen Erdwärmesonde EWS 1 eine tektonische Störung die geologische Profilfolge um ca. 120 Höhenmeter versetzt, wobei die EKB 1 auf der Hochscholle liegt. Daher konnte am Standort der Erkundungsbohrung EKB 1 keine weitere Erkundung des Gipskeupers stattfinden. Die Abb. 5.2 verdeutlicht die angetroffene geologische Schichtfolge im Bezug zu den Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 3.

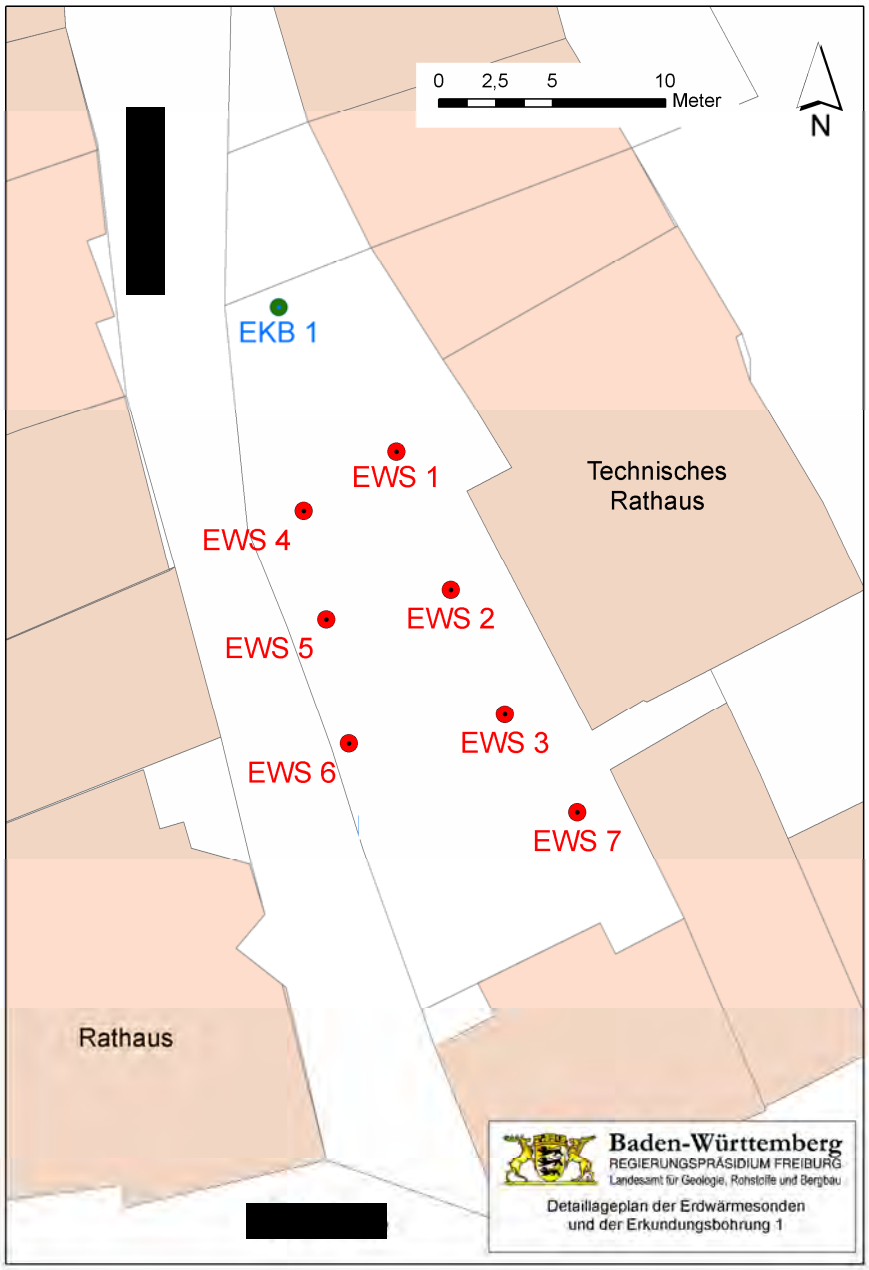


Abb. 5.1: Lageplan mit Eintrag der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 und der Erkundungsbohrung EKB 1.

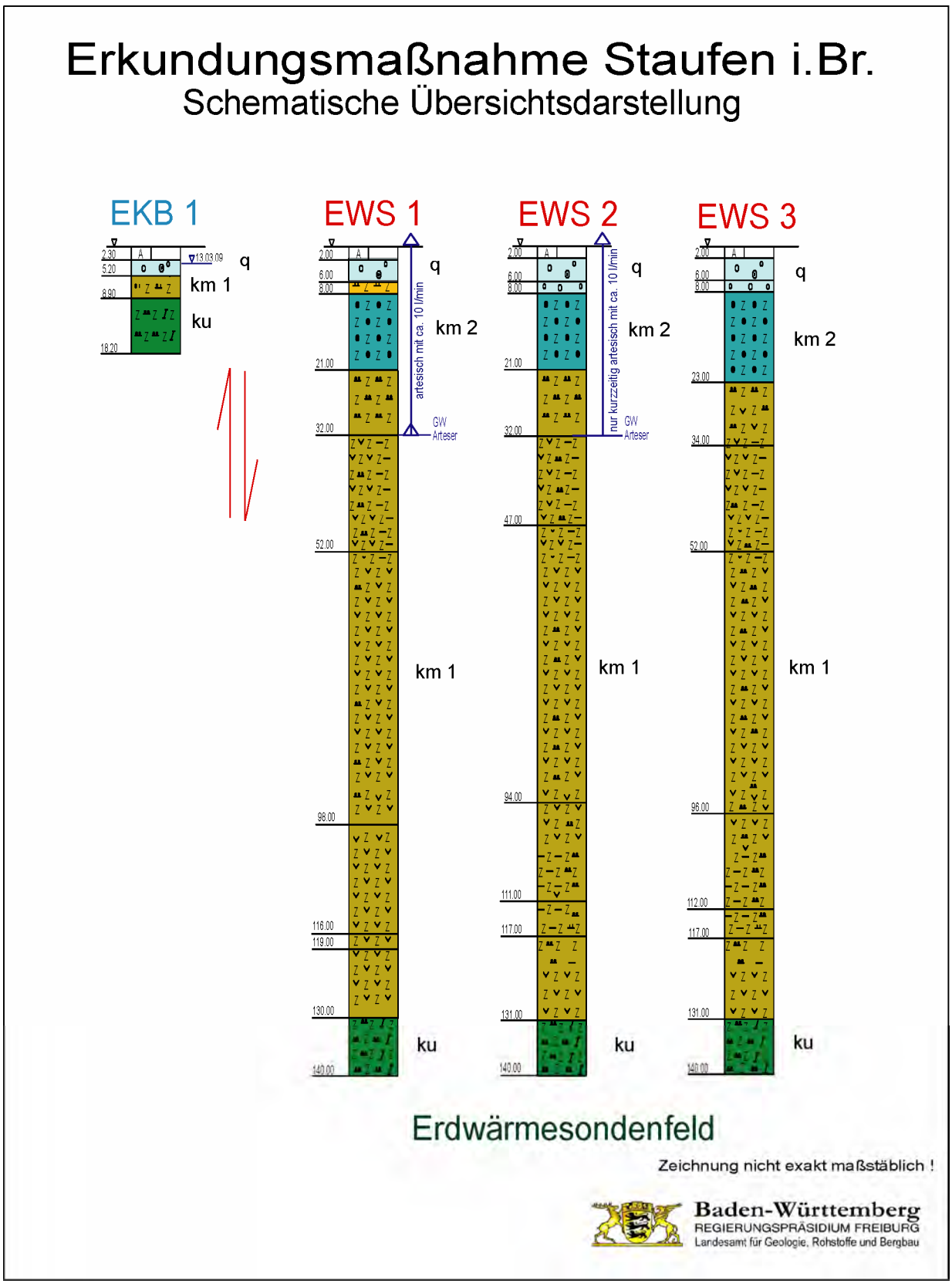


Abb. 5.2: Vergleich der in der EKB 1 angetroffenen Schichtabfolge mit der im benachbarten Erdwärmesondenfeld.

Als bohrtechnische Besonderheit wurde in einer Tiefe zwischen 15,90 m u. GOK bis 17,10 m u. GOK im Unterkeuper ein Verkarstungs-Hohlraum angetroffen, wobei ein merklicher Spülungsverlust (ca. 1 bis 1,3 m³) aufgetreten ist. Nach erfolgtem Bohrloch-Scan (Kap. 5.4.1, Abb. 5.14) sowie einem Pumpversuch im Bereich des Hohlraumes (Kap. 5.4.2) wurde die Bohrung noch bis auf 18,20 m unter Gelände vertieft, auf einen Bohrdurchmesser von Ø 370 mm aufgeweitet und anschließend zu einer 5"-Grundwassermessstelle mit einer Filterstrecke zwischen 14,50 m u. GOK und 17,50 m u. GOK im Unterkeuper ausgebaut. Zusätzlich wurde in das Bohrloch ein 2"-Beobachtungsrohr zu Temperatur-Profilmessungen eingebaut. Der Mehrverbrauch an Filterkies (Ø 3,15 - 5,6 mm) im Bereich des Hohlraumes betrug 750 kg.

Der Zwischen- und Endausbau der EKB 1 kann der Ausbauzeichnung der Fa. H. Anger´s Söhne entnommen werden (Anl. 5.2).

Die reine Bohrzeit für die EKB 1 betrug vier und der Ausbauaufwand ohne bohrloch-geophysikalische und hydraulische Tests sieben weitere Arbeitstage.

5.1.2 Geologische Schichtabfolge EKB 1

In Abb. 5.3 und Anl. 5.3 a, b ist das Bohrprofil (graphische Darstellung sowie geologische Schichtenbeschreibung) der Erkundungsbohrung EKB 1 beigefügt. Anl. 5.5 enthält die Fotodokumentation der EKB 1.

Unter einer 2,30 m mächtigen sandig - kiesigen **anthropogenen Aufschüttung** (yA) folgen bis 5,20 m u. GOK die sandig-schluffigen Mittel- bis Grobkiese der quartären **Neumagen-Schotter** (gg). Sie werden bis 8,0 m u. GOK von tonigen Auslaugungs-schluffen der **Gipskeuper-Formation** (km1) unterlagert. Bis 8,90 m u. GOK folgt Kern-verlust, welcher vermutlich in Zusammenhang mit dem ausgelaugten Böhringen-Sulfat des Unterkeupers steht. Bis zur Endtiefe von 18,20 m u. GOK setzt sich der **Unter-keuper** (ku) fort, der aus einer Wechselfolge von Tonstein, Dolomitstein und Dolomit-mergelstein besteht. Weitere Kernverluste traten in den Abschnitten 11,40 m u. GOK bis 12,85 m u. GOK und von 15,90 m u. GOK bis 17,10 m u. GOK auf.

Die quartären Sedimente führten kein Grundwasser. In einer Tiefe von 15,90 m u. GOK wurde am 12. März 2009 im Unterkeuper gespanntes Grundwasser angebohrt, dessen Druckspiegel bis zum 13. März 2009 in das Niveau der Neumagen-Schotter auf 2,5 m u. GOK anstieg.

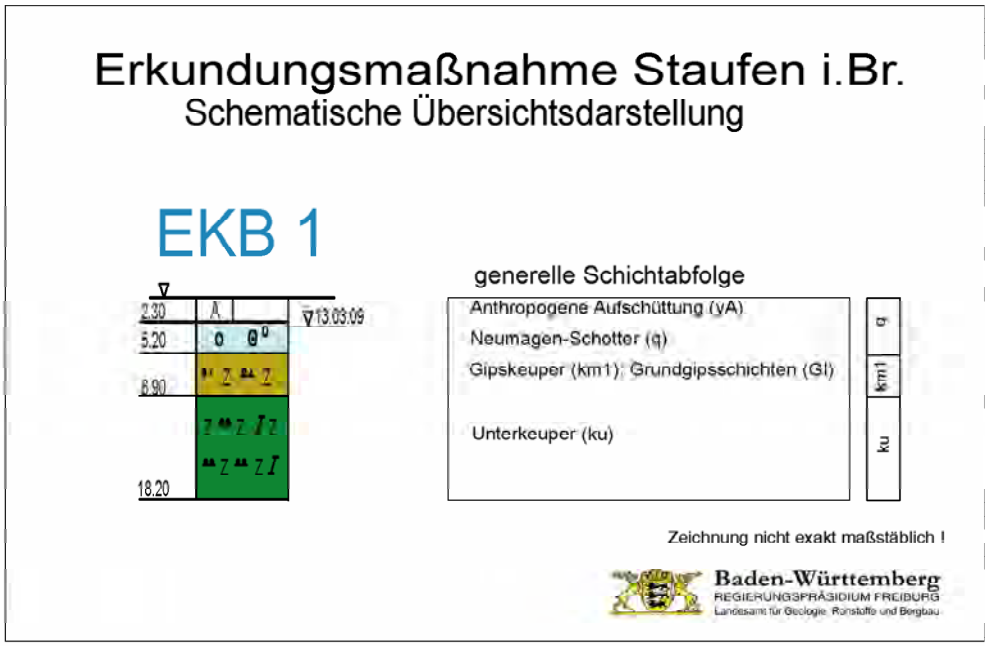


Abb. 5.3: Schematische graphische Darstellung des Schichtenprofils der Erkundungsbohrung EKB 1.

5.2 Erkundungsbohrung EKB 2

Der Bohrbefund der EKB 1 führte trotz geringer Bohrteufe zu wichtigen Ergebnissen für das Verständnis der geologischen Strukturen im Umfeld des EWS-Feldes und gab Anlass zur Durchführung der ersten drei Seismik-Profile (Kap. 7.2.3). Durch die Ergebnisse der seismischen Messungen konnten die zwischen der EKB 1 und dem Erdwärmesondenfeld vorhandene tektonische Störung genauer lokalisiert sowie der neue Standort für eine weitere Erkundungsbohrung EKB 2 eingegrenzt werden.

Bei der Festlegung des neuen Bohransatzpunktes waren verschiedene Sachzwänge zu beachten. Einerseits schränkten die räumlich sehr beengten Verhältnisse in der Rathausgasse, ein nicht mehr genutzter Erdtank sowie die in der Rathausgasse verlegten Leitungen (insbesondere eine Gasleitung) die Standortauswahl stark ein. Ferner war zu berücksichtigen, dass die Erdwärmesonden durch die Erkundungsbohrung möglichst nicht angebohrt werden sollten. Aufgrund der geophysikalischen Messungen war davon auszugehen, dass im Untergrund weitere tektonische Störungen vorhanden sind, die aus Sicherheitsgründen möglichst nicht erbohrt werden sollten.

5.2.1 Stammdaten, Ausbauhinweise

Der neue Bohrstandort wurde am Südwestende des Erdwärmesondenfeldes festgelegt (Abb. 5.4, Tab. 5.2). Das Bohrgerät wurde am 24. und 25. März 2009 umgesetzt, die Bohrarbeiten begannen am 26. März 2009. Die EKB 2 erreichte am 21. Oktober 2009 ihre Endteufe bei 163 m u. GOK.

Tab 5.2: Stammdaten der Erkundungsbohrung EKB 2 (Datum der Einmessung: 23. September 2009).

Bezeichnung	LGRB-Nr.	Rechtswert	Hochwert	Geländeoberkante [m NN]	Messpunkt-oberkante [m NN]
Erkundungsbohrung EKB 2/09 Rathaus Staufen	8112/289	[redacted]		ca. 286	derzeit noch nicht ausgebaut

Der Zwischen- und Endausbau der EKB 2 kann der Ausbauzeichnung der Fa. H. Anger´s Söhne (Anl. 5.5) entnommen werden.

Nachfolgend werden die bohrtechnischen Besonderheiten zusammengefasst, die den Bohr- und Ausbaufortschritt der EKB 2 bestimmten.

Die Erkundungsbohrung EKB 2 wurde - nach einer Vorschachtung bis 2,0 m u. GOK und einer Fräsrohrtour Ø 273/178 mm bis 6,5 m u. GOK - überwiegend im Seilkernbohrverfahren SK 6 L Ø 146 mm abgeteuft. Kurze Bohrabschnitte wurden in bohrtechnisch schwierigen Gebirgsbereichen als Vollbohrung ausgeführt. Im Bereich einzelner Grundwasserhorizonte sowie im Quellungsbereich des Gipskeupers wurde das Bohrloch mit dem (Stufen-) Rollenmeißel entsprechend aufgeweitet und mit vier Stand-/Sperrrohren teleskopiert ausgebaut (Tab. 5.3). Die einzelnen Rohrtouren wurden dabei mit hochsulfatbeständigem Brunnendämmer hinterfüllt.

Tab. 5.3: Zusammenstellung der in der EKB 2 eingebauten Standrohr-/Sperrrohrtouren.

1. Standrohr	Basis 13,70 m	Bohrloch Ø 530 mm	Standrohr Ø 473 mm
2. Sperrrohr	Basis 32,20 m	Bohrloch Ø 444 mm	Sperrrohrtour Ø 356 mm
3. Sperrrohr	Basis 97,60 m	Bohrloch Ø 311 mm	Sperrrohrtour Ø 244 mm
4. Sperrrohr	Basis 145,20 m	Bohrloch Ø 216 mm	Sperrrohrtour Ø 178 mm

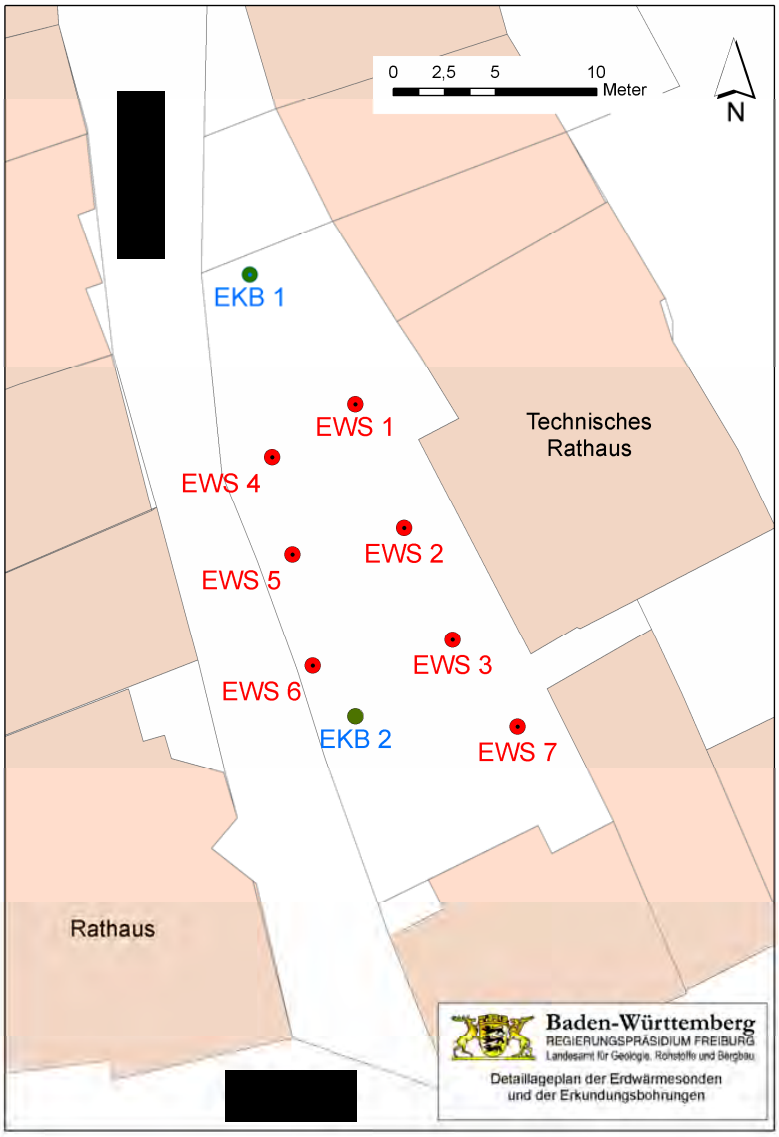


Abb. 5.4: Lageplan mit Eintrag der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 und den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2.

Mit Erreichen der Gipskeuper-Formation (km1) wurden bei kleineren Kernverluststrecken ab 22,40 m u. GOK geringmächtige Residualbildungen (GAR, Auslaugungsrückstände ehemaliger Gipslagen) angetroffen (vgl. Bohrprofil, Anl. 5.6 a). Die Bohrstrecke von 26,40 m u. GOK bis 28,60 m u. GOK war überwiegend durch Kern- und ab 26,60 m u. GOK auch durch Spülverlust bestimmt. Es handelt sich bei dieser Zone um den so genannten **Gipskarst** oberhalb des **Oberen Gipsspiegels**, welcher bei 28,6 m u. GOK angetroffen wurde und den Beginn des sulfatführenden Gebirges markiert (Abb. 5.6).

Der oberste Grundwasserzufluss in der Schilfsandstein-Formation (km2) wurde mit Setzen des 1. Standrohres und der erheblich stärkere Grundwasserzufluss im Niveau des Gipskarstes mit Setzen des 2. Sperrrohres hydraulisch abgedichtet.

Im Bereich des über dem Gipsspiegel angetroffenen Hohlraumes kam es im Bohrloch zu einer wiederholten Auflandung (insgesamt 1,5 - 2 m³). Dies erforderte aus Sicherheitsgründen eine umgehende Zementage/Plombierung unter Einbringung von ca. 2,6 m³ Zementsuspension zusätzlich zur regulären Ringraumzementation von weiteren 1,2 m³. Die Hydratationswärme dieser Zementage bildete sich in einer abschnittsweisen Temperaturanomalie in der benachbarten Erdwärmesonde EWS 6 ab (vgl. Kap. 6.3.3.2.2).

Wie in der Ausschreibung vorgesehen, wurde oberhalb des Gipsspiegels mit Klarwasser gespült, ab Erreichen des Gipsspiegels durfte im gesamten Bereich des Sulfatgebirges (d.h. bis zur Zementation des 4. Sperrrohres) ausschließlich mit inhibierter Bohrspülung gearbeitet werden. Die inhibierte Bohrspülung besteht aus Trinkwasser mit organischen und mineralischen Zusätzen (vgl. Tab. 5.4). Mit dem Einsatz der inhibierten Bohrspülung wurde einer unerwünschten Auslaugung von Sulfatgestein sowie einem Quellen quellfähiger Tonmineralen vorgebeugt. Die inhibierte Bohrspülung führte zu einer merklichen Verlangsamung des Bohrfortschrittes.

Tab. 5.4: Zusätze und Parameter der inhibierten Bohrspülung.

Inhibierte Bohrspülung	
PacElv CMC Carboxylmethylcellulose	30 kg/m³
KaliumCarbonat (Degussa)	60 kg/m³
Zitronensäure (wegen pH-Wert) ohne Bentonit-Zusatz	2,5 kg/m³
Gemessene Parameter am 09. Juni 2009:	
Spülungsdichte	1,09 g/cm³
pH	9,988
Temperatur	20,4 ℃
Leitfähigkeit LF	54 660 µS/cm
Salinität	36,745

Die Parameter der inhibierten Bohrspülung unterlagen der ständigen Kontrolle durch einen Bohrspültechniker.

Mit Erreichen des **Oberen Anhydritspiegels** bei 61,50 m u. GOK kam es vor allem in den schwarzgrauen Tonsteinen des Mittleren Gipshorizonts sowie des Weinsberg-Horizonts zu einer weiteren starken Verlangsamung des Bohrfortschrittes.

Der Abschnitt zwischen 66,80 m u. GOK und 99,60 m u. GOK zeichnete sich als ein unter hohem Umschließungsdruck stehender Gebirgsabschnitt mit großen Bohrerschwernissen aus (**Quellungsbereich**). Insbesondere die schwarzgrauen Tonsteine zerfielen unmittelbar nach Entnahme aus dem Kernrohr in kleine polyedrische Stücke, teils waren die Kernstücke deutlich oval und verkeilten sich kurze Zeit nach Einlagerung in den Kernkisten.

Bei 76,4 m u. GOK kam es zu einem zwar geringen, aber doch merklichen Spülungsabgang, welcher auf **eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit** in diesem Abschnitt hindeutet. Durch wiederholtes Aufhöhen der Bohrspülung und Beobachtung des Wiederabsinkens konnte diese Gebirgsdurchlässigkeit belegt werden (siehe auch Abb. 5.64 und Kap. 5.5.2.4). Demgegenüber waren darüber und darunter in den Bohrstrecken im Gipskeuper keinerlei Spülungsverluste festzustellen.

Es traten unterschiedlich starke Bohrlochwandausbrüche auf, (vgl. Tab. 5.9 sowie Anl. 5.8 a, b), die sich in wiederholt ausgeführten Caliber-Logs teilweise als progressiv erwiesen und eine Aufzementation mit anschließendem Wiederaufbohren des Bohrloches zwischen 63,50 m u. GOK und 83,20 m u. GOK erforderten.

Der gesamte von den Quellungserscheinungen betroffene Gebirgsabschnitt musste daher aus Sicherheitsgründen (Gefahr des Festsitzens des Bohrgestänges nach Bohrunterbrechung) durch den Einbau des 3. Sperrrohres gesichert werden.

Im Abschnitt der Dunkelroten Mergel stellte sich der Bohrfortschritt zunächst ähnlich gering dar wie darüber (Bohrfortschritt teilweise unter 1 m/Tag), so dass man sich zwischen 87 m und 90 m sowie zwischen 111,50 m und 114 m Bohrteufe zu einigen wenigen Vollbohrungs-Intervallen entschloss, unterbrochen durch kurze Kernbohrabschnitte.

Auch hier kam es immer wieder zu einzelnen Bohrlochwandausbrüchen, (vgl. Tab. 5.9 sowie Anl. 5.8 a, b), die eine abschnittsweise Aufzementierung zwischen 113 m u. GOK bis 119,50 m u. GOK und von 95 m u. GOK bis 127 m u. GOK erforderlich machten. Mit Erreichen der Grundgipsschichten konnte wieder eine Beschleunigung des Bohrfortschrittes verzeichnet werden.

Am 04. August 2009 wurde in der Erkundungsbohrung EKB 2 zwischen 117,50 m u. GOK und 118,10 m u. GOK die EWS 5 angebohrt. Dabei wurde die schon nach Augenschein (Verschnitt der Bohrlochwandung der Erdwärmesonde EWS 5 mit dem Bohrkern der EKB 2) stark von der Vertikalen abweichende Erdwärmesondenbohrung zentral angebohrt. Im Bohrkern der EKB 2 wurden von allen vier PVC-Sondenschläuchen ca. 10 cm lange Abschnitte einschließlich der vorhandenen Ringraumverfüllung geborgen (Abb. 5.5). Eine eigens durchgeführte Druckprüfung in der EKB 2 im Bereich der Sondenquerung ergab, dass der Ringraumabschnitt der EWS 5 zumindest im Nahbereich zur Erkundungsbohrung EKB 2 ausreichend dicht war, so dass der Querungsbereich EWS 5/EKB 2 mit der Sperrrohr-Zementation des 4. Sperrrohres abgedichtet werden konnte (Kap. 5.5.2.2, Pulse-Test 8/EKB2).

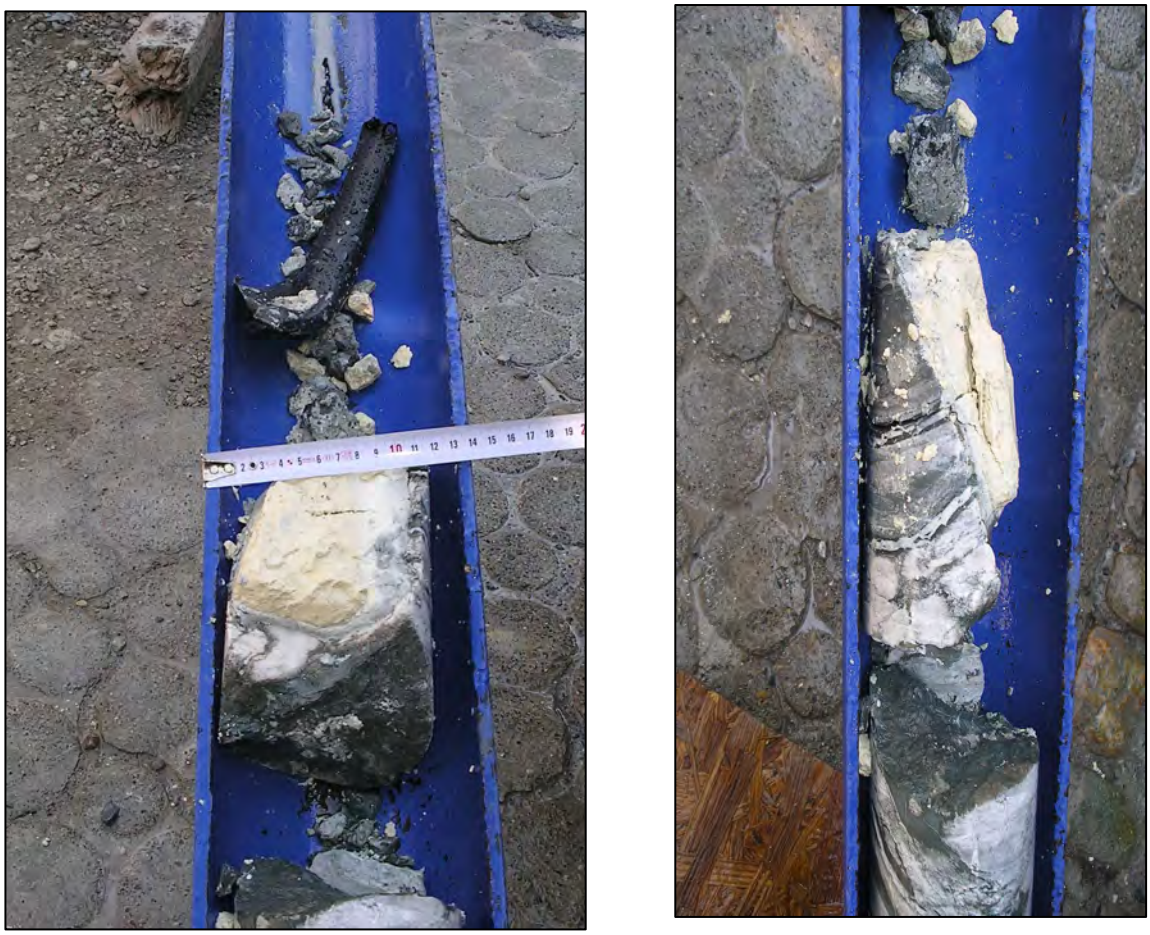


Abb. 5.5: Bohrkern der EKB 2 von 117,5 m u. GOK bis 118,1 m u. GOK, angebohrte EWS 5 mit Ringraumverfüllung und Sondenschlauch.

Nach Durchörtern des sulfatführenden Gebirges des Gipskeupers, dessen **Unterer Anhydritspiegel** bei 126,10 m u. GOK und dessen **Unterer Gipsspiegel** bei 141,70 m u. GOK angetroffen wurde (siehe Kap. 5.2.2), wurde die 4. Sperrverrohrung eingebaut.

Damit wurde das sulfatführende Gebirge zuverlässig vom unterlagernden Unterkeuper und Oberen Muschelkalk hydraulisch getrennt.

Nach Aufweiten des Bohrloches zum Einbau des 4. Sperrrohres behinderten zunächst die in das offene Bohrloch der EKB 2 einklappenden vier Sondenschläuche der EWS 5 das Aufweiten mittels Rollenmeißel sowie eine ordnungsgemäße Ringraumzementation. In der Lotung vor Einbau des 4. Sperrrohres stellte sich dies als vermeintliche Auflandung des Bohrloches bis in Höhe der Sondenquerung dar. Daher musste das Bohrloch zunächst aufzementiert und anschließend wieder aufgebohrt werden.

Nach Einbau des 4. Sperrrohres konnte unterhalb des Unteren Gipsspiegels auf den weiteren Einsatz der inhibierten Bohrspülung verzichtet und auf Klarwasserspülung umgestellt werden. Das Durchteufen des ausgelaugten Böhringen Sulfats im Unterkeuper (s. u.) gestaltete sich problemlos mit nur geringen Kern- oder Spülungsverlusten. Nach Vertiefung der EKB 2 auf 163 m u. GOK wurde das Bohrloch temporär bis auf 144 m u. GOK (d. h. bis 1 m in das 4. Sperrrohr hinein) mit gut durchlässigem Kies verfüllt, um die Bohrlochwandung für den geplanten Pumpabwehrbetrieb gegen Einsturz zu sichern.

Der reine Kernbohrzeitaufwand für die Erkundungsbohrung EKB 2 betrug 46 Arbeitstage, der Aufwand zum Einbau von Sperrrohren und Abdichten bzw. zur Zementation instabiler Bohrlochabschnitte weitere 50 Arbeitstage. Der Ausbau ist in Anl. 5.5 dargestellt.

5.2.2 Geologische Schichtabfolge EKB 2

In Anl. 5.6 a, b, 5.7 und 5.13 sind das Bohrprofil der EKB 2 (detaillierte geologische Schichtenbeschreibung, Fotodokumentation, graphische Darstellung) sowie eine graphische Darstellung der im Labor ermittelten Boden und Gesteinskennwerte beigefügt. Abb. 5.6 zeigt die schematische graphische Darstellung des Schichtenprofils der Erkundungsbohrung EKB 2.

Unter einer 4,0 m mächtigen sandig kiesigen **anthropogenen Aufschüttung (yA)** folgen bis 4,5 m u. GOK die sandig-schluffigen Mittel- bis Grobkiese der quartären **Neumagen-Schotter (gg)**, darunter bis 6,0 m u. GOK die als sandig-toniger Schluff ausgebildete **Fließerde (fl)**.

Die 13,6 m mächtige **Schilfsandstein-Formation (km2)** besteht aus einem wechselnd tonig ausgebildeten Mittel- bis Feinsandstein in feinlagigem Wechsel mit Schluffstein (Abb. 5.7).

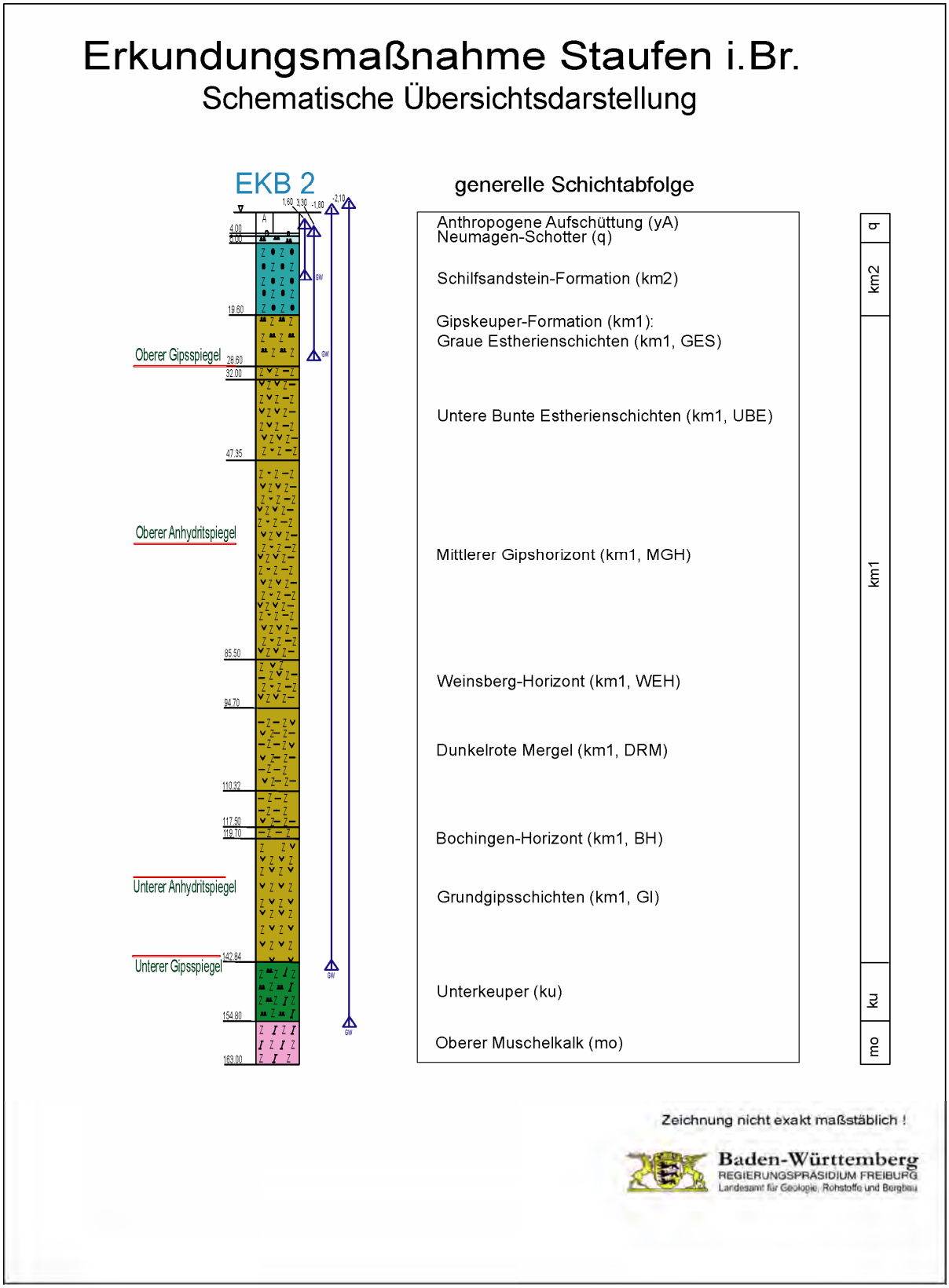


Abb. 5.6: Graphische Darstellung des schematischen Schichtenprofils der Erkundungsbohrung EKB 2.

EKB 2: 15,1 – 15,3 m u. GOK

EKB 2: 17,7 – 18,0 m u. GOK

Abb. 5.7 links: EKB 2: Schilfsandstein, km2; Intraklast-Konglomerat aus Tonstein- und Schluffstein-Geröllen bis ca. 6 cm, überwiegend gut gerundet, in Sandmatrix, mit einzelnen Sandstein-Brocken.

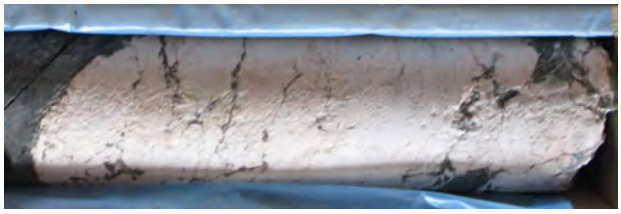
Abb. 5.7 rechts: EKB 2: Schilfsandstein, km2; Sandstein-Schluffstein-Wechsellagerung, einzelne Lagen 1 – 4 mm dick, unten in Flaserschichtung übergehend, grau; von brecciösen Klüften durchsetzt, in der Mitte ca. 5 cm hohe Stauchfalte.

Die Gipskeuper-Formation (km1) liegt zwischen 19,6 m u. GOK und 142,84 m u. GOK. Die Schichtneigung beträgt generell ca. 40° nach No rdwest.

Die *Grauen Estherienschichten* (GES, 19,60 m u. GOK bis 32,00 m u. GOK) bestehen aus einer Wechsellagerung im Dezimeterbereich von grauen bis dunkelgrauen, bisweilen grünlichgrauen dolomitischen Tonsteinen und tonigen Dolomit- bis Dolomitmergelsteinen. Von 22,40 m u. GOK bis 22,60 m u. GOK tritt der erste Gipsauslaugungsrückstand auf, nach einer 1,3 m mächtigen Kernverluststrecke (27,3 m bis 28,6 m) ab 28,60 m u. GOK tritt in einem polygonal-bröckelig zerfallenden dunkelgrauen Ton-/ Schluffstein erstmals wolkiger, rosa gefärbter Gips auf (Oberer Gipsspiegel). Daneben kommen Fasergips und Marienglasblättchen als Kluftfüllungen vor. Der Gipsstein-Anteil beträgt meist bis ca. 10 %, maximal 50 %. Von 30,80 m u. GOK bis 30,90 m u. GOK wurde eine steil stehende Kluftzone durchbohrt. Kernverluste traten von 25,45 m u. GOK bis 25,55 m u. GOK, von 26,40 m u. GOK bis 27,05 m u. GOK und von 27,30 m u. GOK bis 28,60 m u. GOK auf (Gipskarst).

Die *Unteren Bunten Estherienschichten* (UBE, 32,00 m u. GOK bis 47,40 m u. GOK) bestehen aus einer Wechselfolge von dunkelgrauen, dunkelrotbraunen und graugrünen Tonsteinen und knolligem, weißgrauem und rosafarbenem Gipsstein (Abb. 5.8). Vereinzelt vorkommender massig ausgebildeter Gipsstein ist meist von einzelnen dünnen Tonflasern durchzogen. Daneben kommen häufig Fasergips und Marienglasblättchen als Kluftfüllungen vor. Die Engelhofen-Platte (47,00 m u. GOK bis 47,40 m u. GOK) an der Basis der UBE besteht aus einem hellgrauen bis rötlich marmorierten Dolomit- bis Dolomitmergelstein.

EKB 2: 38,7 – 39,0 m u. GOK



EKB 2: 39,7 – 40,0 m u. GOK

Abb. 5.8 links: EKB 2: Untere Bunte Estherienschichten, km1; knollig ausgebildeter Gipsstein in Tonsteinmatrix.

Abb. 5.8 rechts: EKB 2: Untere Bunte Estherienschichten, km1; massig ausgebildeter Gipsstein mit dünnen Tonflasern, ab 39,95 m knollig-brecciös.

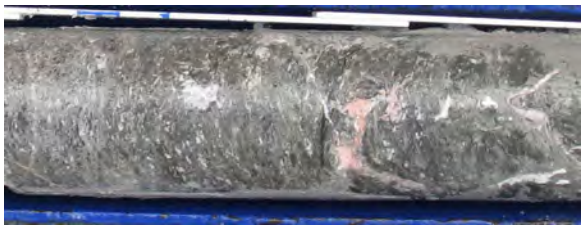
Der *Mittlere Gipshorizont* (MGH, 47,40 m u. GOK bis 85,50 m u. GOK) besteht aus grauem, z. T. dolomitischem Tonstein in Wechsellagerung mit deutlich überwiegendem knolligem oder tonflaserigem Gipsstein (Abb. 5.9 und Abb. 5.10). Der Gipsanteil erreicht 80 %. Von 61,50 m u. GOK bis 61,55 m u. GOK tritt neben Gips erstmals in geringen Anteilen (6 %) grauer Anhydrit auf (Oberer Anhydritspiegel). Ab 63,65 m u. GOK nimmt der Anhydritanteil deutlich zu. Er kommt in engständiger Wechsellagerung mit dünnen, nur wenige Zentimeter mächtigen Tonsteinlagen vor. Daneben kann der Anhydritstein mit weißlichen, mm-großen Knötchen ausgebildet sein. Die Tonsteinlagen sind ab 68,3 m u. GOK aufgequollen. Ab 66,65 m u. GOK (insbesondere in den Abschnitten 66,65 m u. GOK bis 67,40 m u. GOK und 73,75 m u. GOK bis 76,60 m u. GOK) zerfällt der Tonstein in Folge von Quellung polyedrisch in Stücke von 0,2 bis 5 Zentimeter. Der aus dem Abschnitt 75,0 m u. GOK bis 75,15 m u. GOK geborgene Kern bestand aus dunkelgrauem, mit mm-großen Anhydritknötchen durchsetztem Tonstein. Er war bereits 10 Minuten nach der Ablage in der Kernkiste verspannt, nach 36 Stunden war er so stark aufgequollen, dass er nicht mehr aus der Kiste zu entnehmen war. Die gesamte Kernstrecke ist von steil stehenden Klüften durchsetzt, die mit Millimeter- bis mehrere Zentimeter dicken Gipsbelägen verheilt sind.

EKB 2: 70,10 – 70,40 m u. GOK

EKB 2: 71,25 – 71,55 m u. GOK

Abb. 5.9 links: EKB 2: Mittlerer Gipshorizont, km1; Anhydritstein, tonig, brecciös, mit mm-großen Sulfat- und Tonstein-Knötchen, einzelne, gipsverheilte Schichtfugen und steilstehende Klüfte; Kern polyedrisch zerfallend, Schichtneigung 40°.

Abb. 5.9 rechts: EKB 2: Mittlerer Gipshorizont, km1; feinschichtige Wechsellagerung von Anhydritstein, grau und Tonstein, dunkelgrau, einzelne Lagen leicht enterolithisch verfaltet; Kern z. T. an Tonfugen aufgequollen.



EKB 2: 79,65 – 79,95 m u. GOK

EKB 2: 89,00 – 89,30 m u. GOK

Abb. 5.10 links: EKB 2: Mittlerer Gipshorizont, km1; bis 79,80 m: Anhydritstein, schlierig-flaserig geschichtet, im feinschichtigen Wechsel mit Tonstein, dunkelgrau; bei 79,75 steilstehende Kluft mit hellrotem Anhydritstein (2 – 3 mm), bis 79,95 m: Tonstein, schwarzgrau mit rotbraunen Schlieren, erdfeucht-trocken, bröckelig, stückig, einzelne Gips-/Anhydritsteinlagen, Marienglas, Fasergips.

Abb. 5.10 rechts: EKB 2: Weinsberg-Horizont, km1; Tonstein, dunkelgrau, Gipstapeten auf Trennflächen; 89,05 – 89,15 m steil stehende Kluft, mit blassrosa Gips verheilt; Kern platzt entlang Schichtfugen auf.

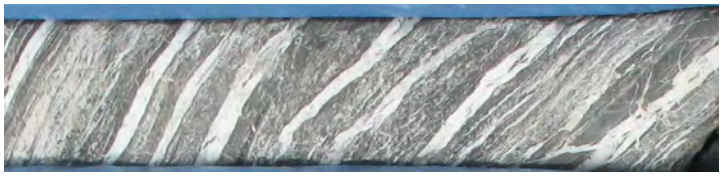
Im *Weinsberg-Horizont* (85,50 m u. GOK bis 94,70 m u. GOK) überwiegt dunkelgrauer Tonstein, der von dünnen Anhydritlagen und kleinen Gips-/Anhydritknöllchen durchsetzt ist. Der Sulfatanteil liegt bei maximal 28 %, wobei Anhydrit stark überwiegt. Der Tonstein zerfällt kleinstückig bzw. platzt entlang von Schichtfugen auf. Ab 89,60 m u. GOK musste bis 97,80 m u. GOK wegen der hohen quellungsbedingten Gebirgsspannungen und dem damit einhergehenden, äußerst geringen Bohrfortschritt auf das Spülbohrverfahren mit Rollenmeißel umgestellt werden.

Die *Dunkelroten Mergel* (DRM, 94,70 m u. GOK bis 110,30 m u. GOK) bestehen aus dunkelgrauem, meist rotbraunem, bisweilen schluffigem, dolomitischem Tonstein in Wechsellagerung mit Anhydritstein. Die Tonsteine sind bis 99,20 m u. GOK ungeschichtet, darunter in unregelmäßigen Lagen von 1 bis 3 cm geschichtet. Sie zerfallen in Folge des Quell- und Schwelldruckes in polygonale Stücke. Die gesamte Kernstrecke ist von steil stehenden, gipsverheilten Klüften durchsetzt.

Der *Bochingen-Horizont* (BH) und das *Entringen-Sulfat* (ENS, zusammen von 110,30 m u. GOK bis 119,70 m u. GOK) bestehen aus einer Wechsellagerung von dunkelgrauem, rotbraunem und grüngrauem, bisweilen dolomitischem Tonstein mit Sulfatgestein.

Von 117,50 m u. GOK bis 118,10 m u. GOK wurden 4 Sondenschlauchstücke (EWS 5) und gelbliche tonig-schluffige Ringraumverfüllung der EWS-Bohrung 5 angebohrt (Abb. 5.5). Die obere Bohrlochwand wurde zerbohrt, die untere fällt mit ca. 60° unter steilem Winkel zur Schichtung ein.

Die *Grundgipsschichten* (GI, 119,70 m u. GOK bis 142,84 m u. GOK) bestehen überwiegend aus einer feinschichtigen Wechsellagerung (1 bis 4 cm) von (hell)grauem Ton- und Dolomit- bis Dolomitmergelstein mit hellgrauem Gips- und Gipsdolomitstein. Der Gipsstein enthält häufig kleine Gipsporphyroblasten. Bis zu einer Tiefe von 126,00 m u. GOK kommt neben Gips mit nach unten abnehmendem Anteil Anhydrit (Unterer Anhydritspiegel), darunter bis in eine Tiefe von 141,70 m u. GOK nur noch Gips als Sulfatgestein vor (Unterer Gipsspiegel (Abb. 5.11 links)). Im unteren Abschnitt der Grundgipsschichten treten ab 141,70 m u. GOK Gipsauslaugungsgesteine (Schluff) auf (Abb. 5.11, rechts). Dazwischen liegen zwei 10 und 30 Zentimeter mächtige, durchfeuchtete, dunkel- bis schwarzgraue Ton(-steinlagen). Der untere Tonstein entspricht möglicherweise einer Störungszone.



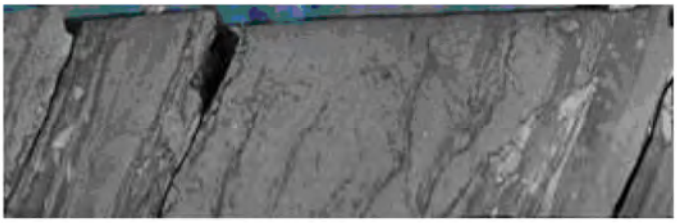
EKB 2: 141,2 – 141,50 m u. GOK

EKB 2: 141,70 – 142,00 m u. GOK

Abb. 5.11 links: EKB 2: Grundgipsschichten, km1; Wechsellagerung von Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, in Lagen von 1 – 3 cm, mit Dolomitmergelstein, grau, in Lagen zu 0,5 – 2 cm; Fasergips vorwiegend auf Schichtfugen, Gips ca. 60 %, Einfallen ca. 40°.

Abb. 5.11 rechts: EKB 2: Grundgipsschichten, km1; Gipsauslaugungsschluff, tonig, z.T. kalkig, beige bis grau, nach unten zunehmend feinschichtig, lagenweise Dolomitstein-Bröckchen bis 2 cm Dicke.

Der **Unterkeuper (ku)** liegt zwischen 142,84 m u. GOK und 154,80 m u. GOK. Er besteht bis zur Basis des *Liegendtons* (LGT) bei 149,55 m u. GOK aus grauem Dolomitstein mit dazwischen eingeschalteten dunkelgrauen, teils dolomitischen Tonsteinlagen. Darunter folgen bis 152,2 m mittelgraue Feinsandsteine und dunkelgraue, stark sandflaserige Tonsteine der *Sandigen Pflanzenschiefer* (Abb. 5.12 links, SPS). Die Basis des Unterkeupers wird durch die Dolomitsteine der Unteren Dolomite (UDO), der Blaubank (Bk) und der "Vitriolschiefer" gebildet. Sie liegt bei ca. 154,80 m u. GOK.



EKB 2: 150,4 – 150,7 m u. GOK

EKB 2: 158,4 – 158,7 m u. GOK

Abb. 5.12 links: EKB 2: Sandige Pflanzenschiefer, ku; Feinsandstein, schwach dolomitisch, mittelgrau.

Abb. 5.12 rechts: EKB 2: Trigonodusdolomit, mo2D: Dolomitstein, feinkristallin, wellig feinlaminiert (Algenlaminat), weißlichgrau bis hellbeige, bei 158,40 m hellgraue bis weißlichgraue Hornsteinlinse.

Die **Obere Hauptmuschelkalk-Formation** (mo2) schließt an den Unterkeuper bis zur Endtiefe der Bohrung bei 163,00 m u. GOK an. Sie besteht aus gelblichem, bräunlichgrauem und weißlichgrauem bis hellbeigem Dolomitstein (Abb. 5.12 rechts), in dem zwischen 155,40 m u. GOK und 160,72 m u. GOK Hornsteinlagen auftreten. Von 161,35 m u. GOK bis 162,45 m u. GOK wurde eine Störungszone mit einer Dolomitsteinbreccie durchfahren. Darunter folgt bis zur Endtiefe gelbbrauner Dolomitstein mit calcitisch verheilten Klüften.

Die Abb. 5.13 verdeutlicht die angetroffene geologische Schichtfolge im Bezug zur Erkundungsbohrung EKB 1 und den Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 3. Es handelt sich in der EKB 2 um ein weitgehend unausgelaugtes Normalprofil der Gipskeuper-Formation und des Unterkeupers. Es ist in seiner Mächtigkeitsentwicklung mit dem der Bohrung Bad Krozingen 2 (LGRB-Nr. 8012/61) vergleichbar (LUTZ & ETZOLD 2003).

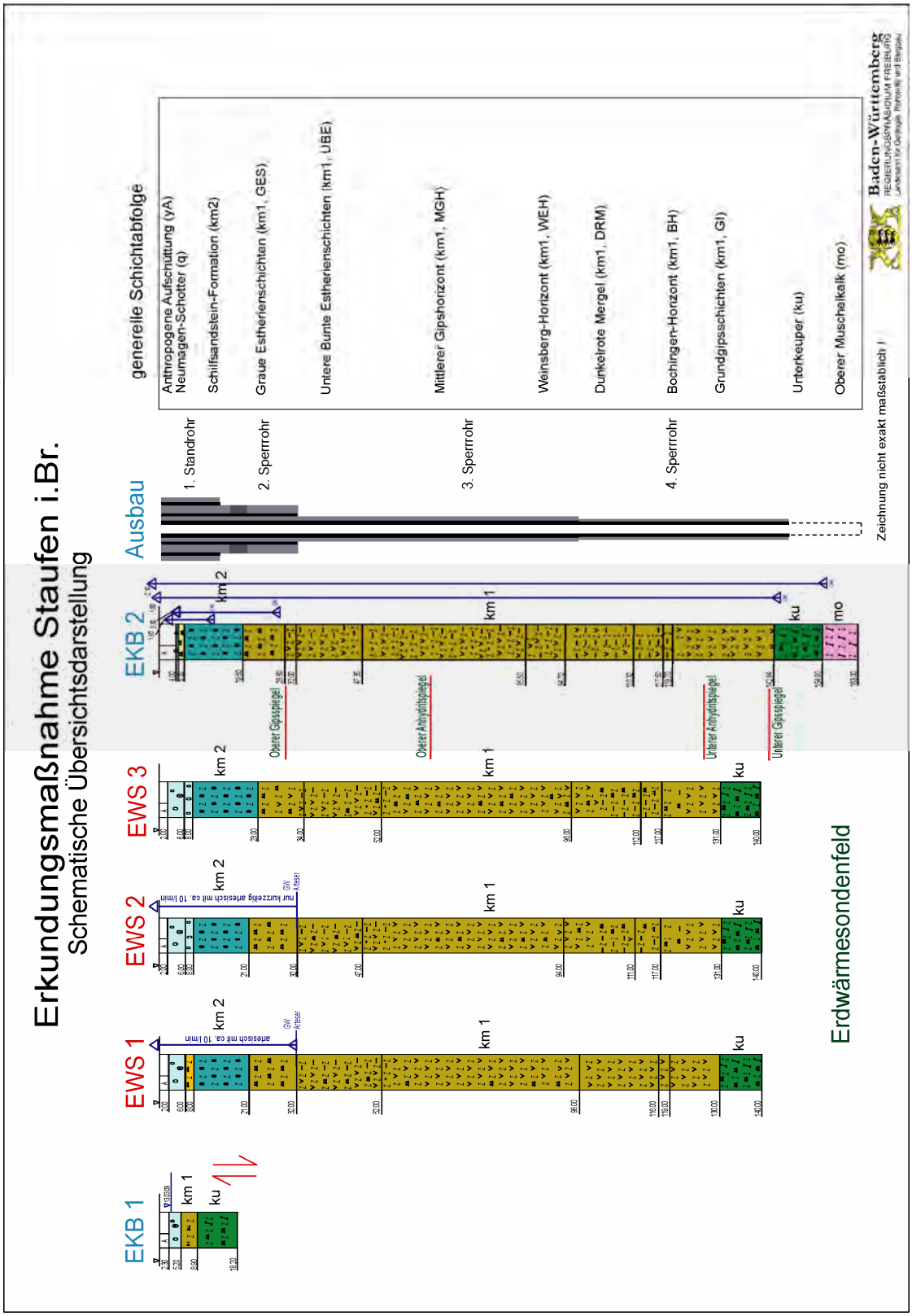


Abb. 5.13: Schematische Übersichtsdarstellung der geologischen Schichtfolge (EKB 1, EWS 1 bis 3 und EKB 2).

Grundwasserführung

Die quartären Sedimente führten kein Grundwasser.

Im Schilfsandstein wurde bei 11,65 m u. GOK in einem rostbraunen, mürben, klüftigen Feinsandstein gespanntes Grundwasser angetroffen (Wasserstand am 31. März 2009: 1,70 m u. GOK bis 1,80 m u. GOK). Der Feinsandstein reicht bis 12,70 m u. GOK. In diesem Abschnitt wurden leichte Spülverluste festgestellt.

In den Grauen Estherienschichten trat zwischen 25,45 m u. GOK und 28,60 m u. GOK wiederholt Kernverlust auf, zwischen 26,60 m u. GOK und 29,40 m u. GOK wurden im Gipskarst Spülungsverluste beobachtet. Das angetroffene Grundwasser war gespannt (Wasserstand am 22. April 2009: 2,50 m u. GOK).

Mit Erreichen der Basis der Grundgipsschichten und des Unterkeupers wurde ein weiteres Grundwasserstockwerk erbohrt. Erste Wasserzutritte wurden in den Gipsauslaugungsresiduen der Grundgipsschichten ab 141,66 m u. GOK, weitere Grundwasserzutritte in den Dolomitbänken (Grenzdolomit, GD und Linguladolomit, Ld) des Unterkeupers beobachtet. Das angetroffene Grundwasser trat mit einem Druckspiegel von ca. 1,8 m ü. GOK **artesisch** aus.

Das tiefste Grundwasserstockwerk wurde in den Dolomitsteinen des Trigonodusdolomits (mo2D) der Oberen Hauptmuschelkalk-Formation (mo2) erbohrt. Das angetroffene Grundwasser trat mit einem Druckspiegel von ca. 2,10 m ü. GOK **artesisch** aus.

5.3 Untersuchungsmethoden

Zur Erkundung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse wurden neben der lithologischen Bohrkernansprache (Kap. 5.1.2 und Kap. 5.2.2) sowie der mineralogisch-petrographischen Bohrkernanalyse (Kap. 5.5.4) verschiedene Verfahren eingesetzt, deren Methodik und Zielsetzungen im Folgenden beschrieben werden.

5.3.1 Geophysikalische Bohrlochmessungen

Geophysikalische Bohrlochmessungen dienen zur Gewinnung von quantitativen und qualitativen in-situ-Aussagen in einer Bohrung. Die in Staufen eingesetzten Untersuchungsmethoden sind nachfolgend beschrieben (vgl. hierzu Berichte der Firma terratec vom 17./18. November 2009, terratec 2009 a, terratec 2009 b). Die Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen in der EKB 2 sind in den Anl. 5.8 a, b dargestellt.

5.3.1.1 Optischer Bohrlochscanner (ETIBS)

Die Messungen mit dem optischen Bohrlochscanner dienen der Ermittlung von Strukturdaten (Schichtung, Schieferung, Klüftung) und deren Orientierung.

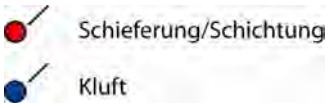
Der Optische Bohrlochscanner erzeugt kontinuierliche Logs von orientierten, hochauflösenden Videobildern der Bohrlochwand. Die Bohrlochwand wird als Mantelabbildung dargestellt und kann mit Schicht- und Strukturinformationen versehen werden. Im Gegensatz zum akustischen Scanner ist der optische Televiewer nur bei weitgehend klarer Bohrspülung oder in mit Luft oder Gas gefüllten Bohrlöchern sinnvoll einsetzbar. Deshalb konnte in der Erkundungsbohrung EKB 2 mit Beginn der Verwendung der inhibierten Bohrspülung (Kap. 5.2.1) dieses Verfahren nicht eingesetzt werden.

5.3.1.2 Akustischer Scanner (BHTV)

Die Messungen mit dem akustischen Scanner dienen der Ermittlung von Strukturdaten (Schichtung, Schieferung, Klüftung) und deren Orientierung, sowie des Bohrlochverlaufs und des Bohrlochkalibers.

Beim Akustischen Scanner (BHTV) wird die Wandung der Bohrung mit einem Ultraschallsignal abgetastet. Im Messdiagramm sind die *Travel Time* (*rechte Spur* in Anl. 5.8 b) und die *Amplitude* (*linke Spur* in Anl. 5.8 b) als abgerollte 360° Bohrlochinnenwandabtastung darg estellt. Bei der *Travel Time* stehen dunkle Farbtöne für kurze und helle für lange Laufzeiten (z. B. längerer Weg). Bei der *Amplitude* stehen dunkle Farbtöne für niedrige Reflexionsamplituden (Risse, Klüfte, weiches Material), helle Farbtöne für hohe Reflexionsamplituden (festes Material).

Aus den Daten des Akustischen Scanners (*Travel Time, Amplitude*) wurden die Strukturen getrennt nach folgenden Kriterien in ihrer Richtung und Neigung eingemessen:



Die Auswertungen beziehen sich ausschließlich auf die akustischen Signale des Gebirges. Ein akustisches System unterscheidet nicht zwischen einer lokalen Schwächung des Gebirges (zum Beispiel einem Riss oder einer feinen Kluft) und akustisch schwächerem Material (zum Beispiel Toneinlagerungen). Um eine klare Sprachregelung zu treffen, wird von *Schichtung* gesprochen, wenn diese als Parallelgefüge erkannt werden kann. Alle anderen Strukturen werden als *Klüfte* gekennzeichnet. Diese werden auch in der Laufzeit zumindest teilweise erkannt, da Sinusspuren in der Laufzeit durch offen stehende Strukturen und somit durch eine erhöhte Laufzeit verursacht werden.

Die Strukturverläufe (Sinusspuren) auf dem Amplitudenbild zeigen die *scheinbaren, unrotierten* Orientierungen relativ zur Bohrungsachse. Bei größerer Neigung der Bohrung werden das scheinbare Einfallen und der Azimut der eingemessenen Strukturen mit Hilfe der Bohrungsverlaufsdaten auf ihre tatsächliche Raumlage korrigiert. Das Tad Pole (*TADPOLE*) Diagramm und die Lagekugel (*STEREO)* zeigen dann die *wahren, orientierten* Azimut- und Einfallswerte.

Zur besseren Übersicht über alle in der Bohrung herrschenden Richtungen wurde jeweils eine Polpunktdarstellung (alle Gefügedaten) für das gesamte Tiefenintervall berechnet und dargestellt. Die Lagekugeldarstellung (*STEREO*) zeigt die Flächenpole der wahren Azimut- und Einfallswerte, dargestellt im Schmidtschen Netz, untere Halbkugel, in den jeweiligen Messabschnitten.

Die in der *TADPOLE* Spur verwendeten Symbole sind folgendermaßen zu lesen:
Die Position des Symbols auf der Horizontalachse gibt die Neigung der Struktur an
(0 – 90 Grad), der Strich am Symbol gibt die Einfallsrichtung der Struktur an. Die hier verwendeten Symbole der zwei Typen und ihre Bedeutung sind oben dargestellt.

5.3.1.3 Kalibermessung

Das Kaliber wurde entweder aus den Laufzeiten (*Travel Time*) des Akustischen Scanners berechnet oder mit der 3-Arm Kalibersonde gemessen und in mm dargestellt. Das Kaliber aus der Laufzeitmessung wurde als gemitteltes Kaliber dargestellt. Die Überprüfung der Messung erfolgte im bekannten Durchmesser der Verrohrung.

5.3.1.4 Messung von Neigung und Richtung

Die Kurven der Neigung und Richtung (Azimut), bezogen auf magnetisch Nord, geben die Bohrlochabweichung in der entsprechenden Tiefe in Grad an. Der Bohrlochverlauf wird aus der Kombination von einer Kompassmessung und einer Neigungsmessung bestimmt. Innerhalb der magnetischen Stahlverrohrung ist die Kompassmessung gestört. Für die Richtung der Bohrung, in Bezug auf Nord, wird daher im Bereich der Stahlverrohrung die erste ungestörte Richtungsmessung unterhalb der Verrohrung angenommen.

Zur Bestimmung der Richtung und Neigung im verrohrten und offenen Bohrloch wurde zusätzlich eine Messung mit der Gyro-Sonde durchgeführt. Die Sonde verwendet 12 Sensoren, um ihre relative Lage zu jeder gegebenen Richtung zu ermitteln.

5.3.1.5 Natürliche Gammastrahlung

Die Messung der natürlichen Gammastrahlung *GR* in cps (counts per second) dient der Unterscheidung der verschiedenen Lithologien.

Beim Zerfall des radioaktiven Isotops ^{40}K wird eine charakteristische Strahlung emittiert, die von einem Szintillationszähler in der Sonde gemessen wird. Kalium ist ein häufig auftretendes Kation in Tonmineralen, deshalb wird mit der Gamma-Messung primär qualitativ der Tonanteil des Gesteins bestimmt. Gamma-Messungen sind von besonderer Bedeutung für tiefendifferenzierte Aussagen zur lithologischen Ausbildung (insbesondere Tongehalte) und bei der Ermittlung von Wasserwegsamkeiten. Die Messungen können auch in Verrohrungen und Ausbauten vorgenommen werden und sind sowohl im spülungsgefüllten wie im trockenen Bohrloch möglich.

5.3.2 Hydraulische Messungen

Zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeiten und zur Lokalisierung von Grundwasserzutritten wurden in den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 umfangreiche hydraulische Bohrlochtests durchgeführt. Dabei kamen je nach zu erwartender Durchlässigkeit des getesteten Abschnittes Pumpversuche oder Ventiltests (Slug- oder Pulse-Tests) zum Einsatz. Mit dem Fluid-Logging-Verfahren wurden Wasserzutritte in das Bohrloch lokalisiert. Darüber hinaus erlauben die tiefenabhängigen Spülungsabgänge bzw. ausbleibende Spülungsverluste qualitative Aussagen zur Durchlässigkeit, die während des Abteufens der Bohrung registriert wurden. Die hydraulischen Messungen wurden vom Büro André VOUTTA, Grundwasserhydraulik, Herrenberg, durchgeführt.

5.3.2.1 Pumpversuche

Zur Ermittlung hydraulischer Parameter (Durchlässigkeiten, Speicherkoeffizienten) und zur Aquiferdiagnose wurden Pumpversuche durchgeführt. Bei den Pumpversuchen wurde aus der Bohrung mit konstanter oder steigender Pumprate Grundwasser entnommen und der Wasserstand als Reaktion des Druckspiegels in der Bohrung bis zum Erreichen des Ruhewasserspiegels nach dem Ausschalten der Pumpe gemessen.

5.3.2.2 Ventiltests

Ventiltests (Slug- bzw. Pulse-Tests) sind geeignet, im Festgestein die Durchlässigkeitsverteilung in einer Bohrung tiefenbezogen zu erkunden. Sie können jedoch nicht eingesetzt werden, um großräumig die hydraulischen Eigenschaften des Aquifers zu beschreiben. Ventiltests sind im Transmissivitätsbereich von ca. $T = 10^{-3}$ m²/s bis 10^{-10} m²/s einsetzbar, kommen jedoch bevorzugt bei geringeren Durchlässigkeiten zur Anwendung.

Beim *Slug-Test* wird der Druck in einem Testintervall schlagartig verändert. Das Testintervall liegt zwischen einem Doppelpacker oder zwischen Bohrlochsohle und einem Einfachpacker. Die Druckveränderung erfolgt durch Aufnahme (Auffülltest) oder Abgabe (Absenktest) eines definierten Wasservolumens im abgesperrten Testintervall. In der daraufhin einsetzenden Fließphase wird die Einstellung des Ruhewasserspiegels als Reaktion des Wasserspiegels im Testrohr gemessen.

Beim *Pulse-Test* wird nicht die Wiedereinstellung des Testrohrwasserspiegels, sondern die Erholung des Druckes im Testintervall bei geschlossenem Testventil gemessen. Hierzu wird der Druck im Testintervall nach Einstellen des Ruhepotenzials schlagartig verändert und anschließend bis zur Wiedereinstellung des Ruhedruckes gemessen. Im Vergleich zum Slug-Test erfolgt die Druckerholung im gespannten Aquifer wesentlich schneller, so dass sich beim Pulse-Test bei geringen bis sehr geringen Transmissivitäten ($T = 10^{-7}$ m²/s bis 10^{-11} m²/s) erhebliche Zeitvorteile ergeben.

5.3.2.3 Fluid-Logging

Das Fluid-Logging-Verfahren wird zur teufengenauen Lokalisation und Quantifizierung von Zuflusszonen in einer Bohrung eingesetzt. Es dient außerdem zur Bestimmung von Gebirgsdurchlässigkeiten gering durchlässiger Gesteine im Transmissivitätsbereich von $T = 5 \cdot 10^{-4}$ m²/s bis $< 1 \cdot 10^{-9}$ m²/s.

Beim Fluid-Logging-Verfahren wird das Bohrlochfluid üblicherweise gegen ein Fluid mit deutlich geringerer oder höherer elektrischer Leitfähigkeit ausgetauscht. Durch Abpumpen mit konstanter Rate werden die Zuflüsse ins Bohrloch aktiviert. Die Zuflussbereiche lassen sich in den wiederholt gemessenen Leitfähigkeitslogs durch Ausbildung von Sprüngen oder Peaks lokalisieren. Da während der Durchführung der Messungen in Staufen keine Grundwasserentnahme erfolgte, lassen sich die Grundwasserzuflüsse nicht quantifizieren.

5.3.3 Hydrochemische und isotopenhydrologische Messungen

5.3.3.1 Haupt- und Spureninhaltsstoffe

Die hydrochemischen Untersuchungen haben die Analyse der Inhaltsstoffe, die Typisierung der Grundwässer nach verschiedenen Methoden sowie die Berechnung der Mineral-Sättigungszustände zum Ziel. Besonderes Augenmerk wurde im vorliegenden Fall auf die Sättigungszustände an den Sulfatmineralen Gips und Anhydrit gerichtet. Damit kann zum einen gezeigt werden, in welchem Grundwasservorkommen die Lösung

von Anhydrit und die Ausfällung von Gips stattfinden kann und zum anderen in welchem Grundwasservorkommen keine Gipsbildung möglich ist. Für die hydrochemischen Berechnungen wurde das Programm PHREEQC des United States Geological Survey (USGS) verwendet. Die Probenahme und die Analytik der Haupt- und Spurenstoffe wurden vom Labor des RPF/LGRB durchgeführt.

5.3.3.2 Isotope und Spurengase

Die isotopenhydrologischen Untersuchungen haben die Erfassung der Grundwasseraltersstruktur und der Komponentenzusammensetzung in den verschiedenen Grundwasservorkommen zum Ziel. Daraus können insbesondere Aussagen über die Neubildungsbedingungen, die Grundwasserfließdynamik und über mögliche Wechselwirkungen zwischen den Grundwasservorkommen abgeleitet werden.

Die Isotopenmessungen erfolgten im Labor der Fa. HYDROISOTOP (Schweitenkirchen), die Spurengasuntersuchungen wurden durch das Labor Dr. Oster (Wachenheim) durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Bericht der Fa. HYDROISOTOP vom 17. Dezember 2009 zusammenfassend dargestellt (HYDROISOTOP 2009).

5.3.3.2.1 Tritium (^{3}H)

Tritium ist das radioaktive Isotop des Wasserstoffs (^{3}H; Halbwertszeit 12,3 Jahre). Als Folge der Wasserstoffatombombentests in den 1950-er und 1960-er Jahren kam es zu Tritiumgehalten in den Niederschlägen von mehreren 1000 TU (TU = Tritium-Units, 1 TU = 0,119 Bq/l). Die aktuellen Niederschläge weisen als Spätfolge dieser und jüngerer Tests noch Tritiumgehalte von etwa 5 bis 15 TU mit stetig abnehmender Tendenz auf. Als Folge der aktuellen natürlichen Produktionsrate von Tritium enthalten derzeit die Niederschläge ca. 5 TU. Grundwässer, in denen Tritium nicht nachweisbar ist, enthalten keine Niederschlagsanteile aus dem Zeitraum nach 1953 und sind somit älter als 57 Jahre.

5.3.3.2.2 Spurengase SF6 und FCKW

Beim Schwefelhexafluorid (SF6) und den Fluorkohlenwasserstoffen (FCKW: F11, F12, F113) handelt es sich um klimarelevante Spurengase (Chlor-Fluor-Kohlenstoffverbindungen), deren Konzentration aufgrund menschlicher Tätigkeiten in der Atmosphäre seit den vierziger bis fünfziger Jahren (F11: $CFCl_3$ bzw. F12: CF_2Cl_3) bzw. seit den siebziger Jahren (F113: $CCl_2F/CClF_2$ bzw. SF6) des letzten Jahrhunderts kontinuierlich zunimmt. Über den Kontakt mit der Atmosphäre gelangen die Spurengase entsprechend ihrer Löslichkeit in die Hydrosphäre. Deshalb kann anhand dieser Spurengase prinzipiell eine Datierung von jungem Grundwasser durchgeführt werden. Da der Anstieg der FCKWs infolge des Produktionsstopps in den letzten zehn Jahren nur noch sehr gering oder gar negativ war, ist die Methode für sehr junge Wässer wenig geeignet.

Die FCKW's können – insbesondere in reduzierten Grundwassermilieus – einem natürlichen Abbau unterliegen und sind dann für die Datierung nicht oder nur stark eingeschränkt zu verwenden. In einigen Fällen kann ein lokaler FCKW-Eintrag (Deponie, städtischer Bereich, Kanalisation, Abwasser) zu FCKW-Gehalten im Grundwasser führen, die deutlich über dem heutigen atmosphärischen Eintrag liegen. Bei diesen Grundwässern kann keine Datierung vorgenommen werden. Die FCKW's können jedoch in diesen Fällen einen sensitiven Parameter für die Beteiligung von anthropogen beeinflusstem Grundwasser darstellen.

Referenzmessungen an zwei Privatbrunnen der Firma Schladerer im Zustrombereich der EKB 1 und 2 belegen, dass das quartäre Grundwasser anthropogene FCKW-Belastungen aufweist. Dies gilt für alle drei Spezies (F11, F12, F113). Neben den geogenen und anthropogenen Quellen sind bei den FCKW zusätzlich Abbauprozesse aufgrund des reduzierenden Grundwassermilieus möglich.

Anthropogene Überhöhungen für SF6 treten nur lokal auf (Spezialabfälle, Hochspannungsanlagen). Im Einflussbereich des Grundgebirges oder bei Gipswässern sind jedoch geogene Überhöhungen bekannt. Nach bislang vorliegenden Erfahrungen wird SF6 mikrobiologisch nicht abgebaut.

5.3.3.2.3 Kohlenstoffisotope (^{13}C-, ^{14}C-DIC)

Die isotopische Zusammensetzung des im Wasser gelösten anorganischen Kohlenstoffs (DIC, dissolved inorganic carbon) wird von der Herkunft des Karbonats und durch Wasser-Gesteins-Reaktionen gesteuert. Der Kohlenstoff-13-Gehalt (^{13}C) gibt Hinweise auf die Herkunft des Kohlenstoffs insbesondere in Hinblick auf C-Isotopenaustauschprozesse mit dem Aquifermaterial und dient der Bestimmung des ^{14}C-Anfangsgehaltes. δ^{13}C-Werte von -13 ‰ bis -15 ‰ können als charakteristische Signatur für karbonatische Grundwässer im Bereich des Rheintals und der Vorbergzone angenommen werden, die keine Isotopenaustauschprozesse erfahren haben. δ^{13}C-Werte von -12 ‰ bis -9 ‰ geben im Vergleich dazu Hinweise auf Isotopenaustauschprozesse, die bei der Berechnung des Grundwasseralters mit berücksichtigt werden müssen.

Durch das im Kohlenstoff enthaltene radioaktive Isotop Kohlenstoff-14 (^{14}C) mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren können im einfachsten Fall über das Gesetz des radioaktiven Zerfalls die Grundwasseralter ermittelt werden. Detaillierte Altersangaben sind bei Berücksichtigung hydrochemischer und isotopenhydrologischer Reaktions- und Austauschprozesse möglich.

Aus den ^{14}C-Gehalten lässt sich das Grundwasseralter ermitteln. Dies geschah unter folgenden Annahmen:
- Das alte Grundwasser ist ein Einkomponentensystem.
- Es erfolgten keine wesentlichen Überprägungen durch Karbonatfällung.
- Der ^{14}C-Anfangsgehalt entspricht 70 %-modern.
- Der Isotopenaustausch wird durch den δ^{13}C-Wert berücksichtigt (Referenzwert -13 ‰ bis -15 ‰).

5.3.3.2.4 Stabile Isotope des Wassers (δ^{18}O, ^{2}H)

Die stabilen Isotope des Wassermoleküls, Sauerstoff-18 (^{18}O) und Deuterium (^{2}H), liefern Informationen über die Herkunft und Bildungsbedingungen eines Grundwassers. Unterschiede bei δ^{18}O-Werten beruhen in erster Linie auf temperaturabhängigen Prozessen in Niederschlag und Verdunstung.

5.4 Untersuchungen in der Erkundungsbohrung EKB 1

5.4.1 Geophysikalische Bohrlochmessungen

Zur Ermittlung von Strukturdaten (Schichtung, Klüftung) und deren Orientierung wurden in der EKB 1 vom Geotechnischen Ingenieurbüro Prof. FECKER und Partner GmbH (GIF) Befahrungen mit dem Akustischen Bohrlochfernsehen (ABF) und dem Akustischen Bohrlochscanner (ETIBS) durchgeführt (Tab. 5.5, Abb. 5.14).

Tab. 5.5: Geophysikalische Bohrlochmessungen in der Erkundungsbohrung EKB 1.

Datum	Bohrtiefe [m]	Unterkante Verrohrung [m]	Messintervall [m u. GOK]	Messungen	Durchführende Firma
13.03.2009	17,80	6,90	6,90-16,05	ABF	GIF
13.03.2009	17,80	6,90	6,90-16,05	ETIBS	GIF

Die Schichtung fällt nach der Auswertung des Geotechnischen Ingenieurbüros Prof. FECKER und Partner GmbH (GIF) im Tiefenabschnitt 14,50 m u. GOK bis 15,74 m u. GOK mit 37° bis 44° nach Nordwesten (307° bis 326°) ein. Darüber wurden im Abschnitt von 7,77 m u. GOK bis 14,26 m u. GOK ausschließlich Klüfte identifiziert, die mit Einfallswinkeln zwischen 33° und 77° überwiegend in no rdwestliche und südsüdöstliche Richtungen einfallen (vgl. Abb. 5.14). Bei einigen Strukturen, die beim automatisierten Auswerteverfahren als Klüfte interpretiert wurden, handelt es sich um Schichtung (z. B. zwischen 11,0 m u. GOK und 12,90 m u. GOK).

Geotechnisches Ingenieurbüro
Prof. Fecker und Partner GmbH

GIF GmbH
Am Reutgraben 9
D-76275 Ettlingen

Tel.: 07243 / 59 83 7
Fax : 07243 / 59 83 97
E-mail: mail@gif-ettlingen.de

Messprogramm
ABF Akustisches Bohrlochfernsehen

Erkundungsobjekt
Staufen

Auftraggeber: Fa. Anger
Bohrung: EKB 1
Ort: Staufen
Auftragsnummer: e-2830

Koordinaten:
Rechtswert:
Hochwert:
Messbezugspunkt: GOK
Höhe ü. NN:

Messdatum :	13.03.2009	Bohrlochdurchmesser :	146 mm
Bohrteufe :	17.80 m	Richtung der Bohrung :	vertikal
Messintervall :	6.90 m - 16.05 m (9.15 m)	Quelldatei :	BK 1_ba
Verrohrung bis :	6.90 m	Messingenieur :	[redacted]
Wasserstand :	2.50 m	Bearbeiter :	

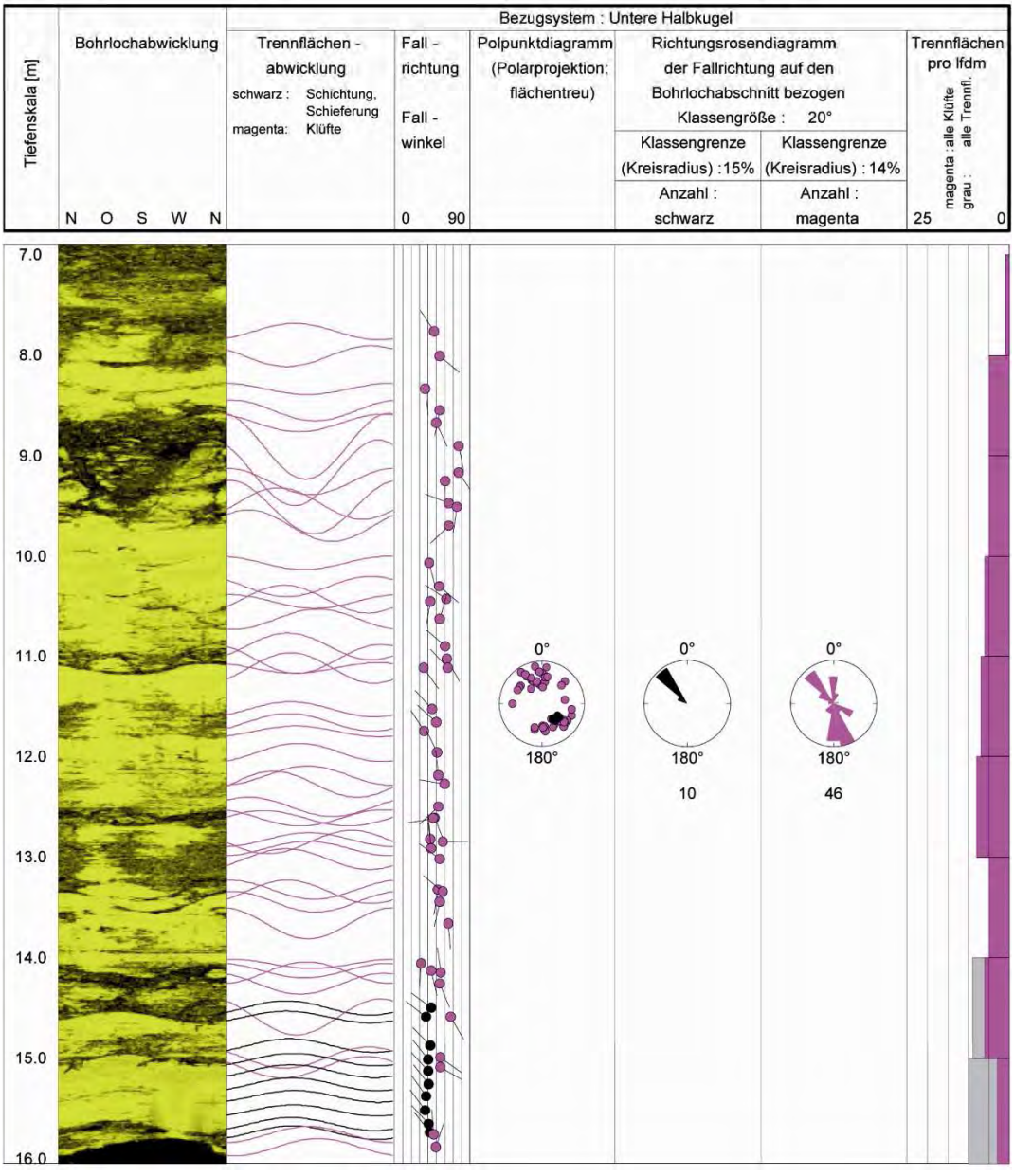


Abb. 5.14: Akustisches Bohrlochfernsehen: Ergebnisse der Befahrung in der EKB 1.

5.4.2 Pumpversuch (Unterkeuper, ku)

In der Erkundungsbohrung EKB 1 wurde am 13. März 2009 ab 15:22 Uhr vom Büro VOUTTA ein Pumpversuch mit einer ca. 23-stündigen Absenkphase bei einer Entnahmerate von ca. 1,0 l/s (bis 14. März 2009, 13:06 Uhr) bzw. 1,5 bis 2,3 l/s (bis 14. März 2009, 14:45 Uhr) durchgeführt (Tab. 5.6). Der Wiederanstieg wurde bis 14. März 2009, 21:57 Uhr gemessen (Tab. 5.6, Abb. 5.15). Getestet wurde der Abschnitt des **Unterkeupers (ku),** der zwischen 15,9 m u. GOK und 17,0 m u. GOK einen Verkarstungshohlraum aufwies. Bei dessen Anfahren wurde laut Bohrmeisterangaben ein Spülungsverlust von ca. 1 m³ beobachtet (vgl. Profilbeschreibung zur EKB 1, Anl. 5.3 a).

Der Ruhewasserspiegel lag zu Beginn des Pumpversuches bei 4,28 m u. GOK, am Ende der Wiederanstiegsphase bei 3,97 m u. GOK. Der Grundwasserstand wurde bei der Entnahmerate von 2,3 l/s um 11,57 m u. GOK auf 15,85 m u. GOK abgesenkt.

Die Auswertung des Absenkverlaufes während der ersten Pumpstufe nach COOPER & JACOB liefert eine **Transmissivität** von **$T = 7{,}2 \cdot 10^{-5}$ m²/s** und einen **Speicherkoeffizienten** von **S = 0,098** (Abb. 5.17).

Die kontinuierlich digital aufgezeichnete elektrische Leitfähigkeit des geförderten Wassers lag zu Beginn des Pumpversuches bei 1200 µS/cm und schwankte im weiteren Verlauf zwischen 1460 µS/cm und 1500 µS/cm (Abb. 5.16). Die Temperatur betrug zwischen 13,8 °C und 14,2 °C, der pH-Wert bewegte sich im ne utralen Bereich bei anfänglich 7,18 und sank im Laufe der ersten Pumpstufe auf 7,11 ab. Bei der Entnahmerate von 2,3 l/s stieg er wieder auf 7,14 an.

Tab. 5.6: Pumpversuchsablauf in der Erkundungsbohrung 1 (EKB 1).

Phase	Datum, Uhrzeit	Flurabstand [m u. GOK]	Absenkung [m]	Entnahmerate [l/s]
Ruhewasserspiegel	13.03.2009 15.22 Uhr	4.28		
Beginn PV	13.03.2009 15.22 Uhr	4.28		
Ende Erste Pumpstufe	14.03.2009 13.06 Uhr	11.54	7.27	1,0
Ende Zweite Pumpstufe	14.03.2009 13.48 Uhr	13.44	9.17	1.5
Ende Dritte Pumpstufe	14.03.2009 14.13 Uhr	15.06	10.79	2,0
Ende Vierte Pumpstufe	14.03.2009 14.45 Uhr	15.85	11.58	2,3
Ende PV	14.03.2009 14.45 Uhr			
Ende Wiederanstieg	14.03.2009 21.57 Uhr	3.97	-0.30	0

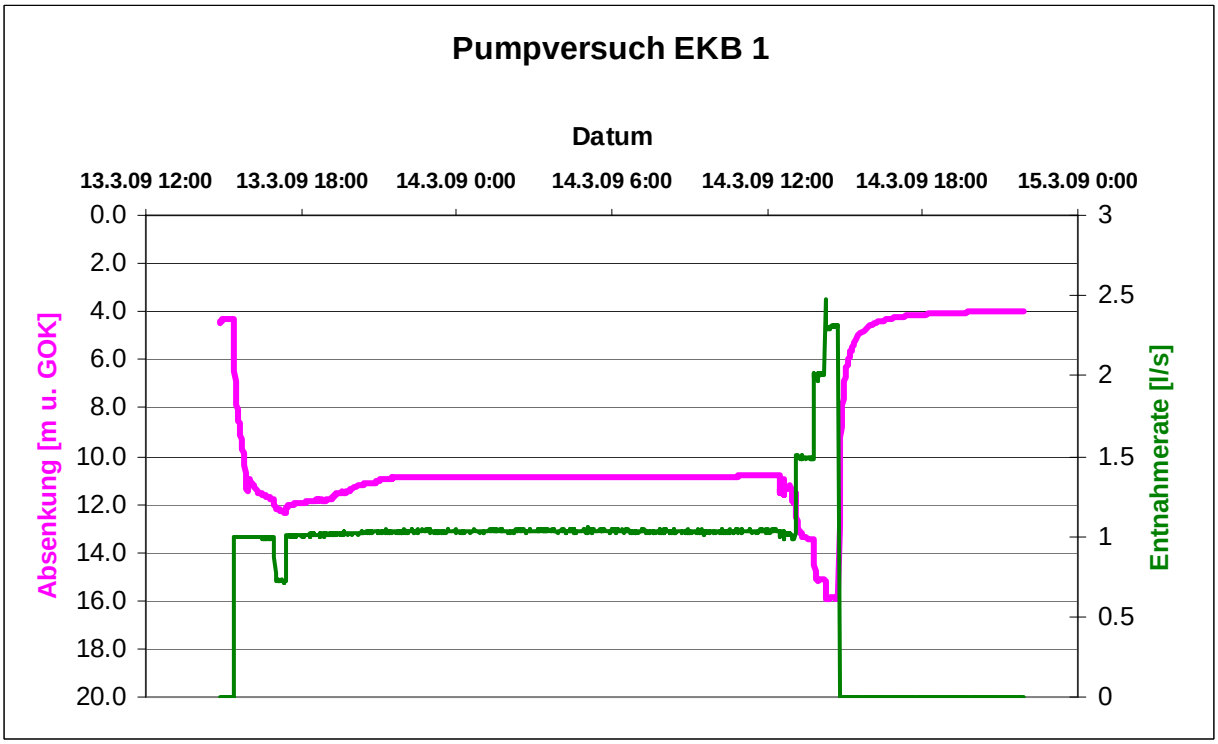


Abb. 5.15: Pumpversuch EKB 1: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

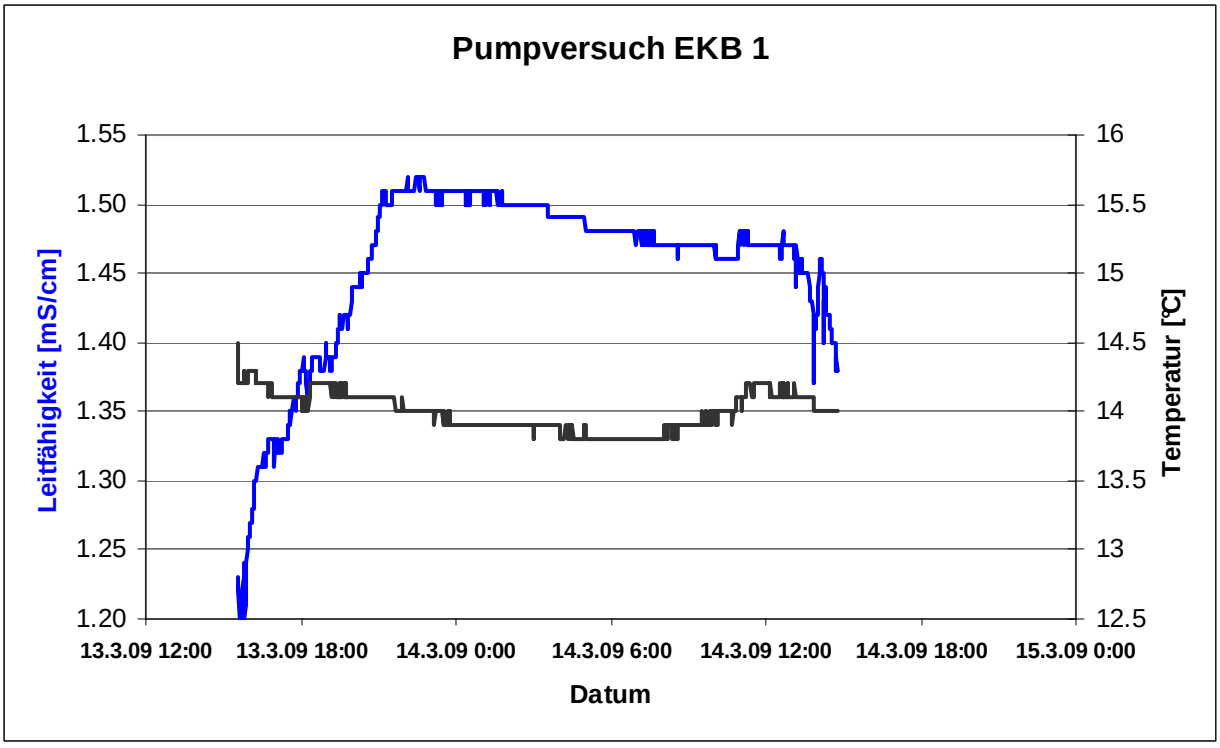


Abb. 5.16: Pumpversuch EKB 1: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

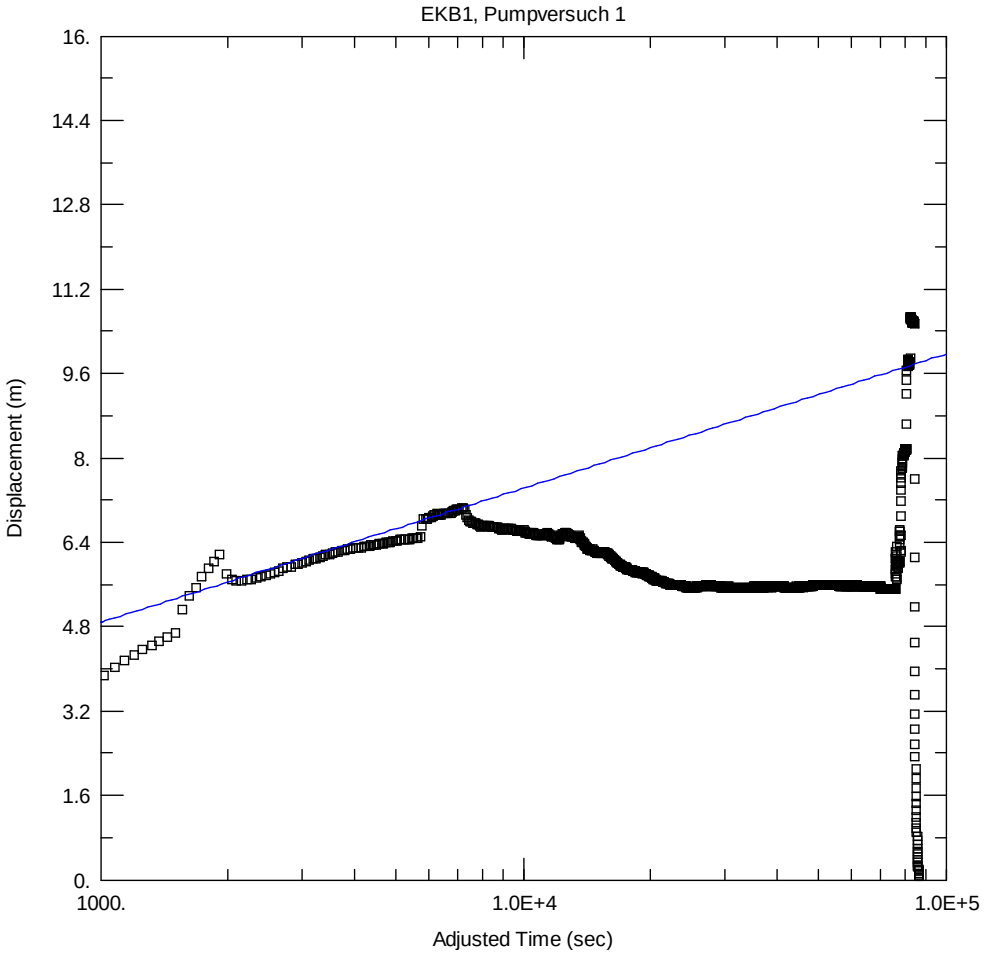


Abb. 5.17: Pumpversuch EKB 1: Auswertung der Absenkung nach COOPER & JACOB.

5.4.3 Hydrochemie und Isotope

Während des Pumpversuches in der EKB 1 wurden zwischen dem 13. und 14. März 2009 vier Grundwasserproben zur hydrochemischen und isotopenhydrologischen Charakterisierung entnommen (vgl. Tab. 5.17). Zusätzlich erfolgte eine weitere Probenahme am 28. Juli 2009. Die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe stimmen in den fünf Analysen gut überein.

Das in der EKB 1 oberflächennah erschlossene Grundwasser aus dem **Unterkeuper** ist ein normal **erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser** (PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH, 1967, Abb. 5.18).

Nach der für Mineralwässer üblichen hydrochemischen Typisierung ist es vom **Ca-SO_4-HCO_3-Typ** (UDLUFT-Diagramm, Abb. 5.19). Es handelt sich um ein Wasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit zwischen 1115 µS/cm und 1450 µS/cm, in dem mäßig hohe Mengen an Calciumsulfat (ca. 400 mg/l bis 550 mg/l Sulfat) gelöst sind. Die Chlorid-

gehalte liegen zwischen 15,2 mg/l und 20,6 mg/l. Die Kaliumgehalte zwischen 20,6 mg/l und 22,9 mg/l sind im Vergleich zu den sonstigen in Staufen angetroffenen Grundwässern deutlich erhöht (Tab. 5.18). Da beim Abteufen der EKB 1 außer Trinkwasser keine Bohrhilfsmittel verwendet wurden, sind chemische Beeinflussungen durch Bohrspülung ausgeschlossen. Die Ursachen der erhöhten Kaliumgehalte konnten nicht eindeutig geklärt werden, wahrscheinlich sind sie anthropogen bedingt.

Die mit dem Programm PHREEQC berechneten Mineral-Sättigungszustände (Abb. 5.20) zeigen folgendes Bild: Calcit kann aufgrund der Sättigung nicht gelöst werden, dagegen besteht eine Untersättigung an Dolomit, Gips und Anhydrit. Diese Minerale können somit gelöst werden.

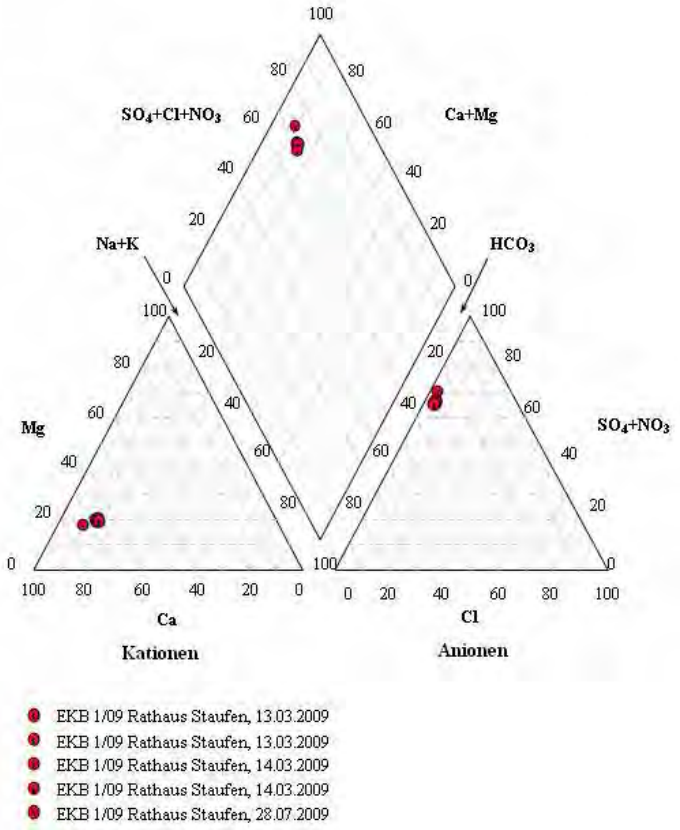


Abb. 5.18: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Unterkeuper (ku) der EKB 1.

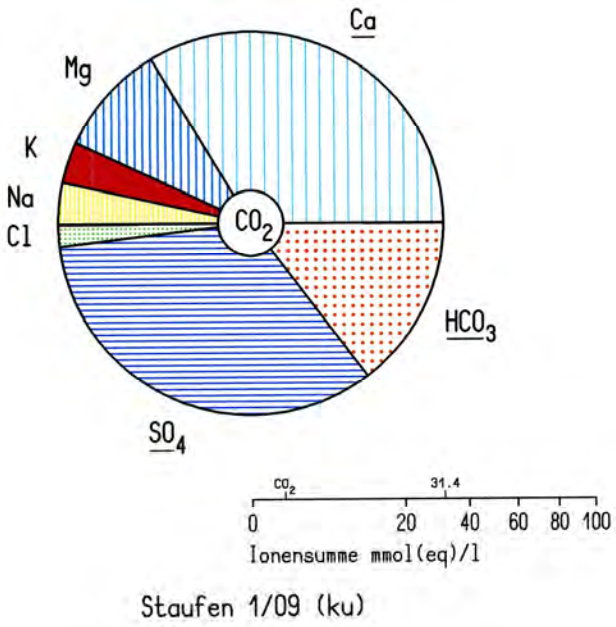


Abb. 5.19: Kreisdiagramm zur Darstellung der hydrochemischen Inhaltsstoffe nach UDLUFT (Unterkeuper der EKB 1, Analyse vom 14. März 2009).

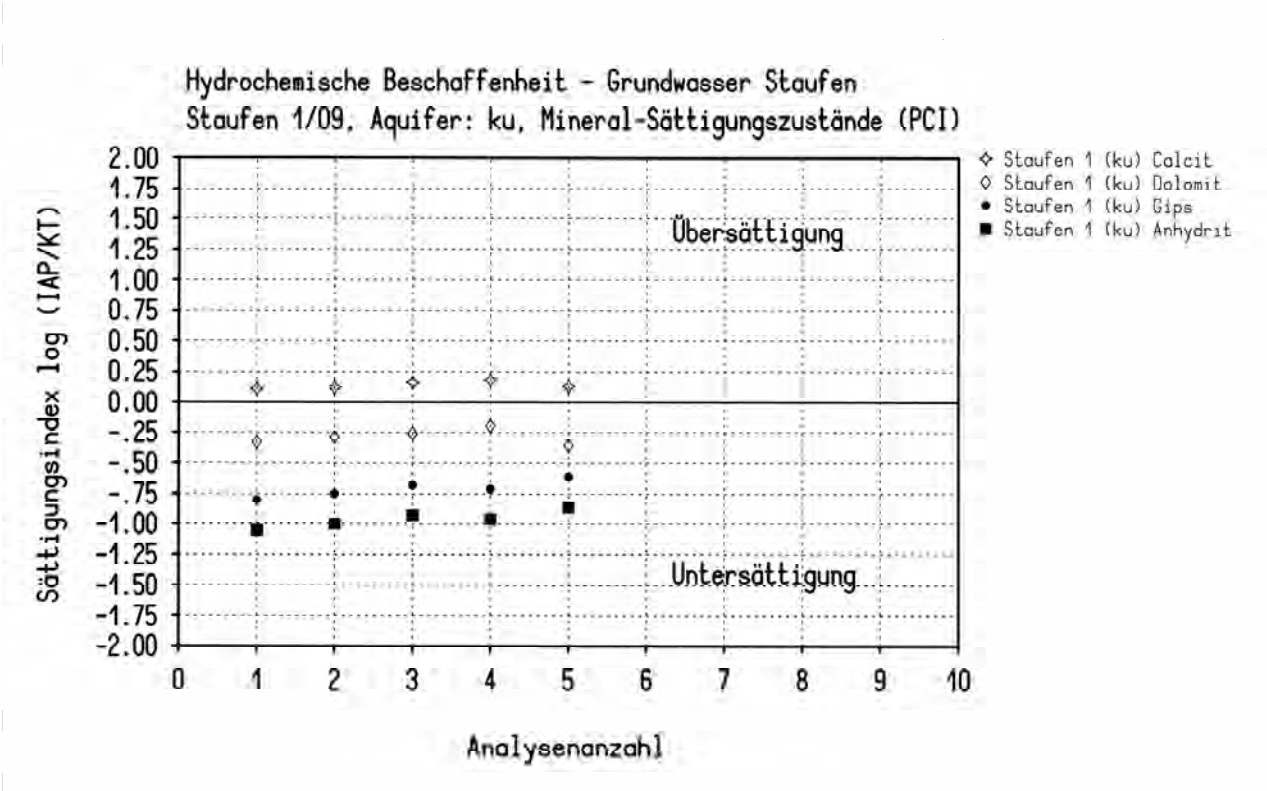


Abb. 5.20: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus dem Unterkeuper (ku) der EKB 1.

Im Temperatur- und Leitfähigkeitsprofil, das am 12. Juni 2009 vom RPF/LGRB in der ausgebauten Grundwassermessstelle EKB 1 gemessen wurde, zeigt sich im Bereich der Filterstrecke eine signifikante Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe (Abb. 5.21).

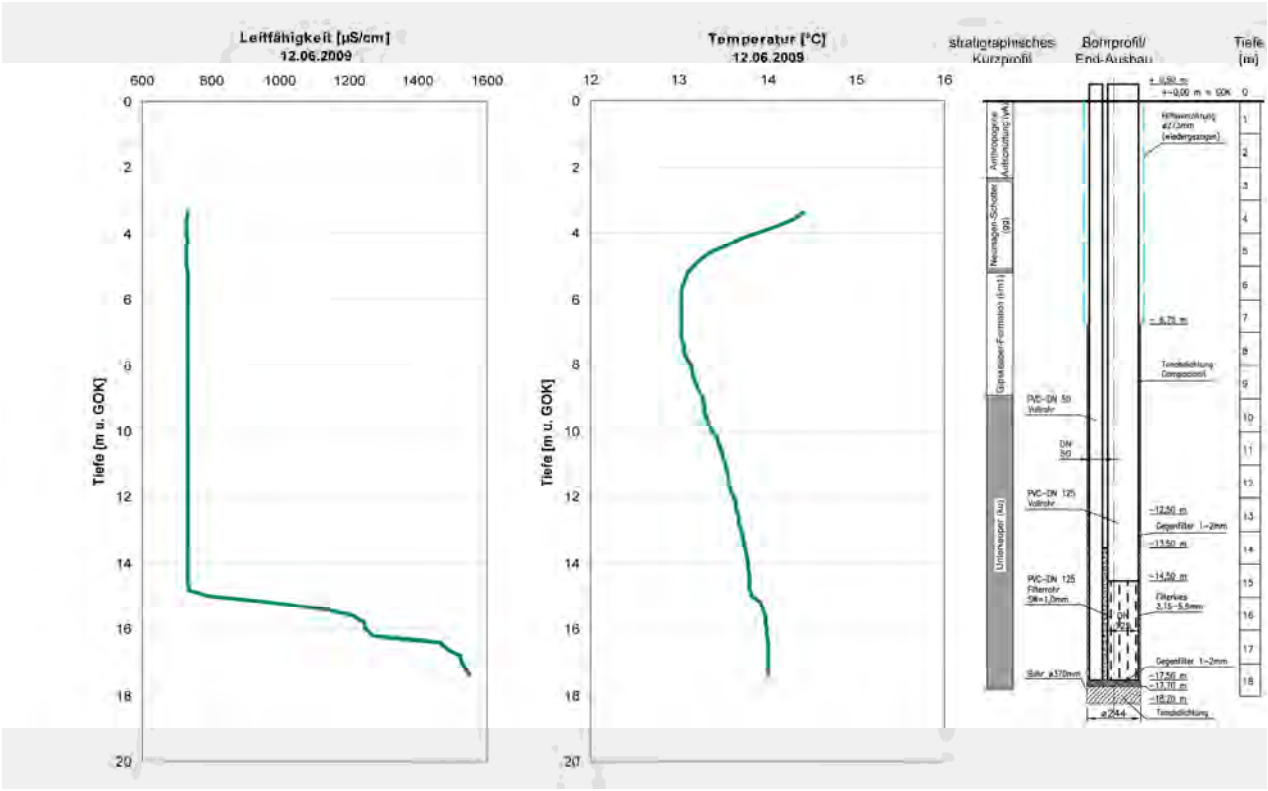


Abb. 5.21: EKB1: Tiefenprofil der Temperatur und Leitfähigkeit in der ausgebauten Grundwassermessstelle (Ausbauzeichnung: Fa. Anger's Söhne).

Die Tritiumgehalte des Grundwassers aus dem **Unterkeuper** der EKB 1 liegen zwischen 5,0 TU und 5,5 TU (Tab. 5.7). Der ^{14}C-Gehalt von ca. 55 %-modern zeigt bereits erkennbare ^{14}C-Zerfallsprozesse an, insbesondere wenn der durch die Tritiumgehalte belegte Jungwasseranteil mit berücksichtigt wird (Tritiumgehalt ca. 5 TU), d. h. in der EKB 1 tritt oberflächennah neben einer Jungwasserkomponente bereits altes tritiumfreies Grundwasser auf.

Hinsichtlich der Grundwasseraltersstruktur handelt es sich um ein Zwei-Komponenten-Mischwassersystem aus jungen (tritiumhaltig; < 50 Jahre) und alten (einige hundert bis wenige tausend Jahre) Komponenten. Markante Veränderungen der Zusammensetzung sind während des zweitägigen Pumpversuchs nicht erkennbar.

Da die Mischungsverhältnisse zwischen jungen und alten Komponenten nicht im Detail bekannt sind, lassen sich keine ausreichend genaue Abschätzungen zum ^{14}C-Gehalt der alten Komponente durchführen. Möglich sind Alter wie sie in der EKB 2 im Schilfsandstein/Gipskarst oder im Unterkeuper berechnet wurden (s. Kap. 5.5.3.1).

Tab. 5.7: Ergebnisse der isotopenhydrologischen Messungen im Grundwasser aus dem Unterkeuper (ku) der Erkundungsbohrung 1 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Parameter	**Ergebnisse**
Tritium [TU]	5,0 - 5,5
Sauerstoff-18 [‰] Deuterium [‰]	-9,25 -65,8
Kohlenstoff-13 [‰] Kohlenstoff-14 [%-modern]	-13,82 54,6

Die Interpretation der Messergebnisse des Grundwassers aus dem Unterkeuper der EKB 1 erfolgt gemeinsam mit den Grundwässern aus der EKB 2 in Kap. 5.5.3.1.

5.4.4 Langzeitbeobachtung des Grundwasserspiegels in der EKB 1

In der Grundwassermessstelle EKB 1 werden seit dem 23. April 2009 kontinuierlich der Grundwasserstand, seit dem 02. September 2009 zusätzlich die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit digital registriert. Die Grundwasserstandsschwankungen lassen sich meist gut mit Niederschlagsereignissen korrelieren (Abb. 5.22). Die spontane Reaktion ist Ausdruck der gespannten Grundwasserverhältnisse im Unterkeuper-Grundwasserleiter. Die signifikanten Grundwasserstandsschwankungen im Zeitraum zwischen dem 15. und 19. Juli 2009 stehen direkt mit Niederschlagsereignissen an den Vortagen im Zusammenhang. Reaktionen des Grundwasserstandes in der EKB 1 auf Entnahmen in der EKB 2 werden bei der Beschreibung der Pumpversuche in Kap. 5.5.2.1 beschrieben.

Die Temperatur und Leitfähigkeit des Grundwassers änderten sich während des Beobachtungszeitraumes nicht signifikant.

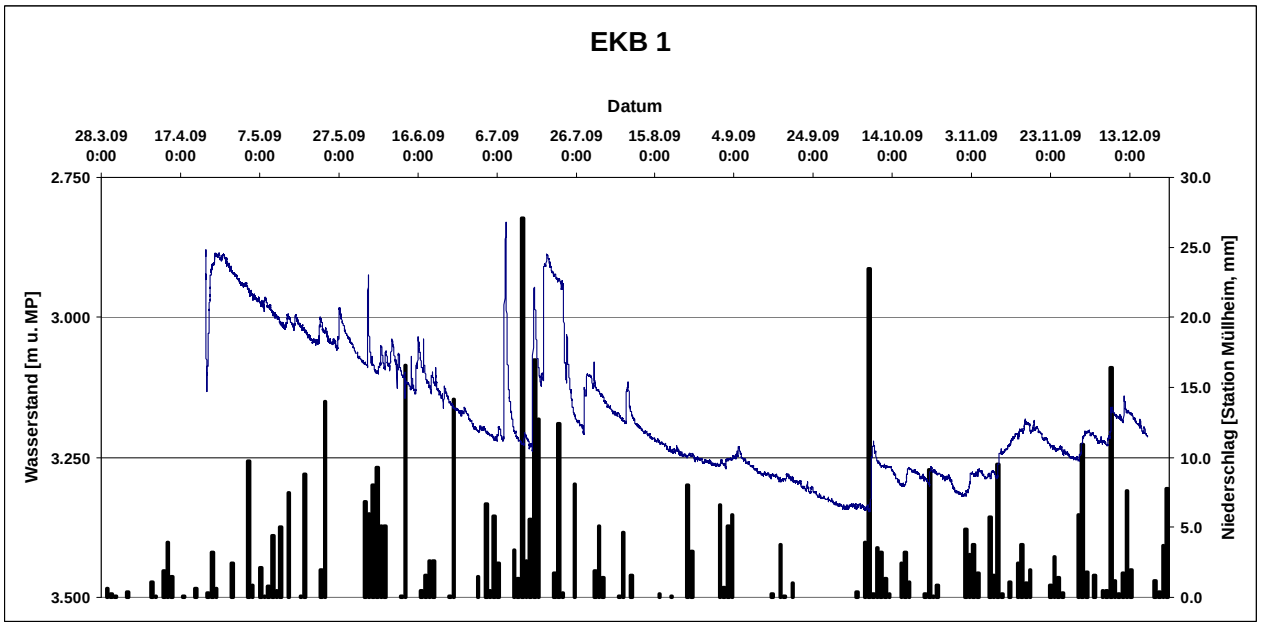


Abb. 5.22: Korrelation des Grundwasserspiegels in der EKB 1 mit den Niederschlagshöhen der Messstation Müllheim (273 m NN).

5.5 Untersuchungen in der Erkundungsbohrung EKB 2

5.5.1 Geophysikalische Bohrlochmessungen (Anl. 5.8 a, Anl. 5.8 b, Tab. 5.8)

Zwischen dem 13. März und 21. April 2009 wurden in der EKB 2 durch das Geotechnische Ingenieurbüro Prof. FECKER und Partner GmbH (GIF) Bohrlochbefahrungen zur Untersuchung der Bohrlochwandung und Gewinnung von Strukturdaten durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in der Anl. 5.8a dargestellt. Folgende Messverfahren kamen zum Einsatz:

- Optischer Bohrlochscanner (**ETBIS**)
- Akustisches Bohrlochfernsehen (**ABF**)

Zwischen dem 12. Juni und dem 21. Oktober 2009 wurden in der EKB 2 von der Fa. terratec, Heitersheim, in der Bohrung EKB 2 geophysikalische Bohrlochmessungen durchgeführt (Tab. 5.8). Die Ergebnisse sind im Bericht vom 17. November 2009 dargestellt (terratec 2009 a). Zur Untersuchung der Lithologie, strukturgeologischer Parameter und der Beschaffenheit des Bohrloches wurden folgende geophysikalische Bohrlochmessverfahren eingesetzt:

- Akustischer Scanner (**BHTV**) zur Ermittlung der Strukturen und deren Orientierung, sowie des Bohrlochverlaufs und des Bohrlochkalibers
- Induktionssonde (**D**ual **I**nduction **L**og) zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (1/Widerstand) der Formation
- **F**ull **W**ave **S**onic Sonde (Akustik-Log) zur Bestimmung der P-Wellengeschwindigkeit
- 3-Arm **Kal**iber zur mechanischen Bestimmung des Bohrlochkalibers
- Gamma-Sonde zur Messung der natürlichen Gammastrahlung **(Gamma)**
- **Gyro**-Sonde zur Bestimmung des Bohrlochverlaufs im verrohrten und offenen Bohrloch

Die Ergebnisse der Messungen sind in der Anl. 5.8b dargestellt.

Tab 5.8: Bohrlochgeophysikalische Messungen in der Erkundungsbohrung EKB 2.

Datum	Bohrtiefe [m]	Unterkante Verrohrung [m]	Messintervall [m u. GOK]	Messungen	Durchführende Firma
13.03.2009	12,80	ohne	6,60 – 12,80	ETBIS	GIF
21.04.2009	24,60	ohne	12,50 – 24,60	ABF	GIF
12.06.2009	76,40	60,20	60,20 – 75,79	Kal, T, LF, BHTV, Res, FWS	terratec, Heitersheim
19.06.2009	83,25	60,80	60,80 – 83,30	Kal, BHTV	terratec, Heitersheim
02.07.2009	88,76	66,80	66,80 – 88,76	BHTV, Kal, DIL	terratec, Heitersheim
17. + 18.07.2009	97,00	32,20	32,20 – 95,65	BHTV, DIL, Kal, FWS, Gamma	terratec, Heitersheim
06.08.2009	118,50	97,60	97,60 – 117,90	BHTV, Kal	terratec, Heitersheim
14.08.2009	148,00	97,50	97,50 – 118,40	Cal, DIL	terratec, Heitersheim
17.08.2009	148,00	121,70	121,7 – 147,9	BHTV, Cal	terratec, Heitersheim
10.09.2009	145,40	97,60	97,60 – 145	Cal, Gyro (140 – 2 m), Gamma	terratec, Heitersheim
21.10.2009	163	142,60	142,60 – 163	BHTV, Cal, Gamma	terratec, Heitersheim

5.5.1.1 Beschaffenheit der Bohrlochwandung

Die Laufzeitmessung und das Kaliberlog zeigen über weite Teile der Messstrecke ein relativ glattes und gut kaliberhaltiges Bohrloch mit wenigen deutlichen Ausschlägen, verursacht durch Klüfte und Bohrlochwandauskesselungen. Die Strukturen, die auf der Bohrlochwandung identifiziert werden konnten, sind in Tab. 5.9, Anl. 5.8a und Anl. 5.8b zusammengestellt.

Bohrlochwandausbrüche treten insbesondere im Tiefenabschnitt zwischen 66,8 m u. GOK und 99,5 m u. GOK auf. Dies entspricht der Zone, in der aufgrund erhöhter Gebirgsspannung wiederholt Erschwernisse beim Niederbringen der Bohrung mit mehrfachem Nachfall auftraten. In den benachbarten EWS-Bohrungen zeichnet sich dieser Abschnitt in den dort gemessenen Temperaturprofilen durch eine deutliche Temperaturanomalie (Kap. 6.3.3) aus. Wie die Auswertung von Dünnschliffen (66,3 m u. GOK und 70,55 m u. GOK, Abb. 5.84 und 5.85) erbrachte, lassen sich in diesem Abschnitt auch unmittelbare Anzeichen einer rezenten Gipsbildung (Fasergips im Bereich feiner Schichtfugen in Tonsteinlagen) nachweisen (Kap. 5.5.4.5).

Tab. 5.9: Strukturen in der Bohrlochwandung der EKB 2.

Ausbruch	Kluftzone	Auswaschung
66,8 – 67,4 m u. GOK		
73,6 m u. GOK		
75,6 m u. GOK		
85,3 – 86,7 m u. GOK		
88,3 – 89,2 m u. GOK		
91,4 – 92 m u. GOK		
93,7 – 94,7 m u. GOK		
98,6 – 99,5 m u. GOK		
	102,0 – 106,4 m u. GOK	
102,9 – 106,1 m u. GOK		
	113,0 – 114,0 m u. GOK	
113,3 – 114,3 m u. GOK		
146,4 m u. GOK		
154,2 m u. GOK		
155,5 – 155,8 m u. GOK		
		161,0 – 161,7 m u. GOK

5.5.1.2 Strukturdaten (Akustischer Scanner)

Die Strukturdaten basieren im Wesentlichen auf Auswertungen der Amplitude. Es wurde eine Vielzahl von Strukturen (Klüfte und Schichtflächen) identifiziert. Die Einfallsrichtungen der Schicht- und Kluftflächen in der Polpunktprojektion zeigen Vorzugsrichtungen in die NW-Richtung mit Einfallswinkeln zwischen 30° und 60°, mehrheitlich um 42° (Anl. 5.8b).

5.5.1.3 Lithologische Differenzierung der Bohrung (Gammastrahlung)

Die Gammastrahlung wurde bis 32 m u. GOK durch die Verrohrung gemessen. Die jeweiligen Rohrtouren dämpfen die Strahlungsintensität und sind in der Messkurve durch stufenweise Erhöhung der Zählraten zu erkennen.

Im offenen Bohrloch treten Gammaaktivitäten um 20 cps bis 180 cps auf. Die Gammakurve zeigt deutliche Unterschiede in der Strahlungsintensität, was auf eine ausgeprägte lithologische Wechsellagerung hindeutet. Sulfatführende Abschnitte sind generell durch eine geringere Strahlungsintensität gekennzeichnet. Die stärksten Schwankungen mit Werten zwischen 25 cps und 100 cps treten im Unterkeuper zwischen 141 m u. GOK und 154 m u. GOK auf. Der Obere Muschelkalk ist durch eine geringe Strahlungsintensität gekennzeichnet.

5.5.2 Hydraulische Versuche

Tab.5.10 gibt einen Überblick über die hydraulischen Versuche, die in der Erkundungsbohrung EKB 2 durchgeführt wurden.

Tab. 5.10: Übersicht über die hydraulischen Versuche in der Erkundungsbohrung EKB 2.

Datum	Bohrloch-sohle [m u. GOK]	Packersitz [m u. GOK]	Ruhewas-serspiegel [m u. GOK]	Beginn der Messung [Datum, Uhrzeit]	Ende der Messung [Datum, Uhrzeit]	Versuchs-typ	Aquifer	Einhänge-tiefe Pumpe [m. u. GOK]
31.03.2009 (PV1)	14,0	Ohne Packer	1,71	13.03.2009 15:31	31.03.2009 19:27	Pump-versuch	km2	
21.04.2009	22,0	18 – 19	1,65	21.04.2009	21.04.2009	Pulse-Test	km1, GES	-
23.04.2009 (PV2)	28,0	Erstes Sperrohr bis 13,70 m, Kernrohr bis 25,15 m	3,31	23.04.2009, 9:43	24.04.2009, 7:14	Pump-versuch	km1, GES, Gipskarst über Gips-spiegel	
22.05.2009	52,0	48,5 – 49,5	-0,2	22.05.2009	22.05.2009	Slug-Test	km1, MGH	-
27.05.2009	58,0	48,5 – 49,5	3,14	27.05.2009	27.05.2009	Slug-Test	km1, MGH	-
27.05.2009	58,0	54 – 55	3,07	27.05.2009	27.05.2009	Slug-Test	km1, MGH	-
08.06.2009	75	61,5 – 62,5	11,73 (12,2 korr.)	08.06.2009	08.06.2009	Pulse-Test	km1, MGH	-
08.06.2009	75		11,73 (12,2 korr.)	08.06.2009	08.06.2009	Fluid Logging	km1, MGH	-
02.07.2009	91,4 verstürzt auf 88,76	68 - 69		02.07.2009	02.07.2009	Pulse-Test	km1, MGH, WEH	-
23.09.2009	153,0	Ohne Packer		24.09.2009 2 Kurz-pump-versuche nicht aus-wertbar	25.09.2009	Klarspülen 1 l/s	ku	20 und 40 m
24.09.2009 (PV3)	153,0	Ohne Packer. UK Sperrohr: 145,20 m u. GOK	mindestens 0,77 m **über Gelände** (freier Auslauf)	24.09.09, 10:15	25.09.09, ca. 01:57	Pump-versuch, Abbruch wegen Stromaus-fall	ku	100 m
25.09.2009 (PV3a)	153,0	Ohne Packer UK Sperrohr: 145,20 m u. GOK	mindestens 0,77 m **über Gelände** (freier Auslauf)	25.09.09, 12:11	09.10.2009	Pump-versuch, 0,55 und 0,6 l/s (ab 29.09.09)	ku	132 m
12.10.2009 (PV3b)	153,0	Ohne Packer UK Sperrohr: 145,20 m u. GOK	ca. 1,80 m **über Gelände**	12.10.2009, ca. 18:00	17.10.2009, Ca. 16:00	Pump-versuch, 0,89 l/s	ku	132 m
22.10.2009	163,0	ohne Packer	ca. 2,10 m **über Gelände**	22.10.2009	22.10.2009	Fluid Logging	ku-mo2D	-
22.10.2009 (PV4)	163,0	152	ca. 2,10 m **über Gelände**	22.10.2009 20:12	26.10.2009 ca. 12.00	Pump-versuch, 0,47 l/s	mo2D	

5.5.2.1 Pumpversuche

In Tiefenabschnitten, in denen aufgrund der Bohrergebnisse höhere Durchlässigkeiten zu erwarten waren, wurden Pumpversuche durchgeführt. Gleichzeitig zum Pumpversuch in der EKB 2 wurde der Wasserspiegel in der EKB 1 beobachtet.

Pumpversuch PV1/EKB 2 (Schilfsandstein-Formation, km2)

In der Erkundungsbohrung EKB 2 wurde am 31. März 2009 ab 15:31 Uhr ein zweistufiger Pumpversuch mit einer ca. dreieinviertel-stündigen Absenkphase bei einer Entnahmerate von ca. 0,2 l/s (bis 31. März 2009, 18:42 Uhr) bzw. 0,4 l/s (bis 31. März 2009, 18:44 Uhr) durchgeführt (Tab. 5.11, Abb. 5.23). Die Entnahmeratensteigerung führte zu einer starken Absenkung des Grundwasserspiegels und wurde deshalb nach zwei Minuten abgebrochen. Der Wiederanstieg wurde bis 31. März 2009, 19:27 Uhr gemessen.

Getestet wurde der Abschnitt der Schilfsandstein-Formation bis in eine Tiefe von 14 m u. GOK, in dem ab 11,65 m u. GOK geklüftete, rostbraune, mürbe bis hart-mürbe klüftige Feinsandsteine angetroffen wurden. Zwischen 11,65 m u. GOK und 12,05 m u. GOK wurde leichter Spülungsabgang beobachtet (Profilbeschreibung zur EKB 2: Anl. 5.6 a).

Der Ruhewasserspiegel lag bei Beginn des Pumpversuches bei 1,66 m u. GOK, am Ende der Wiederanstiegsphase bei 2,04 m u. GOK. Der Grundwasserstand wurde am Ende der ersten Pumpstufe bei der Entnahmerate von 0,2 l/s um 6,56 m u. GOK auf 8,22 m u. GOK, am Ende der nur zweiminütigen zweiten Pumpstufe bei einer Entnahmerate von 0,4 l/s um 7,66 m u. GOK auf 9,32 m u. GOK abgesenkt (Abb. 5.23).

Die Auswertung des Wiederanstiegs nach Cooper & Jacob liefert eine **Transmissivität $T = 2{,}6 \cdot 10^{-5}$ m²/s** und einen **Speicherkoeffizienten $S = 3{,}4 \cdot 10^{-5}$** (Abb. 5.26). Bei einer hydraulisch getesteten Kernstrecke von H = 12,3 m ergibt sich daraus eine Profildurchlässigkeit $T/H = 8 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Die kontinuierlich digital aufgezeichnete elektrische Leitfähigkeit des geförderten Wassers stellte sich nach einem anfänglich deutlichen Anstieg von spülungsbedingt niedrigen elektrischen Leitfähigkeiten nach ca. 30 Minuten bei ca. 1900 µS/cm ein und stieg im weiteren Verlauf bis zum Ende des Pumpversuches auf 2200 µS/cm an (Abb. 5.24). Nachdem die elektrische Leitfähigkeit hauptsächlich durch Sulfat bestimmt ist, wurde der Pumpversuch aus Sicherheitsgründen beendet, um Auslaugungsprozesse zu vermeiden. Die Temperatur zeigte einen ähnlichen Verlauf wie die elektrische Leitfähigkeit und erreichte Werte bis 13,2 °C. Der pH-Wert stieg im Lau fe des Versuchs nach einer starken Zunahme in der Anfangsphase (Reste von Spülflüssigkeit) kontinuierlich auf ca. 7,4 am

Ende des Pumpversuchs an, der Sauerstoffgehalt lag im späteren Verlauf zwischen 1,1 mg/l und 1,6 mg/l (Abb. 5.25).

Tab. 5.11: Pumpversuchsablauf PV1/EKB 2 am 31. März 2009 in der Erkundungsbohrung 2 (EKB 2).

Phase	Datum, Uhrzeit	Flurabstand [m u. GOK]	Absenkung [m]	Entnahmerate [l/s]
Ruhewasserspiegel	31.03.2009 15:23 Uhr	1,66		
Beginn PV	31.03.2009 15:31 Uhr	1,71		
Ende Erste Pumpstufe	31.03.2009 18:42 Uhr	8,22	6,56	0,2
Ende Zweite Pumpstufe	31.03.2009 18:44 Uhr	9,32	7,6	0,4
Ende PV	31.03.2009 18:44 Uhr	9,32		
Ende Wiederanstieg	31.03.2009 19:27 Uhr	2,04	0,39	

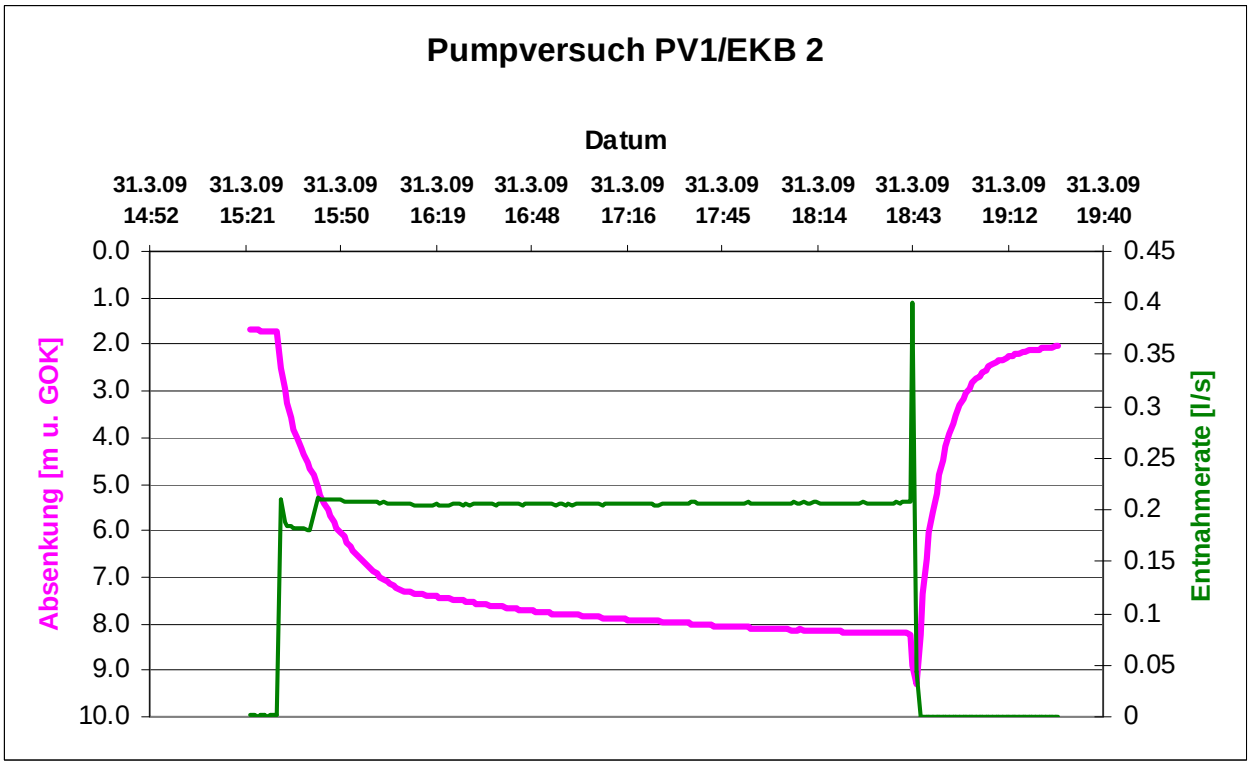


Abb. 5.23: Pumpversuch PV1/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

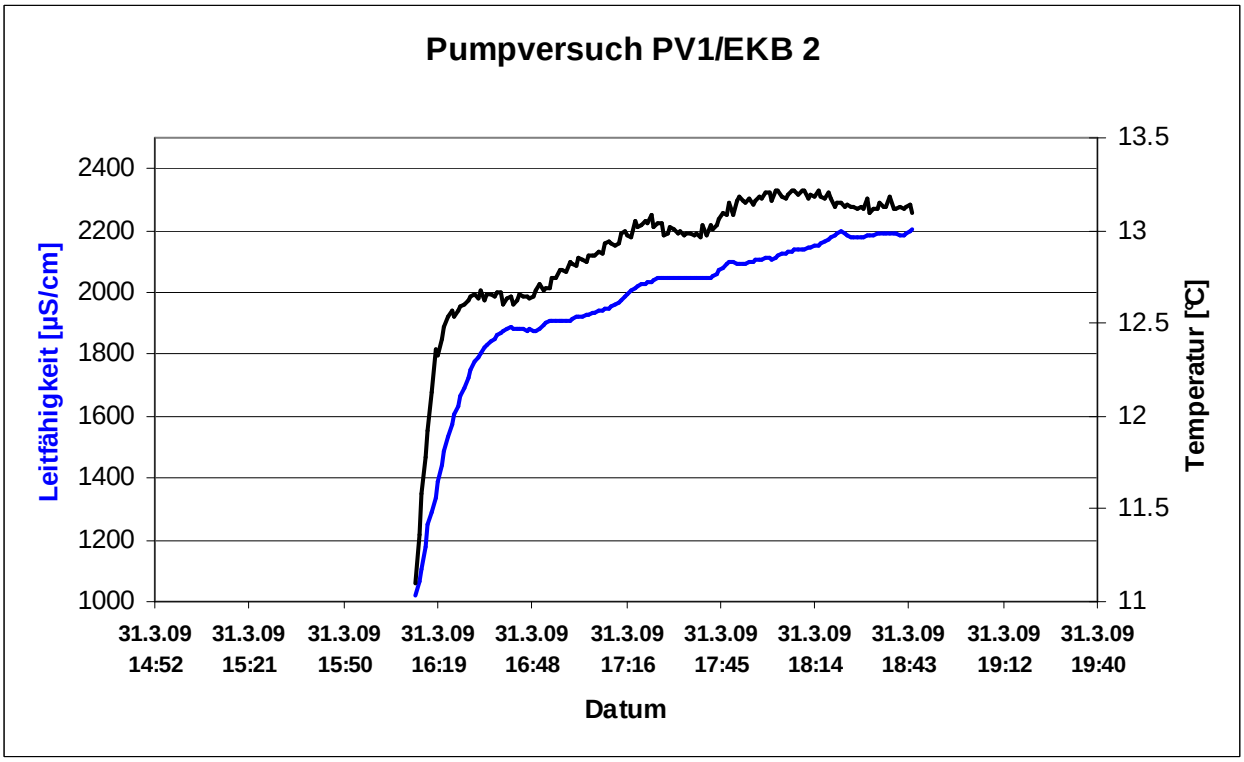


Abb. 5.24: Pumpversuch PV1/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

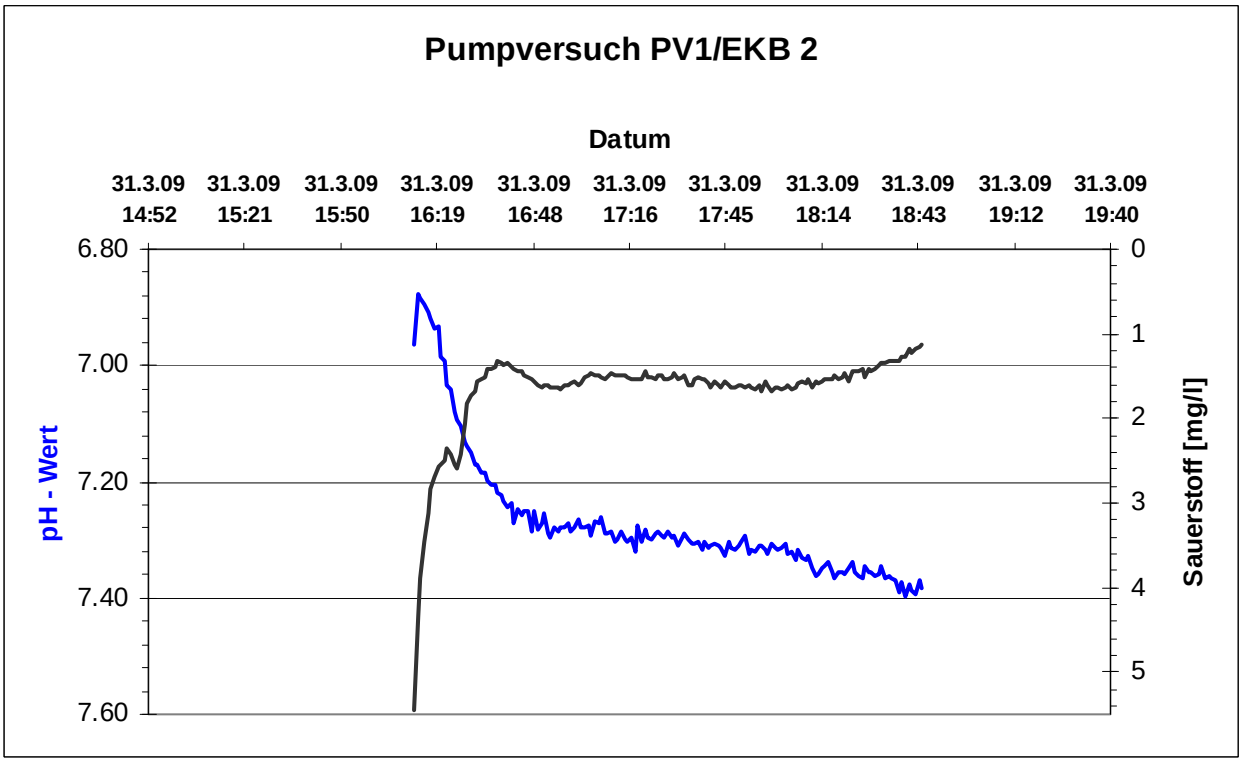


Abb. 5.25: Pumpversuch PV1/EKB 2: pH-Wert und Sauerstoffgehalt im entnommenen Grundwasser.

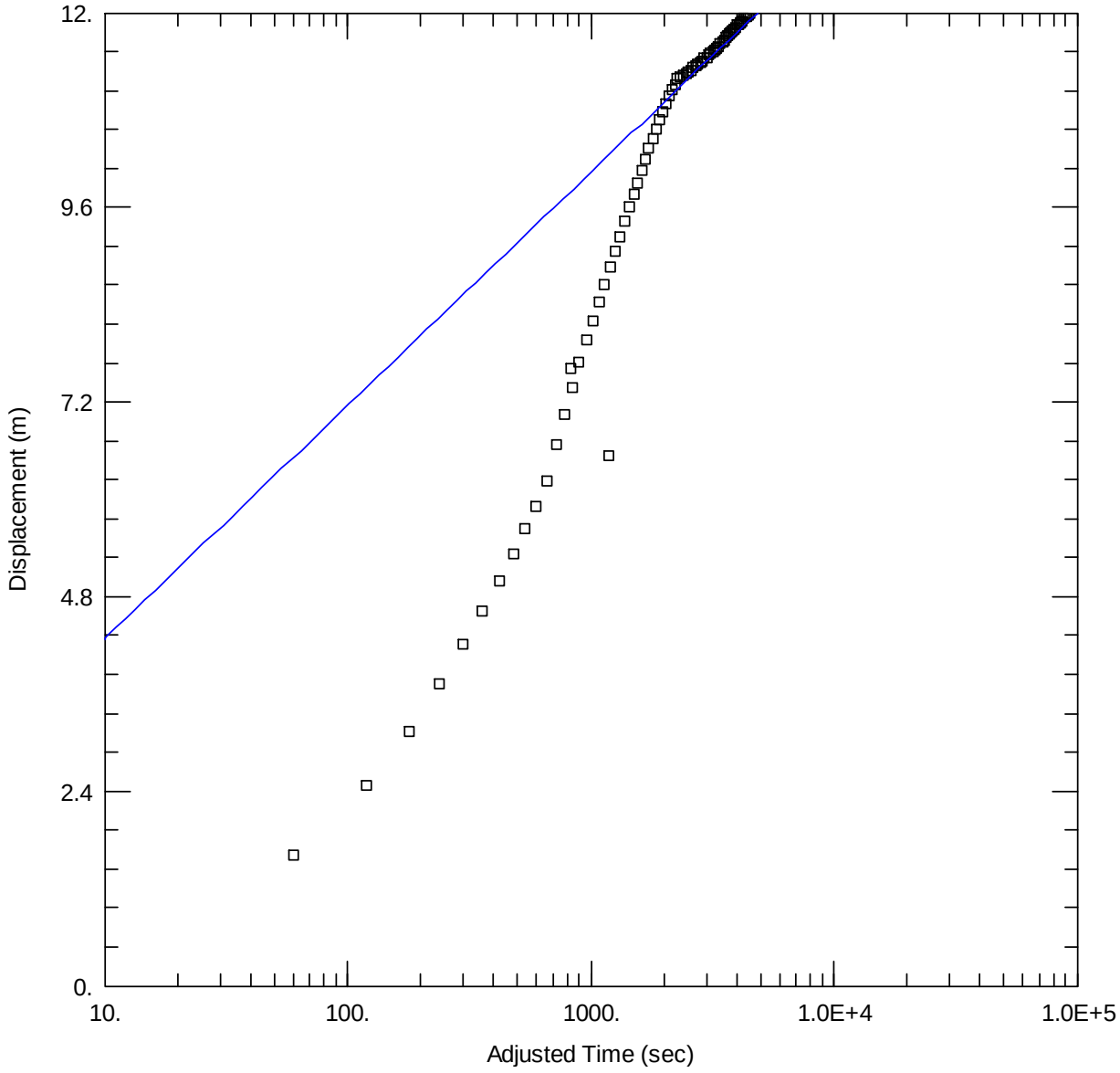


Abb. 5.26: Pumpversuch PV1/EKB 2: Auswertung der Absenkung nach COOPER & JACOB.

PV2/EKB 2 (Gipskeuper-Formation, km1, Gipskarst)

Am 23. April 2009 ab 9:43 Uhr wurde in der Erkundungsbohrung EKB 2 ein zweistufiger Pumpversuch mit einer ca. achtstündigen Absenkphase mit einer Entnahmerate von ca. 3,0 l/s (erste Pumpstufe bis 23. April 2009, 12:05 Uhr) bzw. 4,1 l/s (zweite Pumpstufe bis 23. April 2009, 17:43 Uhr) durchgeführt. Der Wiederanstieg wurde bis 24. April 2009, 07:14 Uhr gemessen (Tab. 5.12, Abb. 5.27).

Getestet wurde der Abschnitt der Gipskeuper-Formation im Bereich des Gipskarstes bis in eine Tiefe von 28 m u. GOK. Der Obere Gipsspiegel liegt bei 28,65 m u. GOK. Der obere Abschnitt der Bohrung war bis 13,70 m u. GOK durch das 1. Standrohr abgesperrt, das Kernrohr stand bei 25,15 m. Nach dem ersten Auftreten von Gipsauslaugungsresiduen (GAR) bei 22,40 m u. GOK wurde ab 25,45 m u. GOK wiederholt Kernverlust festgestellt (vgl. Profilbeschreibung zur EKB 2 in Anl. 5.6 a).

Der Ruhewasserspiegel lag bei Beginn des Pumpversuches bei 3,31 m u. GOK, am Ende der Wiederanstiegsphase bei 3,41 m u. GOK (Tab. 5.12). Der Grundwasserstand wurde am Ende der ersten Pumpstufe bei der Entnahmerate von 3,0 l/s um 4,01 m auf 7,32 m u. GOK, am Ende der zweiten Pumpstufe bei einer Entnahmerate von 4,3 l/s um 8,69 m u. GOK auf 12,00 m u. GOK abgesenkt (Abb. 5.27).

Die Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS liefert eine **Transmissivität T = 1,4 • 10^{-5} m²/s** (Abb. 5.30). Bei einer hydraulisch getesteten Kernstrecke von H = 14,30 m ergibt sich daraus eine Profildurchlässigkeit T/H = 1 • 10^{-6} m/s.

Die Pumpmaßnahme in der EKB 2 führte zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels in der EKB 1 um 0,23 m (Abb. 5.28).

Die kontinuierlich digital aufgezeichnete elektrische Leitfähigkeit des geförderten Wassers nahm in der EKB 2 während des Pumpversuches kontinuierlich von 2850 µS/cm auf 2670 µS/cm ab. Am 23. April um 16:02 Uhr stieg sie sprunghaft auf 2770 µS/cm an, um danach bis zum Ende der Pumpphase wieder auf 2740 µS/cm abzusinken (Abb. 5.29). Die Temperatur schwankte zwischen 13,0 °C und 13,2 °C. Der pH-Wert fiel im Laufe des Versuchs von 7,21 in der Anfangsphase kontinuierlich auf ca. 6,85 am Ende ab. Das geförderte Grundwasser ist reduziert. Der Sauerstoffgehalt nahm kurz nach Pumpversuchsbeginn von 2,57 mg/l auf 0,12 mg/l ab, stieg bei der Entnahmeratensteigerung kurzfristig auf 0,84 mg/l an und sank anschließend wieder auf 0,04 mg/l ab. Möglicherweise sind die höheren Sauerstoffgehalte zu Beginn der beiden Pumpphasen messtechnisch bedingt.

Tab. 5.12: Pumpversuchsablauf PV2/EKB 2 am 23. April 2009 in der Erkundungsbohrung EKB 2.

Phase	Datum, Uhrzeit	Flurabstand [m u. GOK]	Absenkung [m]	Entnahmerate [l/s]
Beginn PV	23.04.2009 9:43	3,31		
Ende erste Pumpstufe	23.04.2009 12:05	7,32	4,01	3,0 l/s
Ende zweite Pumpstufe	23.04.2009 17:43	12,00	8,69	4,3 l/s
Ende Wiederanstieg	24.04.2009 7:14	3,41		0

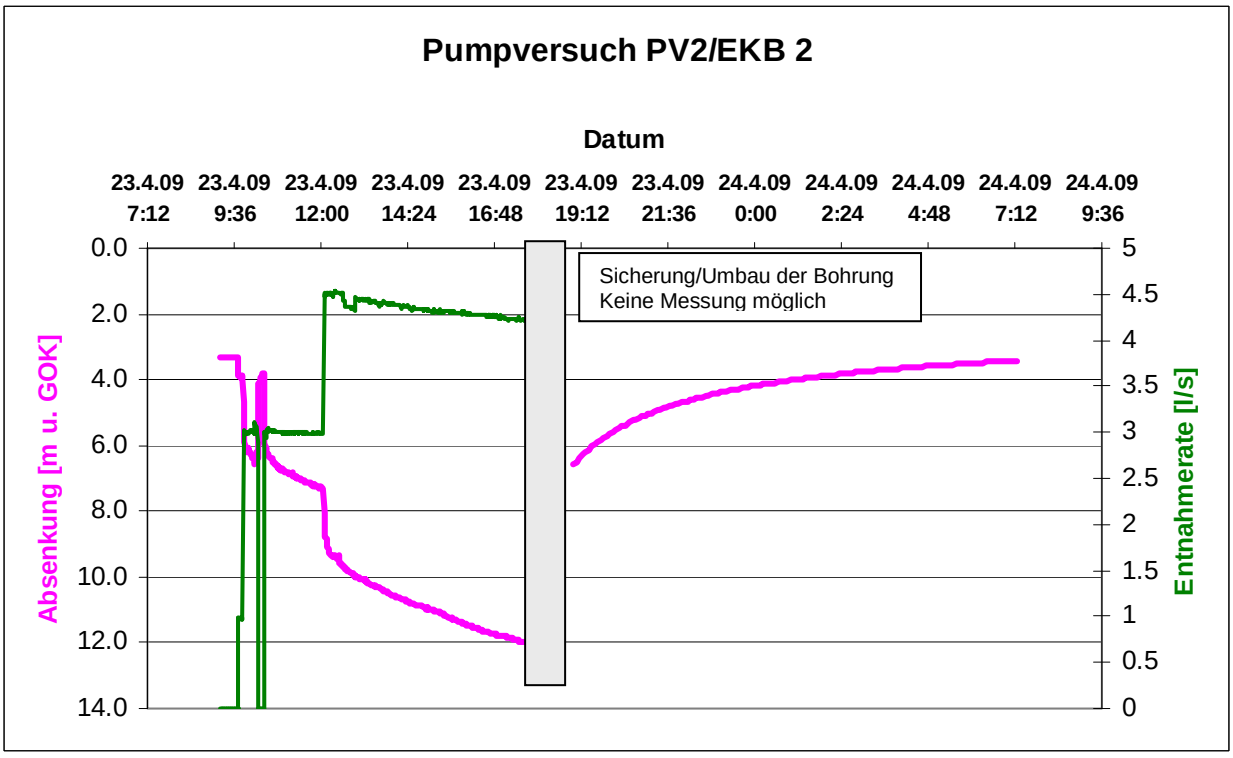


Abb. 5.27: Pumpversuch PV2/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

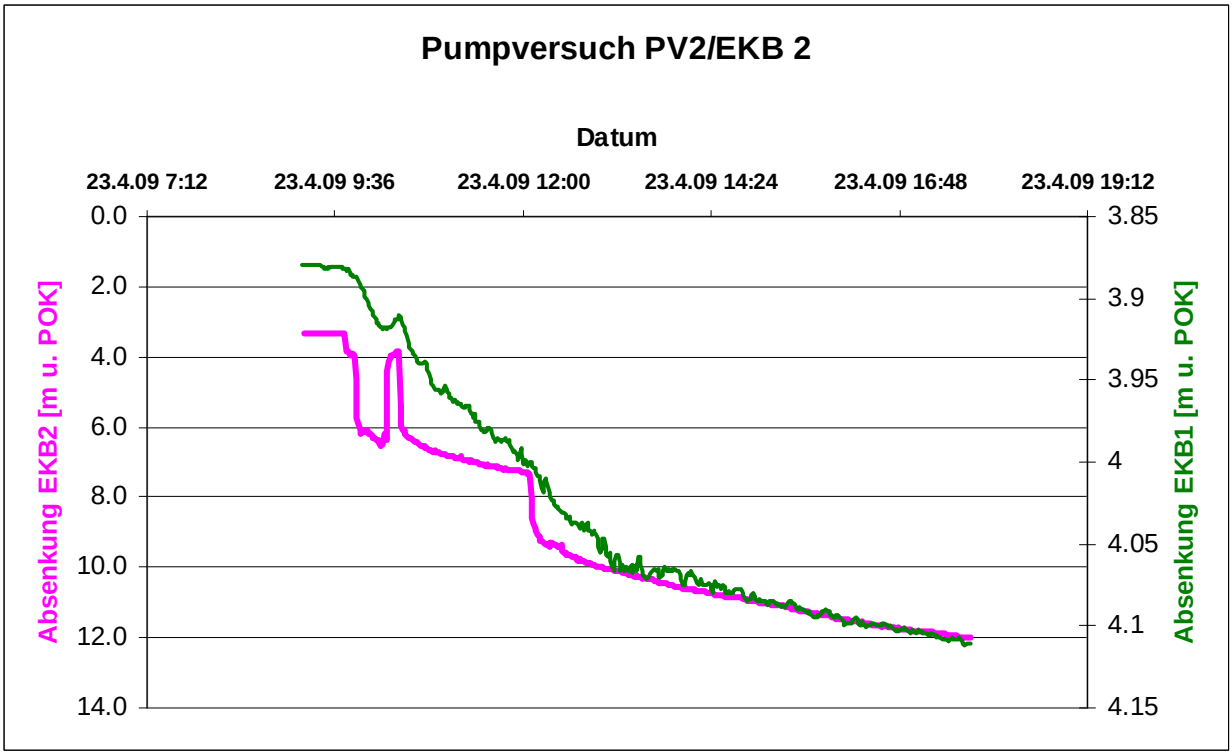


Abb. 5.28: Pumpversuch PV2/EKB 2: Verlauf der Absenkung in den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 während des Pumpversuches PV2 in der Erkundungsbohrung EKB 2.

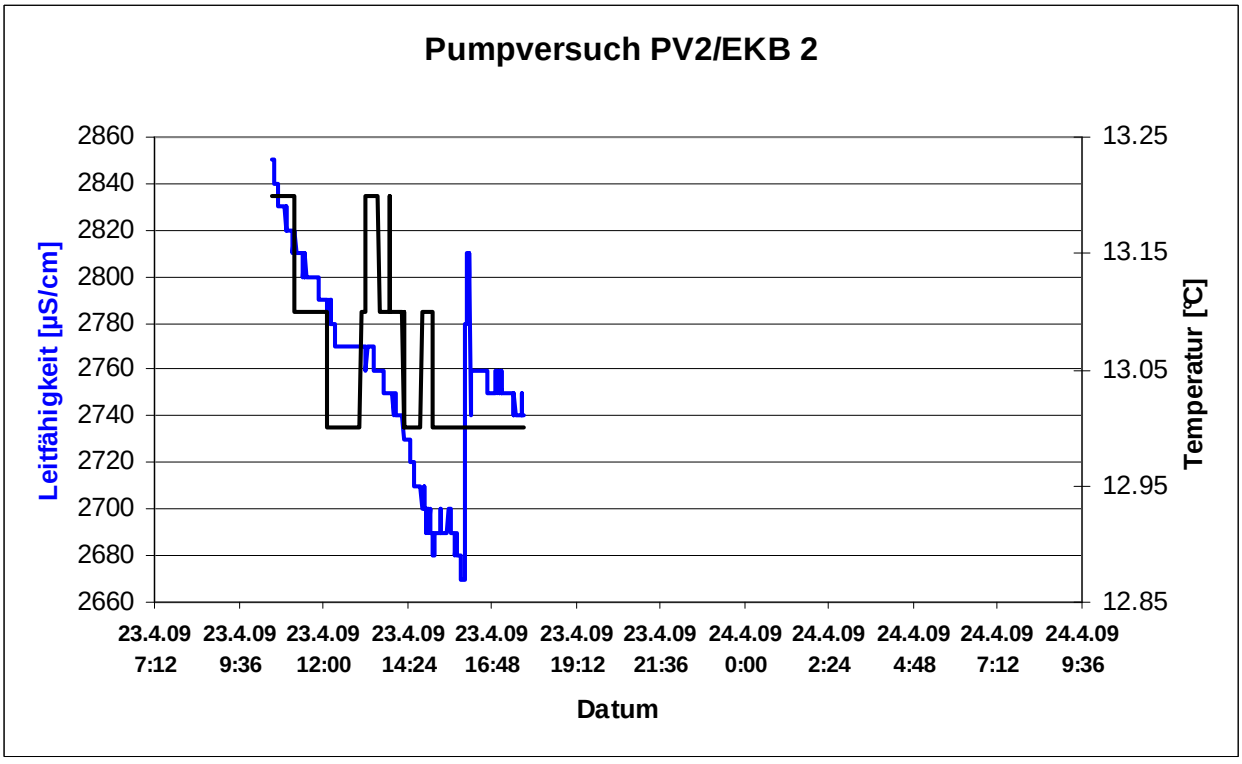


Abb. 5.29: Pumpversuch PV2/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

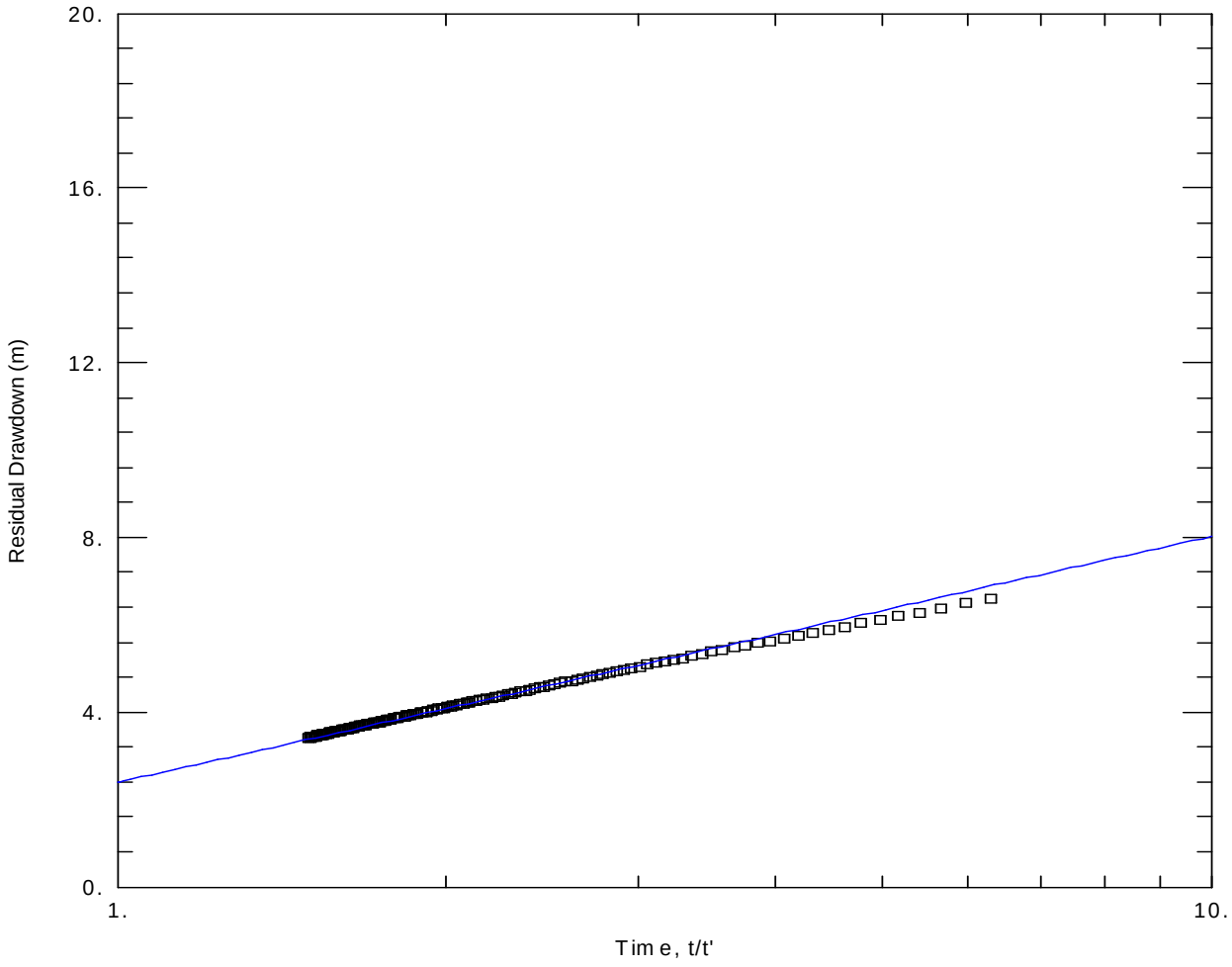


Abb. 5.30: Pumpversuch PV2/EKB 2: Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS.

Pumpversuch PV3/EKB 2 (Unterkeuper)

In der Zeit vom 24. September 2009, 10:12 Uhr, bis 12. Oktober 2009, 8:59 Uhr, wurden in der EKB 2 im Tiefenabschnitt 145,2 m u. GOK bis 153,0 m u. GOK zwei Pumpversuche durchgeführt (Abb. 5.31). Der erste Pumpversuch (PV3/EKB 2) musste wegen technischer Probleme vorzeitig abgebrochen werden.

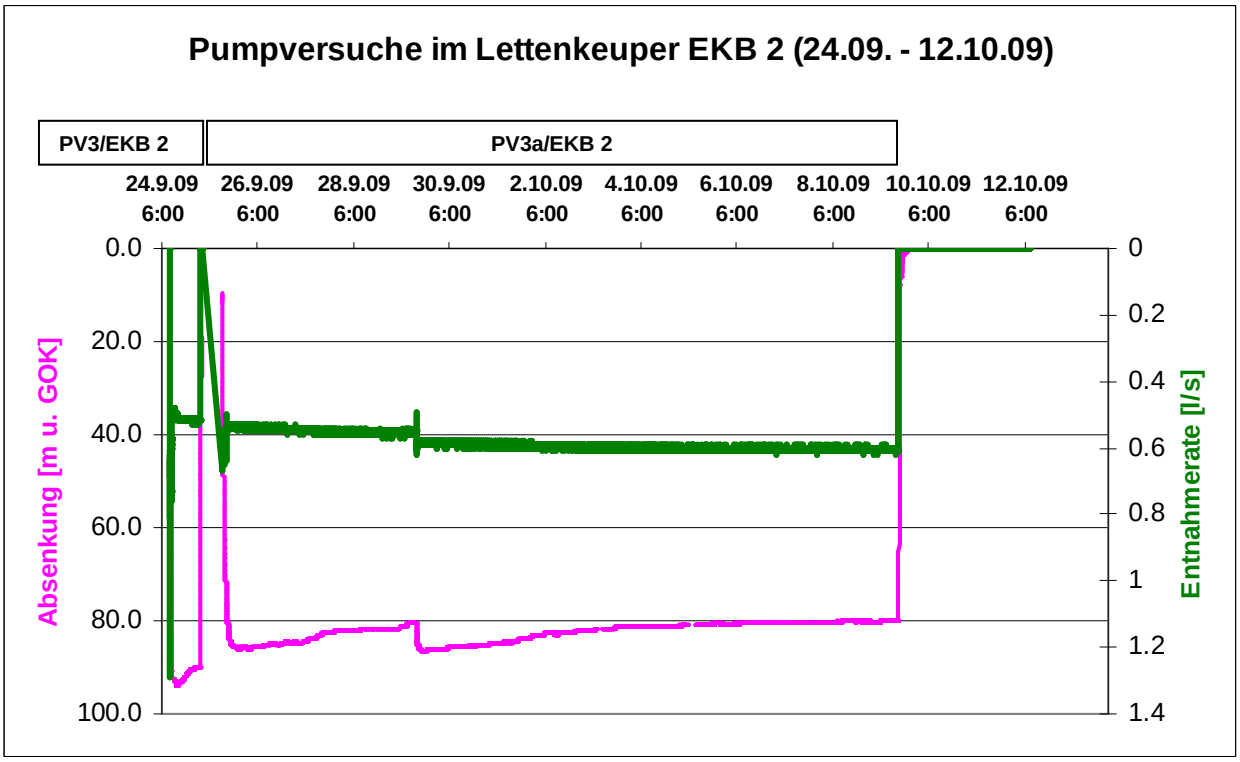


Abb. 5.31: Übersicht über die Pumpversuche vom 24. September bis 12. Oktober 2009 in der Erkundungsbohrung EKB 2 im Tiefenabschnitt 145,2 m u. GOK bis 153,0 m u. GOK.

Am 24. September 2009 ab 10:12 Uhr wurde in der Erkundungsbohrung EKB 2 ein einstufiger Pumpversuch mit einer ca. vierzehnstündigen Absenkphase bei einer Entnahmerate von ca. 0,55 l/s durchgeführt (PV3/EKB 2). Der Pumpbetrieb endete am 25. September 2009, 0:54 Uhr wegen Stromausfall (Tab. 5.13, Abb. 5.32). Die Messung des Wiederanstiegs brach am 25. September 2009, 1:57 Uhr, ab. Getestet wurde der Unterkeuper zwischen der Unterkante des 4. Sperrrohres bei 145,2 m u. GOK bis in eine Tiefe von 153 m u. GOK.

Der Ruhewasserspiegel lag zu Beginn des Pumpversuches bei 0,77 m ü. GOK. Der Grundwasserstand wurde am Ende der Pumpstufe bei der Entnahmerate von 0,55 l/s um 90,38 m u. GOK auf 89,61 m u. GOK abgesenkt (Abb. 5.32). Der Wasserspiegel stand am Ende der messtechnisch bedingt frühzeitig abgebrochenen Wiederanstiegsphase bei

18,99 m u. GOK (Tab. 5.13). Zu diesem Zeitpunkt war der Ruhewasserspiegel noch nicht erreicht.

Aufgrund der starken Entnahmeratenschwankungen bei Pumpbeginn und des Ausfalls der digitalen Aufzeichnungen in der Wiederanstiegsphase kann der Pumpversuch hydraulisch nicht ausgewertet werden.

Die Pumpmaßnahme in der EKB 2 führte zu keiner Absenkung des Grundwasserspiegels in der EKB 1.

Die kontinuierlich digital aufgezeichnete elektrische Leitfähigkeit des geförderten Wassers nahm in der EKB 2 während des Pumpversuches stetig von 4200 µS/cm auf 2100 µS/cm ab (Abb. 5.33). Die Temperatur stieg von 14,9 °C zu Beginn des Pumpversuchs im weiteren Verlauf auf 16,4 °C an (Temperaturansti eg durch Pumpenerwärmung). Der pH-Wert fiel im Laufe des Versuchs von anfänglich unplausibel messtechnisch oder durch Bohrspülungseinfluss bedingten hohen Werten von über 12 auf 7,1 ab (Abb. 5.34). Das geförderte Grundwasser ist reduziert. Der Sauerstoffgehalt nahm nach anfänglichen starken Schwankungen auf 0,1 mg/l bis 0,2 mg/l ab. Wahrscheinlich sind die höheren Sauerstoffgehalte zu Beginn der Pumpphase messtechnisch bedingt.

Tab. 5.13: Pumpversuchsablauf PV3 am 24. September 2009 in der Erkundungsbohrung EKB 2.

Phase	**Datum, Uhrzeit**	**Flurabstand [m u. GOK]**	**Absenkung [m u. GOK]**	**Entnahmerate [l/s]**
Beginn PV	24.09.2009 10:12	-0,77 **(über Gelände)**		
Ende PV (Stromausfall)	25.09.2009 00:54	89,61	90,39	ca. 0,55
Ende Wiederanstieg	25.09.2009 01:57 Uhr abgebrochen	18,99 Ruhewasserspiegel nicht erreicht		0

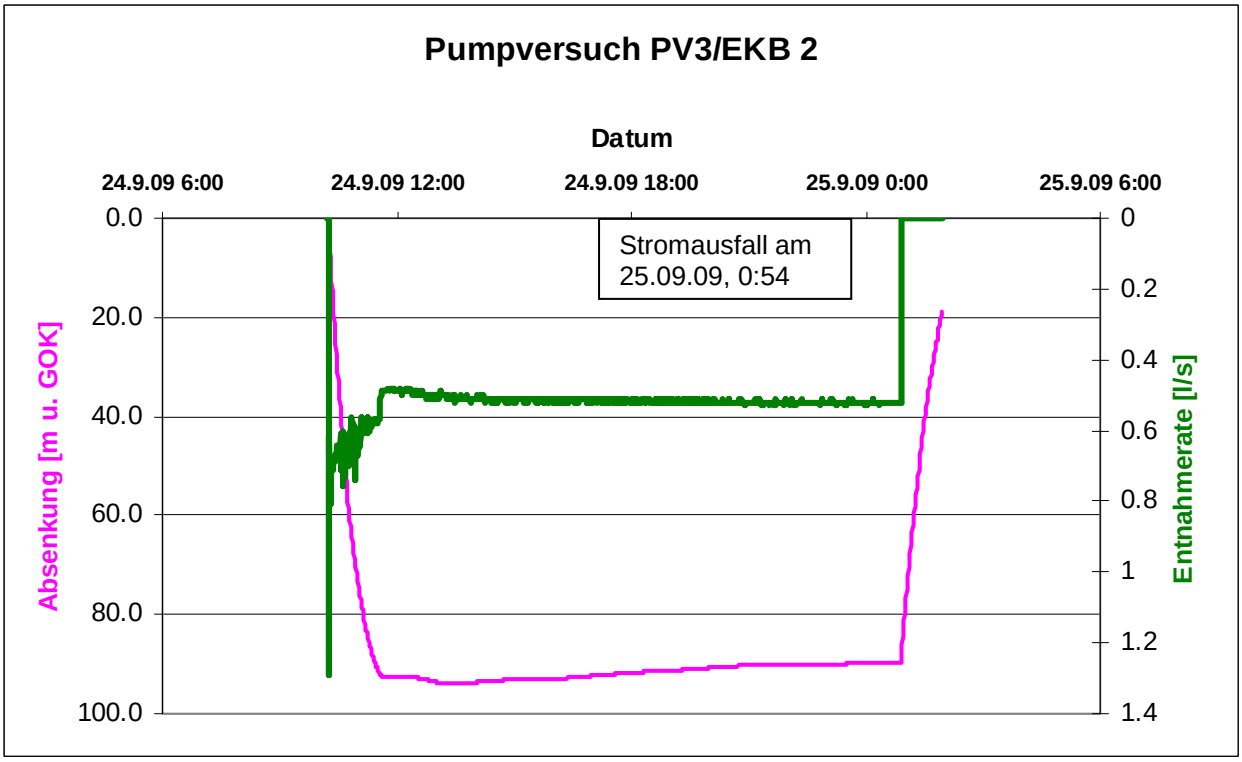


Abb. 5.32: Pumpversuch PV3/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

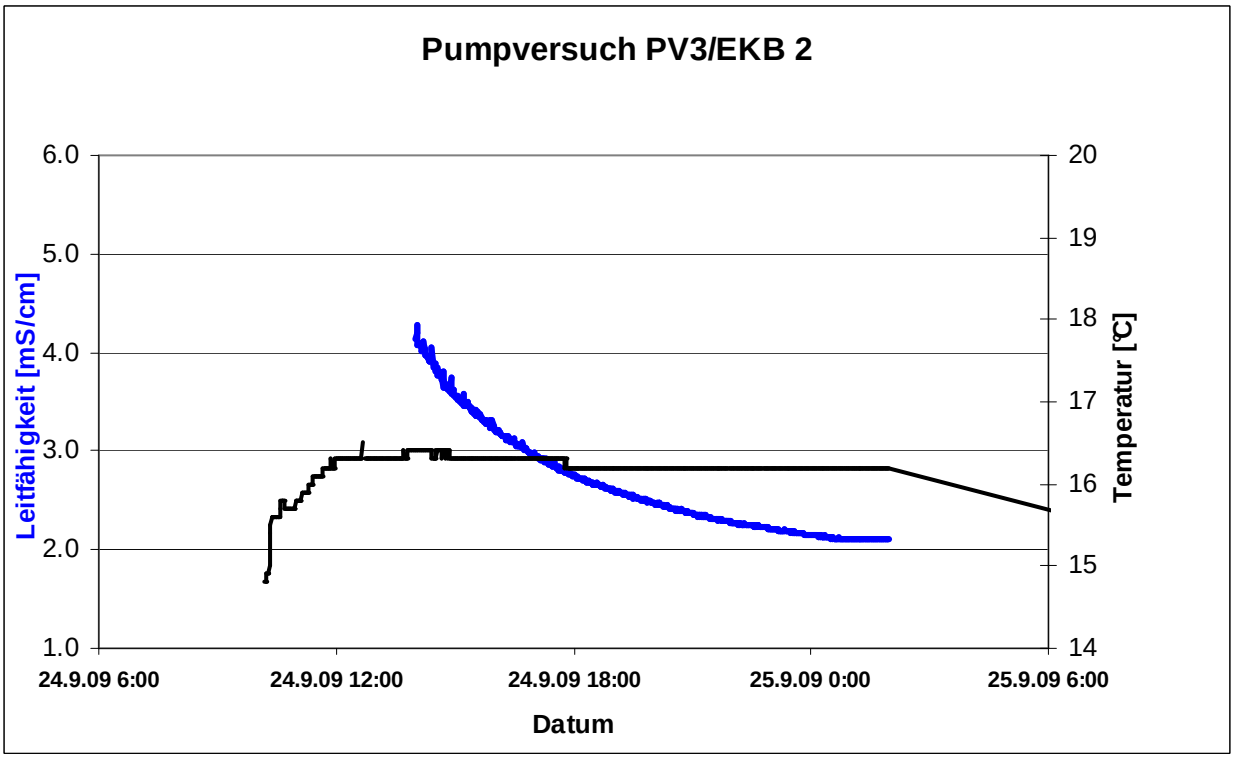


Abb. 5.33: Pumpversuch PV3/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

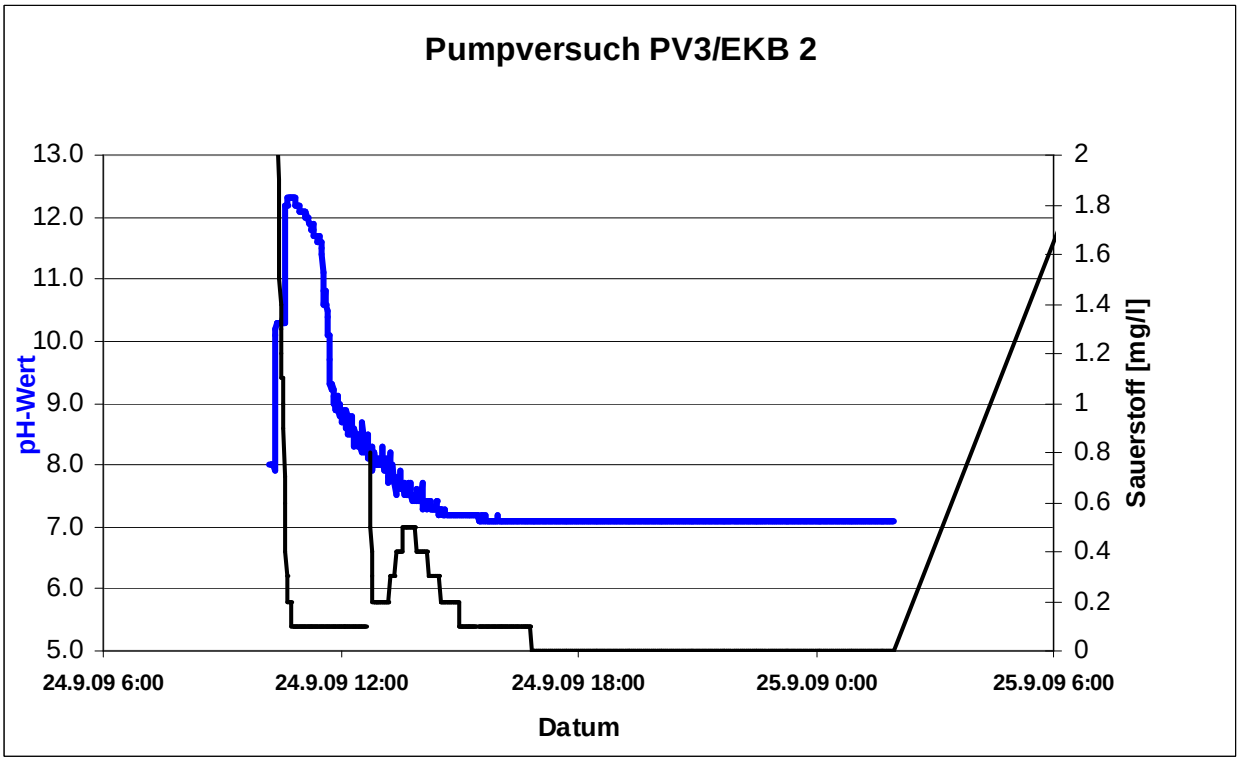


Abb. 5.34: Pumpversuch PV3/EKB 2: pH-Wert und Sauerstoff im entnommenen Grundwasser

Pumpversuch PV3a/EKB 2 (Unterkeuper)

Vom 25. September 2009, 12:11 Uhr, bis 09. Oktober 2009, 15:03 Uhr wurde in der EKB 2 ein weiterer, zweistufiger Pumpversuch im Unterkeuper zwischen der Unterkante des 4. Sperrrohres bei 145,2 m u. GOK und der damaligen Bohrlochsohle bei 153 m u. GOK durchgeführt.

Das 4. Sperrrohr reichte bis 0,77 m über Gelände. Das artesisch gespannte Grundwasser trat zu Beginn des Pumpversuchs auf diesem Niveau frei aus. Eine Messung des Ruhewasserspiegels konnte nicht erfolgen, da ein Totstau des artesisch auslaufenden Grundwassers aus technischen Gründen nicht möglich war.

Der Grundwasserstand wurde am Ende der ersten Pumpstufe bei der Entnahmerate von 0,55 l/s um 89,61 m u. GOK auf 80,47 m u. GOK, am Ende der zweiten Pumpstufe auf 80,00 m u. GOK abgesenkt (Abb. 5.35). Der Wiederanstieg wurde bis 12. Oktober 2009, 08:59 Uhr gemessen (Tab. 5.14, Abb. 5.35).

Die Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS liefert eine **Transmissivität T = $4{,}8 \cdot 10^{-5}$ m²/s** (Abb. 5.37). Bei einer hydraulisch getesteten Kernstrecke von H = 7,8 m ergibt sich daraus eine Profildurchlässigkeit T/H = $6{,}1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Die Pumpmaßnahme in der EKB 2 fiel in einen Zeitraum mit generell fallendem Trend des Grundwasserstandes in der EKB 1 (Abb. 5.22). Sie führte zu keiner entnahmebedingten Absenkung des Grundwasserspiegels in der EKB 1.

Die stark abweichenden physikalisch-chemischen Parameter zu Beginn des Pumpversuches dürften auf Restmengen von Fremdwasser (Spülungsflüssigkeit) in der Bohrung zurückzuführen sein. Die kontinuierlich digital aufgezeichnete elektrische Leitfähigkeit des geförderten Wassers nahm in der EKB 2 während des Pumpversuches gleichmäßig von 2700 µS/cm am 25. September 2009 um 13:11 Uhr bis zum Ende der Pumpphase auf 1260 µS/cm ab (Abb. 5.36). Die Temperatur schwankte zwischen 15,7 ℃ und 15,8 ℃ . Der pH-Wert lag zwischen 7,0 und 7,1. Das geförderte Grundwasser ist reduziert. Der Sauerstoffgehalt lag zwischen 0 mg/l und 0,2 mg/l.

Tab. 5.14: Pumpversuchsablauf PV3a/EKB 2 vom 25. September bis 12. Oktober 2009 in der Erkundungsbohrung EKB 2.

Phase	**Datum, Uhrzeit**	**Flurabstand [m u. GOK]**	**Absenkung [m u. GOK]**	**Entnahmerate [l/s]**
Ruhewasserspiegel		mindestens 0,77 m **über** Gelände (freier Auslauf)		
Beginn PV	25.09.2009 12:11			
Ende Erste Pumpstufe	29.09.2009 13:09	mindestens 81,24	80,47	0,55
Ende Zweite Pumpstufe	09.10.2009 15:03	mindestens 80,77	80,00	0,6
Ende Wiederanstieg	12.10.2009 08:59	mindestens 1,20 m über GOK (freier Auslauf)		

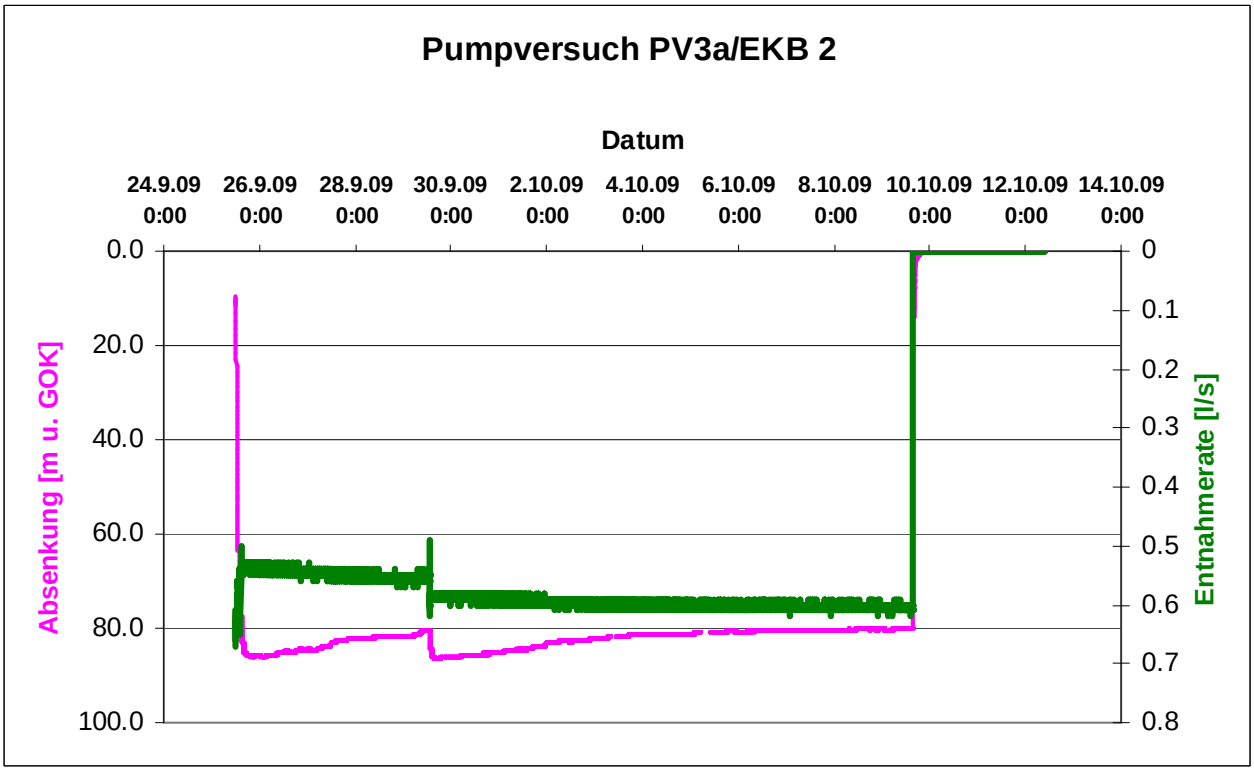


Abb. 5.35: Pumpversuch PV3a/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

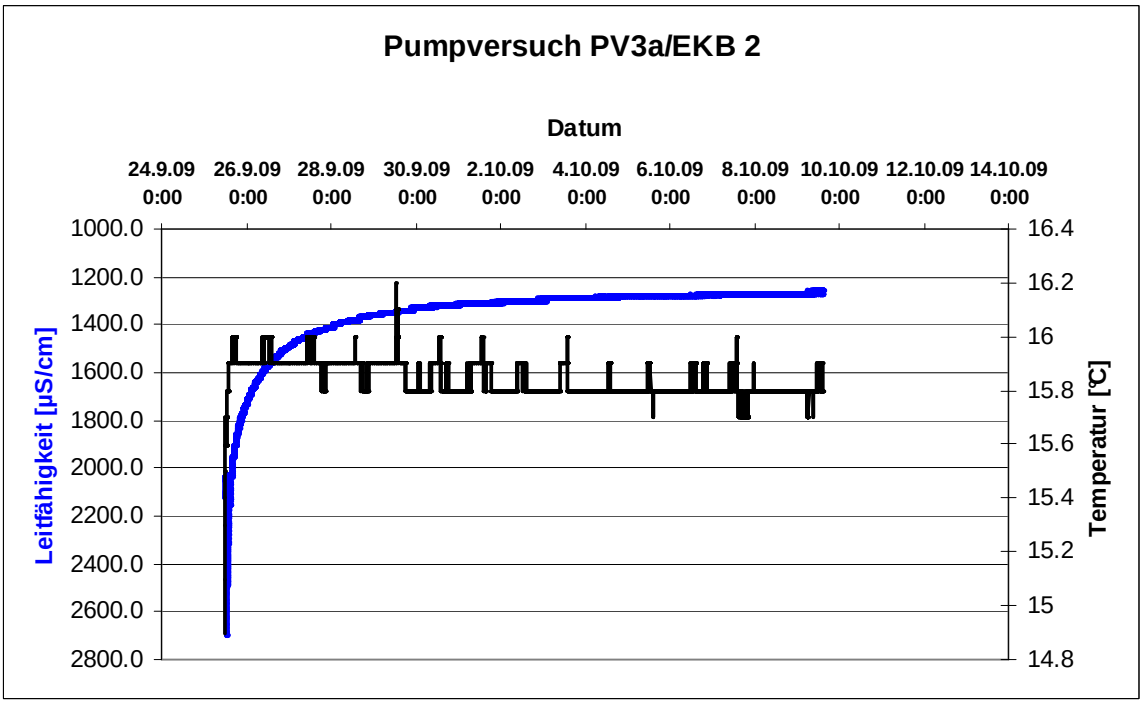


Abb. 5.36: Pumpversuch PV3a/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

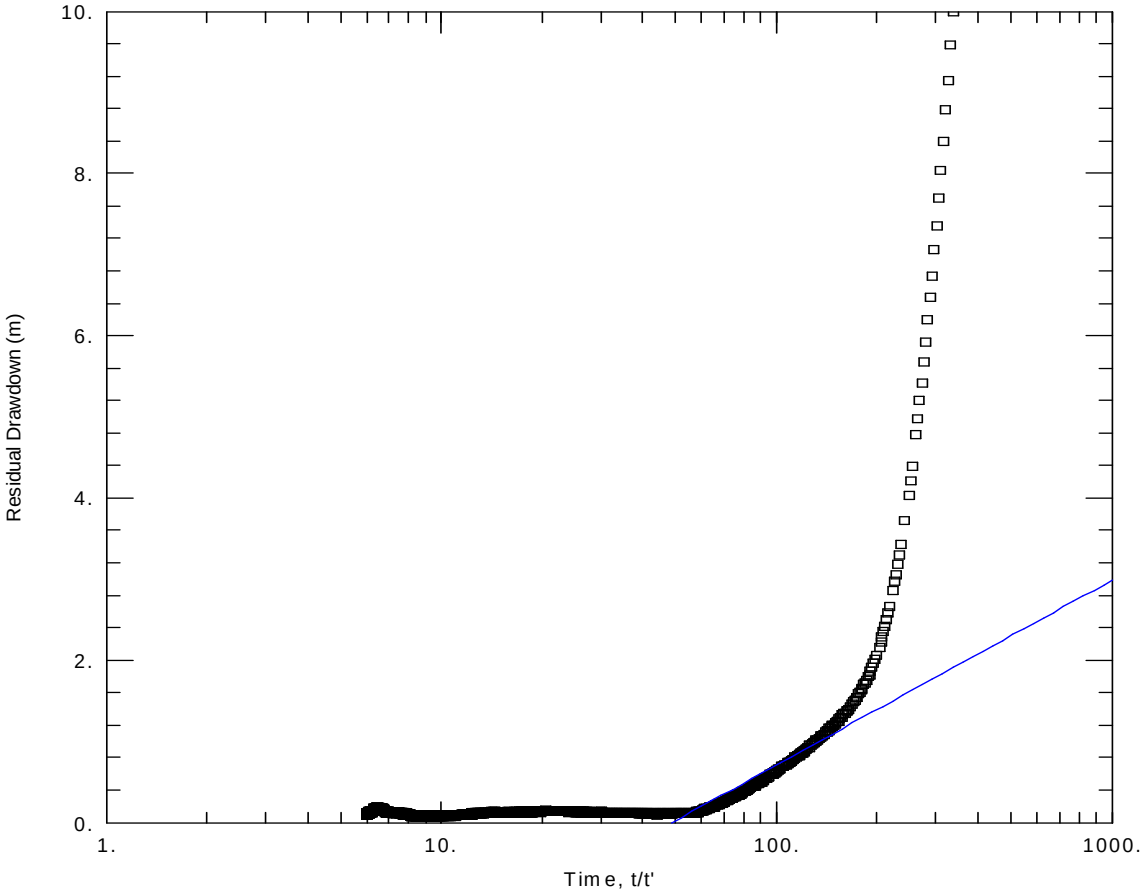


Abb. 5.37: Pumpversuch PV3a/EKB 2: Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS.

Pumpversuch PV3b/EKB 2 (Unterkeuper)

Vom 12. Oktober 2009, 18:40 Uhr, bis 17. Oktober 2009, 12:30 Uhr, wurde in der EKB 2 ein weiterer Pumpversuch im Unterkeuper zwischen der Unterkante des 4. Sperrrohres bei 145,2 m u. GOK bis in eine Tiefe von 153 m u. GOK durchgeführt (Tab. 5.15, Abb. 5.38). Die Pumpe war bei 132 m u. GOK eingehängt. Zu Beginn des Pumpversuches lief das artesisch gespannte Grundwasser in einer aufgestauten Höhe von 1,20 m über Gelände frei aus.

Der Grundwasserstand wurde am Ende der Pumpstufe bei der Entnahmerate von ca. 0,90 l/s bis 0,95 l/s um mindestens 125,13 m auf 123,93 m u. GOK abgesenkt (Abb. 5.38). Der Wiederanstieg wurde bis 20. Oktober 2009, 08:45 Uhr, gemessen. Das totgestaute Grundwasser stieg auf 1,83 m über Gelände an.

Die Auswertung des Wiederanstiegs nach Theis liefert eine **Transmissivität** **$T = 3{,}5 \cdot 10^{-5}$ m²/s** (Abb. 5.42). Bei einer hydraulisch getesteten Kernstrecke von H = 7,8 m ergibt sich daraus eine Profildurchlässigkeit $T/H = 4{,}5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Sie liegt in der Größenord-

nung, die für den gleichen Testabschnitt beim Pumpversuch PV3a/EKB 2 ermittelt wurde (s. o.).

Während der Pumpmaßnahme in der EKB 2 sank der Grundwasserspiegel in der EKB 1 um bis 0,03 m (Abb. 5.41), wobei der Wiederanstieg bereits etwas früher als in der EKB 2 einsetzte (17. September 2009, 9:10 Uhr). Eine direkte Auswirkung der Entnahme aus der EKB 2 auf die EKB 1 kann daraus nicht abgeleitet werden. Diesem generellen Trend ist in der EKB 1 ein kurzfristiger Gang mit wiederholten Schwankungen des Grundwasserspiegels in der Größenordnung von wenigen Millimetern überlagert.

Die abweichenden physikalisch-chemischen Parameter zu Beginn des Pumpversuches dürften auf Restmengen von Fremdwasser (Spülungsflüssigkeit) in der Bohrung zurückzuführen sein. Die kontinuierlich digital aufgezeichnete elektrische Leitfähigkeit des geförderten Wassers lag in der EKB 2 zu Beginn des Pumpversuches bei 1270 µS/cm, stieg im weiteren Verlauf auf 1290 µS/cm an und sank am Ende des Pumpversuches auf 1250 µS/cm (Abb. 5.39). Die Temperatur schwankte zwischen 15,7 ℃ und 16,0 ℃. Der pH-Wert lag zwischen 7,0 und 7,1 (Abb. 5.40). Das geförderte Grundwasser ist reduziert. Der Sauerstoffgehalt lag am Anfang des Pumpversuches bei 0 mg/l und stieg in der zweiten Hälfte des Pumpversuches auf 0,5 mg/l an. Am Ende sank der Sauerstoffgehalt wieder auf 0 mg/l. (Abb. 5.40).

Tab 5.15: Pumpversuchsablauf PV3b/EKB 2 vom 12. Oktober 2009 bis 17. Oktober 2009 in der Erkundungsbohrung EKB 2.

Phase	**Datum, Uhrzeit**	**Flurabstand [m u. GOK]**	**Absenkung [m u. GOK]**	**Entnahmerate [l/s]**
Beginn PV	12.10.2009 18:40	1,20 m ü. GOK freier Auslauf, kein Ruhewasserspiegel		0,90 - 0,95
Ende Pumpstufe	17.10.2009 12:30	123,93	125,13	
Ende Wiederanstieg	20.10.2009 8:45	1,83 m **über Gelände**		

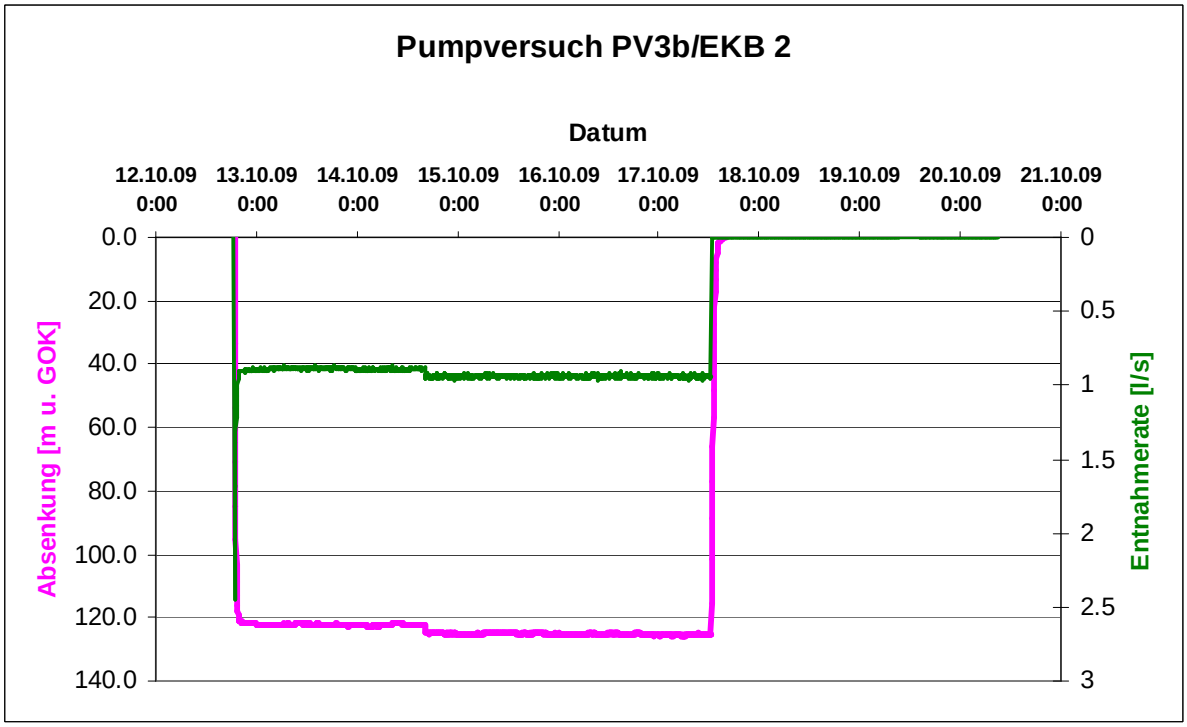


Abb. 5.38: Pumpversuch PV3b/EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

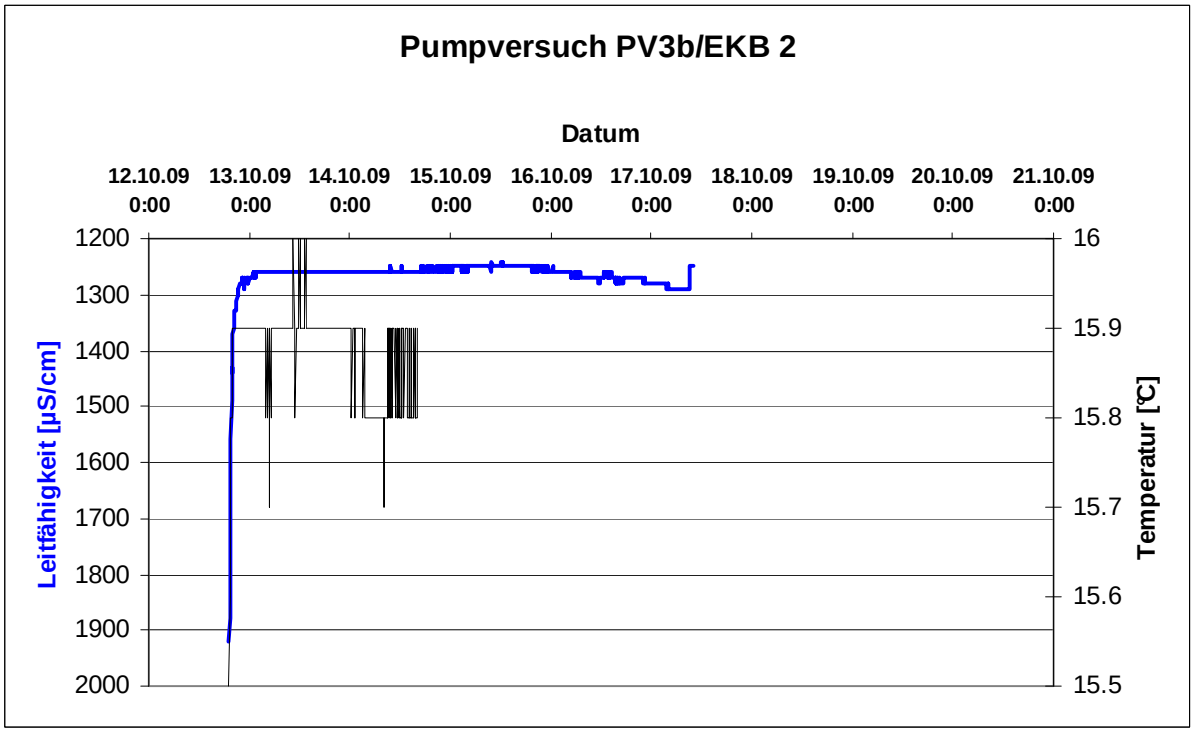


Abb. 5.39: Pumpversuch PV3b/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

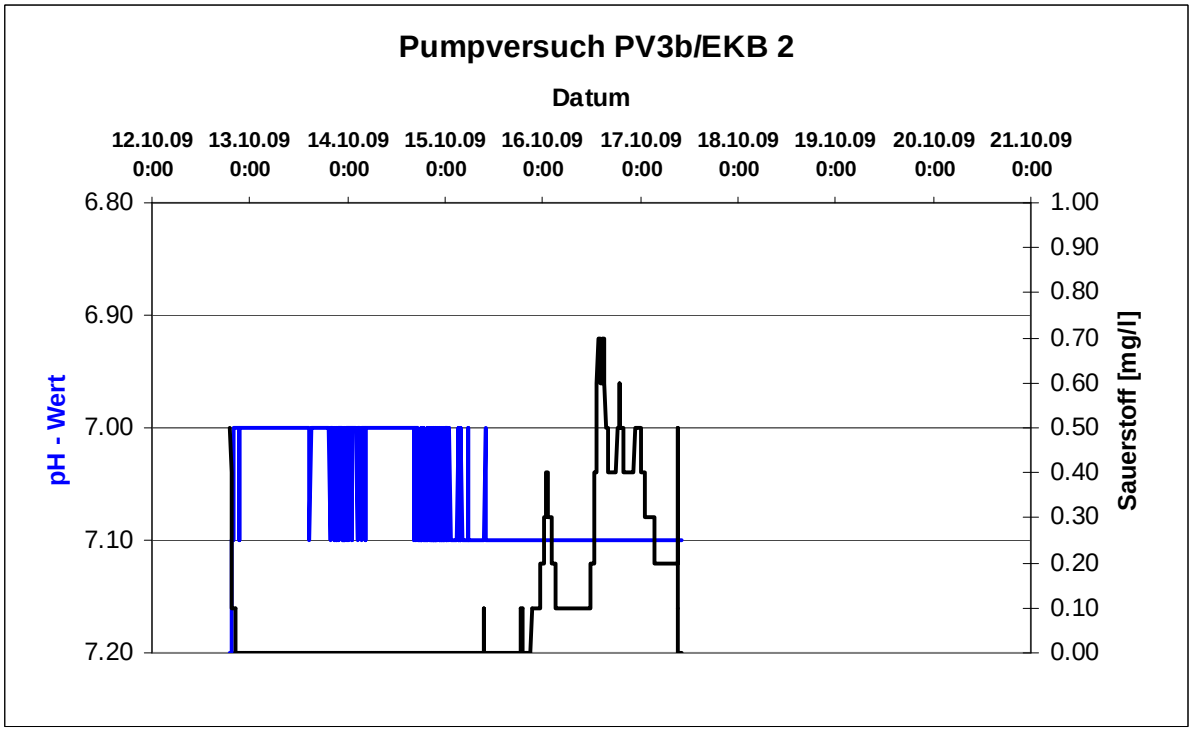


Abb. 5.40: Pumpversuch PV3b/EKB 2: pH-Wert und Sauerstoff im entnommenen Grundwasser.

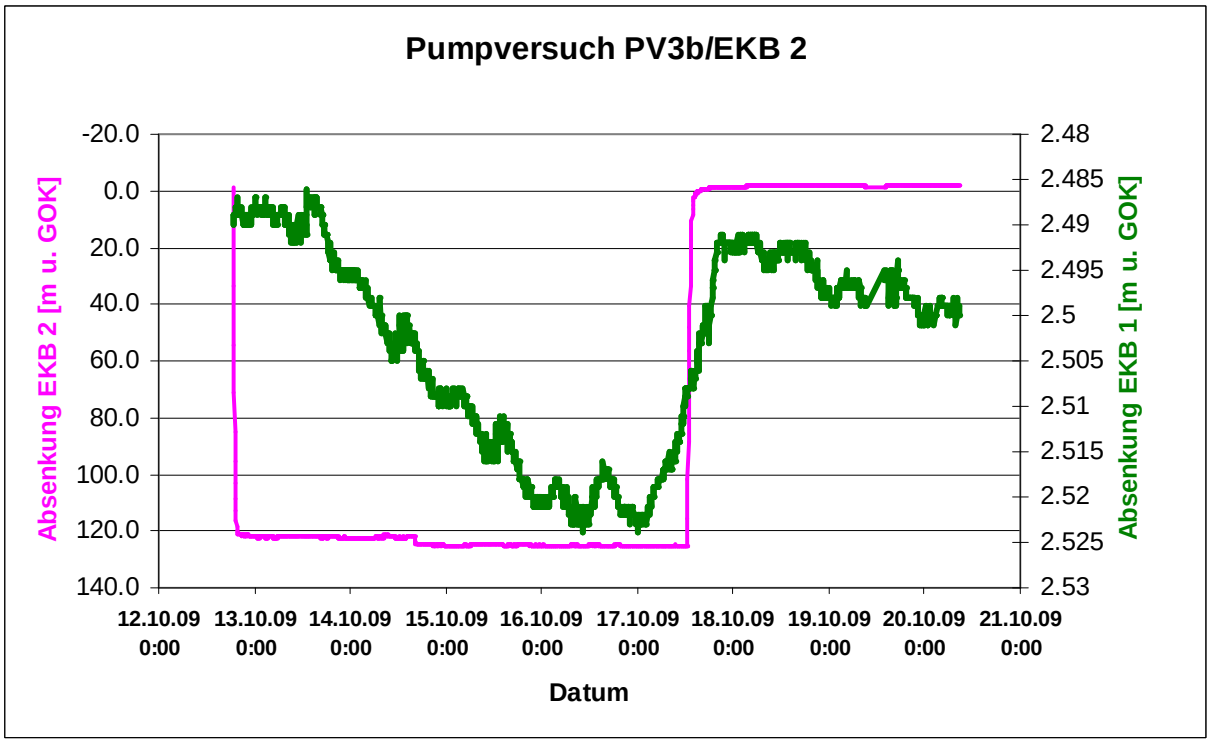


Abb. 5.41: Pumpversuch PV3b/EKB 2: Wasserstandsänderungen in der EKB 2 und der EKB 1.

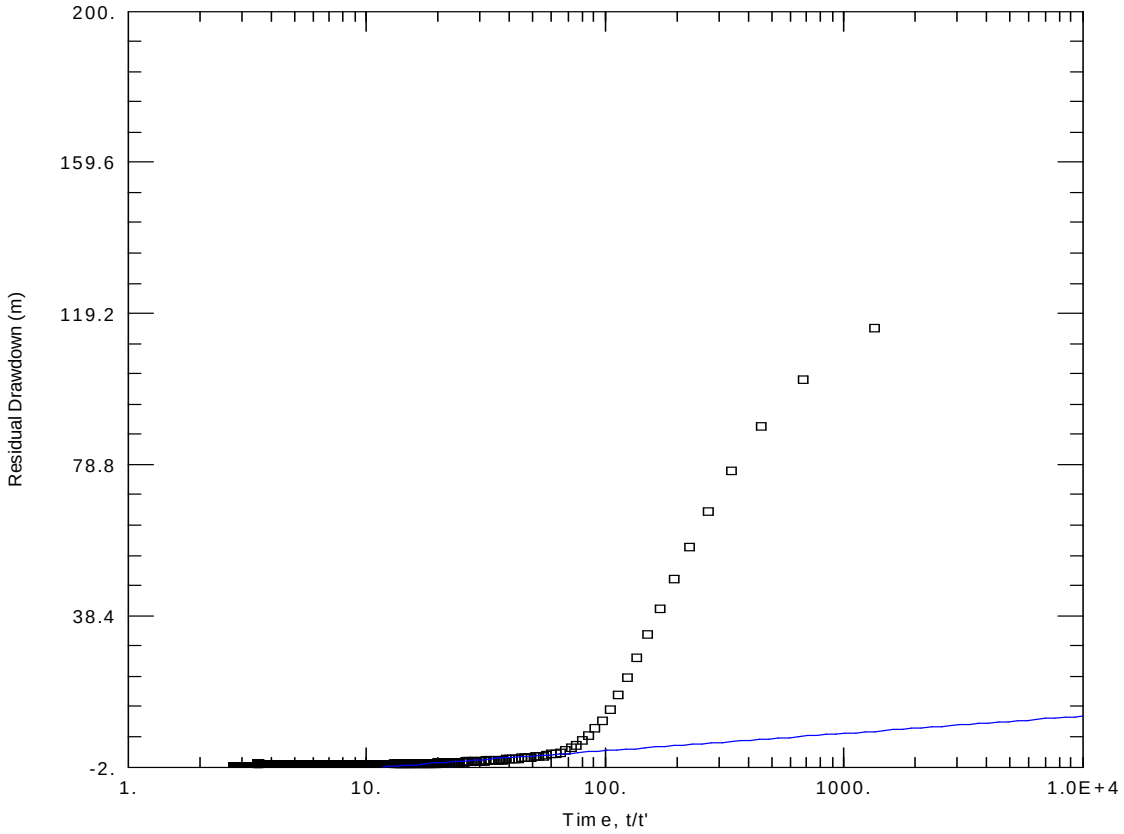


Abb. 5.42: Pumpversuch PV3b/EKB 2: Auswertung des Wiederanstiegs nach THEIS.

Pumpversuch PV4/EKB 2 (Oberer Muschelkalk)

Vom 22. Oktober 2009, 20:38 Uhr bis 25. Oktober 2009, 18:45 Uhr wurde in der EKB 2 ein Pumpversuch im Oberen Muschelkalk durchgeführt (Tab. 5.16, Abb. 5.43). Hierzu wurde im offenen Bohrloch bei 152,0 m u. GOK ein Packer gesetzt, um den darüber liegenden Abschnitt des Unterkeupers hydraulisch abzusperren. Die Bohrlochsohle lag bei 163,0 m u. GOK. Aufgrund eines Ausfalls der digitalen Datenaufzeichnung liegen ab dem 24. Oktober 2009, 7:00 Uhr nur noch manuell gemessene Wasserstandswerte in ein- bis zweistündlichen Abständen vor.

Zu Beginn des Pumpversuches stand das artesisch gespannte Grundwasser bei 1,87 m über Gelände. Der Grundwasserstand wurde am Ende der Pumpstufe bei der Entnahmerate von ca. 0,47 l/s um 125,84 m auf 123,97 m u. GOK abgesenkt (Abb. 5.43). Der Wiederanstieg wurde bis 26. Oktober 2009, 3:33 Uhr digital gemessen (Tab. 5.16, Abb. 5.43). Der Druckspiegel des Grundwassers stand zu diesem Zeitpunkt bei 1,87 m über Gelände. Nach Handmessungen, die bis 26.Oktober 2009 bis 14:20 Uhr durchgeführt wurden, stieg das artesisch gespannte Grundwasser weiter bis 2,11 m über Gelände an.

Der Pumpversuch konnte aufgrund der schwankenden Entnahmeraten, der spontanen Absenkung des Grundwasserspiegels zu Beginn der Pumpphase sowie der lückenhaften Datenaufzeichnung während des Wiederanstieges nur näherungsweise ausgewertet werden. Die Abschätzung nach LOGAN (T = Q/s) liefert für den getesteten Abschnitt des Oberen Muschelkalkes eine **Transmissivität T von ca. 4 • 10^{-6} m²/s**. Bei einer hydraulisch getesteten Kernstrecke von H = 11,0 m ergibt sich daraus eine Profildurchlässigkeit T/H ca. 4 • 10^{-7}m/s.

Zeitgleich zur Beobachtung des Grundwasserstandes im Oberen Muschelkalk wurde in der EKB 2 der Wasserstand im Unterkeuper gemessen, der oberhalb des Packers bis zum Fuß des 4. Sperrrohres in 145,2 m u. GOK hydraulisch angeschlossen war (Abb. 5.44). Die Grundwasserentnahme im Muschelkalk führte im Unterkeuper bei überprüftem dichtem Packersitz zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels um 0,29 m von 1,20 m ü. GOK auf 0,91 m ü. GOK. Nach Ausschalten der Pumpe stieg der Grundwasserspiegel im Unterkeuper wieder um 0,19 m an.

Die abweichenden physikalisch-chemischen Parameter zu Beginn des Pumpversuches dürften auf Restmengen von Fremdwasser (Spülungsflüssigkeit) in der Bohrung zurückzuführen sein. Die kontinuierlich digital aufgezeichnete elektrische Leitfähigkeit des geförderten Wassers lag in der EKB 2 zu Beginn des Pumpversuches bei (durch Spülung beeinflussten) 1980 µS/cm und sank mit geringfügigen Schwankungen nach kurzer Pumpdauer auf 1250 µS/cm bis 1260 µS/cm ab (Abb. 5.45). Die Temperatur nahm als Folge der Aufwärmung des entnommenen Grundwassers durch die Pumpe von anfänglich 15,9 ℃ auf 16,3 ℃ zu. Der pH-Wert lag konsta nt bei 7,2 (Abb. 5.46). Das geförderte Grundwasser ist reduziert. Der Sauerstoffgehalt lag am Anfang des Pumpversuches bei durch Fremdwasser bzw. messtechnisch bedingt überhöhten Werten und sank anschließend schnell auf 0 mg/l (Abb. 5.46).

Tab. 5.16: Pumpversuchsablauf PV4/EKB 2 vom 22. Oktober bis 26. Oktober 2009 in der Erkundungsbohrung (EKB 2.

Phase	**Datum, Uhrzeit**	**Flurabstand [m u. GOK]**	**Absenkung [m u. GOK]**	**Entnahmerate [l/s]**
Beginn PV	22.10.2009 20:38	-1,87	0	0,47
Ende Pumpstufe	25.10.2009 18:45	123,97	125,84	
Ende Wiederanstieg	26.10.2009 ca. 14:20	2,11 m **über Gelände**		

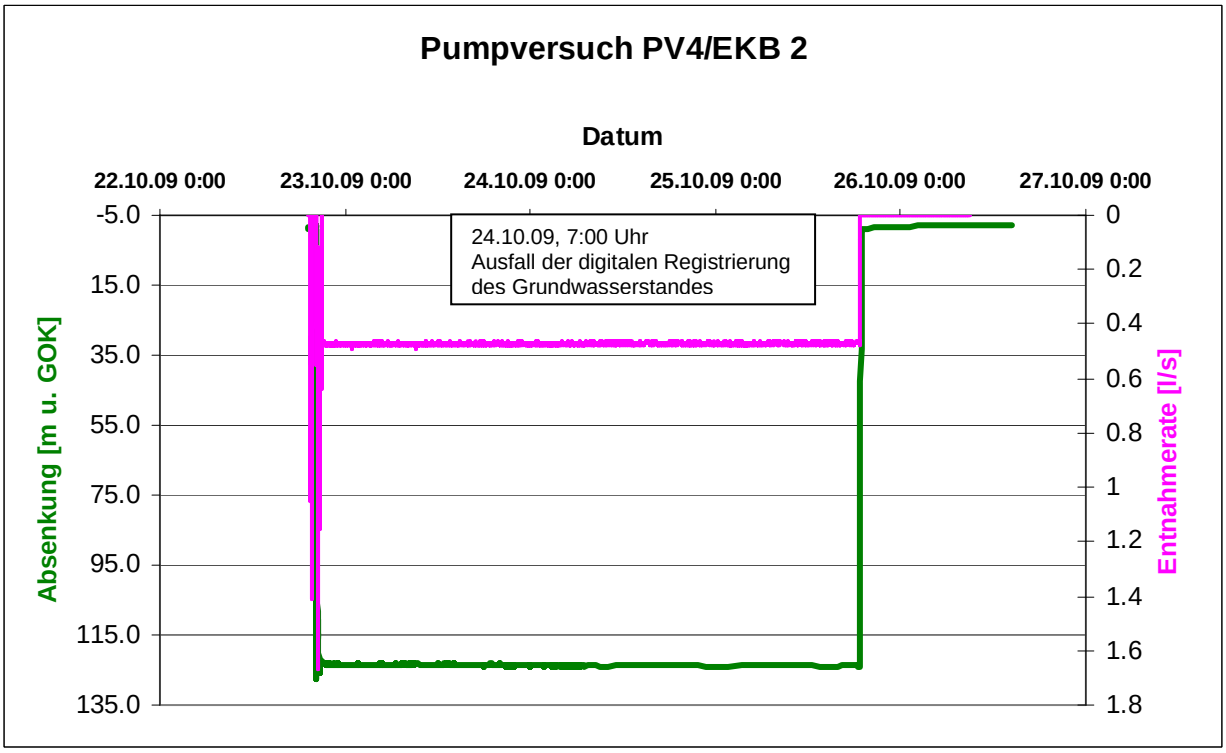


Abb. 5.43: Pumpversuch PV4/EKB 2: Wasserstandsänderung (EKB 2) und Entnahmeraten.

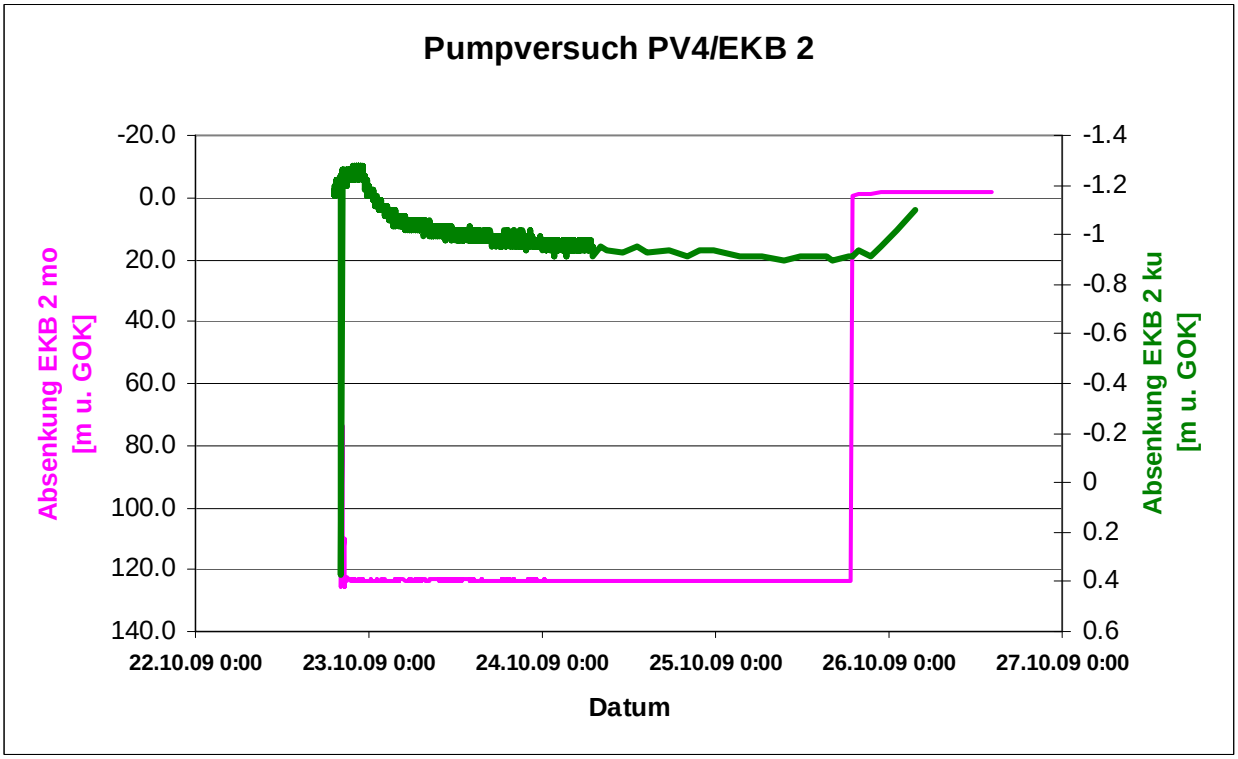


Abb. 5.44: Pumpversuch PV4/EKB 2: Verlauf der Absenkung in den Erkundungsbohrungen EKB 2 im Oberen Muschelkalk und im Unterkeuper (gemessen im Ringraum oberhalb des Packers).

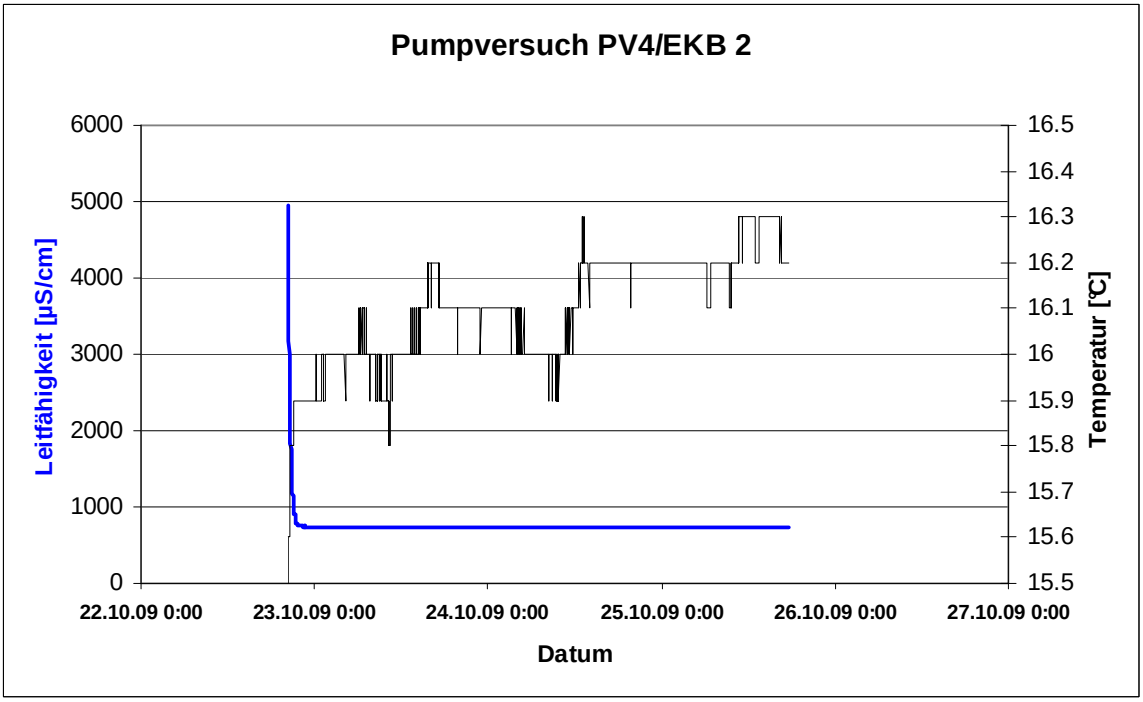


Abb. 5.45: Pumpversuch PV4/EKB 2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser.

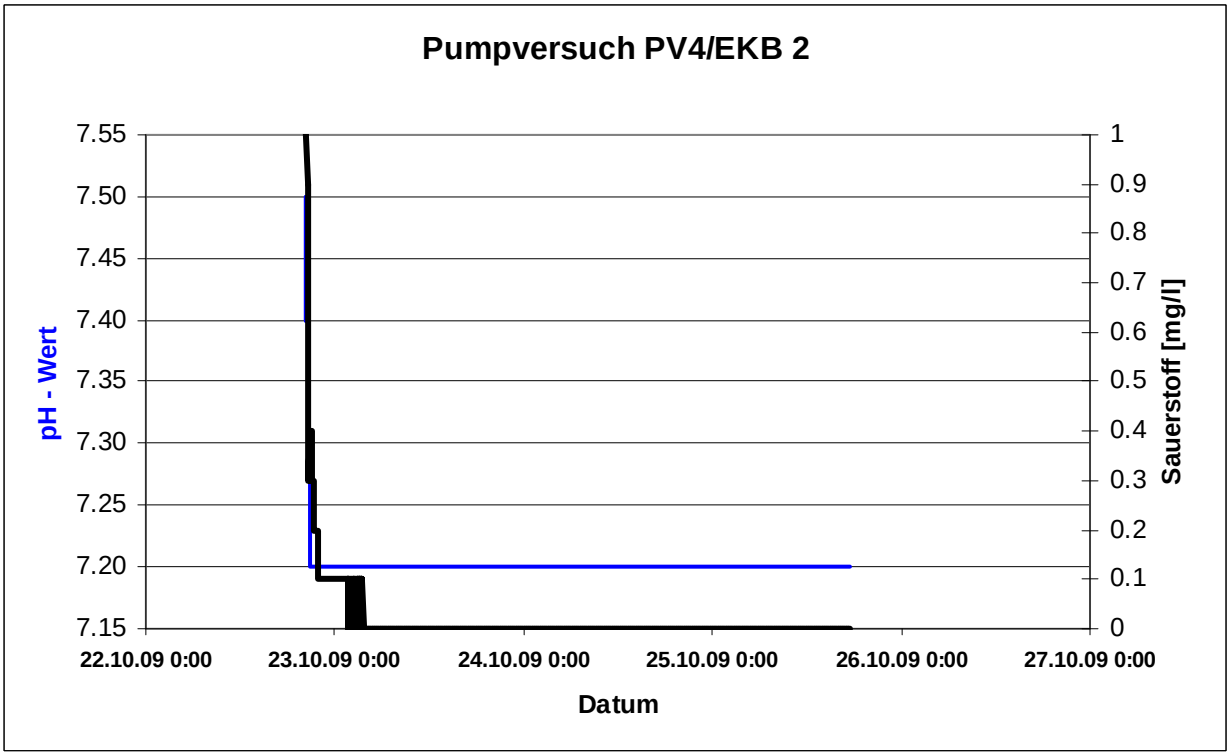


Abb. 5.46: Pumpversuch PV4/EKB 2: pH-Wert und Sauerstoff im entnommenen Grundwasser.

5.5.2.2 Ventiltests

Pulse-Test 1/EKB 2 (19,0 m u. GOK bis 22,0 m u. GOK, Schilfsandstein-Formation (km2) und Gipskeuper-Formation (km1), Graue Estherienschichten (km1)

Am 21. April 2009 wurde der Tiefenabschnitt zwischen 19,0 m u. GOK und 22,0 m u. GOK im offenen Bohrloch mit einem 2-phasigen Pulse-Test hydraulisch getestet (Abb. 5.47).

Von 19,0 m u. GOK bis 19,65 m u. GOK wurde eine Sandstein-Schluffstein-Wechsellagerung der Schilfsandstein-Formation (km2), darunter eine Wechselfolge von Ton- und Schluffsteinen der Grauen Estherienschichten (km1, GES) erbohrt.

Die Auswertung lieferte für die getestete Strecke eine **Transmissivität T = 2,3 • 10^{-7} m²/s** (Abb. 5.48).

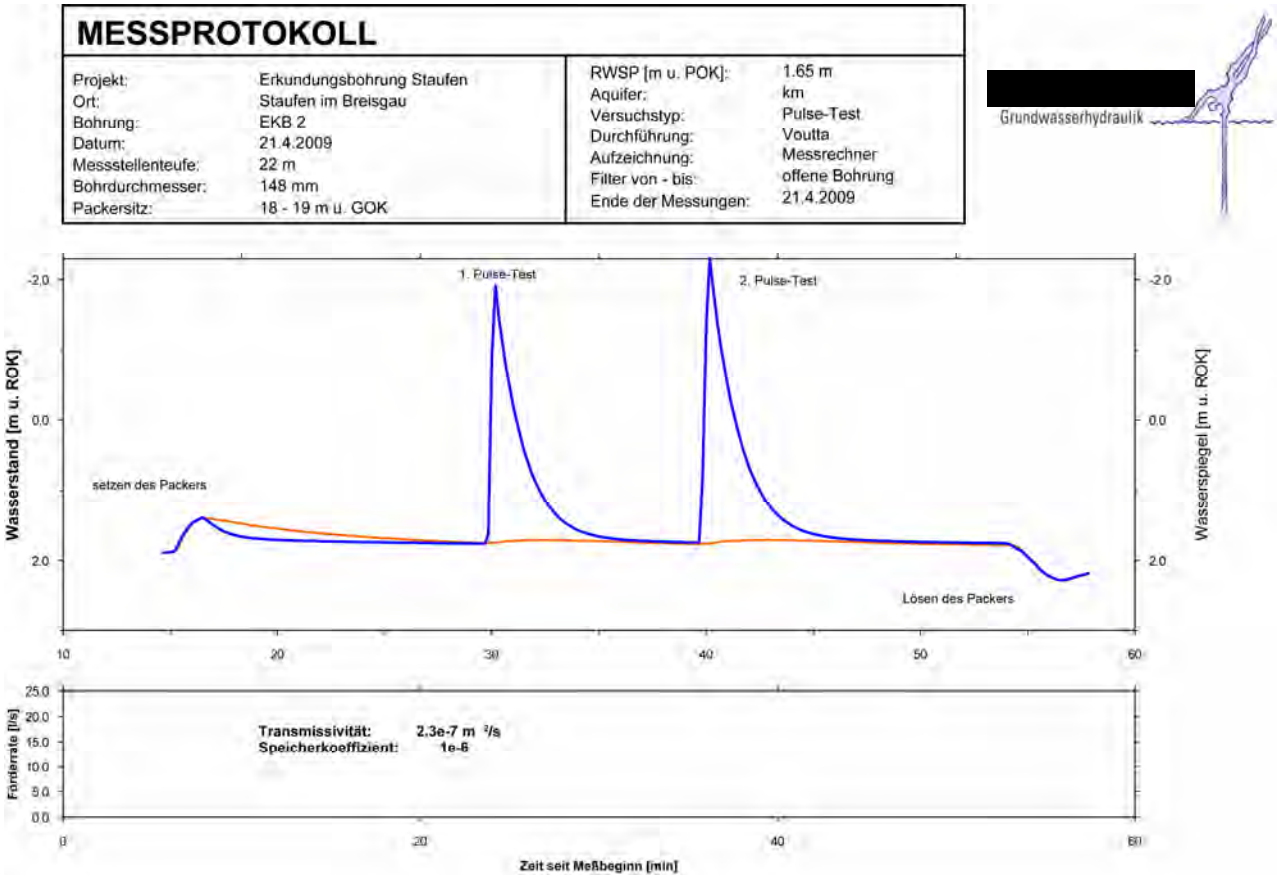


Abb. 5.47: Messprotokoll zum Pulse-Test am 21. April 2009.

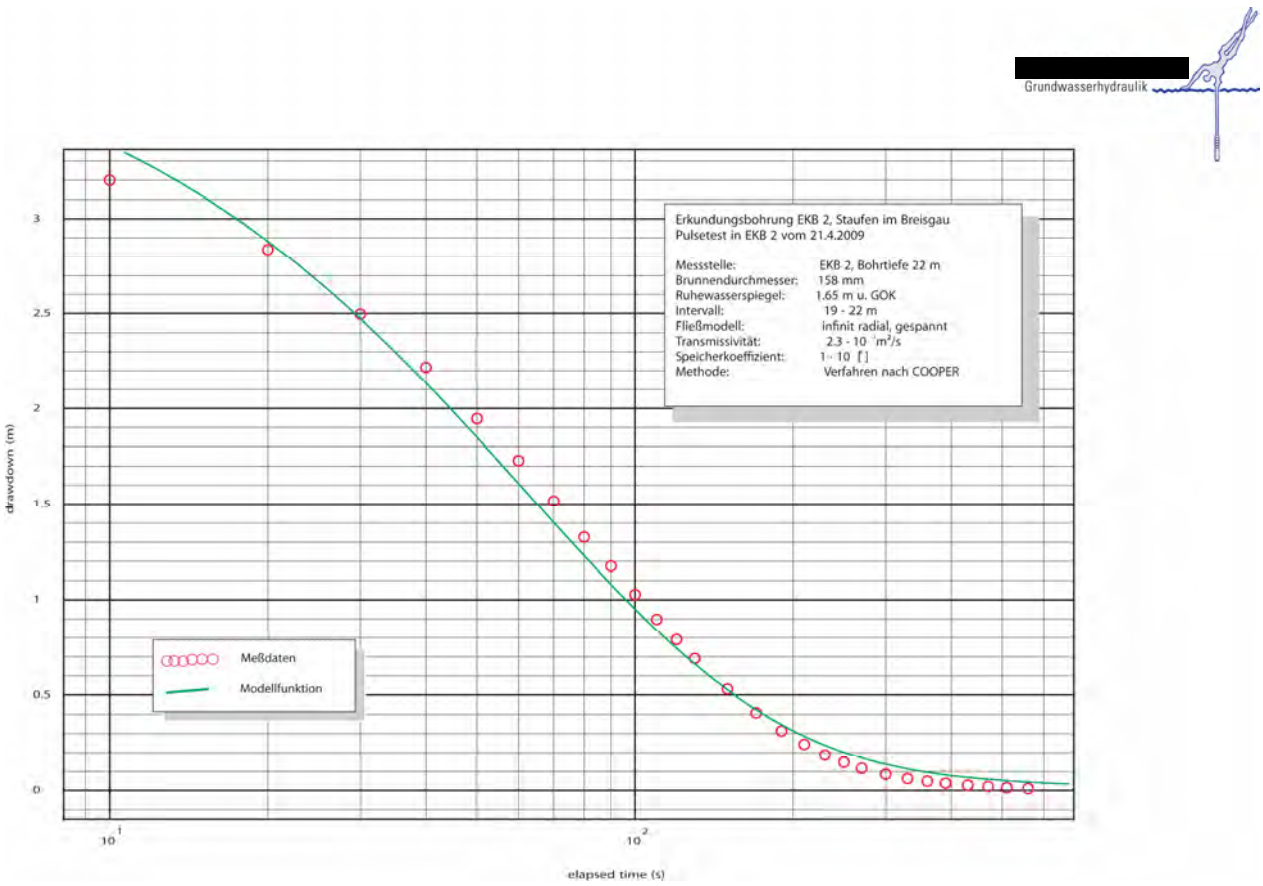


Abb. 5.48: Auswertung des Pulse-Tests vom 21. April 2009 (Tiefenabschnitt 19,0 m u. GOK bis 22,0 m u. GOK).

Slug-Test 2/EKB 2 (49,5 m u. GOK bis 52,0 m u. GOK, Gipskeuper-Formation, Mittlerer Gipshorizont (km1))

Am 22. Mai 2009 wurden die Gips- und Tonsteine im Tiefenabschnitt zwischen 49,5 m u. GOK und 52,0 m u. GOK im offenen Bohrloch mit einem Slug-Test hydraulisch getestet (Abb. 5.49).

Da beim Slug-Test die inhibierte Bohrspülung mit einer Dichte von 1,09 g/cm³ eingesetzt wurde, wurde zur Auswertung vom Büro VOUTTA eine dichteabhängige Messwertkorrektur durchgeführt. Hierbei wurde ausgehend von der bekannten Position des Drucksensors die über dem Sensor stehende Wassersäule mit der Dichte multipliziert.
Diese Korrektur wurde auch bei den weiteren Ventiltests durchgeführt.

Die Auswertung lieferte für die getestete Strecke eine **Transmissivität T = 7,4 • 10^{-6} m²/s** (Abb. 5.50).

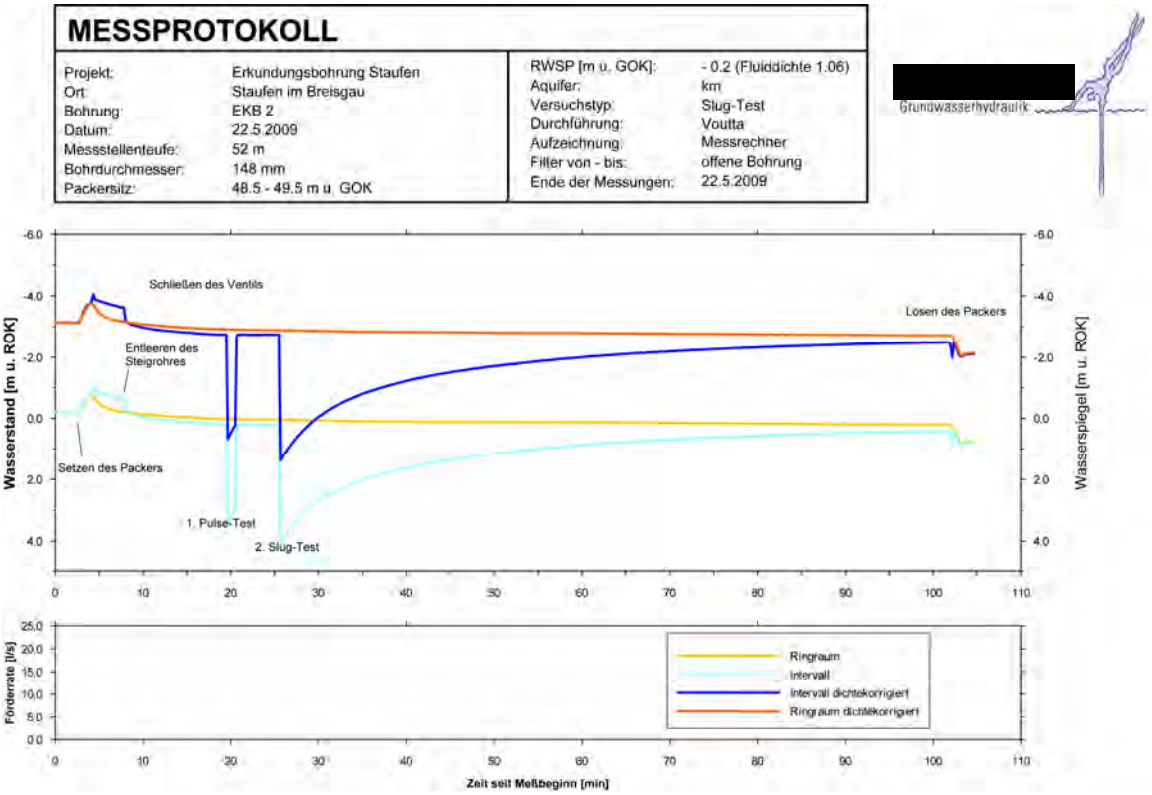


Abb. 5.49: Messprotokoll zum Slug-Test am 22. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 49.5 m u. GOK bis 52,0 m u. GOK)

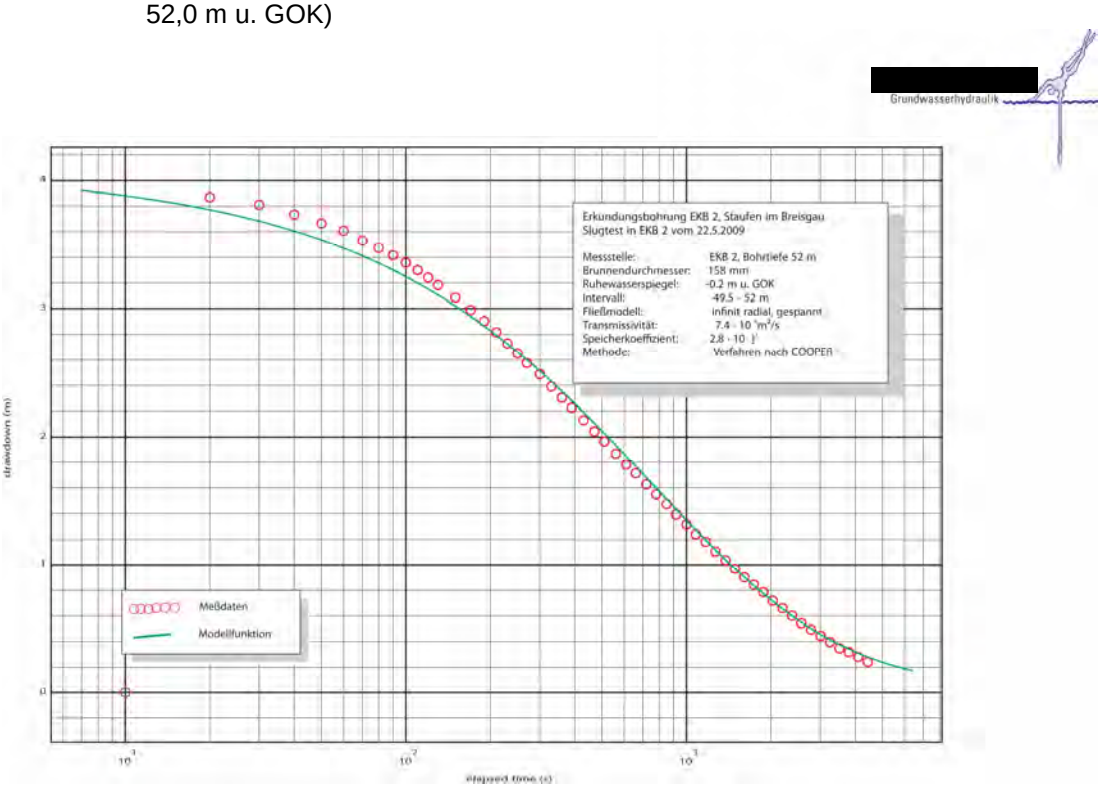


Abb. 5.50: Auswertung des Slug-Tests vom 22. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 49,5 m u. GOK bis 52,0 m u. GOK).

Slug-Test 3/EKB 2 (49,5 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK, Gipskeuper-Formation, Mittlerer Gipshorizont, km1).

Am 27. Mai 2009 wurde der von Gips- und Tonsteinen des Mittleren Gipshorizontes (km1, MGH) aufgebaute Tiefenabschnitt zwischen 49,5 m u. GOK und 58,0 m u. GOK im offenen Bohrloch mit einem Slug-Test hydraulisch getestet (Abb. 5.51).

Die dichtekorrigierte Auswertung lieferte für die getestete Strecke eine **Transmissivität $T = 3{,}4 \cdot 10^{-7}$ m²/s** (Abb. 5.52).

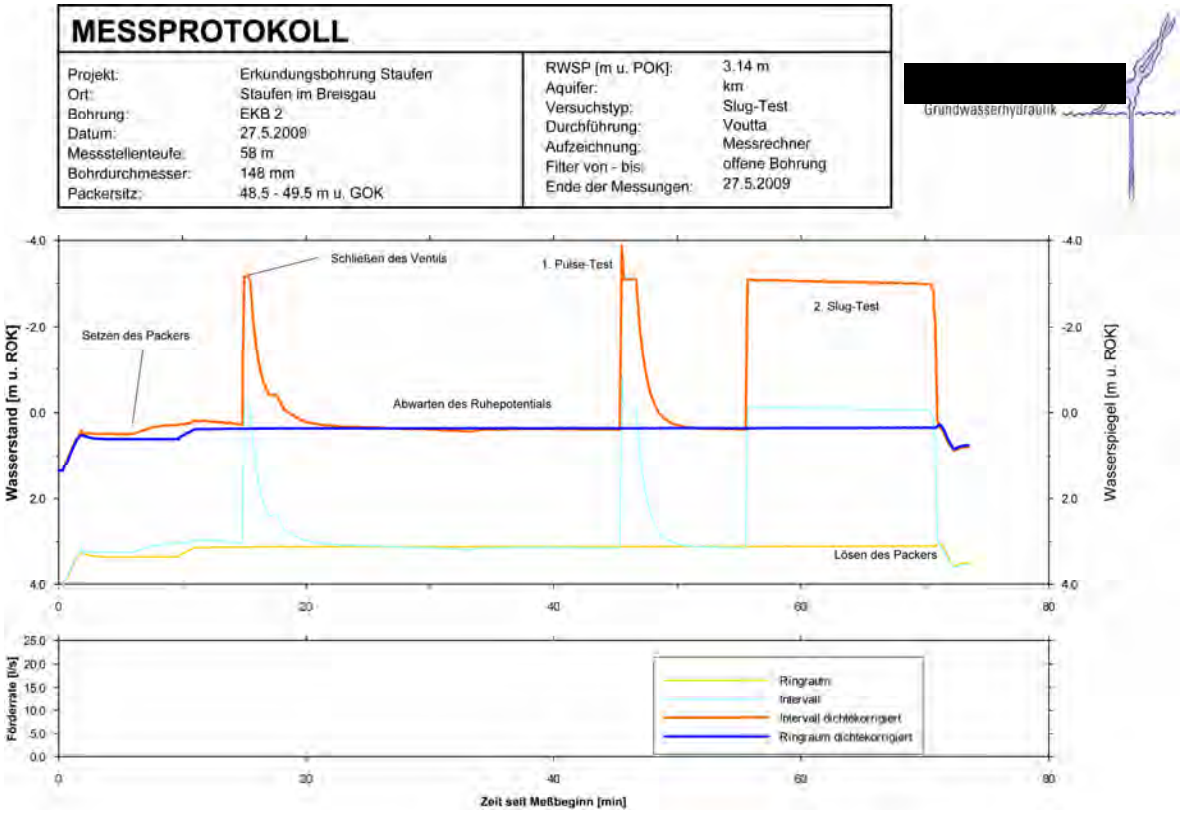


Abb. 5.51: Messprotokoll zum Slug-Test am 27. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 49,5 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK).

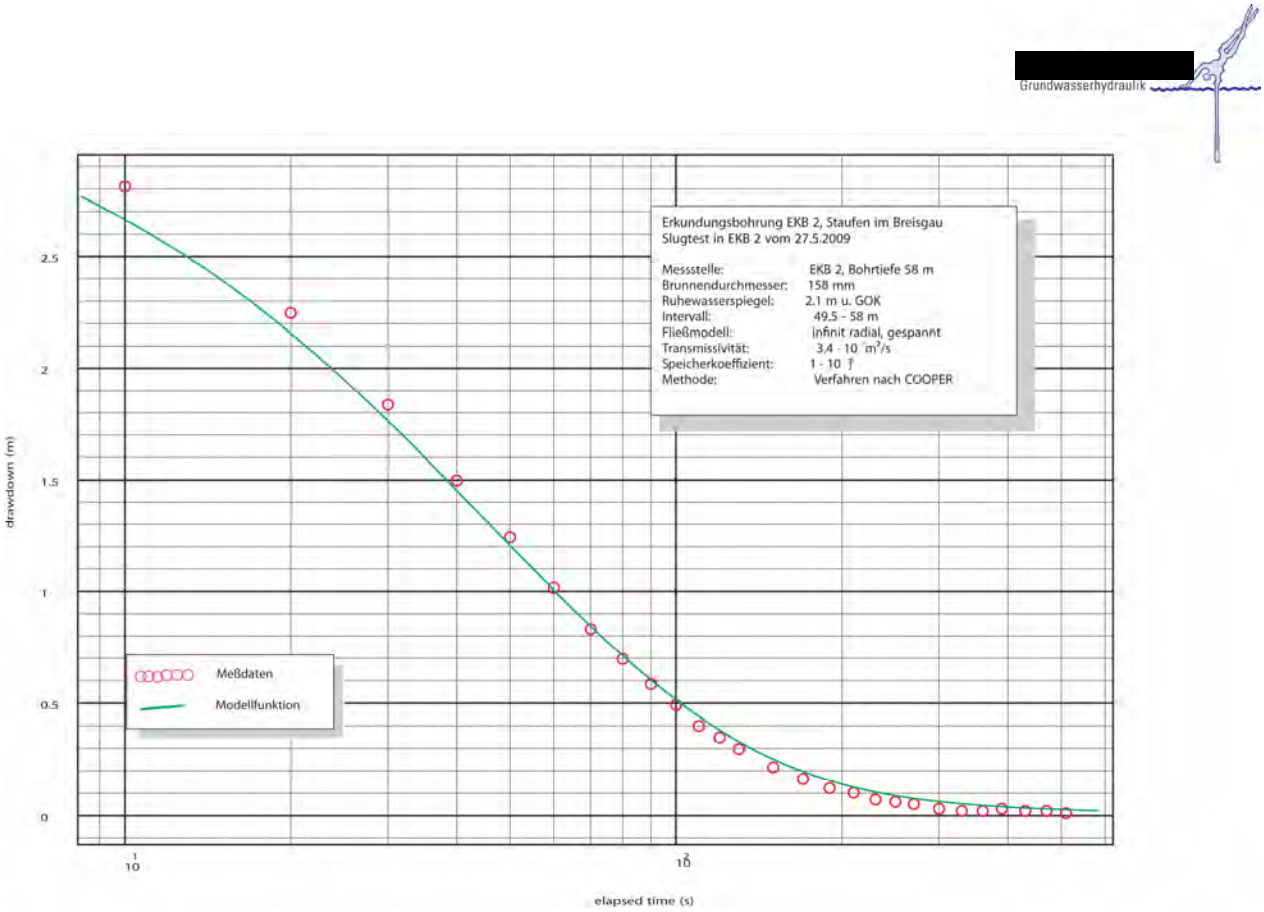


Abb. 5.52: Auswertung des Slug-Tests vom 27. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 49,5 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK).

Slug-Test 4/EKB 2 (55,0 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK, Gipskeuper-Formation, Mittlerer Gipshorizont, km1)

Am 27. Mai 2009 wurde der von Gips- und Tonsteinen des Mittleren Gipshorizontes (km1, MGH) aufgebaute Tiefenabschnitt zwischen 55,0 m u. GOK und 58,0 m u. GOK im offenen Bohrloch mit einem Slug-Test hydraulisch getestet (Abb. 5.53).

Die dichtekorrigierte Auswertung lieferte für die getestete Strecke eine **Transmissivität $T = 6{,}5 \cdot 10^{-8}$ m²/s** (Abb. 5.54).

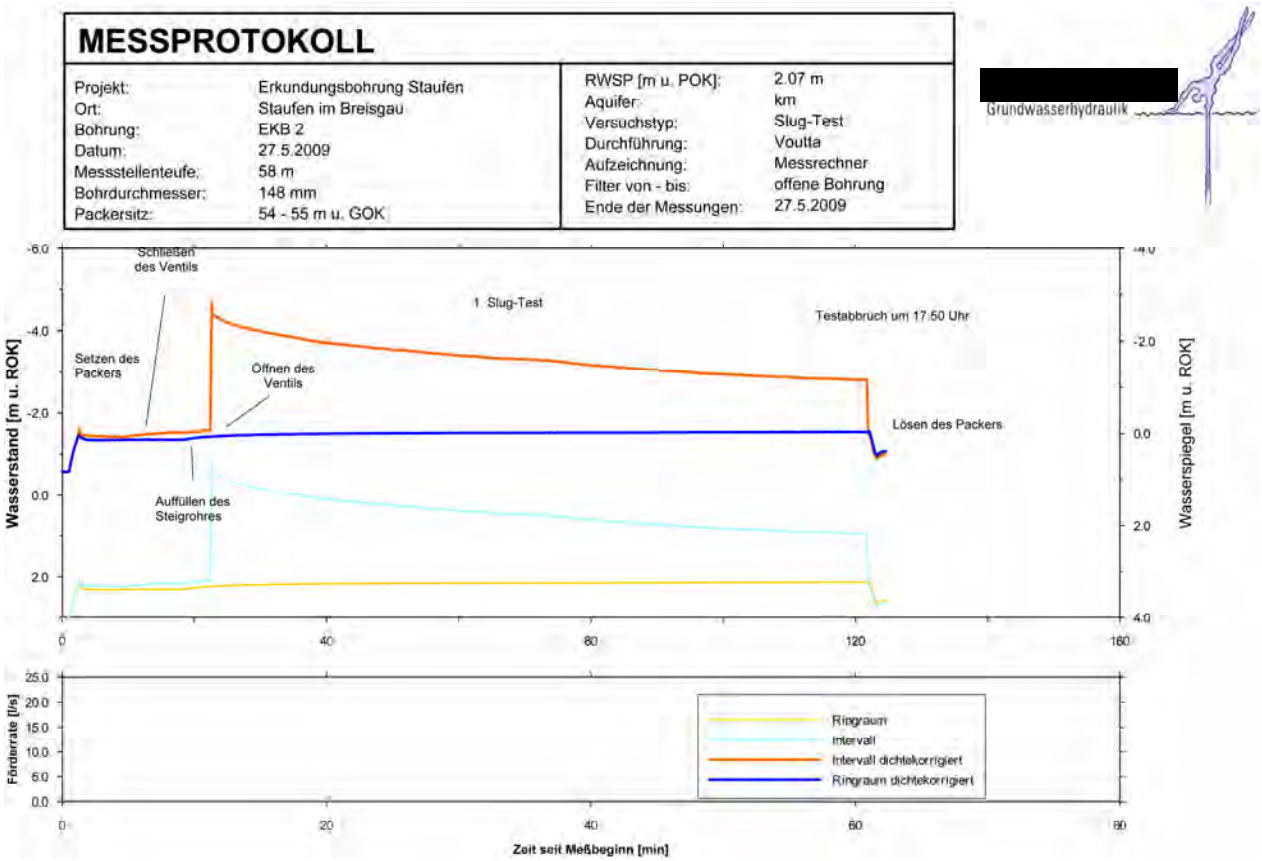


Abb. 5.53: Messprotokoll zum Slug-Test am 27. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 55,0 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK).

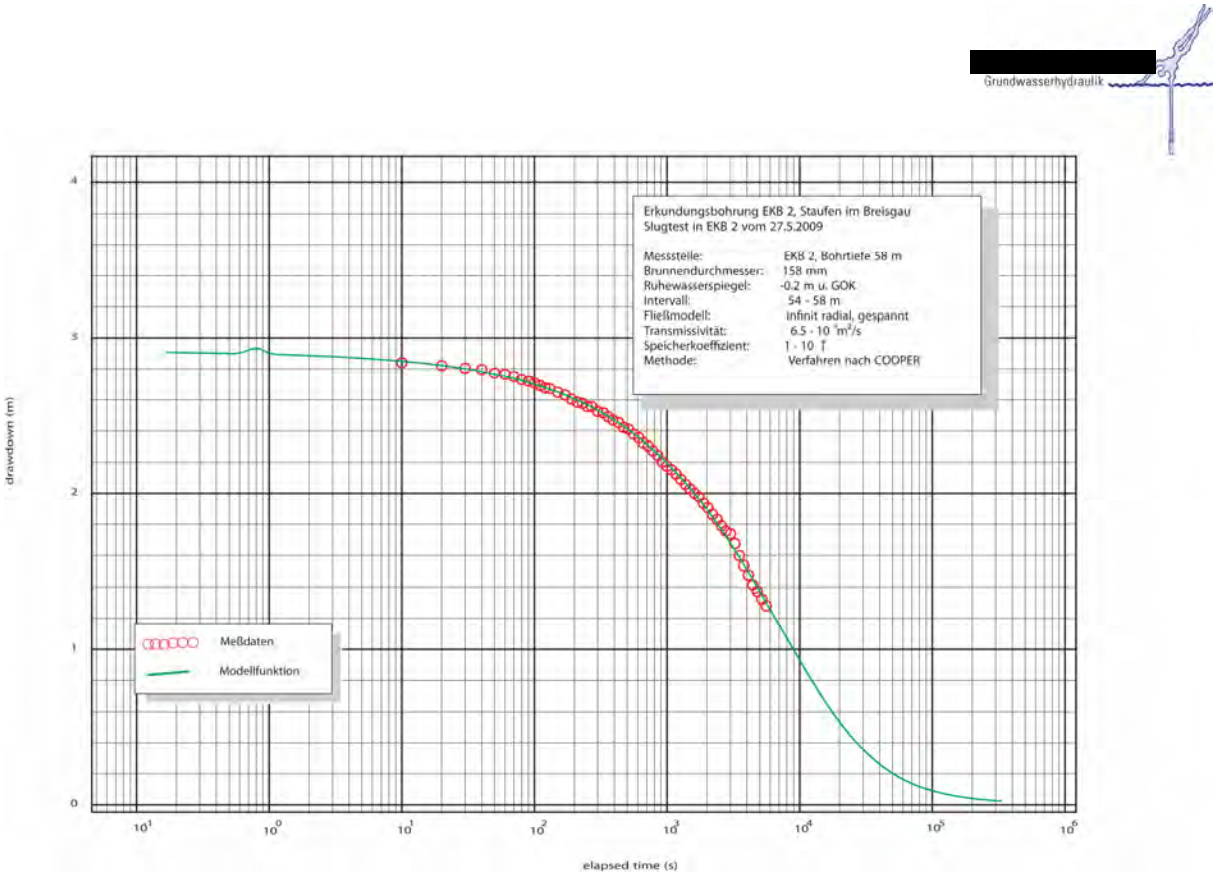


Abb. 5.54: Auswertung des Slug-Tests vom 27. Mai 2009 (Tiefenabschnitt 55,0 m u. GOK bis 58,0 m u. GOK, Anmerkung: Packersitz von 54,0 bis 55,0 m u. GOK).

Pulse-Test 5/EKB 2 (62,5 m u. GOK bis 75,0 m u. GOK, Gipskeuper-Formation, Mittlerer Gipshorizont, km1)

Am 08. Juni 2009 wurde der von Gips-, Anhydrit- und Tonsteinen des Mittleren Gipshorizontes (km1, MGH) aufgebaute Tiefenabschnitt unmittelbar unterhalb des Oberen Anhydritspiegels zwischen 62,5 m u. GOK und 75,0 m u. GOK im offenen Bohrloch mit einem 2-phasigen Pulse-Test hydraulisch getestet (Abb. 5.55).

Die dichtekorrigierte Auswertung lieferte für die getestete Strecke eine **Transmissivität $T = 1{,}3 \cdot 10^{-7}$ m²/s** (Abb. 5.56).

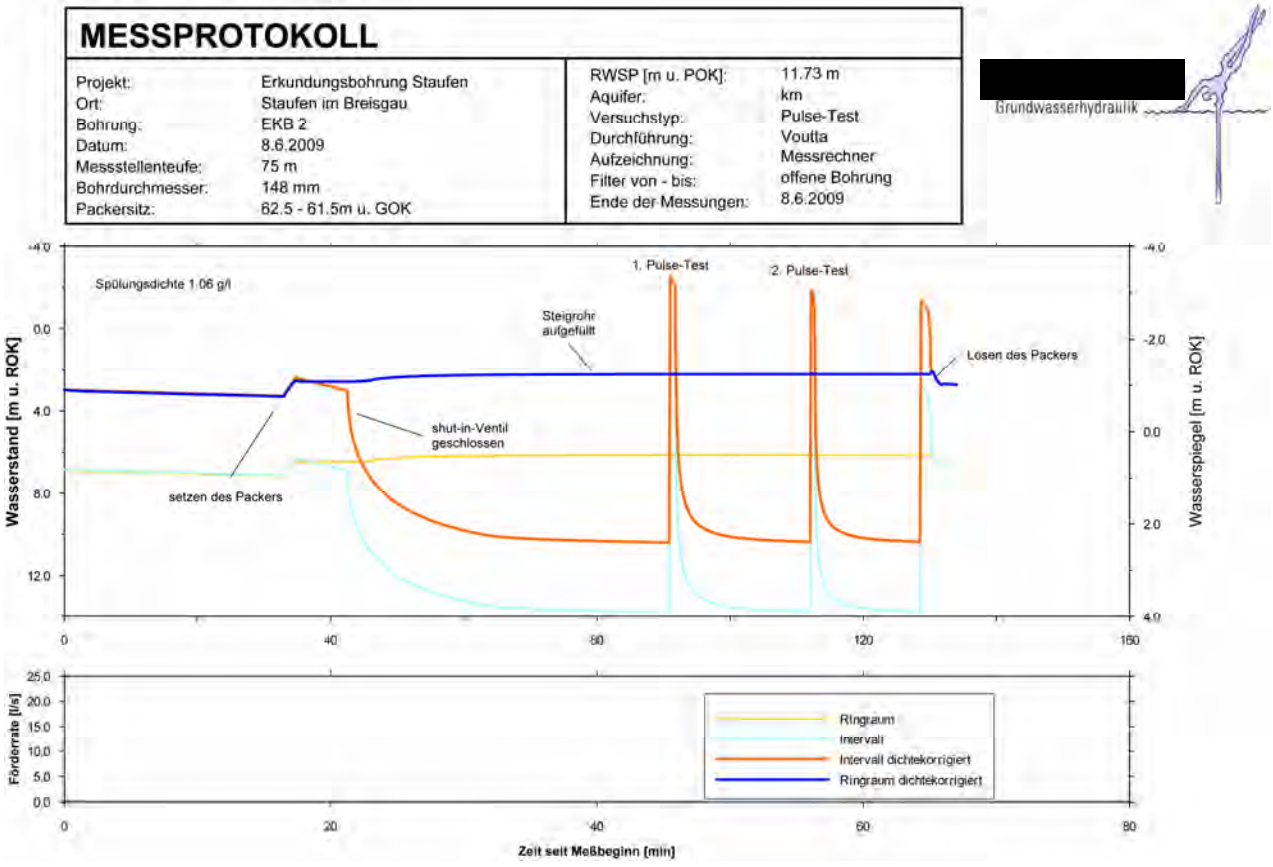


Abb. 5.55: Messprotokoll zum Pulse-Test am 08. Juni 2009 (Tiefenabschnitt 62,5 m u. GOK bis 75,0 m u. GOK).

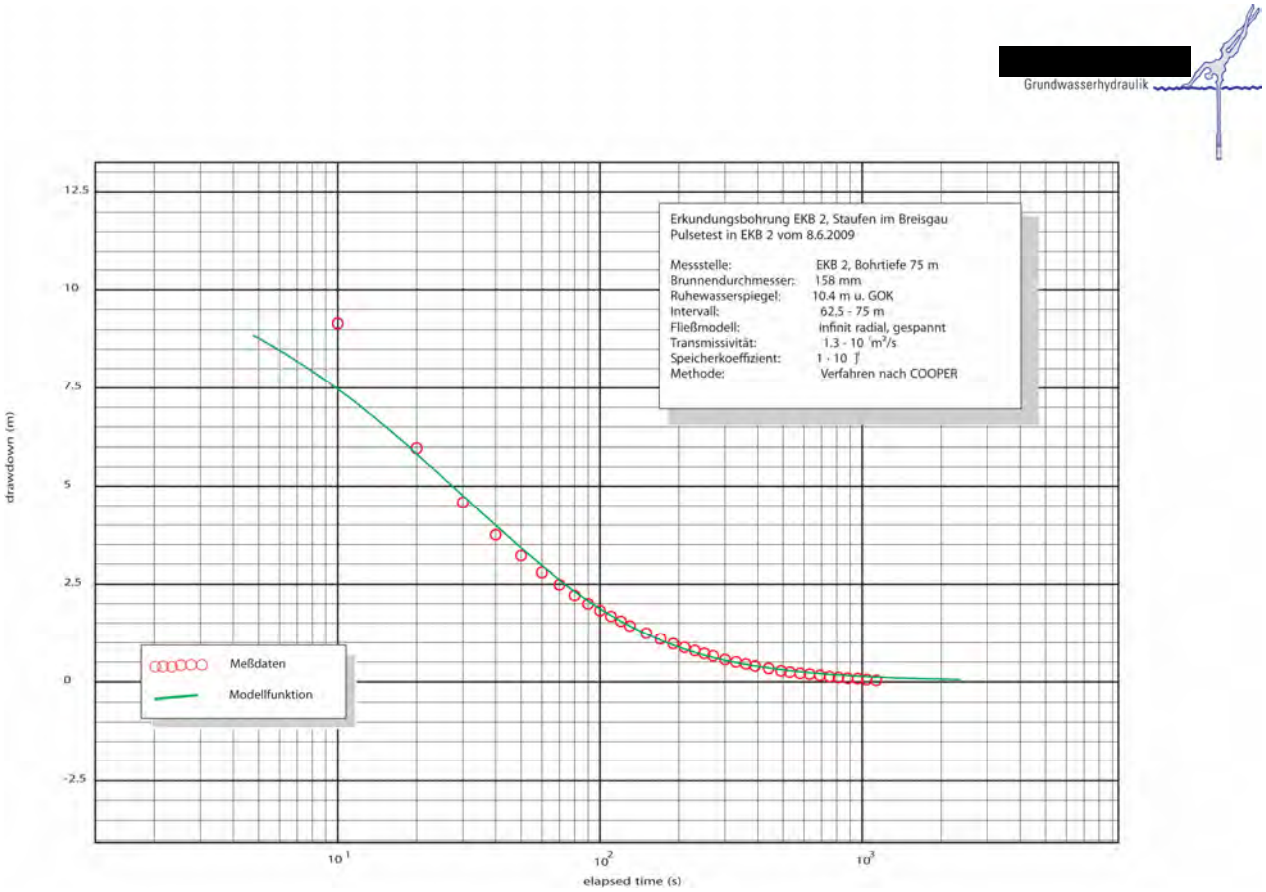


Abb. 5.56: Auswertung des Pulse-Tests vom 08. Juni 2009 (Tiefenabschnitt 62,5 m u. GOK bis 75,0 m u. GOK).

Pulse-Test 6/EKB 2 (68,0 m u. GOK bis 92,0 m u. GOK, Gipskeuper-Formation, Mittlerer Gipshorizont, km1)

Am 02. Juli 2009 wurde der von Gips-, Anhydrit- und Tonsteinen des Mittleren Gipshorizontes (km1, MGH) aufgebaute Tiefenabschnitt unterhalb des Anhydritspiegels zwischen 68,0 m u. GOK und 92,0 m u. GOK im offenen Bohrloch mit einem 2-phasigen Pulse-Test hydraulisch getestet (Abb. 5.57). Das Bohrloch der EKB 2 war am 22. Juni 2009 im Abschnitt zwischen 83,2 m u. GOK bis 63,5 m u. GOK wegen Bohrlochwandinstabilität zementiert und wieder aufgebaut worden.

Die dichtekorrigierte Auswertung lieferte für die getestete Strecke eine **Transmissivität T ca. 1 • 10^{-7} m²/s** (Abb. 5.58). Auf Grund der Zementation zwischen 83,2 m u. GOK und 63,5 m u. GOK ist dieser Wert für den Gebirgsabschnitt nicht repräsentativ.

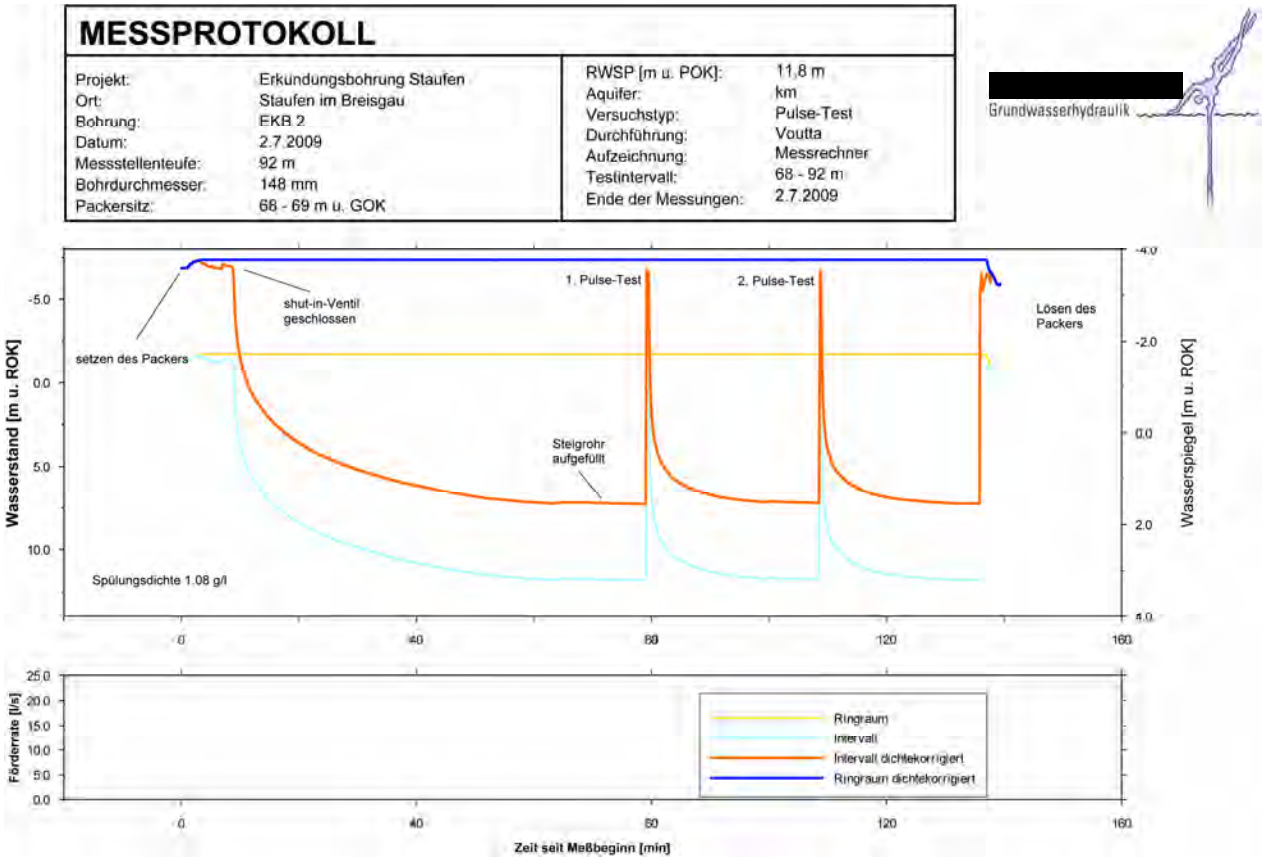


Abb. 5.57: Messprotokoll zum Pulse-Test am 02. Juli 2009 (Tiefenabschnitt 69,0 m u. GOK bis 92,0 m u. GOK).

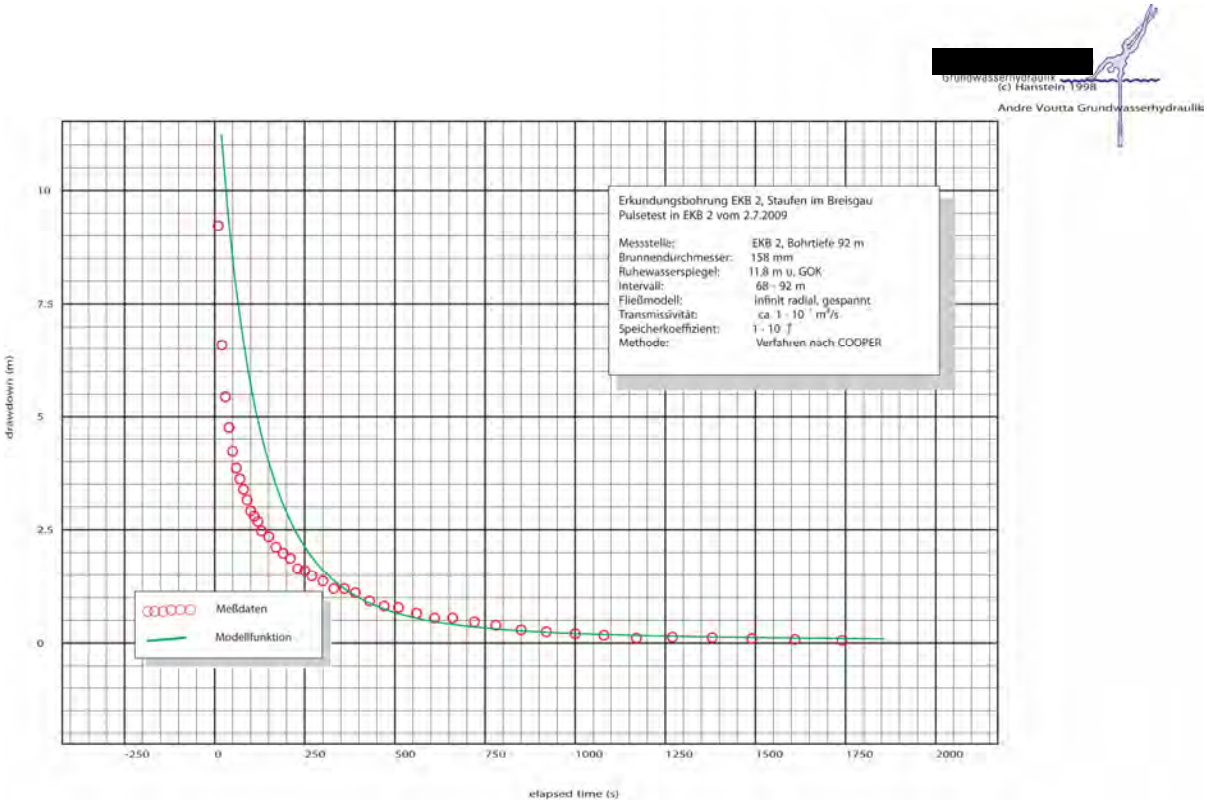


Abb. 5.58: Auswertung des Pulse-Tests vom 02. Juli 2009 (Tiefenabschnitt 69,0 m u. GOK bis 92,0 m u. GOK, Anmerkung: Packersitz von 68,0 m u. GOK bis 69,0 m u. GOK).

Pulse-Test 7/EKB 2 (72,0 m u. GOK bis 95,0 m u. GOK, Gipskeuper-Formation, Mittlerer Gipshorizont, km1)

Am 17. Juli 2009 wurde der von Gips-, Anhydrit- und Tonsteinen des Mittleren Gipshorizontes (km1, MGH) aufgebaute Tiefenabschnitt unterhalb des Oberen Anhydritspiegels zwischen 72,0 m u. GOK und 95,0 m u. GOK im offenen Bohrloch mit einem Pulse-Test hydraulisch getestet (Abb. 5.59). Das Bohrloch der EKB 2 war am 22. Juni 2009 im Abschnitt zwischen 83,2 m u. GOK bis 63,5 m u. GOK wegen Bohrlochwandinstabilität zementiert und wieder aufgebaut worden.

Die dichtekorrigierte Auswertung lieferte für die getestete Strecke eine **Transmissivität T ca. 6,7 • 10^{-7} m²/s** (Abb. 5.60) und ist in der Größenordnung mit der des vorangegangenen Pulse-Tests (Pulse-Test 6/EKB 2) vergleichbar. Auf Grund der Zementation zwischen 83,2 m u. GOK und 63,5 m u. GOK ist dieser Wert für den Gebirgsabschnitt nicht repräsentativ.

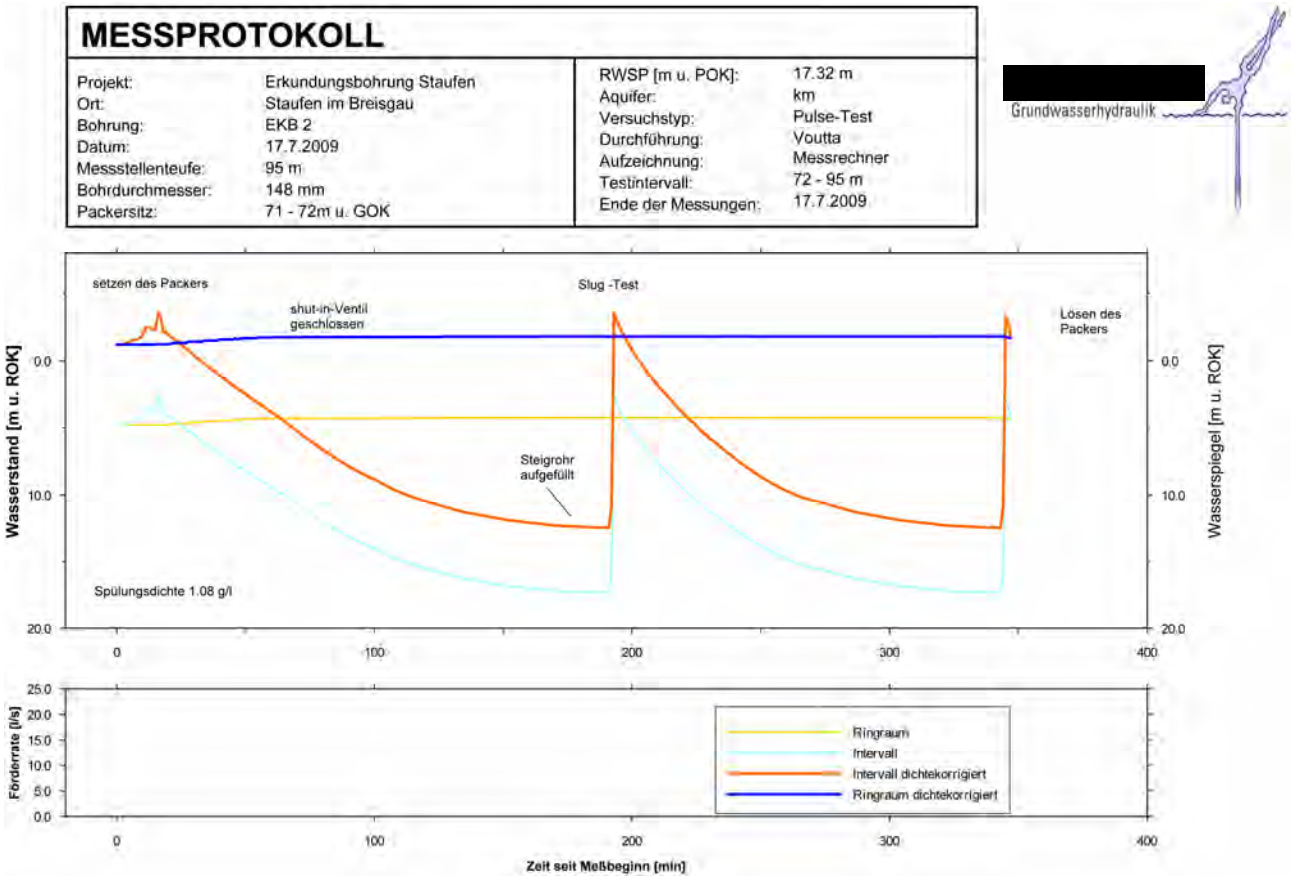


Abb. 5.59: Messprotokoll zum Pulse-Test am 17. Juli 2009 (Tiefenabschnitt 72,0 m u. GOK bis 95,0 m u. GOK).

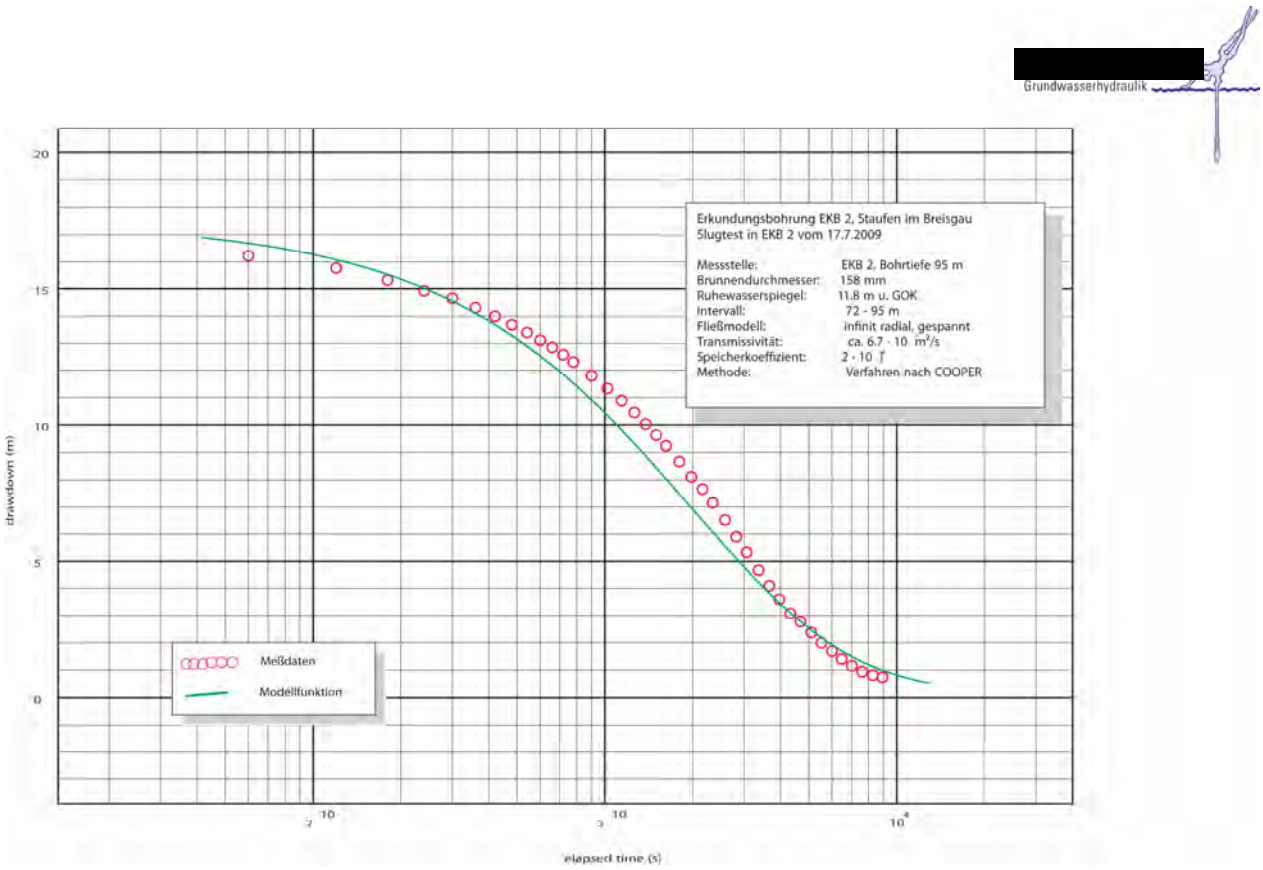


Abb. 5.60: Auswertung des Pulse-Tests vom 17. Juli 2009 (Tiefenabschnitt 72,0 m u. GOK bis 95,0 m u. GOK).

Pulse-Test 8/EKB 2 (100,0 m u. GOK bis 120,0 m u. GOK, Gipskeuper-Formation, Mittlerer Gipshorizont, km1)

Am 06. August 2009 wurde der von Gips-, Anhydrit- und Tonsteinen der Dunkelroten Mergel (DRM, bis 110,32 m u. GOK) des Bochinger Horizontes und Entringen-Sulfates (BH + ENS, bis 119,70 m u. GOK) und der Grundgipsschichten (GI, bis 120,0 m u. GOK) aufgebaute Tiefenabschnitt der Gipskeuper-Formation unterhalb des Oberen Anhydritspiegels zwischen 100,0 m u. GOK und 120,0 m u. GOK im offenen Bohrloch hydraulisch mit einem Pulse-Test getestet (Abb. 5.61). In diesem Abschnitt wurden zwischen 117,50 m u. GOK und 118,10 m u. GOK alterierter Zementstein und PEHD-Rohre der Erdwärmesonde EWS 5 angebohrt.

Durch den Pulse-Test wurde nachgewiesen, dass in diesem Tiefenabschnitt nur eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit vorliegt und auch die Ringraumverfüllung der EWS 5 im Kontaktbereich zur Erkundungsbohrung EKB 2 keine durch den Pulse-Test messbaren Durchlässigkeiten aufweist.

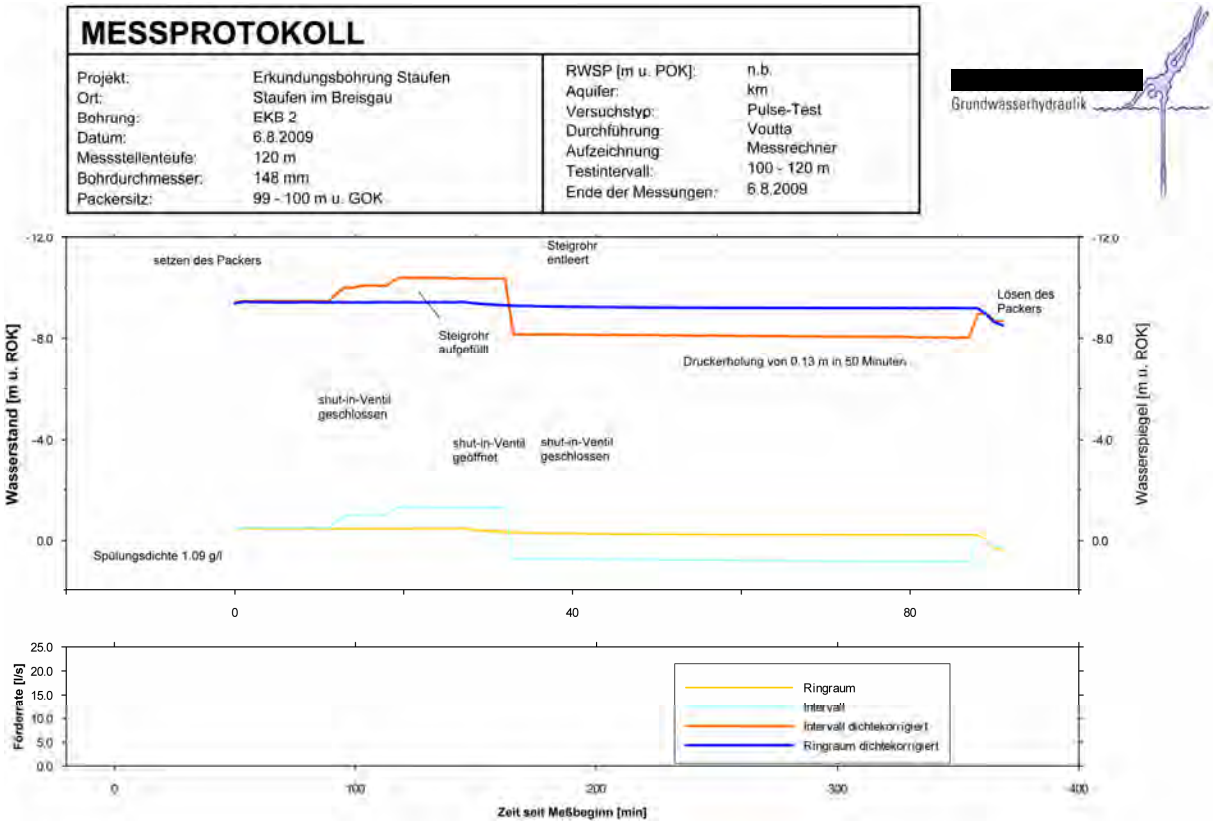


Abb. 5.61: Messprotokoll zum Pulse-Test am 06. August 2009 (Tiefenabschnitt 100,0 m u. GOK bis 120,0 m u. GOK).

5.5.2.3 Fluid-Logging-Messungen

In der Erkundungsbohrung EKB 2 wurden zwei Fluid-Logging-Messungen durchgeführt. Neben Leitfähigkeitsprofilen wurden auch Temperaturprofile gemessen.

Die erste Fluid-Logging-Messung erfolgte am 08. Juni 2009 im Tiefenabschnitt zwischen 60,0 m u. GOK und 75,0 m u. GOK in den Gips-, Anhydrit- und Tonsteinen des Mittleren Gipshorizontes (km1, MGH) (Abb. 5.62). Abweichend von den in Kap. 5.3.2.3 beschriebenen Verfahren wurde das Bohrlochfluid nicht ausgetauscht, sondern die Spülung, die aufgrund der Spülungszusätze eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit von 54 000 µS/cm aufwies, als Kontrastfluid verwendet. Der Spülungsspiegel wurde durch Abpumpen von dichte-korrigierten 12,2 m u. GOK auf 22,0 m u. GOK abgesenkt. Die Versuchsdurchführung und Auswertung waren erschwert, da während der vorangegangenen Bohrphase hoch mineralisierte inhibierte Bohrspülung in das Gebirge eindringen konnte und daher das Grundwasser in der näheren Umgebung des Bohrloches verdrängt wurde. Im untersuchten Tiefenabschnitt zeichnen sich vor der am 22. Juni 2009 Bohrlochzementation Wasserzutritte durch sprunghafte Erniedrigungen der elektrischen Leitfähigkeiten im Tiefenabschnitt zwischen 73,8 m u. GOK und 74,0 m u. GOK und in geringerem Maße zwischen 71,0 m u. GOK und 71,5 m u. GOK ab. In diesen Bereichen weisen auch die Temperaturveränderungen auf Wasserzutritte hin.

Die zweite Fluid-Logging-Messung wurde am 22. Oktober 2009 im Tiefenabschnitt zwischen 145,2 m u. GOK (Unterkante 4. Sperrrohr) und 163,0 m u. GOK unterhalb des Unteren Gipsspiegels in den Dolomit- und Tonsteinen des Unterkeupers (ku) und den Dolomitsteinen des Oberen Muschelkalkes (Trigonodusdolomit, mo2D) durchgeführt (Abb. 5.63). In diesem Abschnitt wurde als Bohrspülung Trinkwasser ohne Zusätze verwendet. Kurz vor der Messung wurde die elektrische Leitfähigkeit des Bohrlochfluids durch Aufsalzung stark erhöht. Das in den unverrohrten Bohrlochabschnitt eintretende artesisch gespannte Grundwasser trat mit einer Schüttung von ca. 1 l/s aus der Bohrung frei aus.

Wasserzutritte zeichnen sich im Leitfähigkeitsprofil als sprunghafte Änderungen unmittelbar unter der Verrohrung bei 145,20 m u. GOK, zwischen ca. 156,0 m u. GOK und 156,5 m und in 162 m u. GOK ab. Ein untergeordneter Wasserzutritt deutet sich zwischen 157 m u. GOK und 158 m u. GOK an.

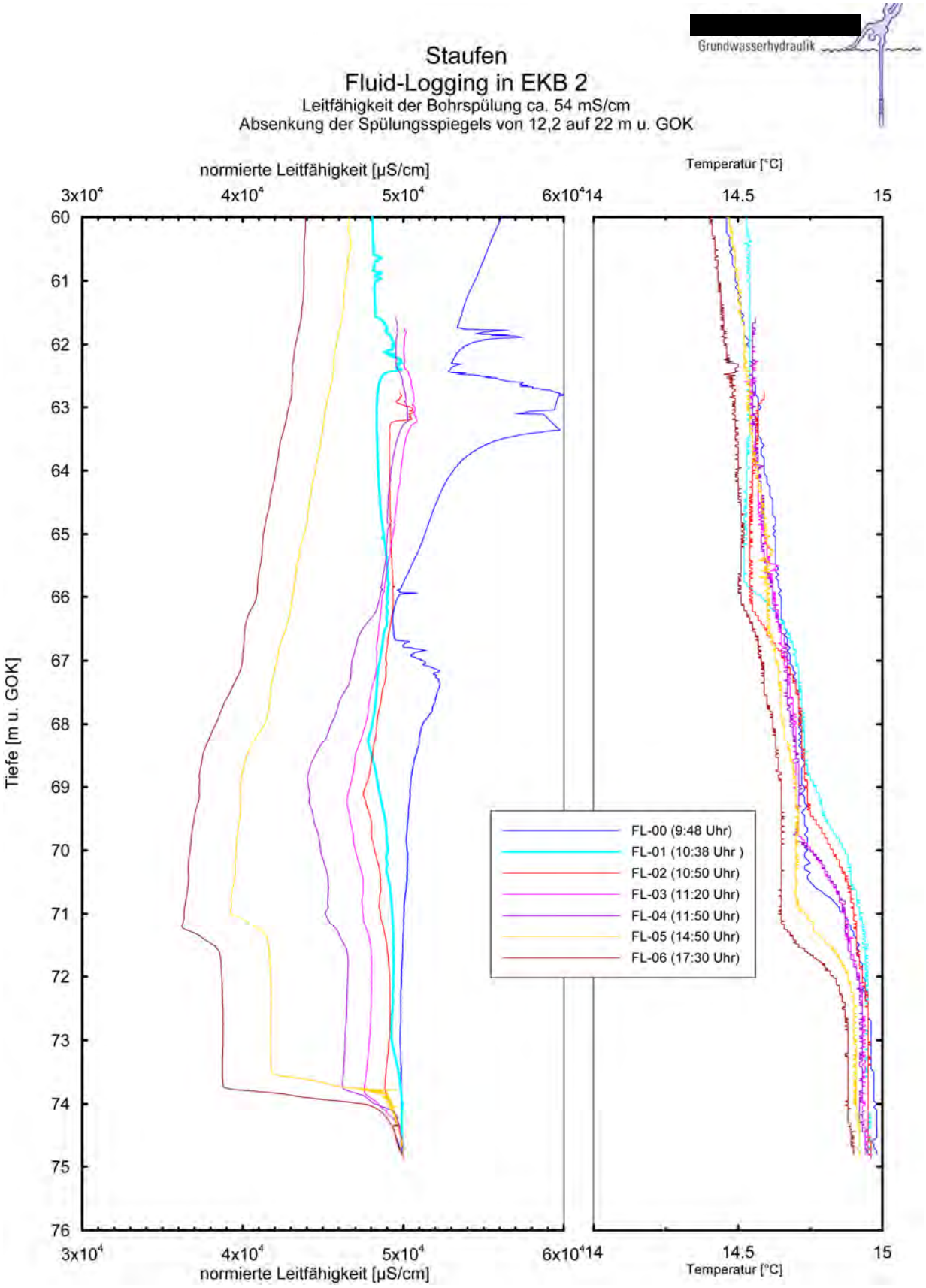


Abb. 5.62: Fluid-Logging (Tiefenabschnitt 60,0 m u. GOK bis 75,0 m u. GOK, 08. Juni 2009).

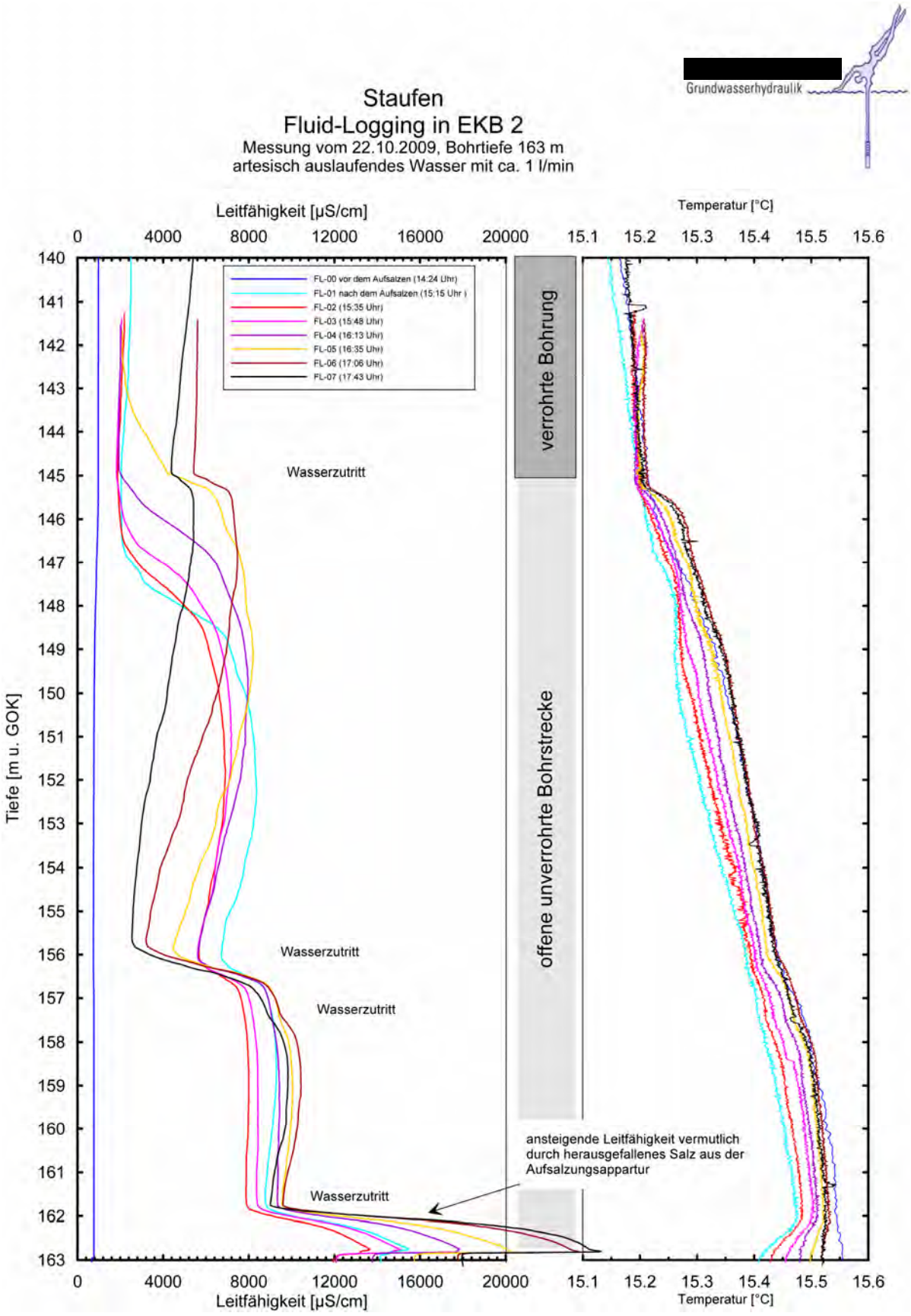


Abb. 5.63: Fluid-Logging (Tiefenabschnitt 140,0 m u. GOK bis 163,0 m u. GOK, 22. Oktober 2009).

5.5.2.4 Beobachtungen von Spülungsabgängen

Um Hinweise über die Durchlässigkeiten des Gebirges zu erhalten, wurden während des Abteufens der Bohrung in verschiedenen Tiefenabschnitten die eintretenden Spülungsabgänge beobachtet und notiert.

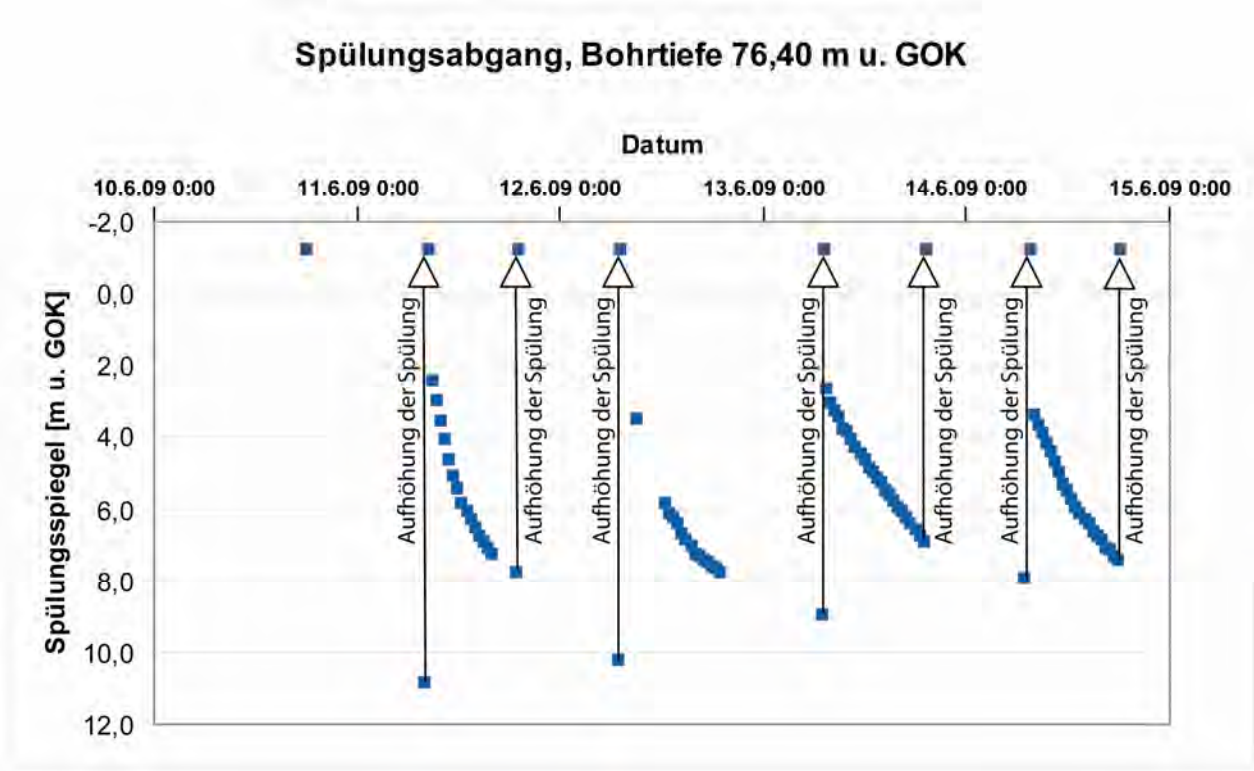


Abb. 5.64: Beobachtung der Spülungsabgänge zwischen dem 10. und 15. Juni 2009 (Bohrabschnitt 32,20 m u. GOK bis 76,40 m u. GOK).

Zwischen dem 10. Juni und dem 15. Juni 2009 wurde bei einer Bohrtiefe von 76,40 m u. GOK und der Position des 2. Sperrohres bei 32,20 m u. GOK (d.h. unterhalb des durch das Sperrrohr abgesperrten Gipskarstes) in den Unteren Bunten Estherienschichten und dem Mittleren Gipshorizont die Bohrspülung zur Stabilisierung des unverrohrten Bohrlochabschnittes wiederholt aufgefüllt (Abb. 5.64). Bei den zeitgleich erfolgten Messungen des Spülungsspiegels wurden wiederholt Spülungsabgänge beobachtet, die z.B. innerhalb von 22,5 Stunden zu einer Absenkung des Spülungsspiegels um 11,45 m (nicht dichtekorrigiert) von 1,2 m ü. GOK m auf 10,25 m u. GOK führte. Im Gebirgsabschnitt zwischen 59,0 m u. GOK und 95,0 m u. GOK wurden bei Ventiltests generell nur sehr geringe Durchlässigkeiten festgestellt. Beim Fluid-Logging wurden im Abschnitt zwischen 71,5 m u. GOK und 71,8 m u. GOK sowie zwischen 73,8 m u. GOK und 74,0 m u. GOK nur gering Wasserzutritte in das Bohrloch lokalisiert. Demzufolge dürften die Spülungs-

abgänge überwiegend im Bereich der Bohrlochsohle bei 76,4 m u. GOK zu verzeichnen gewesen sein (Abb. 5.66).

Zwischen dem 14. August und dem 17. August 2009 wurde die Bohrspülung im Unterkeuper bei einer Bohrtiefe von 148 m u. GOK und der Position des 3. Sperrohres bei 97,60 m u. GOK gemessen und zwei Mal aufgefüllt (Abb. 5.65). Es erfolgte ein Spülungsabgang, der innerhalb von ca. 18 Stunden zu einer Absenkung des Spülungsspiegels um 11,33 m (nicht dichtekorrigiert) führte. Im Gebirgsabschnitt zwischen 100,0 m u. GOK und 129,0 m u. GOK wurden bei Ventiltests sehr geringe Durchlässigkeiten festgestellt. Am 05. August 2009 erfolgte zuvor zwischen 113 m und 119,5 m eine Bohrlochzementation. In der Bohrung wurden bis 141,66 m u. GOK gering durchlässiger Dolomit- und Gipsstein, darunter bis 142,84 m u. GOK Gipsauslaugungsresiduen angetroffen. Darunter folgen Dolomitsteine des Unterkeupers. Beim Fluid-Logging wurden bei 145,2 m u. GOK Grundwasserzutritte lokalisiert. Demzufolge sind die Spülungsabgänge sehr wahrscheinlich in diesem Abschnitt erfolgt (vgl. Abb. 5.65).

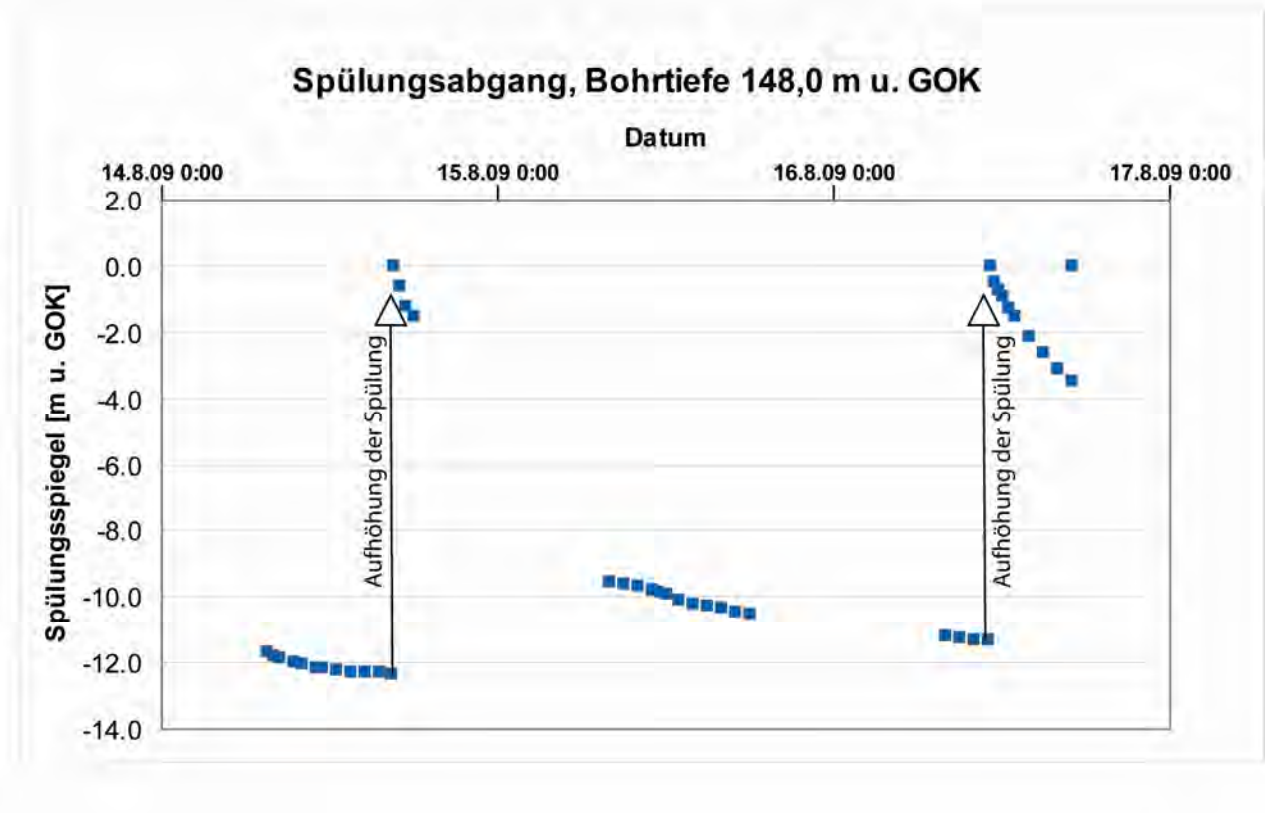


Abb. 5.65: Beobachtung der Spülungsabgänge zwischen dem 14. und 17. August 2009 (Bohrabschnitt 98,0 m u. GOK bis 148,0 m u. GOK).

5.5.2.5 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der hydraulischen Untersuchungen in der Erkundungsbohrung EKB 2

Die Ergebnisse der hydraulischen Untersuchungen sind in der Abb. 5.66 zusammenfassend dargestellt.

In der **Schilfsandstein-Formation (km2)** wurde durch einen Pumpversuch eine Profildurchlässigkeit T/H = 8 • 10^{-6} m/s nachgewiesen. Dort sind nach der Kernbeschreibung die höchsten Durchlässigkeiten im Tiefenabschnitt von 11,45 m u. GOK bis 13,95 m u. GOK zu erwarten, in dem mehrere, z. T. mürbe und geklüftete, stückig bis grobstückig zerfallende, graue bis rostbraune Sandsteinlagen auftreten.

Die hydraulischen Untersuchungen erbrachten für den **verkarsteten Abschnitt der Gipskeuper-Formation (km1)** eine Profildurchlässigkeit T/H von ca. 1 • 10^{-6} m/s. Nach den Kernbefunden konzentrieren sich die Wasserwegsamkeiten auf den Tiefenabschnitt zwischen 27,30 m u. GOK und 28,60 m u. GOK, in dem unter einer Abfolge von Gipsauslaugungsresiduen Kernverlust auftrat.

Die Profildurchlässigkeit im **Unterkeuper** (ku) der EKB 2 (T/H = 4,5 bis 6,1 • 10^{-6} m/s) ist mit der in der Schilfsandstein-Formation vergleichbar. Hier konzentrieren sich die Hauptwasserwegsamkeiten auf Dolomitbänkchen bzw. auf wenige Klüfte.

Die Profildurchlässigkeit in den darunter folgenden Dolomitsteinen des **Oberen Muschelkalk** (mo) ist mit einer Profildurchlässigkeit T/H von ca. 4 • 10^{-7} m/s vergleichsweise gering.

Zwischen 29,35 m u. GOK und 141,05 m u. GOK ist die durchteufte Gesteinsabfolge nach dem Bohrbefund überwiegend gering bis sehr gering durchlässig. Dies belegen auch die zwischen 49,5 m u. GOK und 129,0 m u. GOK durchgeführten, den gesamten Teufenabschnitt nahezu lückenlos abdeckenden Ventiltests (Transmissivitätswerte von T = 10^{-6} m²/s und kleiner). Geringe Wasserwegsamkeiten konzentrieren sich nach den Ergebnissen der Fluid-Logging-Messungen auf den Tiefenabschnitt zwischen 71,8 m u. GOK bis 74,0 m u. GOK. Dieser Befund deckt sich mit Beobachtungen am Kernmaterial an der Bohrstelle unmittelbar nach der Entnahme der Kerne aus den Bohrhülsen. Danach traten in diesem Profilabschnitt gehäuft erdfeuchte Gips-/Anhydrit- bzw. Tonsteine auf, die zum Teil aufgrund des hohen Quelldruckes spontan zu Bröckchen zerfielen.

Die Beobachtungen der Spülungsabgänge deuten im Tiefenabschnitt um 76,40 m u. GOK auf eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit hin.

Beim Pumpversuch PV2/EKB 2 (km1, Gipskarst) sank der Grundwasserstand in der EKB 1 (Unterkeuper) um 0,23 m. Vermutlich handelte es sich dabei um eine Druckreaktion. Darauf deutet hin, dass die zeitgleich beobachteten, geringfügigen Veränderungen im Grundwasserchemismus des in der EKB 2 geförderten Grundwasser zwar kein einheitliches Bild liefern, aber eher auf eine Beeinflussung durch das Grundwasser im Schilfsandstein der EKB 2 hindeuten als durch die EKB 1 (z. B. nahmen die Rubidiumgehalte im Grundwasser der EKB 2 während des PV2/EKB 2 von 20,7 µg/l auf 5,2 µg/l ab. Im Vergleich dazu lagen die Rubidiumgehalte im Grundwasser der EKB 1 (ku) bei 20,3 µg/l bis 24,1 µg/l, die in der EKB 2 (km2) bei 4,5 µg/l bis 5,2 µg/l; ähnliche Tendenzen zeichnen sich bei Kalium ab).

Bei den Pumpversuchen im Unterkeuper und im Oberen Muschelkalk der EKB 2 reagierte der Grundwasserstand in der EKB 1 nicht entnahmebedingt. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen, wonach sich die Beschaffenheit der während der Pumpversuche entnommenen Grundwässer nicht änderte.

Die Grundwasserstockwerke im Unterkeuper und Oberen Muschelkalk der tektonischen Scholle, auf der die EKB 2 abgeteuft wurde, sind hydraulisch vom Unterkeuper-Stockwerk der Nachbarscholle, auf der die EKB 1 liegt, entkoppelt.

Weder bei den Pumpversuchen, noch bei den über mehrere Wochen laufenden Dauerabsenkbetrieben in der EKB 2 hat sich im Absenkverhalten des Grundwasserspiegels eine Anreicherungs- oder Abreicherungsgrenze deutlich bemerkbar gemacht. In Verbindung mit der hydrochemisch und isotopisch außerordentlich konstanten Beschaffenheit des geförderten Grundwassers muss im Unterkeuper- und Muschelkalkstockwerk des durch die EKB 2 erschlossenen Gebirgsbereiches, aus dem zwischenzeitlich über längere Zeiträume Grundwasser im Dauerabsenkbetrieb entnommen wurde, von einem ausgedehnten Grundwasservorkommen mit stagnierenden Grundwässern ausgegangen werden. Das durch die Bohrungen und die seismischen Messungen nachgewiesene kleinräumige Schollenmosaik macht sich in diesem Gebirgsabschnitt hydraulisch nicht bemerkbar.

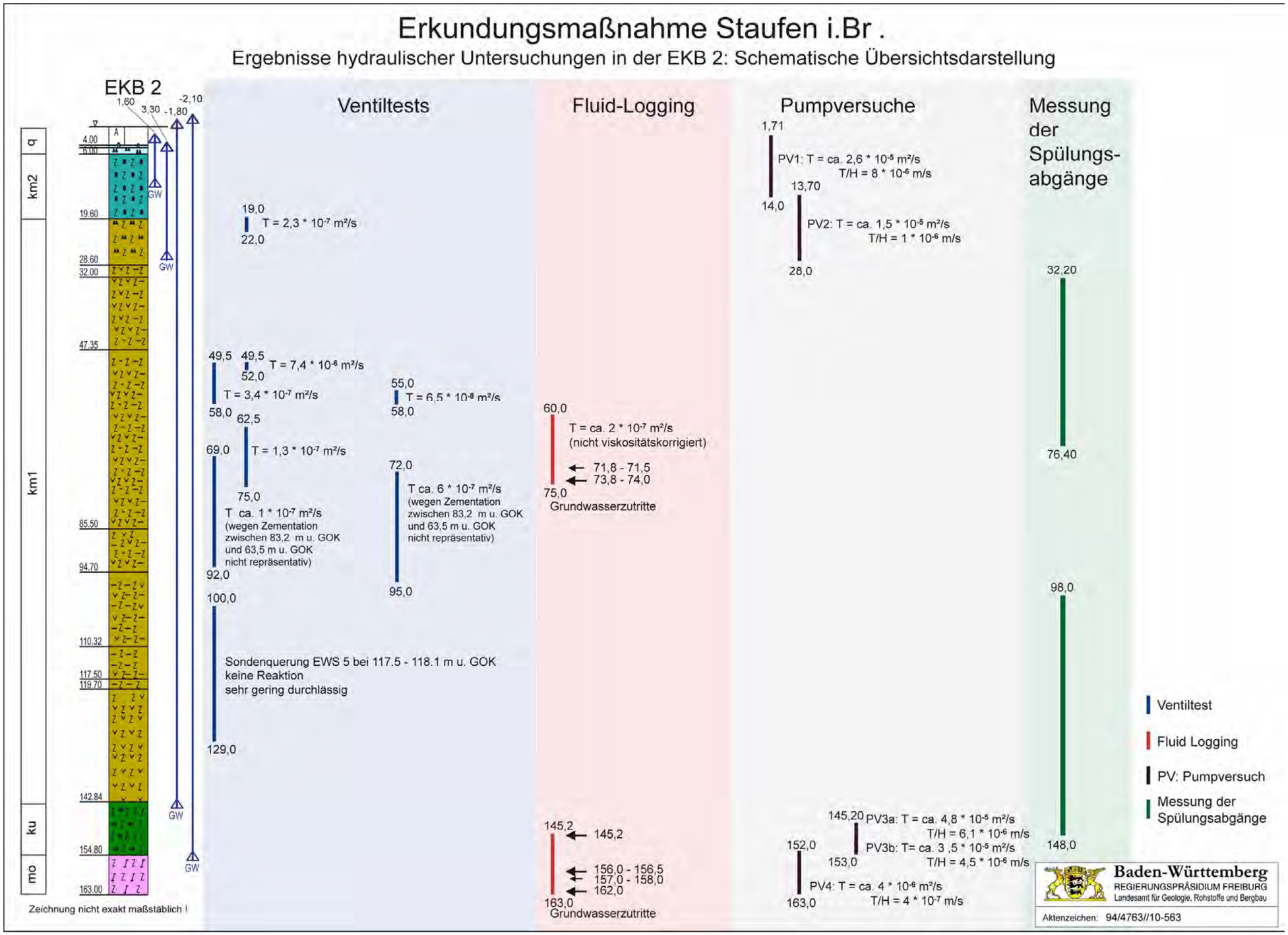


Abb. 5.66 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der hydraulischen Untersuchungen.

5.5.3 Hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen

Während der Pumpversuche und dem anschließenden Dauerabsenkbetrieb wurden in der EKB 1 acht und in der EKB 2 dreizehn Wasserproben zur hydrochemischen und isotopenhydrologischen Charakterisierung des Grundwassers entnommen. Zu Referenzzwecken wurde auch das Grundwasser im quartären Kiesaquifer an verschiedenen Brauchwasserbrunnen im Stadtgebiet untersucht (6 Proben) (Tab. 5.17).

5.5.3.1 Hydrochemische und isotopenhydrologische Charakterisierung der Grundwässer

Die Ergebnisse der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen sind in Anl. 5.9 zusammengestellt. In den Tab. 5.18 und Tab. 5.19 sind die Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe und die isotopische Beschaffenheit zusammenfassend dargestellt.

In den Abb. 5.67 bis Abb. 5.70 sind ausgewählte Ergebnisse der isotopenhydrologischen Untersuchungen graphisch dargestellt. Sie werden bei der Beschreibung der Grundwässer in den einzelnen Grundwasserstockwerken diskutiert. In der Abb. 5.84 wurden die wichtigsten Ergebnisse synoptisch zusammengefasst.

Tab. 5.17: Hydrochemische und isotopenhydrologische Beprobungen.

Zweck	Probenbezeichnung	TK25	Arnum	Probenahme-zeitpunkt	Beprobter Tiefenabschnitt		Geologische Einheit
					von [m u. GOK]	bis [m u. GOK]	
Bestandsaufnahme	INEOS Brunnen 1 Kunststoffwerk Staufen	8112	1	02.02.2009-09:30	5,0	9,0	qN-qBS
Bestandsaufnahme	BBR Schladerer Neu Staufen	8112	15	02.02.2009-11:00	2,85 14,85	10,85 15,85	qN
Bestandsaufnahme	BBR Schladerer Neu Staufen	8112	15	23.06.2009-09:00	2,85 14,85	10,85 15,85	qN
Bestandsaufnahme	WP Entnahmebrunnen Staufen Grünmatten	8112	263	03.02.2009-09:15	3,70	7,70	qN
Bestandsaufnahme	Laufbrunnen Innenhof Fa. Schladerer Staufen ehem. Tuchfabrik Müller	8112	280	02.02.2009-10:30	3,0	ca. 7,8	qN
Bestandsaufnahme	Laufbrunnen Innenhof Fa. Schladerer Staufen ehem. Tuchfabrik Müller	8112	280	23.06.2009-12:30	3,0	ca. 7,80	qN
PV_EKBI_ 01_Anfang	Erkundungsbohrung EKB 1 Rathaus Staufen	8112	287	13.03.2009-15:50	13,20	17,80	qN
PV_EKBI_ 02	Erkundungsbohrung EKB 1 Rathaus Staufen	8112	287	13.03.2009-17:00	13,20	17,80	ku
PV_EKBI_ 03	Erkundungsbohrung EKB 1 Rathaus Staufen	8112	287	14.03.2009-12:30	13,2	17,80	ku
PV_EKBI_ 04_Ende	Erkundungsbohrung EKB 1 Rathaus Staufen	8112	287	14.03.2009-14:45	13,2	17,80	ku
EKBI_ Nachbeprobung	Erkundungsbohrung EKB 1 Rathaus Staufen	8112	287	28.07.2009-08:45	14,50	17,80	ku
PV1_EKBII_ 01 Anfang	Erkundungsbohrung EKB 2 Rathaus Staufen	8112	289	31.03.2009-16:05	16,0	13,2	km2
PV1_EKBII_ 02_Ende	Erkundungsbohrung EKB 2 Rathaus Staufen	8112	289	31.03.2009-18:00	16,0	13,2	km2
PV1_EKBII_ 03_Ende WA	Erkundungsbohrung EKB 2 Rathaus Staufen	8112	289	31.03.2009-19:15	16,0	13,2	km2
PV2_EKBII_ 02_Anfang	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	23.04.2009-11:15	7,0	16,0	km1
PV2_EKBII_ 02_Mitte	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	23.04.2009-13:15	16,0	16,0	km1
PV2_EKBII_ 02_Ende	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	23.04.2009-18:00	15,0	16,0	km1
PV3a_EKBII_ Anfang	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	28.09.2009-15:15	100,0	153,0	ku
PV3a_EKBII_ Ende	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	09.10.2009-10:15	100,0	153,0	ku
PV3b_EKBII_ Mitte	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	14.10.2009-14:40	130,0	153,0	ku
PV3b_EKBII_ Ende	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	17.10.2009-10:00	132,0	153,0	ku
PV4_EKBII_ Anfang	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	23.10.2009-08:30	150,0	163,0	mo2D
PV4_EKBII_ Ende	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	25.10.2009-17:00	150,0	163,0	mo2D
Dauerentnahme	Erkundungsbohrung EKB 2 Staufen Rathaus	8112	289	10.11.2009 9:30	ca. 126 m	163,0	ku/mo2D

Tab. 5.18: Ergebnisse der isotopenhydrologischen Untersuchungen der Grundwässer in Staufen (aus dem Bericht der Fa. Hydroisotop vom 17. Dezember 2009).

Labor-Nr.		201600	201601	202299	203308	203309	203310	207932	208265	208427	208727	208928	208929	208266	204985	204986
Bezeichnung		EKB 1	EKB 1	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	Trinkwasser	BBR Neu Fa. Schladerer	Lbr. Innenhof Fa. Schladerer
Geologische Einheit		Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Schilfsandstein (km2)	Gipskarst (km1)	Gipskarst (km1)	Gipskarst (km1)	Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Muschelkalk (mo2)	Muschelkalk (mo2)	Quartär	Quartär	Quartär
Entnahmedatum		13.03.2009	14.03.2009	31.03.2009	23.04.2009	23.04.2009	23.04.2009	28.09.2009	09.10.2009	14.10.2009	17.10.2009	23.10.2009	25.10.2009	09.10.2009	23.06.2009	23.06.2009
Uhrzeit		17:15	12:30	18:00	11:15	13:10	18:00	15:15	10:15	15:15	11:00	09:30	17:00	12:00	09:00	12:30
spez. el. Leitfähigkeit (25 °C) Labor	µS/cm	1330	1470	2380	2810	2770	2750	1321	1217	1204	1206			318	315	458
Trichlorfluoromethan (FI1)	pmol/l	0,4 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,46 ± 0,05		0,05 ± 0,05	0,06 ± 0,05		0,03 ± 0,05		0,05 ± 0,05	0,04 ± 0,05	0,02 ± 0,05	12,0 ± 3,0	10 ± 1	5,4 ± 0,6
Dichlordifluormethan (FI2)	pmol/l	0,34 ± 0,05	0,4 ± 0,05	0,21 ± 0,05		0,08 ± 0,05	0,05 ± 0,05		0,03 ± 0,05		0,06 ± 0,05	0,04 ± 0,05	0,01 ± 0,05	4,8 ± 0,3	4,9 ± 0,5	3,4 ± 0,4
1,1,2-Trichlortrifluorethan (FI13)	pmol/l	0,29 ± 0,05	0,8 ± 0,1	0,04 ± 0,05		0,013 ± 0,05	< 0,01		0,01 ± 0,05		0,01 ± 0,05	0,01 ± 0,05	< 0,01	0,49 ± 0,05	30 ± 6	16 ± 3
Schwefelhexafluorid (SF6), max. 3	fmol/l	2,8 ± 0,3	2,7 ± 0,3	0,03 ± 0,1		0,4 ± 0,1	0,1 ± 0,1		0,1 ± 0,1		0,1 ± 0,1	< 0,1	< 0,1	2,3 ± 0,3	2,3 ± 0,3	2,6 ± 0,3
Sauerstoff-18 (*18O)	‰	-9,28	-9,24	-9,01	-9,62	-9,61	-9,54	-9,48	-9,17	-9,16	-9,19	-9,24	-9,09	-9,35	-9,04	-8,72
Deuterium (*2H)	‰	-65,7	-65,8	-63,7	-68,7	-68,2	-65,1	-68,0	-63,3	-63,0	-63,4	-64,1	-62,7	-64,2		
Deuterium-Exzeß	‰	8,5	8,2	8,4	8,3	8,7	11,2	7,8	10,1	10,3	10,12	9,82	9,98	10,6		
Tritium (*3H) rot = Schnellmessung	TU	5,5 ± 0,7	5,0 ± 0,6	0,8 ± 0,5	0,9 ± 0,4	< 0,6	< 0,6	< 0,7	< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,6	8,4 ± 0,9		
Kohlenstoff-13 (*13C-DIC)	‰	-13,52	-13,82	-13,60			-14,10		-11,95		-11,02	-9,09	-9,00	-13,27		
Kohlenstoff-14 (*14C-DIC)	%-modern		54,6 ± 2,5	43,2 ± 2,1			40,6 ± 2		18,1 ± 1,7		18,7 ± 1,7	9,7 ± 1,5	10,47 ± 1,6			
überhöht																

Tab. 5.19: Wichtigste Hauptinhaltsstoffe der untersuchten Grundwässer in Staufen.

Stratigraphie		An-zahl	elektrische Leitfähigkeit [µS/cm]	Temp. [°C]	pH	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Cl [mg/l]	SO_4 [mg/l]	SiO_2 [mg/l]	NO_3 [mg/l]	HCO_3 [mg/l]
Quartär		6	138-486	7,2-15,4	6,38-7,08	16,4-64-6	2,12-10,7	5,93-20,2	1,42-4,51	8,1-20,6	10,3-31,7	9,69-12,2	<0,41 - 12,7	150- 210
Schilfsandstein		3	1860-2370	12,7-13,3	6,88-7,07	309-533	44,8-60,2	14,4-19,1	3,93-4,23	10,8-17,0	928-1260	14,0-15,1	0,66-2,79	268- 354
Gipskeuper		3	2750-2810	13,0-13,1	6,85-6,91	610-622	50,5-57	21,4-90,3	4,93-7,83	7,8-8,51	1480-1530	14,4-14,9	0,84-1,08	360- 444
Unter-keuper	EKB 1	5	1115-1470	14,0-14,6	7,07-7,19	175-235	31,3-36,1	20,1-27,2	22,9-43	15,2-20,6	417-549	14,1-15,3	0,74-1,82	239- 293
	EKB 2	4	1210-1330	15,14-16,4	7,03-7,05	206-218	41,0-42,7	5,74-9,58	6,51-38,8	3,19-3,9	428-481	10,6-11,1	<NG	329- 357
Oberer Muschelkalk		2	714-717	15,8-16,1	7,08-7,19	92,3-92,4	39,7-39,9	3,63-3,86	2,32-2,7	2,84-2,87	75,7-76,3	9,31-9,7	<NG-0,57	397
Unterkeuper/ Oberer Muschelkalk		1	1030	16,1	7,04	162	41,1	15,4	4,05	3,19	291	10,5	<NG	354

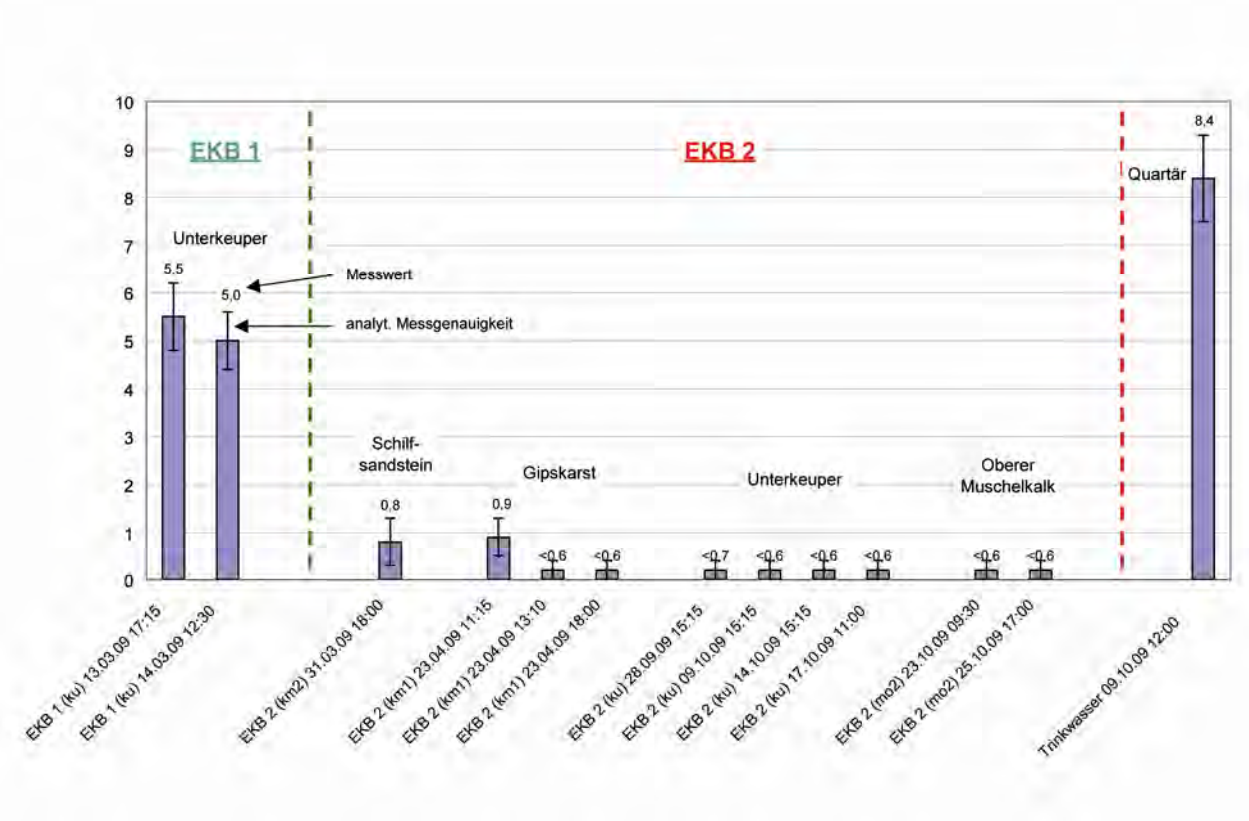


Abb. 5.67: Ergebnisse der Tritium-Messungen
(aus dem Bericht der Fa. HYDROISOTOP vom 17. Dezember 2009).

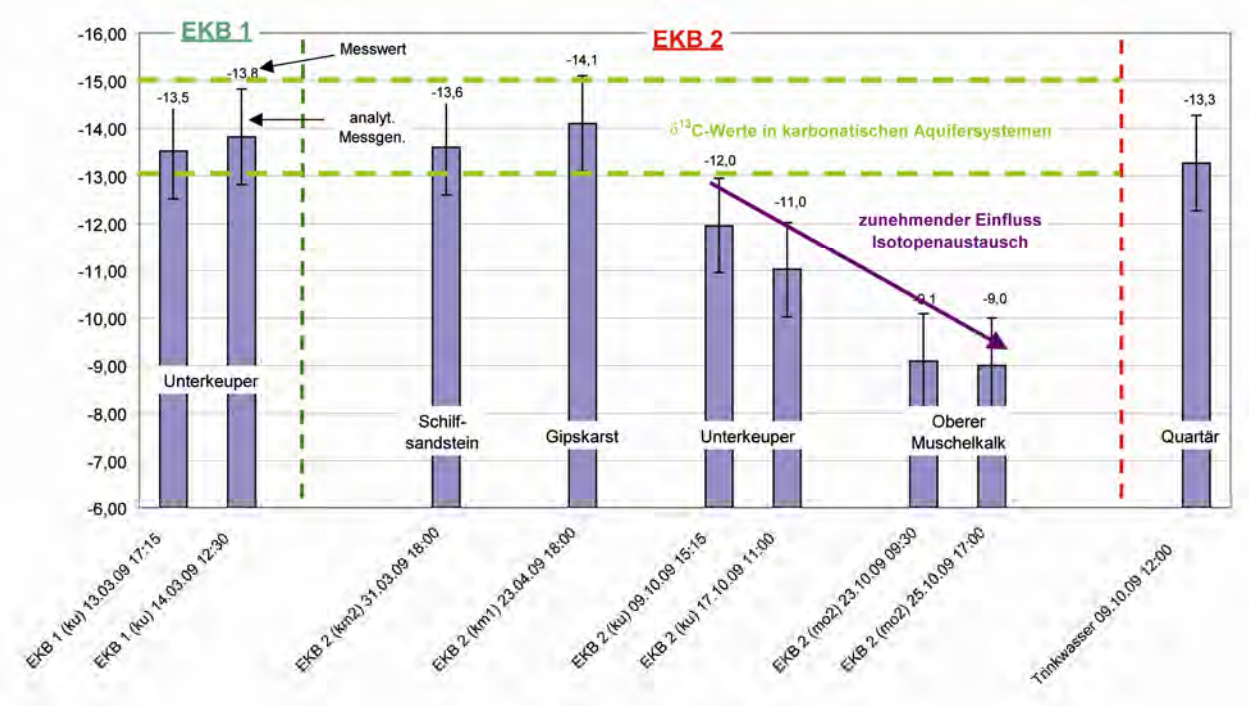


Abb. 5.68: Ergebnisse der $\delta^{13}C$-Messungen
(aus dem Bericht der Fa. HYDROISOTOP vom 17. Dezember 2009).

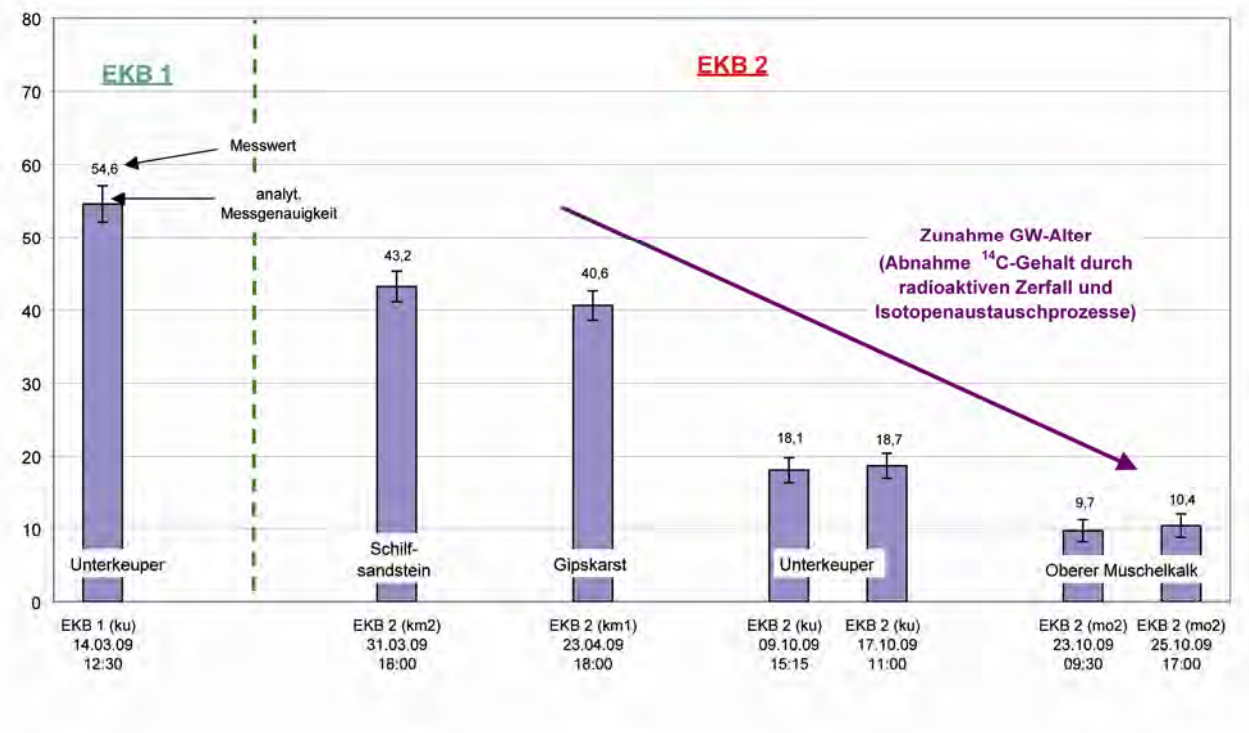


Abb. 5.69: ^{14}C-Gehalte der Grundwasserproben der EKB 1 und EKB 2 Staufen (aus dem Bericht der Fa. HYDROISOTOP vom 17. Dezember 2009).

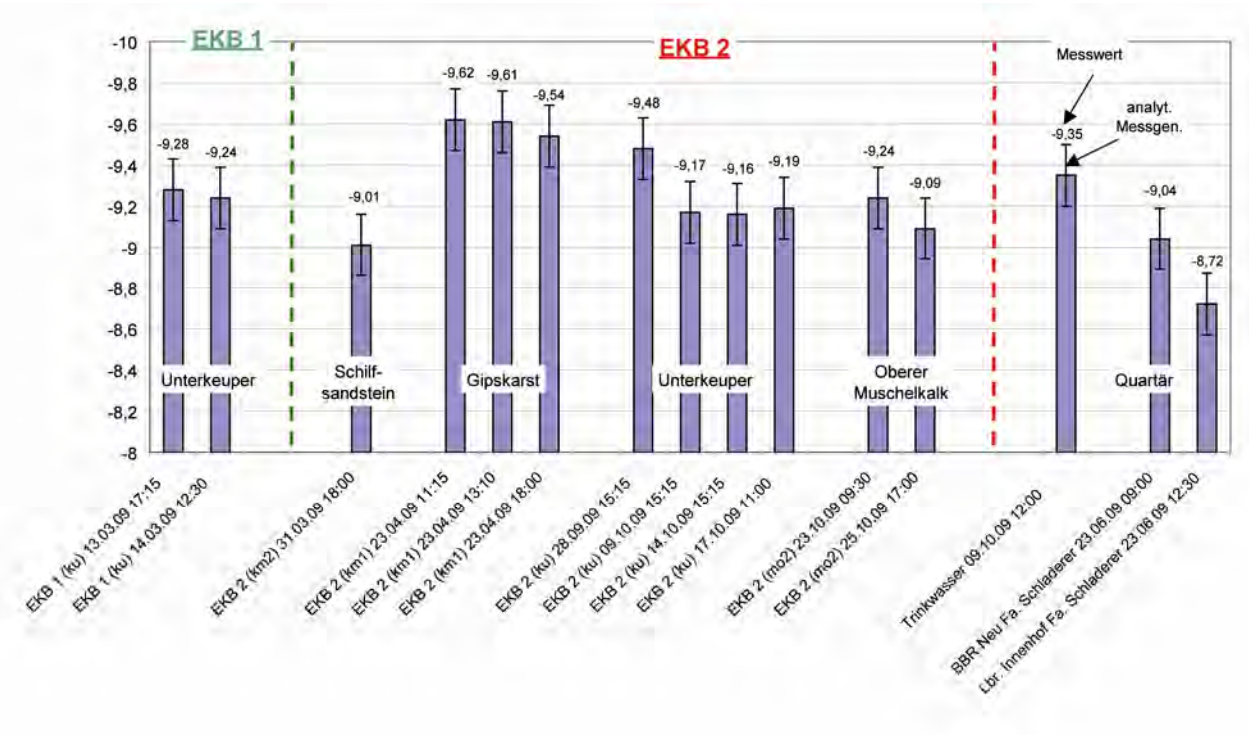


Abb. 5.70: Ergebnisse der δ^{18}O-Messungen (aus dem Bericht der Fa. HYDROISOTOP vom 17. Dezember 2009).

5.5.3.1.1 Quartär

Im Stadtgebiet von Staufen wird aus mehreren Brunnen zu Brauchwasserzwecken Grundwasser aus den Lockergesteinen des **Quartärs** entnommen (BBR Schladerer Neu, Laufbrunnen Innenhof Schladerer, Staufen Grünmatten sowie Staufen BBR 1 EVC, vgl. Tab. 5.17). Diese Brunnen wurden zu Referenzzwecken zur Charakterisierung der quartären Grundwasserkomponente beprobt (6 Analysen). Die quartären Wässer unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Höhe der Mineralisation sowie in der hydrochemischen und isotopischen Beschaffenheit deutlich von den Grundwässern der Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2.

Es handelt sich um **normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässe**r (PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH 1967, Abb. 5.71). Das quartäre Grundwasser weist eine elektrische Leitfähigkeit von 138 µS/cm – 486 µS/cm auf und ist somit vergleichsweise gering mineralisiert. Dementsprechend liegen die Konzentrationen der meisten Inhaltsstoffe deutlich unter denen der Grundwässer aus den tieferen Stockwerken. Lediglich die Konzentrationen an Clorid sind vergleichbar und die an Nitrat liegen über denen aus den Grundwässern aus dem Festgestein.

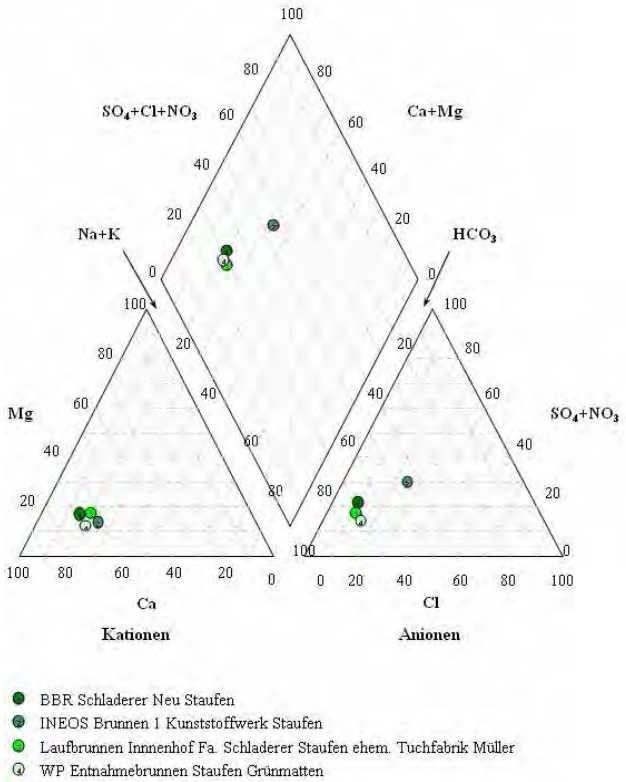


Abb. 5.71: PIPER-Diagramm: Grundwasser des quartären Kiesgrundwasserleiters im Stadtgebiet von Staufen.

Nach der für Mineralwässer üblichen hydrochemischen Typisierung sind diese Wässer überwiegend vom **Ca-HCO_3-Typ** (UDLUFT-Diagramm, Abb. 5.84). Lediglich das außerordentlich gering mineralisierte Wasser des unmittelbar am Neumagen liegenden Brunnens Staufen BBR 1 EVC ist aufgrund des auf anthropogene Einträge (Straßensalzung) aus dem zumindest abschnittsweise infiltrierenden Neumagen zurückzuführenden erhöhten Natriumchlorid-Gehalts vom **Ca-Na-HCO_3-Cl-Typ**.

Für die Proben im quartären Grundwasserleiter liegen die Sauerstoff-18-Signaturen (-9,04 ‰ bis -8,72 ‰) zwischen den für die lokale Neubildung im Rheintal (-8,0 ‰ bis -8,5 ‰) und den aus Uferfiltrat des Neumagens (-9,5 ‰) angenommenen $\delta^{18}O$-Werten (Tab. 5.18, Tab. 5.20, s. Ergebnisse Interreg II, Bericht HYDROISOTOP vom 23. Oktober 2000).

Tab. 5.20: Ergebnisse der Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Quartär im Stadtgebiet von Staufen sowie im Trinkwasser (überwiegend Quellwasser aus dem Münstertal) (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Parameter	Ergebnisse
Tritium [TU]	8,4 ± 0,9 (Trinkwasser)
Sauerstoff-18 [‰]	-9,04 bis -8,72 (Trinkwasser: -9,35)
Deuterium [‰]	-64,2 (Trinkwasser)

5.5.3.1.2 Schilfsandstein (km2)

Das im **Schilfsandstein** (km2) in der EKB 2 erschlossene Grundwasser (3 Analysen, 31. März 2009, PV1/EKB 2) ist ein **normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser** (PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH 1967, Abb. 5.72).

Nach der für Mineralwässer üblichen hydrochemischen Typisierung ist es vom **Ca-SO_4-Typ** (UDLUFT-Diagramm, Abb. 5.84).

Die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe in den drei während des Pumpversuches an einem Tag entnommenen Analysen stimmen recht gut überein. Es handelt sich um ein Wasser mit erhöhten elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 1860 µS/cm und 2370 µS/cm, in dem deutliche Mengen an Calciumsulfat gelöst sind. Der Gehalt an Kalium ist mit 4 mg/l bis 4,2 mg/l wesentlich geringer als in den Wasserproben aus dem in vergleichbarem Tiefenniveau erschlossenen Grundwasser aus dem Unterkeuper der EKB 1 auf der tektonischen Nachbarscholle.

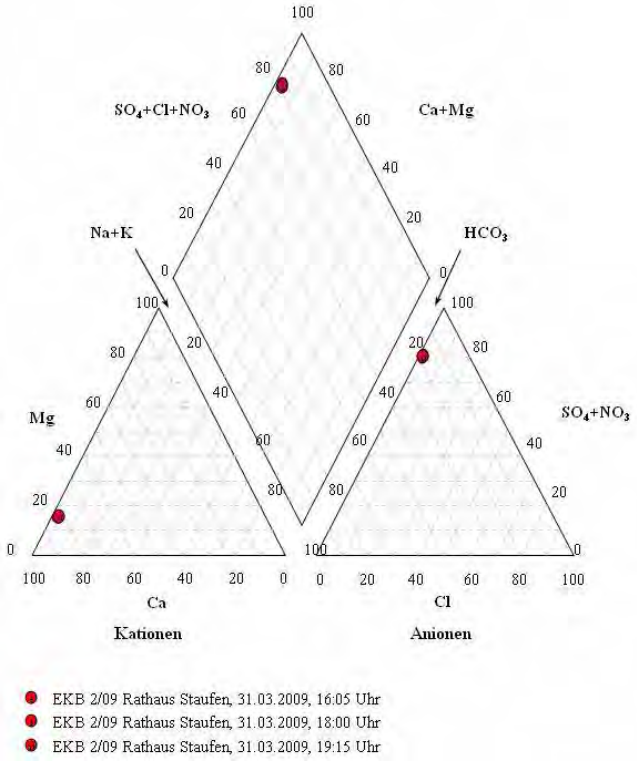


Abb. 5.72: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Schilfsandstein (km2) der EKB 2 Staufen.

Mit dem Programm PHREEQC wurden die Mineral-Sättigungszustände (Abb. 5.73 und Abb. 5.84) berechnet. Hinsichtlich des Minerals Calcit besteht eine Sättigung bis Übersättigung. Calcit kann daher aus dem Grundwasser als Mineral abgeschieden werden. Hinsichtlich des Minerals Dolomit ist das Schilfsandstein-Grundwasser untersättigt. Gips und Anhydrit können aufgrund der Untersättigung im Grundwasserleiter gelöst werden.

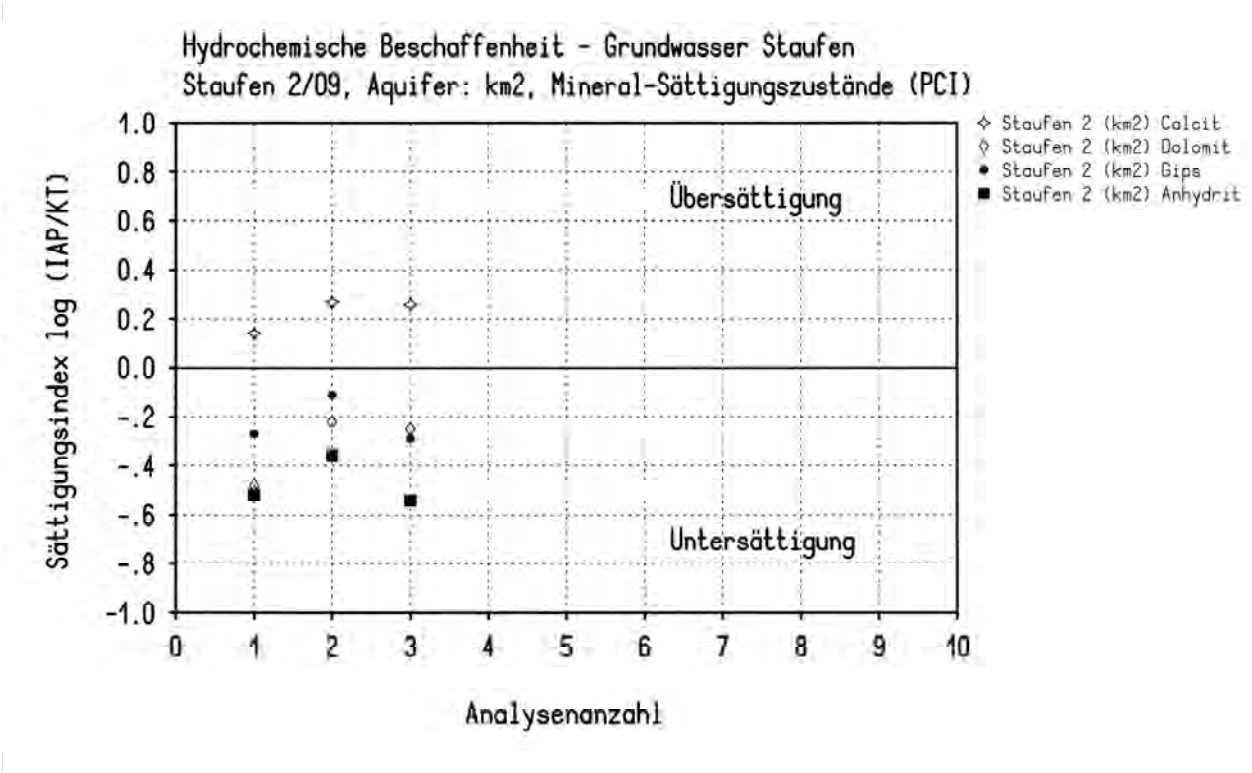


Abb. 5.73: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus dem Schilfsandstein (km2) der EKB 2.

Im Grundwasser aus dem Schilfsandstein der EKB 2 konnte Tritium nur in sehr geringen Konzentrationen nachgewiesen werden (Tab. 5.21, Abb. 5.67). Grundwässer ohne Nachweis von Tritium wurden vor den oberirdischen Wasserstoffbombentests der 1950-er und 1960-er Jahre neu gebildet und sind somit älter als 50 Jahre. Die geringen Tritiumgehalte von ca. 1 TU im Schilfsandstein (und teilweise auch im Gipskarst) belegen die Dominanz über 50 Jahre alter Komponenten. Der tritiumhaltige Jungwasseranteil am Mischwasser aus dem km2 liegt bei max. ca. 10 %. Der sehr geringe Gehalt an Tritium wird auf geringfügige Umläufigkeiten der Verrohrungen oder auf Resteinflüsse der Bohrspülung zurückgeführt, so dass anzunehmen ist, dass das Grundwasser im Schilfsandstein aus **alten, tritiumfreien Komponenten** besteht.

Die ^{14}C-Gehalte zeigen erkennbare Zerfallsprozesse. Unter den in Kap. 5.3.3.2.3 aufgeführten Randbedingungen lässt sich ein Alter von 2 000 - 5 000 Jahren berechnen.

Tab. 5.21: Ergebnisse der Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Schilfsandstein (km2) der Erkundungsbohrung EKB 2 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Parameter	Ergebnisse
Tritium [TU]	0,8
Sauerstoff-18 [‰]	-9,01
Deuterium [‰]	-63,8
Kohlenstoff-13 [‰]	-13,6
Kohlenstoff-14 [%-modern]	43,2

5.5.3.1.3 Gipskeuper (km1, Gipskarst)

Das im **Gipskeuper (km1, Gipskarst)** erschlossene Grundwasser (3 Analysen, 23. April 2009, PV2/EKB 2) ist ein **normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser** (PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH 1967, Abb. 5.74).

Nach der für Mineralwässer üblichen hydrochemischen Typisierung ist es vom **Ca-SO_4-Typ** (UDLUFT-Diagramm, Abb. 5.84). Es handelt sich um ein Wasser mit hohen elektrischen Leitfähigkeiten von 2750 µS/cm bis 2810 µS/cm, in dem deutliche Mengen an Calciumsulfat gelöst sind. Erwartungsgemäß übersteigt die Sulfat-Konzentration diejenige der anderen untersuchten Grundwasserstockwerke (Schilfsandstein, Unterkeuper, Oberer Muschelkalk) deutlich.

Die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe in den drei an einem Tag entnommenen Analysen stimmen bis auf die Alkalien gut überein. Auffallend ist der Rückgang der Natrium-Konzentration mit der Zeit. In den Wasserproben von 11:15 Uhr und 13:15 Uhr waren noch hohe Natrium-Konzentrationen (60 mg/l bis 90 mg/l), in der um 18:00 Uhr entnommenen Probe nur noch 21 mg/l Natrium enthalten. Auch die Kalium-Konzentrationen gingen von ca. 6 mg/l bis 8 mg/l auf ca. 4 mg/l deutlich zurück. Der Rückgang der Alkalien dokumentiert wahrscheinlich den Rückgang der Spülungsbeeinflussung mit der Pumpdauer.

Hinsichtlich der Mineral-Sättigungszustände (Abb. 5.75) sind die drei Analysen insofern unterschiedlich, als dass die in allen Wasserproben vorhandene Übersättigung an Calcit im Verlauf der Probenahme abnimmt. Die anfangs vorhandene Dolomit-Übersättigung ist bei den zwei späteren Wasserproben nicht mehr vorhanden. Dolomit ist hier untersättigt. Die Wasserproben sind einheitlich an Gips gesättigt und an Anhydrit untersättigt. Anhydritlösung und Gipsneubildung stehen im Gleichgewicht.

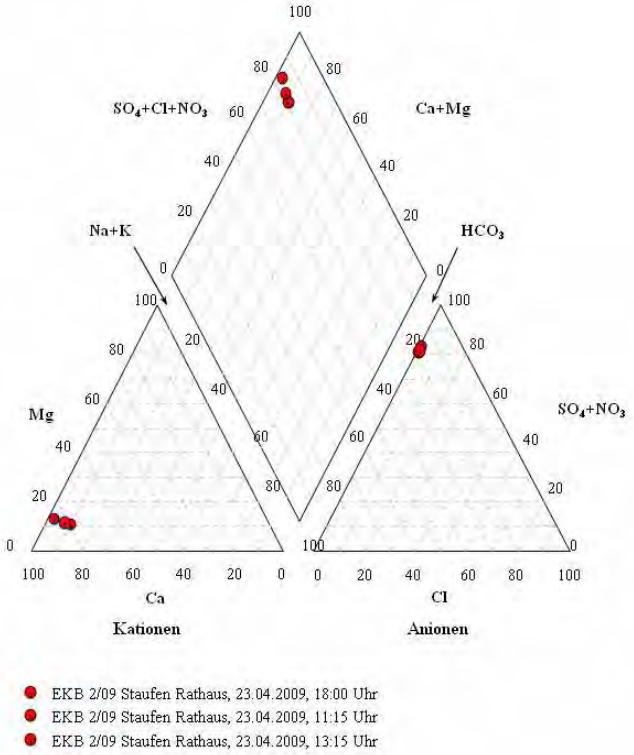


Abb. 5.74: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Gipskeuper (km1) der EKB 2 Staufen.

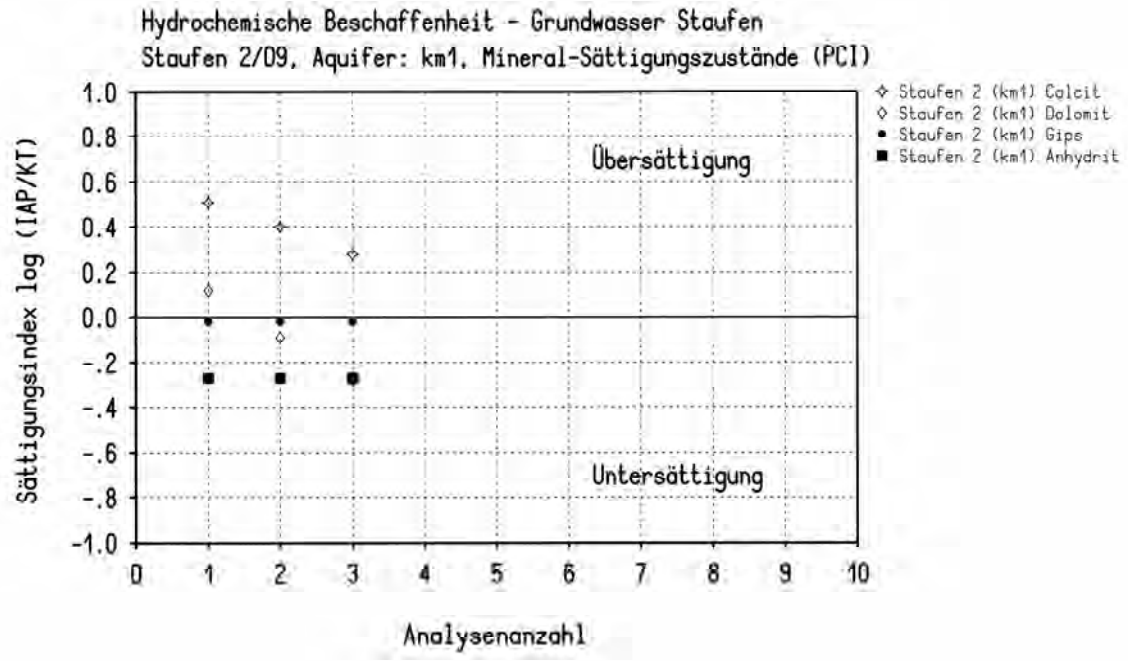


Abb. 5.75: Mineral-Sättigungszustände des Grundwassers aus dem Gipskeuper (km1) der EKB 2 Staufen.

Beim zweitägigen Pumpversuch im Gipskarstabschnitt des Gipskeupers wurden die Isotopensignaturen an 3 Proben untersucht, wobei die Kohlenstoffisotope nur bei der letzten Probe untersucht wurden (Tab. 5.18 und Tab. 5.22).

Der Nachweis von Tritium bei der ersten Probe steht wahrscheinlich noch in Zusammenhang mit der Bohrspülung (s. auch erhöhte Kalium- und Natriumgehalte). Bei den späteren Proben ist Tritium nicht mehr nachweisbar. Die konstanten Signaturen der stabilen Isotope des Wassers sowie die Hydrochemie weisen auf stabile Zustromverhältnisse während des Pumpversuchs hin.

Die ^{13}C- und ^{14}C-Gehalte sind ähnlich wie im überlagernden Schilfsandsteinaquifer. Markante Unterschiede ergeben sich jedoch anhand der Signaturen von Sauerstoff-18 und Deuterium, die isotopisch deutlich leichter sind als im überlagernden Schilfsandstein (Abb. 5.68 bis 5.70)

Tab. 5.22: Ergebnisse der Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Gipskeuper (km1) der Erkundungsbohrung EKB 2 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Parameter	**Ergebnisse**
Tritium [TU]	< 0,6 - 0,9
Sauerstoff-18 [‰]	-9,54 bis -9,62
Deuterium [‰]	-65,1 bis –68,2
Kohlenstoff-13 [‰]	-14,1
Kohlenstoff-14 [%-modern]	40,6

5.5.3.1.4 Unterkeuper (ku)

Das im **Unterkeuper (ku) der EKB 2** erschlossene Grundwasser (4 Analysen, 28. September 2009, 09. Oktober 2009 (PV3a/EKB 2), 14. Oktober 2009, 17. Oktober 2009, (PV3b/EKB 2)) ist ein **normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser** (PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH 1967, Abb. 5.76).

Nach der für Mineralwässer üblichen hydrochemischen Typisierung ist es vom **Ca-Mg-SO_4-HCO_3-Typ** (UDLUFT-Diagramm, Abb. 5.84). Es handelt sich um ein Wasser mit elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 1210 µS/cm und 1330 µS/cm, das deutlich geringer mineralisiert ist als das Wasser im Gipskarst-Stockwerk. Der Gehalt an gelösten Stoffen resultiert im Wesentlichen aus der Lösung von Sulfatgesteinen.

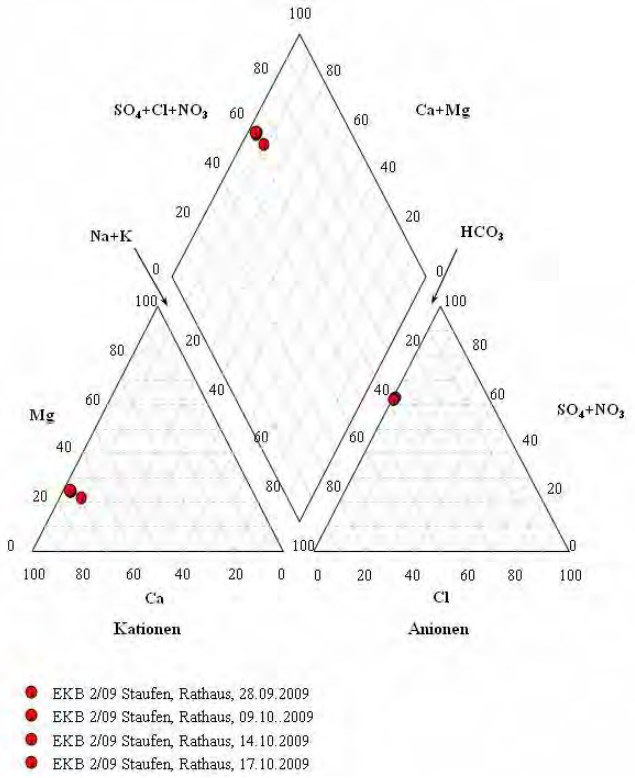


Abb. 5.76: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Unterkeuper (ku) der EKB 2 Staufen.

Die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe in den vier Analysen stimmen bis auf die Alkalien in der ersten Analyse vom 28. September 2009 gut überein. Die hohe Kalium-Konzentration von 38,8 mg/l in der ersten Probe weist auf Spülungsanteile hin. Die Kalium-Konzentration geht in den weiteren Proben kontinuierlich von knapp 10 mg/l auf 6,5 mg/l zurück, was als weiterer Rückgang der Spülungsbeeinflussung zu deuten ist.

Die mit dem Programm PHREEQC berechneten Mineral-Sättigungszustände (Abb. 5.77 und Abb. 5.84) zeigen folgendes Bild: Hinsichtlich des Minerals Calcit besteht eine leichte Übersättigung. Calcit kann daher aus dem Grundwasser ausfallen. Dolomit ist gesättigt bis leicht untersättigt. Hinsichtlich der Minerale Gips und Anhydrit ist das Unterkeuper-Grundwasser untersättigt. Dieses Bild entspricht den hydrogeologischen Erwartungen, da im Unterkeuper Gips- und Anhydrit-Ablagerungen fehlen.

Im Unterkeuper (ku) wurden zwei Pumpversuche durchgeführt. Die jeweils am Anfang der Pumpversuche entnommenen Proben wurden auf Tritium sowie Sauerstoff-18 und Deuterium untersucht, die am Ende zusätzlich auf ^{13}C- und ^{14}C-Gehalte sowie auf die an Spurengasen FCKW/SF6 (Tab. 5.23).

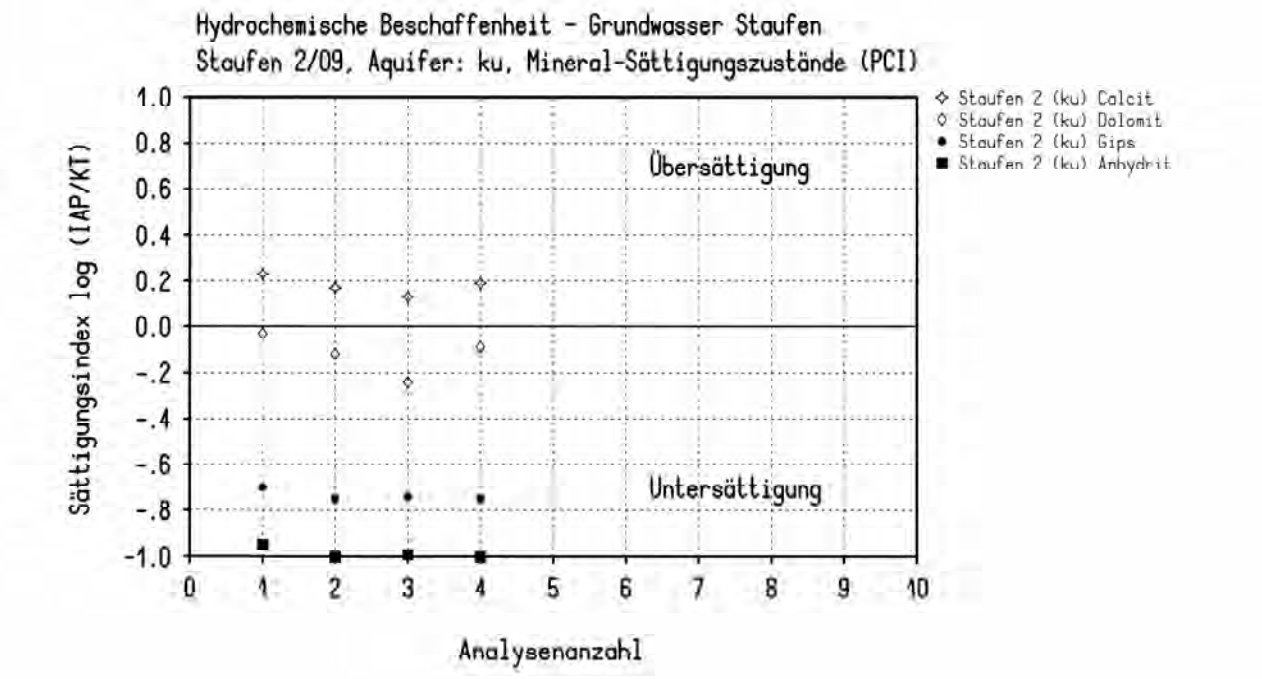


Abb 5.77: Mineral-Sättigungszustände im Grundwasser aus dem Unterkeuper der EKB 2.

Die beiden Proben vom ersten Pumpversuch unterscheiden sich lediglich durch den etwas leichteren Wert bei den stabilen Isotopen des Wassers. Dieser steht möglicherweise mit Resteinflüssen der Bohrspülung in Zusammenhang (siehe auch erhöhter Kaliumgehalt). Zu den Ergebnissen des zweiten Pumpversuchs gibt es keine signifikanten Unterschiede.

Die Ergebnisse des zweiten Pumpversuchs werden als die charakteristischen Signaturen des Grundwassers aus dem in der EKB 2 erschlossenen Unterkeuper angesehen. Die Isotopengehalte blieben während des Pumpversuches sehr konstant. Dies wird auch durch die Hydrochemie bestätigt und zeigt stabile Zustromverhältnisse.

Im Unterkeuperaquifer tritt ausschließlich altes, tritiumfreies Grundwasser auf (Abb. 5.67). Die im Vergleich zum Gipskeuper (km1) und Schilfsandstein (km2) geringeren ^{14}C-Gehalte weisen auf noch höhere Grundwasseralter hin (7 000 bis 10 000 Jahre, geringfügige Isotopenaustauschprozesse wurden berücksichtigt, Abb. 5.69).

Tab. 5.23: Ergebnisse der Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Unterkeuper (ku) der Erkundungsbohrung EKB 2 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Parameter	**Ergebnisse ***
Tritium [TU]	< 0,6 - <0,7
Sauerstoff-18 [‰]	-9,16 bis -9,19
Deuterium [‰]	-63,0 bis -63,3
Kohlenstoff-13 [‰]	-11,02 bis -11,95
Kohlenstoff-14 [%-modern]	18,1-18,7

* Analysenwerte vom 2. Pumpversuch (Probe 1. Pumpversuch evtl. leicht verfälscht)

5.5.3.1.5 Oberer Muschelkalk (mo)

Das im **Oberen Muschelkalk** erschlossene Grundwasser (2 Analysen, 23. Oktober 2009, 25. Oktober 2009, PV4/EKB 2) ist **ein normal erdalkalisches, überwiegend hydrogenkarbonatisches Wasser** (PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH 1967, Abb. 5.78).

Nach der für Mineralwässer üblichen hydrochemischen Typisierung ist es vom **Ca-Mg-HCO_3-Typ** (UDLUFT-Diagramm, Abb. 5.84). Es handelt sich um ein Wasser, das mit vergleichsweise niedrigen elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 714 µS/cm und 717 µS/cm nochmals deutlich geringer mineralisiert ist, als die Grundwässer der darüber liegenden Keuperstockwerke. Der Gehalt an gelösten Stoffen resultiert im Wesentlichen aus der Lösung von Karbonaten (Calcit und Dolomit). Aufgrund der unterschiedlichen hydrochemischen Beschaffenheit im Vergleich zum überlagernden Unterkeuper-Stockwerk ist zu folgern, dass der vertikale Grundwasseraustausch stark eingeschränkt ist.

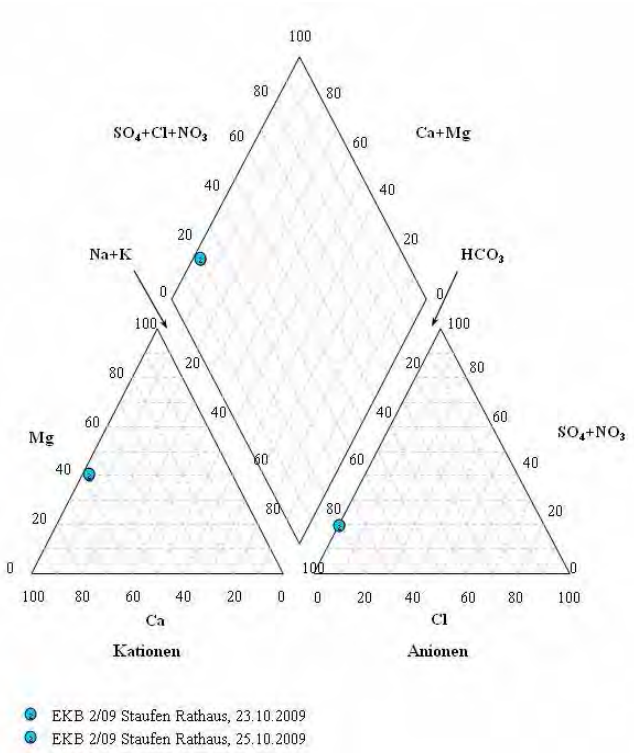


Abb. 5.78: PIPER-Diagramm: Grundwasser aus dem Oberen Muschelkalk (mo) der EKB 2 Staufen.

Die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe in den beiden Analysen vom 23. und 25. Oktober 2009 stimmen sehr gut überein. Hydrochemische Hinweise auf Spülungsanteile sind nicht ersichtlich.

Die mit dem Programm PHREEQC berechneten Mineral-Sättigungszustände (Abb. 5.79 und Abb. 5.84) zeigen folgendes Bild: Hinsichtlich der Minerale Calcit und Dolomit besteht eine Sättigung bis leichte Übersättigung. Dies entspricht den hydrogeologischen Erwartungen, da der Grundwasserleiter Oberer Muschelkalk überwiegend aus diesen Mineralen aufgebaut ist. An Gips und Anhydrit ist das erschlossene Muschelkalk-Grundwasser stark untersättigt.

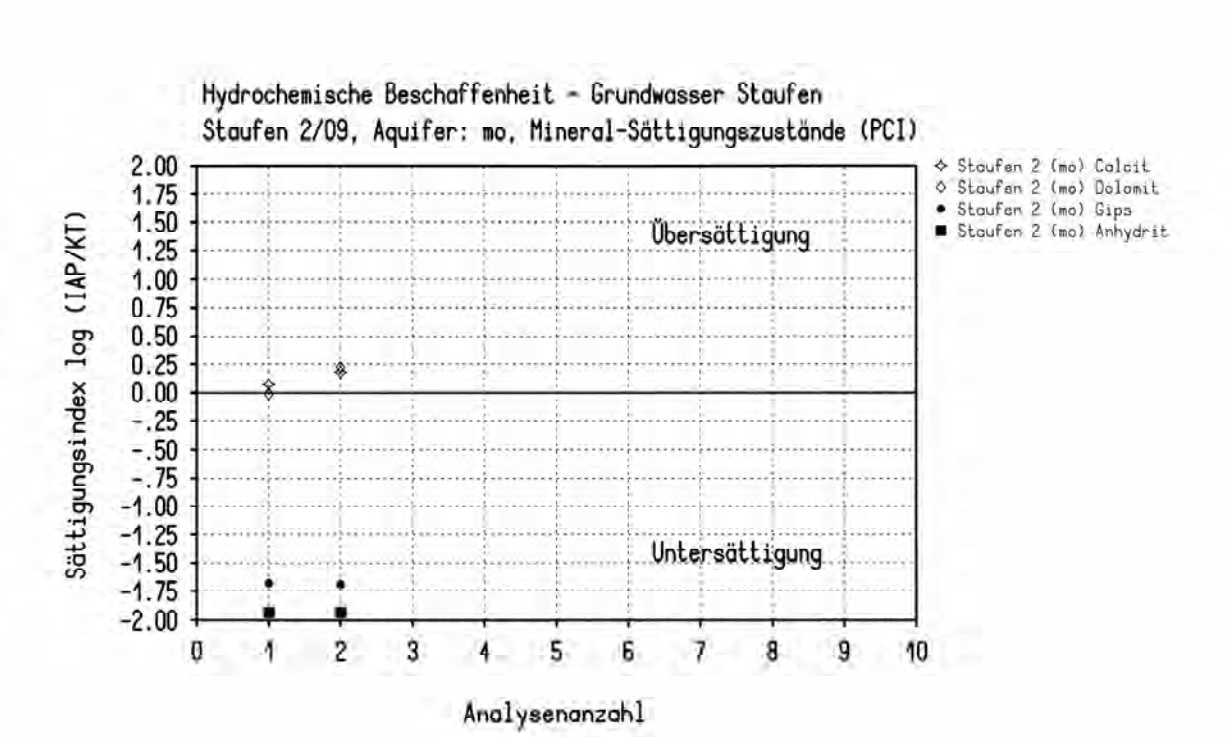


Abb. 5.79: Mineral-Sättigungszustände im Grundwasser aus dem Oberen Muschelkalk der EKB 2.

Während des ca. dreitägigen Pumpversuchs wurden zwei Proben auf alle Isotopenparameter untersucht (Tab. 5.24). Die Proben weisen sowohl hydrochemisch als auch isotopenhydrologisch nahezu identische Ergebnisse auf (Anl. 5.9). Dies belegt konstante Zustromverhältnisse.

Die Kohlenstoffisotopensignaturen unterscheiden sich deutlich vom hangenden Unterkeuper (Abb. 5.68 und Abb. 5.69) und weisen auf noch ältere Grundwasserkomponenten und deutliche Isotopenaustauschprozesse hin (10 000 -14 000 Jahre). Hinsichtlich der stabilen Isotope sind keine Unterschiede zu erkennen.

Trotz des vergleichsweise hohen Grundwasseralters erfolgte im Oberen Muschelkalk keine Aufmineralisation. Ionenaustauschprozesse sind nicht erkennbar (sehr geringe Na-Gehalte). Lediglich das relativ niedrige Ca/Mg-Verhältnis (2,3/1) kann auf erhöhte Kontaktzeiten zwischen Grundwasser und Gestein hinweisen.

Tab. 5.24: Ergebnisse der Isotopengehaltsmessungen an Grundwasserproben aus dem Oberen Muschelkalk (mo) der Erkundungsbohrung EKB 2 (Auswahl, ohne Angabe der analytischen Messgenauigkeit).

Parameter	Ergebnisse
Tritium [TU]	< 0,6
Sauerstoff-18 [‰]	-9,09 bis -9,24
Deuterium [‰]	-62,7 bis -64,1
Kohlenstoff-13 [‰]	-9,00 bis -9,09
Kohlenstoff-14 [%-modern]	9,7-10,4

5.5.3.1.6 Mischwasser Unterkeuper/Oberer Muschelkalk

Aufgrund des für den Absenkbetrieb erforderlichen, vorläufigen, übergreifenden Ausbaus der Erkundungsbohrung EKB 2 wurde während des Dauerbetriebes sowohl Grundwasser aus dem Unterkeuper als auch aus dem Oberen Muschelkalk gefördert (vgl. Kap. 8.1). Anhand der elektrischen Leitfähigkeit des entnommenen Mischwassers von 1030 µS/cm lässt sich abschätzen, dass es sich zu ca. 3/5 aus Grundwasser aus dem Unterkeuper und zu ca. 2/5 aus Grundwasser aus dem Oberen Muschelkalk zusammensetzt. Dies wird auch durch die Bilanzierung weiterer Inhaltsstoffe bestätigt. Isotopenhydrologische Untersuchungen wurden an dem Mischwasser nicht durchgeführt.
Das hydrochemisch abgeschätzte Mischungsverhältnis ist im Einklang mit den aus Pumpversuchen ermittelten hydraulischen Durchlässigkeiten, die im Unterkeuper deutlich über denen des Oberen Muschelkalks liegen.

5.5.3.2 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen

Eine zusammenfassende grafische Darstellung der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Ergebnisse der vier untersuchten Grundwasserstockwerke zeigen das SCHÖLLER-Diagramm (Abb. 5.80) und das PIPER-Diagramm (Abb. 5.81) mit jeweils einer repräsentativen Analyse, die Korrelationsdiagramme $^{13}C/^{14}C$ (Abb. 5.82) und $^{18}O/^{14}C$ (Abb. 5.83) sowie die synoptische Darstellung (Abb. 5.84). Die Abbildungen machen die jeweils eigenständige hydrochemische Charakteristik der Grundwässer deutlich. Im PIPER-Diagramm (Abb. 5.81) zeigt sich zwar eine hydrochemische Verwandtschaft der Grundwässer im Gipskeuper- und im Schilfsandstein-Stockwerk der Bohrung EKB 2. Hinsichtlich ihrer $\delta^{18}O$-Signatur unterscheiden sie sich jedoch deutlich (Abb. 5.83). Generell signifikante Unterschiede bestehen zu den Grundwässern im Unterkeuper und im Oberen Muschelkalk.

Spurengasmessungen an zwei Brunnen im Zustrom der Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 belegen, dass das quartäre Grundwasser anthropogene FCKW-Belastungen aufweist. Insgesamt liefern die Ergebnisse der Spurengaskonzentrationen bei den Untersuchungen in Staufen ein sehr uneinheitliches Bild. Für SF6 liegt eine Überhöhung der Spurengaskonzentration vor, die vermutlich im Zusammenhang mit geogenen Einflüssen (Grundgebirge, Gips) steht. Auch anthropogene Einflüsse sind nicht vollständig auszuschließen.

Die Inhomogenität der Spurengasergebnisse lässt somit mit dieser Methode keine belastbare Interpretation hinsichtlich der Altersstruktur der Grundwässer zu.

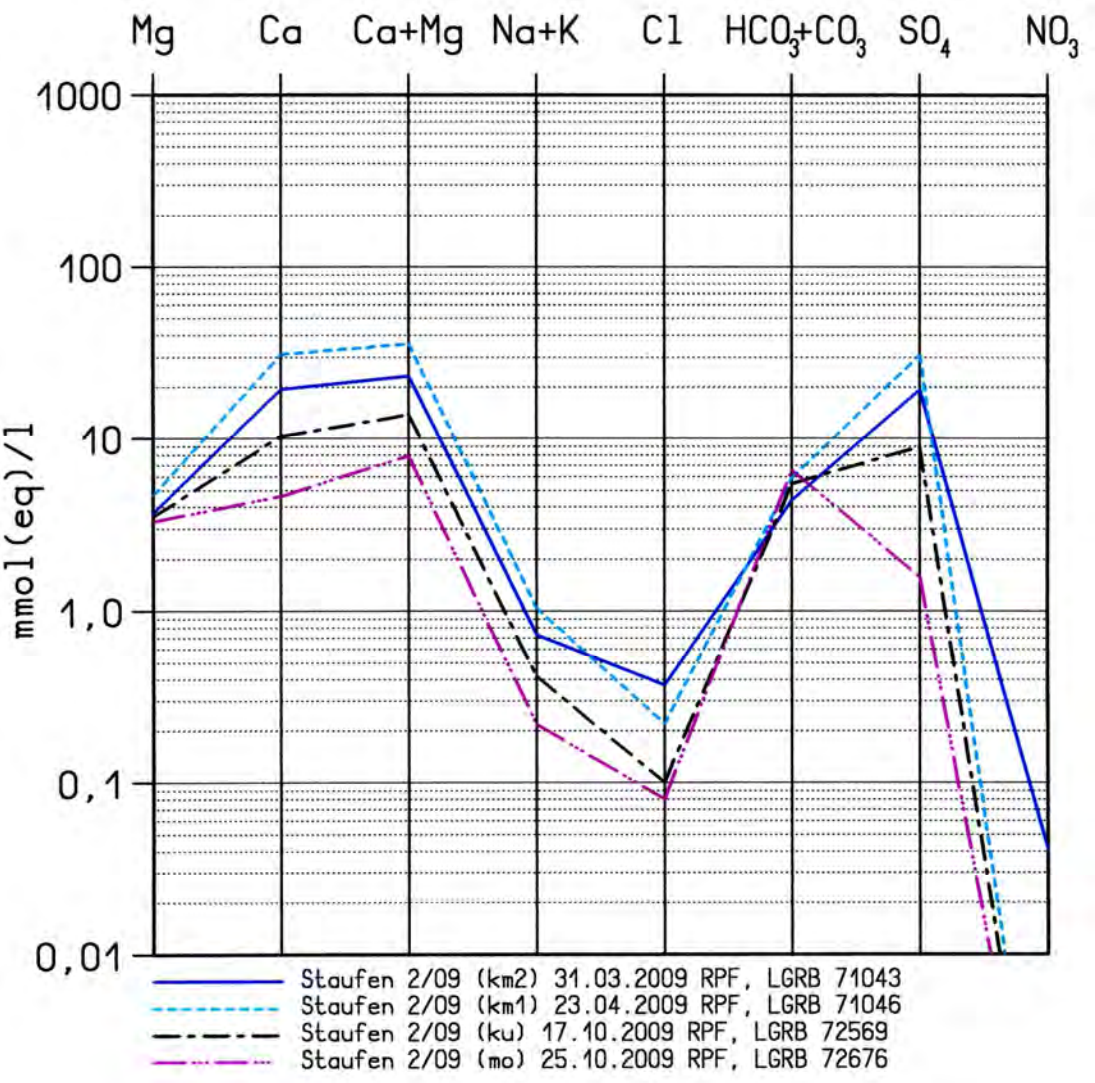


Abb. 5.80: SCHÖLLER-Diagramm mit jeweils einer repräsentativen Grundwasserprobe aus den vier Grundwasserstockwerken der EKB 2.

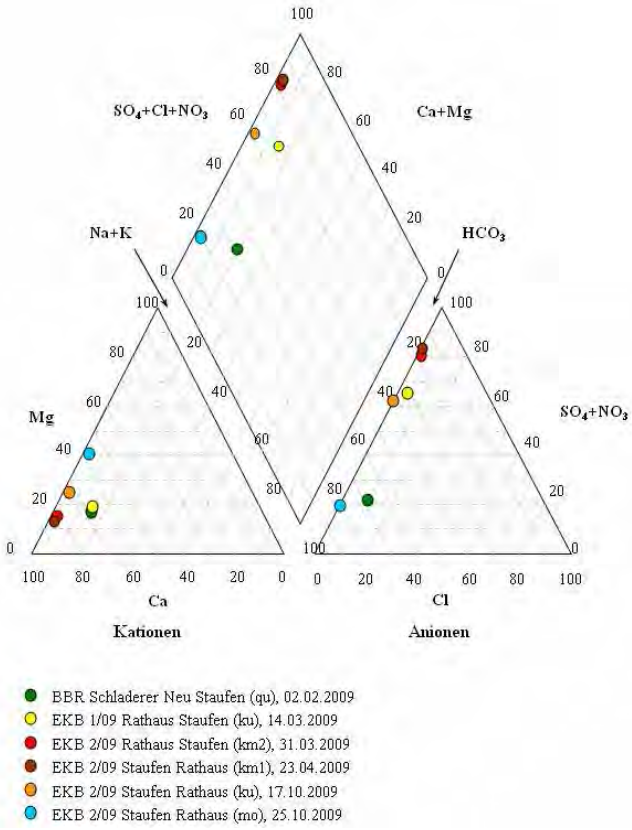


Abb. 5.81: PIPER-Diagramm mit jeweils einer repräsentativen Grundwasserprobe aus den untersuchten Grundwasservorkommen in Staufen.

EKB 1:

Das Grundwasser im **quartären Kiesgrundwasserleiter** unterscheidet sich hydrochemisch aufgrund seiner niedrigen Gesamtmineralisation und isotopisch aufgrund der schwereren $\delta^{18}O$ – Signatur deutlich von den in der EKB 1 und EKB 2 angetroffenen Grundwässern (Abb. 5.84). Das Grundwasser im oberflächennahen **Unterkeuper-Stockwerk** der **EKB 1** weicht aufgrund des höheren Alkali- und Chlorid-Gehalts sowie des höheren Tritiumgehaltes von dem in größerer Tiefe im Unterkeuper-Stockwerk der EKB 2 erschlossenen Grundwasser ab. Beide Grundwässer sind hinsichtlich der Sulfatminerale Gips und Anhydrit untersättigt. Sowohl Gips als auch Anhydrit können von diesen Grundwässern gelöst werden.

Im Vergleich zur EBK 2 ("Grabenscholle" vgl. Kap. 7) handelt es sich beim Grundwasser aus dem Unterkeuper der EBK1 ("Hochscholle") isotopisch um ein Mischwasser aus mindestens zwei Komponenten. Es setzt sich aus einer älteren, tritiumfreien Komponente und einem Jungwasseranteil zusammen. In den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 wurde im quartären Grundwasserleiter kein zusammenhängender Grundwasserkörper angetroffen. Die Beschaffenheit des Grundwassers im quartären Kiesgrundwasserleiter konnte jedoch in mehreren Brauchwasserbrunnen im Stadtgebiet untersucht

werden (Kap. 5.5.3.1.1). Im unmittelbaren Umfeld der Erkundungsbohrungen ist ein Grundwasserübertritt aus dem Quartär in das unterlagernde Stockwerk nicht möglich, da die Druckfläche des Grundwassers im Unterkeuper der EKB 1 deutlich über dem Niveau der Basis des quartären Grundwasserleiters liegt. Die Jungwasserkomponente wird vermutlich am Vorbergzonenrand (Bötzen, Roter Berg) neu gebildet und sitzt dem Unterkeuper der EKB 1 aus den quartären Schottern des Neumagenschwemmfächers bzw. aus den Umlagerungssedimenten zu, die am Vorbergzonenrand über den mesozoischen Sedimenten liegen. Die junge Grundwasserkomponente weist eine durch die quartären Referenzmessstellen belegte, geringe Mineralisation auf (Ca-HCO_3-Wasser mit elektrischen Leitfähigkeiten von 138 µS/cm bis 486 µS/cm). Für die erhöhten elektrischen Leitfähigkeiten bzw. die erhöhten Sulfatgehalte im geförderten Unterkeuperwasser ist eine alte Komponente verantwortlich, die wenige 100 bis mehrere tausend Jahre alt sein kann.

Hinsichtlich ausgewählter hydrochemischer Parameter (elektrische Leitfähigkeit, Sulfat) und der Isotopensignaturen (^{18}O, ^{3}H, ^{13}C, ^{14}C) sind jeweils plausible Mischwassersysteme von Grundwasser aus dem Schilfsandstein oder Gipskarst (alte Komponente) mit dem Grundwasser aus dem Quartär (Junge Komponente) berechenbar. Mischungsrechnungen mit Grundwasserproben aus dem Unterkeuper und Oberen Muschelkalk liefern dagegen keine plausiblen Ergebnisse. Legt man die isotopische Zusammensetzung aus dem Unterkeuper bzw. Gipskarst der EKB 2 als Ausgangswert für die ältere Komponente zugrunde, so könnte der Anteil der alten Grundwasserkomponente in der EKB 1 nach diesem stark vereinfachten Ansatz zwischen ca. 40 % und 60 % liegen.

Gegen diese Ergebnisse sprechen jedoch die Grundwassertemperaturen, die in der EKB 1 deutlich über denen der EKB 2 (Abschnitt Unterkeuper/Gipskarst) liegen. Vermutlich steigt die ältere Grundwasserkomponente aus größerer Tiefe auf. Ein direkter lateraler Zutritt aus dem km1 oder km2 der Nachbarscholle ist aufgrund der mit 14,4 °C bis 14,6 °C vergleichsweise hohen Grundwassertemperatur nicht wahrscheinlich, da das in ähnlicher Tiefe vorkommende Grundwasser im Schilfsandstein der EKB 2 lediglich Temperaturen zwischen 12,7 °C und 13,3 °C aufweist. Die Zusammen setzung der Grundwässer im unterlagernden Muschelkalk ist auf der tektonischen Hochscholle, auf der die EKB 1 liegt, nicht bekannt. Geht man davon aus, dass das Muschelkalkwasser dem der benachbarten tektonischen Grabenscholle gleicht, auf der die EKB 2 abgeteuft wurde, so sind die Sulfatgehalte der dort vorkommenden Grundwässer sowohl im Unterkeuper (428 mg/l SO_4^{2-}) als auch im Muschelkalk (75,7 mg/l bis 76,3 mg/l SO_4^{2-}) zu niedrig, um nach Beimischung einer quartären Komponente (8,1 mg/l bis 20,6 mg/l SO_4^{2-}) den Wert des Unterkeuperwassers in der EKB 1 (417 mg/l bis 549 mg/l SO_4^{2-}) zu erreichen. Möglicherweise stammt die ältere Komponente in der EKB 1 von einer Nachbarscholle aus größerer Tiefe, von der aus sie über einen lateralen Zustrom zur EKB 1 gelangt.

EKB 2:

Im Grundwasser aus dem **Schilfsandstein-Stockwerk (km2)** der **EKB 2** sind deutliche Mengen an Calciumsulfat gelöst. Da der Gehalt an Sulfatgestein im Schilfsandstein im Allgemeinen gering ist, liegt die Vermutung nahe, dass die hydrochemische und isotopische Prägung dieses Stockwerks von einem tieferen Stockwerk oder aus seitlichem Zustrom stammt. Ein Zutritt aus dem unterlagernden Gipskeuper-Stockwerk lässt sich jedoch wegen der signifikanten Unterschiede in der $\delta^{18}O$–Signatur ausschließen. Somit erscheint für den Schilfsandstein der EKB 2 ein lateraler Zutritt von Grundwasser, das zuvor mit dem sulfathaltigen Gebirgsabschnitt im Gipskeuper oder evtl. im Mittleren Muschelkalk in Kontakt stand, am wahrscheinlichsten. Die Isotopenzusammensetzung des Grundwassers im Schilfsandstein belegt ein altes Grundwasservorkommen, welches nicht an oberflächennahe Grundwasserzirkulationssysteme angeschlossen ist (stagnierende Verhältnisse).

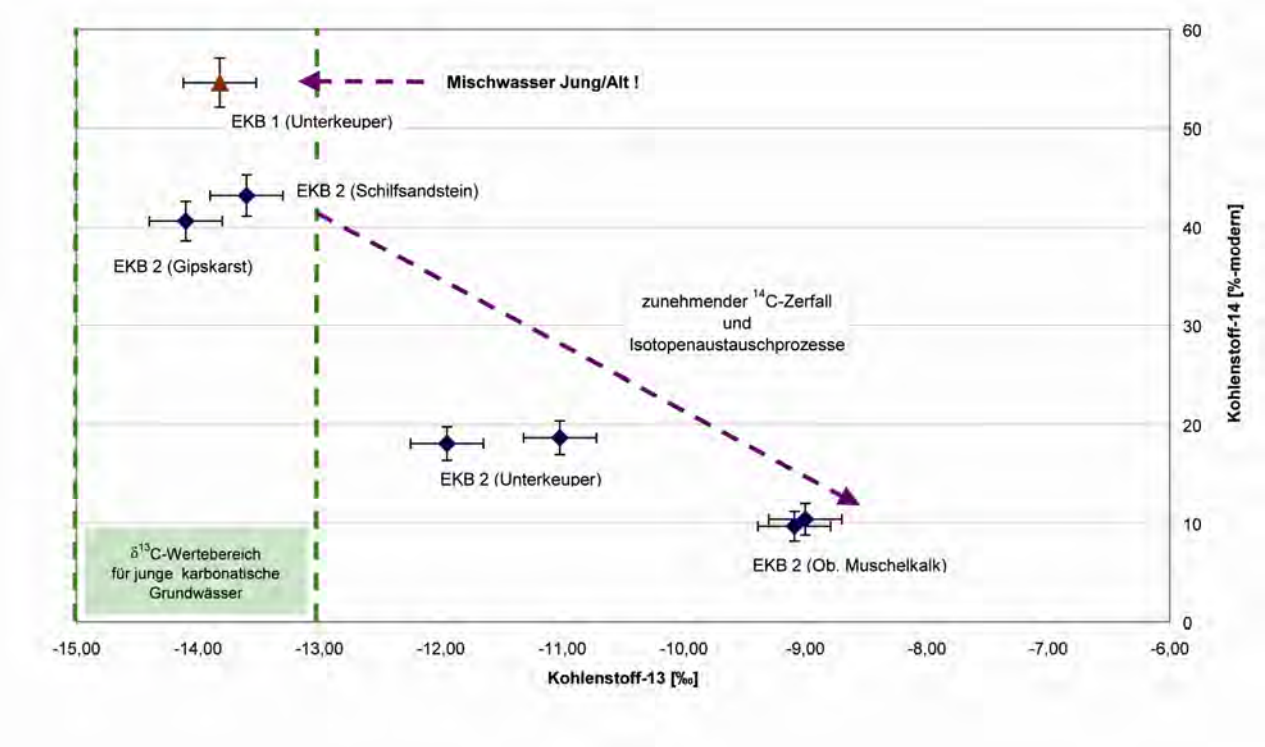


Abb. 5.82: Korrelationsdiagramm $^{13}C/^{14}C$ (aus dem Bericht der Fa. HYDROISOTOP vom 17. Dezember 2009).

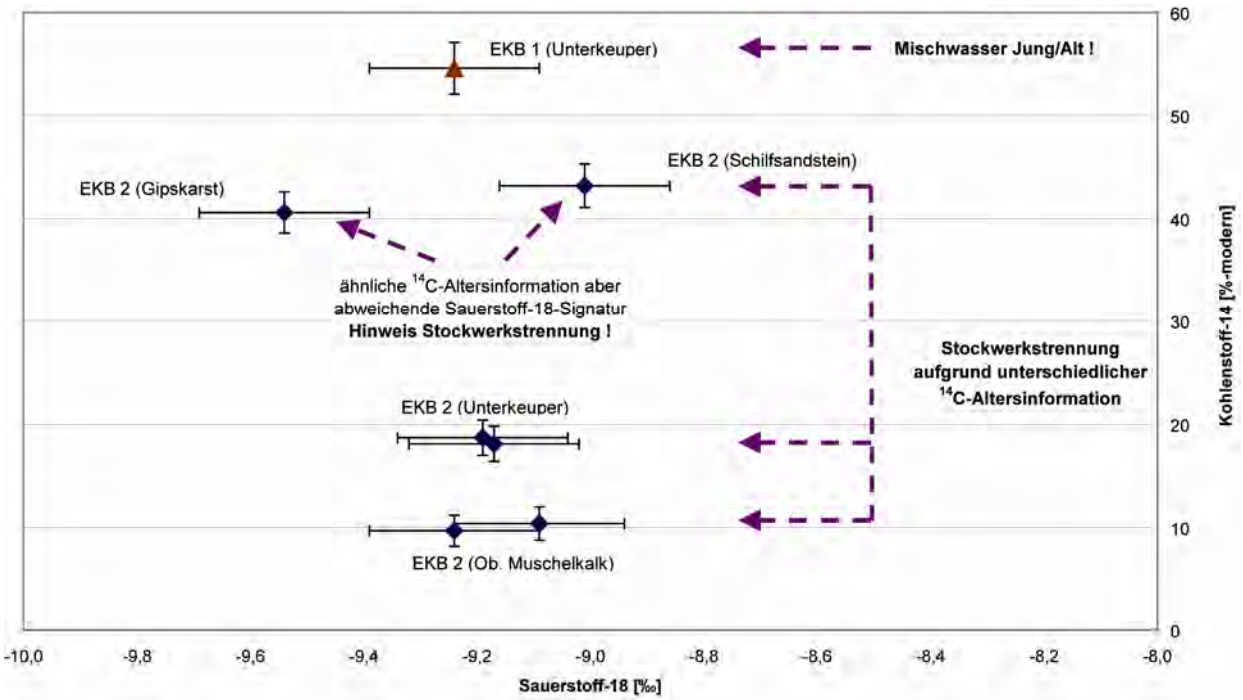


Abb. 5.83: Korrelationsdiagramm $^{18}O/^{14}C$. (aus dem Bericht der Fa. HYDROISOTOP vom 17. Dezember 2009).

Im Grundwasser aus dem **Gipskarst (km1) der EKB 2** sind deutliche Mengen an Calciumsulfat gelöst. Die Sulfat-Konzentration ist höher als diejenige der anderen untersuchten Grundwasserstockwerke (Schilfsandstein, Unterkeuper, Oberer Muschelkalk). Das Wasser ist an Gips gesättigt und an Anhydrit untersättigt.

Isotopenhydrologisch belegen die ^{13}C- und ^{14}C-Gehalte eine vergleichbare Altersstruktur wie im überlagernden Schilfsandstein mit einem Alter von 2 000 bis 5 000 Jahren. Die markanten Unterschiede in den Signaturen von Sauerstoff-18 und Deuterium (deutlich leichter als im überlagernden Schilfsandstein (Abb. 5.84)) weisen jedoch auf unterschiedliche Neubildungsbedingungen hin. Ein bedeutender Grundwasserabfluss im Schilfsandstein und Gipskarst kann aufgrund des hohen Grundwasseralters insgesamt ausgeschlossen werden.

Das Grundwasser im **Unterkeuper-Stockwerk (ku) der EKB 2** unterscheidet sich wegen des geringeren Mineralisationsgrades und vom Grundwassertyp her deutlich vom überlagernden Gipskeuper-Stockwerk. Das Unterkeuper-Grundwasser ist hinsichtlich der Minerale Gips und Anhydrit deutlich untersättigt.

Dies zeigt, dass das Grundwasser im Unterkeuper nicht maßgeblich an Lösungs- bzw. Umwandlungsprozessen des sulfatführenden Gipskeupers beteiligt ist und dass es nicht mit diesem Gebirgsabschnitt hydraulisch in Kontakt steht. Sofern dieses Grundwasser aufgrund des höheren hydraulischen Potentials an Kluft- und Zerrüttungszonen sowie sonstigen durchlässigen Bereichen in das überlagernde Grundwasserstockwerk des Gipskeupers aufsteigen kann, ist eine Sulfatgesteinslösung möglich. Aufgrund der unterschiedlichen hydrochemischen Beschaffenheit in den Gipskeuper- und Unterkeuper-Stockwerken sowie der unterschiedlichen Sauerstoff-18-Gehalte im Grundwasser dieser beiden Stockwerke ist jedoch zu folgern, dass der natürliche vertikale Grundwasseraustausch hier stark eingeschränkt ist. Isotopisch lässt sich aus den im Vergleich zum Schilfsandstein deutlich geringeren ^{14}C-Gehalten und der etwas schwereren Sauerstoff-18-Signatur eindeutig eine Stockwerkstrennung zum Gipskeuper ableiten (Abb. 5.83).

Dies wird insgesamt auch durch die hydrochemischen Ergebnisse bestätigt. Insbesondere die Strontiumgehalte liegen im Unterkeuper auf einem vergleichsweise höheren Niveau (Anl. 5.9). Obwohl der Sulfatgehalt des Grundwassers im Unterkeuper der EKB 2 mit dem im Unterkeuper der EKB 1 vergleichbar ist, zeigen die Ergebnisse zur Grundwasseraltersstruktur sowie die Chloridgehalte eindeutig, dass kein genetischer Zusammenhang zwischen den beiden Vorkommen besteht. Die Sulfatgehalte im Unterkeuper der EKB 2 sind das Resultat von einem insgesamt geringeren Sulfatdargebot im Neubildungs- bzw. Zustromgebiet, während in der EKB 1 der Sulfatgehalt aus der Mischung von zwei zeitlich und räumlich vollständig unterschiedlichen Grundwasserkomponenten herrührt.

Das Grundwasser im **Stockwerk Oberer Muschelkalk (mo)** der **EKB 2** ist nochmals deutlich geringer mineralisiert als die Grundwässer in den beiden überlagernden Stockwerken Unterkeuper und Gipskeuper. Der Gehalt an gelösten Stoffen leitet sich im Wesentlichen aus Calcit und Dolomit ab. Aufgrund der unterschiedlichen hydrochemischen Beschaffenheit im Vergleich mit dem überlagernden Unterkeuper-Stockwerk ist zu folgern, dass der vertikale Grundwasseraustausch auch hier stark eingeschränkt ist. Aufgrund der starken Untersättigung des Muschelkalkwassers an Gips und Anhydrit zeichnet sich hydrochemisch kein nennenswerter Kontakt mit Sulfatgesteins-Ablagerungen ab. Sofern dieses Grundwasser aufgrund seines höheren hydraulischen Potenzials an Kluft- und Zerrüttungszonen oder sonstigen Durchlässigkeiten in die überlagernden Grundwasserstockwerke aufsteigen kann, ist im Gipskeuper eine Sulfatgesteinslösung möglich. Auch die isotopenhydrologischen Befunde belegen, dass das Grundwasser im Muschelkalk der durch die EKB 2 erschlossenen Gebirgsscholle nicht an effektiven Grundwasseraustauschprozessen beteiligt ist.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen, dass in den verschiedenen Grundwasserstockwerken der EKB 2 alte Grundwässer dominieren. Dies gilt bereits für das relativ oberflächennahe Grundwasservorkommen im Schilfsandstein. Mit der Tiefe nehmen die Grundwasseralter zu. Die Stockwerke weisen jeweils voneinander abweichende, eigenständige hydrochemische und isotopische Signaturen auf, so dass eine deutliche Stockwerkstrennung vorliegt. In den einzelnen Stockwerken dominieren laterale Fließbewegungen. Da im Zuge der Pumpversuche in den einzelnen Tiefenabschnitten keine markanten Veränderungen der hydrochemischen Beschaffenheit und Isotopensignaturen festgestellt wurden, erfolgt kein nennenswerter Grundwasserdurchsatz in den Grundwasserstockwerken.

5.5.4 Laboruntersuchungen an Bohrproben der Erkundungsbohrungen Staufen

5.5.4.1 Probenentnahme an der Bohrstelle

Die Entnahme der Bohrproben und Kernstücke erfolgte nach Anweisung des LGRB durch die Bohrfirma Anger's Söhne in der Regel etwa im Meter-Abstand über das gesamte Bohrprofil. Die für die Laboruntersuchungen entnommenen Bohrkernstücke waren mindestens 5 cm lang, sodass sich pro Probe eine Feuchtmasse von mehr als 1000 g ergab. Je nach Bohrbefund wurden auch in Zwischenbereichen zusätzliche Probenstücke entnommen. Die Bohrproben wurden kurz nach dem Ziehen des Bohrkerns aus der Bohrkernkiste entnommen und anschließend vor Ort in Folie eingeschweißt bzw. in Probenbehälter (Plastikdosen, Plastikeimer) luftdicht verschlossen und zeitnah von der Bohrstelle in Staufen in das mineralogisch-petrographische und bodenmechanische Labor des RPF/LGRB nach Freiburg gebracht.

An vier Bohrabschnitten (86,85 – 88,45 m, 89,60 – 97,80 m, 104,85 – 110,0 m, 111,45 – 113,87 m) konnten wegen der technisch notwendigen Umstellung von Kernbohr- auf Meißelbohrverfahren keine Bohrkerne sondern nur Bohrklein (Cuttings) gewonnen werden. Von den Cuttings wurden abschnittsweise repräsentative Proben (ebenfalls etwa 1000 g) aus den Kernkisten entnommen und vor Ort in Folie eingeschweißt.

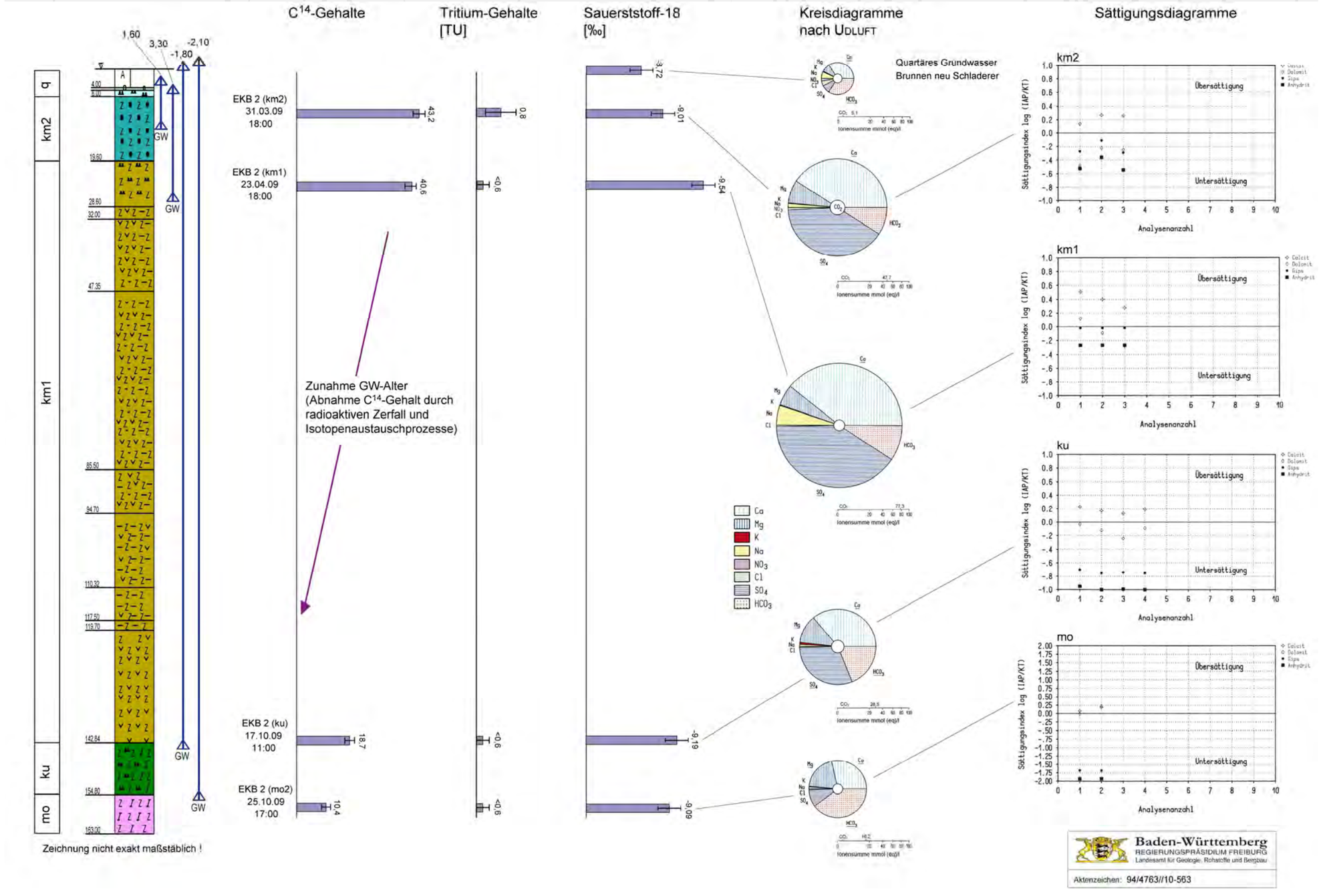


Abb. 5.84: Synoptische Darstellung der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungsergebnisse in der Erkundungsbohrung EKB 2.

5.5.4.2 Probenvorbereitung

Nach Probeneingang wurde die Probe orientierend geologisch beschrieben und beurteilt. Soweit möglich wurden hierbei Angaben über Gesteinsart, Korngröße, Korngrößenverteilung, Textur, Struktur, Farbe, Kalkgehalt, Feuchte, Konsistenz, Kornbindung/Festigkeit, Stratigraphie und Besonderheiten gemacht. Ferner wurde der Gehalt an Feinkorn bzw. Tonmineralen sowie Sulfat- und Karbonatmineralen (Salzsäureprobe) abgeschätzt. Anschließend wurde das Untersuchungsprogramm für die Bohrprobe festgelegt.

Bohrkernstücke
Je nach Zustand und Festigkeit wurde die zu untersuchende Bohrkernscheibe vorsichtig in zwei bzw. in drei repräsentative, homogene Teilproben zerlegt. Stabile Proben wurden der Länge nach mit der Gesteinssäge **trocken** zertrennt.

Die **erste Teilprobe** wurde, falls möglich, grob zerkleinert und der natürliche Wassergehalt bestimmt. Nach Trocknung wurden 30 g bis 50 g von der Probe abgetrennt und für nachfolgende Laboruntersuchungen in einer Scheiben-Schwingmühle analysenfein, d. h. bis auf Feinkorngröße (< 0,063 mm) gemahlen. Anschließend wurden die festgelegten Untersuchungen durchgeführt (Röntgenographie, Bestimmung der Reindichte, des Karbonatgehalts, des Glühverlusts, usw.).

Die **zweite Teilprobe** wurde paraffiniert, um die Trocken- und Feuchtdichte mittels Tauchwägung zu bestimmen. Falls von dem ursprünglichen Bohrkernstück keine dritte Teilprobe erhalten werden konnte, wurde die paraffinierte Teilprobe als Rückstellprobe in Folie eingeschweißt.

Die **dritte Teilprobe** wurde als Rückstellprobe in Folie eingeschweißt und für mögliche spätere Nachbestimmungen aufbewahrt.

Bohrklein (Cuttings)
Aus den mit Cuttings gefüllten Probentüten wurde eine repräsentative Teilmenge entnommen, an der die Reindichte, die Wasseraufnahme und die Glühverluste bestimmt sowie röntgenografische Untersuchungen durchgeführt wurden.

5.5 4.3 Durchgeführte Laboruntersuchungen (Indexversuche)

Bei den im Labor des RPF/LGRB untersuchten Boden- und Gesteinsproben handelt es sich nach DIN 4021 um Proben der Güteklasse 3 bzw. 4 (Cuttings).

Eine Übersicht über Art und Anzahl der durchgeführten Laboruntersuchungen gibt Tab. 5.25.

Tab. 5.25: Übersicht über Art und Anzahl der durchgeführten Laboruntersuchungen.

Erkundungsbohrungen	Anzahl der Gesamtproben	Bestimmung des Wassergehalts	Bestimmung der Reindichte	Bestimmung der Feucht- und Trockendichte	Bestimmung der Glühverluste (550 °C+1150 °C)	Bestimmung des Karbonatgehalts (n. Müller)	Bestimmung der Wasseraufnahme	Bestimmung der Konsistenzgrenzen	Bestimmung der Kornverteilung	Hauptmineralbestimmung RDA/RFA	Tonmineralbestimmung RDA
EKB 1	13	13	7	7	7	7	6	1	7	7	-
EKB 2	178	154	169	150	167	168	158	1	6	166	166

Die Versuchsergebnisse wurden nach Plausibilitätsprüfung in eine Probentabelle übertragen und grafisch ausgewertet (vgl. Anlagen 5.10, 5.11, 5.12 und 5.13).

5.5.4.3.1 Bestimmung des Wassergehalts

Definition:
Der Wassergehalt w einer Boden-/Gesteinsprobe ist das Verhältnis der Masse des im Boden/Gestein vorhandenen Wassers m_w, das bei einer Temperatur von 40 °C bzw. 105 °C verdampft, zur Masse m_d der trockenen Probe:

$w = 100 * (m_w / m_d)$ in %

Methodik:
Die Bestimmung des Wassergehalts ist in DIN 18121 Teil 1 (1998) geregelt. Von der in der DIN angegebenen Ofentemperatur von 105 °C (Standardofentrocknung) wurde bis auf die Proben EKB 1/1 bis EKB 1/5 (sandige Kiese der Neumagen-Schotter) abgewichen, da bei dieser Temperatur bereits bei vielen Tonmineralen Kristallwasser abgeschieden wird. So ändern z. B. der Halloysit und bestimmte quellfähige Tonminerale ihre Kristallstrukturen und können z. B. bei anschließenden röntgenografischen Untersuchungen nicht mehr nachweisbar sein. Ähnliche Strukturänderungen treten beim Mineral Gips auf, das bereits bei ca. 60 °C einen Teil seines Kristallwassers verlieren kann und in Bassanit bzw. Halbhydrat übergeht.

Aus diesen Gründen wurde für die Bestimmung des Wassergehalts eine schonende Trocknungstemperatur von 40°C eingehalten und die Probe bis zur Massenkonstanz getrocknet. Es kann bei dieser Temperatur davon ausgegangen werden, dass nur das mobile und ein großer Teil des immobilen Porenwassers im Gestein verdampft. Wasserabscheidende Mineralreaktionen (z. B. Umkristallisationen) werden hierdurch ausgeschlossen.

An Cuttingproben wurde keine Wassergehaltsbestimmung durchgeführt. Dieser Parameter wird durch das angewandte Meißelbohrverfahren verändert.

Ergebnisse:
Die in der EKB 1 ermittelten Wassergehalte liegen zwischen 2,5 % und 17,8 %; die in der EKB 2 ermittelten Werte liegen zwischen wenigen Promille und bis zu 20,4 %. Der bei der Probe EKB 2/58 (51,05 – 51,65 m) erhaltene Wert von 16,9 % ist nicht dargestellt. Es handelt sich um eine stark zerbohrte, lockergesteinsartige Probe, die bei der Entnahme einer ungestörten Kernprobe (Triaxialsonde) anscheinend mit Bohrspülung in Verbindung gekommen ist und dabei Wasser eingelagert hat.

5.5.4.3.2 Bestimmung der Reindichte

Definition:
Die Reindichte (ρ_r) ist das Verhältnis der Masse des trockenen Probekörpers zum Volumen seiner festen Bestandteile und wird in g/cm³ angegeben. Die Reindichte spiegelt den mineralischen Aufbau eines Gesteins bzw. des Bodens wieder und stellt die theoretische, maximal erreichbare Dichte eines Gesteins bzw. Bodens dar.

Methodik:
Die Bestimmung der Reindichte erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1936 (1999) und DIN 18124 (1997) mit dem Kapillarpyknometer an Proben, die bei 40 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet wurden. Die durchgeführten Verfahrensschritte zur Bestimmung der Reindichte entsprechen den Vorgaben zur Bestimmung der spezifischen Korndichte nach DIN 18124. Der Unterschied zur DIN EN 1936 besteht lediglich in der Benutzung eines größeren Kapillarpyknomters (100 cm³ statt 50 cm³), einer größeren Probenmenge (20 g statt 10 g) sowie einer Teilchengröße < 0,063 mm. Da es sich bei den Proben um in polaren Lösungsmitteln (z. B. Wasser) veränderliche bzw. lösliche Mineralgemische handelt, wurde die Bestimmung der Reindichte mit Petroleum bei etwa 24 °C durchgeführ t. Die Dichte des Petroleums wurde jeweils separat ermittelt.

Ergebnisse:
Die in der EKB 1 ermittelten Reindichten liegen zwischen 2,76 g/cm³ und 2,90 g/cm³; die ermittelten Werte in der EKB 2 liegen zwischen 2,31 g/cm³ (EKB 2/158; Tiefe: 138,0 m; Gipsstein) und 2,97 g/cm³ (EKB 2/177; Tiefe: 161,95 m; Dolomitstein).

Die ermittelten Werte der Proben EKB 2/158 und EKB 2/160 (Tiefe: 140,0 m; Gipsstein) mit 2,31 g/cm³ und 2,33 g/ cm³ erscheinen als etwas zu niedrig und stellen wahrscheinlich Ausreißer dar, zumal die zugehörige Trockendichte mit jeweils 2,35 g/cm³ höher liegen.

Insgesamt entsprechen die Ergebnisse in ihren Wertebereichen den typischen Reindichten bzw. Mineraldichten aus der Literatur. So werden von KLOCKMANN (1978) folgende Werte angegeben:

Anhydrit:	2,9 - 3,0 g/cm³
Calcit:	2,6 - 2,8 g/cm³
Dolomit:	2,85 - 2,95 g/cm³
Gips:	2,3 - 2,4 g/cm³
Kaolinit:	2,1 - 2,6 g/cm³

Chlorit:	2,6 - 3,3 g/cm³
Montmorillonit:	1,7 - 2,7 g/cm³

5.5.4.3.3 Bestimmung der Feucht- und Trockendichte

Definition:
Die Feuchtdichte (ρ) des Bodens ist die Masse (m) der feuchten Probe bezogen auf das Volumen V der Probe einschließlich der mit Wasser und Luft gefüllten Poren.

$\rho = m / V$ in g/cm³

Die Trockendichte (ρ_d) des Bodens ist die Masse (m_d) der trockenen Probe (40 °C Ofentrocknung) bezogen auf das Volumen V der Probe einschließlich der mit Wasser und Luft gefüllten Poren.

$\rho_d = m_d / V$ in g/cm³

Zwischen der Feuchtdichte und der Trockendichte gilt die Beziehung:

$\rho_d = \rho / (1+w)$ in g/cm³

Methodik:
Die Feucht- und Trockendichte wurden an Gesteinsstücken mit einem Volumen von mindestens 100 cm³ und festem Zusammenhalt durch Tauchwägung nach DIN 18125 Teil 1 (1997) bestimmt. Der Probenkörper wird nach Bestimmung der Masse (m) in eine Drahtschleife geschoben und mehrmals in flüssiges Paraffin bekannter Dichte untergetaucht, sodass sich ein vollkommener, wasserdichter, luftblasenfreier Überzug bildet. Nach dem Erkalten wird die Probe gewogen (m1) und ihr Tauchgewicht (m2) bei vollständigem Untertauchen in ca. 24 °C temperiertem Wasser bestimm t. Die Differenz zwischen Gewicht in Luft (m1) und dem Tauchgewicht (m2) entspricht dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit. Über den natürlichen Wassergehalt, der Dichte der Tauchflüssigkeit und der Dichte des Überzugs aus Paraffin wird das Volumen des Probekörpers bestimmt.

Ergebnisse:
Die in der EKB 1 ermittelten Feuchtdichten betragen zwischen 2,19 g/cm³ und 2,76 g/cm³; die ermittelten Werte in der EKB 2 liegen zwischen 1,99 g/cm³ und 2,94 g/cm³.
Die in der EKB 1 ermittelten Trockendichten betragen zwischen 1,97 g/cm³ und 2,65 g/cm³, die ermittelten Werte in der EKB 2 liegen zwischen 1,65 g/cm³ und 2,93 g/cm³.
An der Probe EKB 2/117 (Tiefe: 98,0 m; Anhydritstein) wurde sowohl die maximale Feuchtdichte mit 2,94 g/cm³ als auch die maximale Trockendichte mit 2,93 g/cm³ bestimmt.

Obwohl die im Tauchwägeverfahren ermittelten Trocken- und Feuchtdichten streng von den durch Klüftung, Anwitterung und tektonischer Auflockerung geprägten Gebirgsdichten unterschieden werden müssen, spiegeln sich besonders in den Werten der Trockendichten charakteristische Auflockerungs- und Verwitterungszonen im Gebirge wieder.

5.5.4.3.4 **Bestimmung des Porenanteils** (Gesamtporosität)

Definition:
Der Porenanteil n eines Gesteins bzw. eines Bodens ist das Verhältnis aus dem Porenvolumen und dem Gesamtvolumen und wird rechnerisch mit Hilfe der Reindichte und der Trockendichte ermittelt. Der Porenanteil n gibt den Gesamtporenanteil im Gestein an.

$n = 100 * (1 – (\rho_d / \rho_r))$ in %

Ergebnisse:
Die in der EKB 1 ermittelten Porenanteile liegen zwischen 8 % und 29 %; die ermittelten Werte in der EKB 2 liegen zwischen 1 % und 39 %. Dabei fällt auf, dass sich Gesteine mit einem hohen Anteil von Gips- und/oder Anhydrit (> 80 %) häufig durch eine sehr niedrige Porosität auszeichnen und auch makroskopisch recht dicht erscheinen.

Der Porenanteil in Gesteinen ist von den Entstehungsbedingungen abhängig (Diagenese, Verwitterung) und kann bei gleicher Lithologie stark variieren. So ist z. B. die Dichte von Sandsteinen sehr stark abhängig von der Korngrößenverteilung sowie der Füllung der Kornzwischenräume mit Bindemittel (Kornzement).

Der für hydraulische Fragen maßgebende nutzbare, durchflusswirksame Porenanteil n_f wurde nicht bestimmt und dürfte vor allem bei Ton- und Sulfatgesteinen deutlich niedriger sein als die Gesamtporosität.

Weitere gesteinsphysikalische Parameter

Aufgrund rechnerischer Beziehungen zwischen den ermittelten Dichten und dem Wassergehalt können weitere Parameter wie Porenzahl, Sättigungsgrad, Luftporenanteil, Anteil wassergefüllter Poren sowie Dichte bei Wassersättigung und Dichte unter Auftrieb abgeleitet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Wassergehalts- und Reindichtebestimmung an der einen und die Tauchwägung zur Bestimmung der Trocken- und Feuchtdichte an der anderen Teilprobe durchgeführt wurden. Trotz der repräsentativen Probenteilung im Labor sind geringe Unterschiede zwischen den Teilproben nicht vermeidbar. Dies kann bei den rechnerisch abgeleiteten Parametern vor allem bei probenspezifisch geringen Porositäten und Wassergehalten zu unlogischen Werten (z. B. negative Zahlen oder Werte > 100 %) führen.

5.5.4.3.5 Bestimmung des Karbonatgehalts nach Müller (Karbonatbombe)

Definition:
Der Karbonatgehalt V_{Ca} eines Bodens/Gesteins ist der durch gasometrische CO_2-Bestimmung ermittelte Massenanteil an Gesamtkarbonaten m_{Ca} bezogen auf die Trockenmasse m_d der Probe.

$V_{Ca} = 100 * m_{Ca} / m_d$ in %

Methodik:
Der Versuch wird an ca. 1 g Probenmaterial (pulverisiert, 40 °C Ofentrocknung) durchgeführt, welches in einem druckdichten Gefäß mit kalibriertem Manometer (sog. Karbonatbombe) mit überschüssiger, 20 %-iger Salzsäure versetzt wird. Der dabei durch freigesetztes CO_2 (vgl. untere Formel) entstehende maximale Gasdruck wird ermittelt und der Versuch nach 15 Minuten beendet.

$CaCO_3 + 2\ HCl = CaCl_2 + H_2O + CO_2$

Ergebnisse:
Mit diesem Verfahren werden vor allem die häufig vorkommenden Karbonatminerale Calcit ($CaCO_3$) und Dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) als Gesamtkarbonat erfasst. Die in EKB 1 ermittelten Karbonatgehalte liegen zwischen 42,5 % und 99 %; die ermittelten Werte in der EKB 2 liegen zwischen < 5 % und 95 %. Werte kleiner 5 % befinden sich im Bereich der Messungenauigkeit. Wegen der Kalibrierung des Manometers auf Calziumkarbonat können bei der Untersuchung von Dolomitsteinen Werte bis zu 108,4 % erreicht werden. Es ist anzumerken, dass der in einigen Gebirgsabschnitten auftretende Magnesit ($MgCO_3$) bei Verwendung normal temperierter Salzsäure unter Laborbedingungen äußerst träge reagiert und bei der Bestimmung mit der Karbonatbombe nicht erfasst wird. Aus genannten Gründen werden die mit der Karbonatbombe gasometrisch bestimmten Karbonatgehalte mit den Ergebnissen der Glühverluste und röntgenografischen Analysen rechnerisch abgeglichen.

5.5.4.3.6 Bestimmung des Glühverlusts bei 550 °C

Definition:
Der Glühverlust V_{gl} (550°) eines Bodens/Gesteins ist der auf die Trockenmasse m_d bezogene Massenverlust Δm_{gl} (550°), den der Boden / das Gestein bei einer Temperatur von 550 °C im Muffelofen erleidet.

V_{gl} (550°) = 100 * Δm_{gl} (550°) / m_d in %

Der beim Glühen der Probe entstandene Massenverlust ist auf komplexe physikalische und chemische Vorgänge zurückzuführen, bei denen vor allem Wasser und CO_2 freigesetzt werden. Besonders sind dabei das Verdampfen von Hydratations- und Kristallwasser aus (quellfähigen) Tonmineralen, die Umwandlung von Gips in Bassanit bzw. Anhydrit (Umwandlungsbeginn bei T > 60 °C) sowie das Verbrennen organischen Materials zu nennen. Unter bestimmten Voraussetzungen kann auch ein Massenzuwachs, z. B. durch die Oxidation von Fe^{2+} zu Fe^{3+}, entstehen.

Methodik:
Die Bestimmung des Glühverlusts wurde in Anlehnung an DIN 18128 (2002) durchgeführt. Die zuvor bei 40 °C im Ofen bis zur Gewichtskonstanz getrocknete und im Muffelofen bis zur Massenkonstanz (mindestens 2 Stunden) geglühte Probe wird nach dem Abkühlen im Exsikkator bei Raumtemperatur gewogen (m_{gl} 550°). Die Differenz aus m_d und m_{gl} ergibt den Wert Δm_{gl} (550°). Da es sich bei den untersuchten

Proben überwiegend um Festgestein handelt, wurde im Vergleich zur DIN 18128, die eine Probenmenge von 15 g vorschreibt, eine Trockenmasse (m_d) von 1 g eingewogen und untersucht.

Ergebnisse:
Die in EKB 1 ermittelten 550°-Glühverluste liegen zwischen 2,4 % und 4,1 %; die ermittelten Werte in der EKB 2 liegen zwischen 0,6 % (EKB 2/117; Tiefe: 98,0 m; Anhydritstein) und 20,1 % (EKB 2/56; Tiefe: 50 m; Gipsstein).

Hohe 550°-Glühverluste wurden z. B. an Gesteinsproben gemessen, die vor allem aus (quellfähigen) Tonmineralen und/oder Gips bestehen. Die vollständige Umwandlung von Gips (172 g/mol) in Anhydrit (136 g/mol) ergibt einen theoretischen Glühverlust von rund 20 %, der z. B. in der EKB 2/56 (Tiefe: 50 m; Gipsstein) praktisch erreicht wurde. In reinen Anhydrit- und Karbonatgesteinen wurden die geringsten 550°-Glühverluste ermittelt.

5.5.4.3.7 Bestimmung des Glühverlusts bei 1150 °C

Definition:
Der Glühverlust V_{gl} (1150°) eines Bodens/Gesteins ist der auf die Trockenmasse m_d bezogene Massenverlust, den die Probe bei einer Temperatur von 1150 °C im Muffelofen erleidet.

V_{gl} (1150°) = 100 * Δm_{gl} (1150°) / m_d in %

Methodik:
Der Versuch wird im Anschluss an die Bestimmung des 550°-Glühverlusts durchgeführt. Die im Exsikkator abgekühlte und zurück gewogene Probe wird wieder in den Ofen gestellt und bei 1150 °C bis zur Massenkonstanz (min. 2 Stunden) geglüht. Nach dem Abkühlen im Exsikkator auf Raumtemperatur wird die Probe gewogen (m_{gl} 1150°). Die Differenz aus m_d und m_{gl} 1150° ergibt den Wert Δm_{gl} 1150°.

Ergebnisse:
Der Wert V_{gl} (1150°) stellt den gesamten, zwischen 40 °C und 1150 °C erlittenen Massenverlust einer Probe dar. Der im Zwischenschritt bei 550 °C erhaltene Massenverlust wird nicht vom 1150°-Glühverlust abgezogen. Die Ergebnisse der 1150°-Glühverluste werden zur Plausibilitätskontrolle der durchgeführten Karbonatgehaltsbestimmungen und röntgenografischen Analysen benötigt.

Ähnlich wie beim Glühen der Probe bei 550 °C ist der Massenverlust bei 1150 °C auf komplexe physikalische und chemische Vorgänge zurückzuführen. Hervorzuheben ist das Zerfallen der Karbonate (z. B. Calcit, Dolomit, Magnesit) etwa ab 700° C durch Dissoziation unter Bildung von CaO und MgO sowie flüchtigem CO_2. Nach stöchiometrischen Berechnungen reduziert sich die anfängliche Trockenmasse bei reinem Calcit um 44 % und bei reinem Dolomit um rund 47 %. Zusätzlich geben die Tonminerale, möglicherweise unter Umwandlung in Mullit- ähnliche Phasen, weiteres Kristallwasser ab. Anhydrit sollte in diesem Temperaturbereich noch stabil sein und die Probenmasse nicht verändern.

Die in EKB 1 ermittelten 1150°-Glühverluste liegen zwischen 22,7 % und 44,5 %; die ermittelten Werte in der EKB 2 liegen zwischen 3,8 % (EKB 2/171; Tiefe: 150,75 m; Sandstein) und 45,4 % (EKB 2/175; Tiefe: 156,3 m; Dolomitstein).

Die höchsten Werte lieferten relativ reine Dolomitgesteine aus dem Unterkeuper und dem Oberen Muschelkalk. Niedrige Glühverluste wurden in Sandsteinen des Unterkeupers (ku) und des Schilfsandsteins (km2) sowie relativ reinen Anhydritsteinen der Gipskeuper-Formation (km1) ermittelt.

Unerwartet hohe 1150°-Glühverluste von über 40 % traten bei Proben auf, die zur Gipskeuper-Formation gehören und aus einem Gemenge aus Ton-, Karbonat- und Sulfatmineralen bestehen. Dazu gehören z. B. die Proben EKB 2/54 (Tiefe: 48,0 m), EKB 2/93 (Tiefe: 76,70 m), EKB 2/142 (Tiefe: 122,0 m), EKB 2/145 (Tiefe: 125,0 m) und EKB 2/149 (Tiefe: 129,0 m). Diese Proben wurden in einem zweiten Durchgang nachbestimmt und lieferten weitgehend die gleichen Glühverluste. Diese ungewöhnlich hohen Werte lassen sich nicht durch die Summe aus den Massenverlusten der Einzelkomponenten erklären. Möglicherweise führen chemische Reaktionen zu einem Austreiben volatiler Phasen wie z. B. SO_2 bzw. SO_3.

Leicht erhöhte 1150°-Glühverluste wurden auch bei der Probe EKB 2/117 (Tiefe: 98,0 m, 95 % Anhydrit) festgestellt. Trotz des hohen Anhydritgehalts gingen bei dieser Probe insgesamt 7,6 % Masse verloren. Dieser Verlust erklärt sich möglicherweise durch verstärkte Sublimation der Sulfate im Prüftiegel.

5.5.4.3.8 Bestimmung der Kornverteilung durch Sieb- und Sedimentationsanalyse von Lockergesteinen

Definition:
Die Korngröße und die Korngrößenverteilung sind ein Maß für die Einteilung und Benennung mineralischer Lockergesteine. Die Verfahren und Geräte zur Ermittlung der Korngrößenverteilung sind in DIN 18123 (1996) festgelegt. Die Korngrößenverteilung eines Lockergesteins ergibt sich aus der Bestimmung der mittleren geometrischen Ausdehnung (Größe) seiner festen Bestandteile (Körner) und wird in Prozent der Gesamttrockenmasse angegeben. Korngrößen > 0,063 mm werden durch Siebung und Korngrößen < 0,125 mm durch Sedimentation getrennt.

Methodik:
Bei der Siebung werden die Körnungsgruppen eines Bodens mit Hilfe von Prüfsieben getrennt. Die durch die Siebe ermittelten Korngrößen werden nach der Lochweite der Siebe benannt, durch die sie zuletzt gefallen sind. Diese Weite wird als Korngröße oder Korndurchmesser bezeichnet.

Die Korngrößenverteilung der Kornanteile unter 0,125 mm wird durch Sedimentation nach dem Aräometerverfahren ermittelt. Dabei wird die aufbereitete Bodenprobe mit Wasser zu einer Suspension aufgerührt und in einem Standzylinder der Sedimentation überlassen. Die Bodenteilchen sinken in Abhängigkeit von Korngröße, spezifischer Korndichte und Temperatur in der Wassersäule ab und erniedrigen die Dichte der Suspension. In festgelegten Zeitabständen wird die Dichte der Suspension über die Eintauchtiefe eines Aräometers gemessen. Mit Hilfe des Gesetzes von Stokes wird die Korngrößenverteilung berechnet. Da dieses Gesetz für kugelförmige Körper gilt, werden bei seiner Anwendung für die Körner natürlicher Böden

nur gleichwertige Korndurchmesser, d. h. sog. hydraulische Äquivalenzdurchmesser bestimmt. Die Korndichte wird als einheitlich vorausgesetzt.

Je nach Anteil an Feinkorn wurden reine Sieb- oder Sedimentationsanalysen oder kombinierte Sieb- und Sedimentationsanalysen durchgeführt.

Ergebnisse:
Sieb- und Sedimentationsanalysen wurden an quartären Lockergesteinen (Auffüllung, Neumagenschotter und Fließerde sowie an lockergesteinsartig verwitterten Festgesteinen im Auslaugungsbereich über dem Oberen Gipsspiegel (Gipsauslaugungsresiduen) durchgeführt. Die ermittelten Korngrößengruppen werden als Summenkurve (Körnungslinie) in einfach logarithmischem Maßstab dargestellt. Die prozentualen Anteile der Korngruppen (Ton, Schluff, Sand, Kies, Steine und Blöcke) wurden aus der Körnungslinie ermittelt und als Kornkennziffer angegeben. Aus der Kornverteilung und den plastischen Eigenschaften konnten die Bodengruppen nach DIN 18196 ermittelt werden.

Die Neumagenschotter (EKB 1 und EKB 2) bauen sich aus schluffigen und stark schluffigen Kiesen (GU, GU+) auf. Die Fließerde (EKB 2/4) besteht aus einem stark sandigen Schluff. Die lockergesteinsartigen Gipsauslaugungsresiduen (EKB 1/6, 1/8, 2/26, 2/30, 2/31) bestehen aus Schluffen und schluffigen Sanden. Die Sand- und Kiesanteile der Proben EKB 1/6, 1/8, 2/4, 2/26, 2/30 und 2/31 bauen sich aus angewitterten Tonsteinbröckchen und Karbonatknöllchen auf.

5.5.4.3.9 Bestimmung der Konsistenzgrenzen (Fließ- und Ausrollgrenze)

Definition:
Die Konsistenzgrenzen sind ein Maß für die Bildsamkeit eines bindigen Bodens (Plastizität) und für die Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehalts. Die Zustandsgrenzen geben in Verbindung mit dem jeweiligen Wassergehalt einen Anhalt für die Konsistenz und damit für die Festigkeit eines bindigen Bodens wieder. Mit abnehmendem Wassergehalt geht bindiger Boden von der flüssigen in die bildsame (plastische), dann in die halbfeste und schließlich in die feste (harte) Zustandsform über.

Die Übergänge von einer Zustandsform in die andere sind wie folgt definiert:

Fließgrenze w_L:	Wassergehalt am Übergang von der flüssigen zur plastischen Zustandsform
Ausrollgrenze w_P:	Wassergehalt am Übergang von der plastischen zur halbfesten Zustandsform
Schrumpfgrenze w_S:	Wassergehalt am Übergang von der halbfesten zur festen Zustandsform (nicht bestimmt)
Plastizitätszahl I_P:	Differenz zwischen der Fließ- und der Ausrollgrenze ($I_P = w_L - w_P$)
Konsistenzzahl I_C:	Kennwert, der aus dem Wassergehalt an der Fließgrenze w_L, dem natürlichen Wassergehalt des Bodens und seiner Plastizitätszahl bestimmt wird ($I_C = w_L - w / I_P$)

Die Konsistenzzahl dient vor allem der Unterteilung des plastischen Bereichs in flüssig ($I_C < 0$), breiig ($I_C = 0 – 0,5$), weich ($I_C = 0,5 – 0,75$), steif ($I_C = 0,75 - 1,0$), halbfest ($I_C = 1,0 - 1,25$) und fest ($I_C > 1,25$).

Methodik:
Die Bestimmung der Konsistenzgrenzen geschieht nach DIN 18122-T1 (1997) an einer homogenisierten Paste ohne Körner > 0,4 mm (Überkorn). Die Fließgrenze w_L wurde nach der Mehrpunktmethode im Fließgrenzengerät aus mindestens vier Einzelversuchen ermittelt. Die Ausrollgrenze ist erreicht, wenn die Bodenprobe zu einer 3 mm dicken Walze auf einer Wasser aufsaugenden, nicht fasernden Unterlage ausgerollt wurde und zu zerbröckeln beginnt.

Unter Einbezug des Überkorns werden aus den erhaltenen Fließ- und Ausrollgrenzen nach o.g. Formeln die Plastizitäts- und die Konsistenzzahl bestimmt. Die zugehörige Bodengruppe nach DIN 18196 wird über die Lage im Plastizitätsdiagramm nach Casagrande definiert.

Ergebnisse:
Konsistenzgrenzenbestimmungen wurden an der Probe EKB 1/7 sowie an einer Mischprobe aus EKB 2/30 und EKB 2/31 bestimmt. Die Proben gehören den lockergesteinsartig verwitterten Festgesteinen im Auslaugungsbereich ehemals gipsführender Gesteine an. Als Bodengruppe nach DIN 18196 wurden für die Gipsauslaugungsresiduen der Grundgipsschichten (EKB 1) und der Grauen Estherienschichten (EKB 2) mittelplastische Tone (TM) ermittelt.

5.5.4.3.10 Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens (Enslin-Versuch)

Definition:
Das Wasseraufnahmevermögen w_A ist das Verhältnis der von der getrockneten Bodenprobe im Wasseraufnahmegerät (Enslin-Gerät) aufgesaugten Wassermasse m_{wg} zur Trockenmasse m_d der Bodenprobe. Bei stark quellfähigen Bodenarten ist als Grenzwert der aufgesaugten Wassermasse der Wert bei der Versuchsdauer von 24 Stunden anzusetzen.

$w_A = 100 * m_{wg} / m_d$ in %

Methodik:
Der Versuch wird in Anlehnung an DIN 18132 (1995) durchgeführt. Etwa 1 g der bei 40 ℃ im Ofen bis zur Gewichtskonstanz getrockneten, feinkörnigen (> 0,063 mm) Probenmasse wird auf die Glasfilterplatte des Wasseraufnahmegeräts gegeben. Das Volumen des aufgesaugten Wassers wird in vorgegebenen Zeitintervallen abgelesen, um das in einem Parallelversuch ermittelte verdunstete Volumen korrigiert und in einem Zeit-Wassergehalts-Diagramm dargestellt. Der Versuch ist beendet, wenn der Probenkegel vollständig durchfeuchtet und in zwei aufeinander folgenden Zeitintervallen keine Wasseraufnahme mehr beobachtet wird. Bei stark quellfähigen Bodenarten wird der Versuch nach 24 Stunden beendet.

Ergebnisse:
Durch den Versuch wird das Wasseraufnahmevermögen der Feinbestandteile eines Bodens ermittelt. Dieses hängt vor allem von der spezifischen Oberfläche und der mineralischen Zusammensetzung des Feinkorns ab. Dabei überlagern sich verschiedene Prozesse. Neben der Bildung von kapillar aufgesogenem Adsorptions- und Porenwinkelwasser (Porenwasser) kann es bei geeigneter Mineralzusammensetzung (quellfähige Tonminerale, Anhydrit) zur Einlagerung von Wasser in das Kristallgitter (Quellen bzw. Schwellen) kommen.

Lockergesteine bzw. lockergesteinsartige Festgesteine
In der EKB 1 wurden an EKB 1/7 und EKB 1/8 Werte von 74,4 % und 78,2 % erreicht. In der EKB 2 wurden Werte zwischen 76,0 % und 97,5 % ermittelt.

Für die Bewertung der Bereiche des Wasseraufnahmevermögens für Böden macht die DIN 18132 folgende Angaben (Tab. 5.26):

Tab. 5.26: Bewertung der Bereiche des Wasseraufnahmevermögens.

Bereich	w_A (%)	Beispiel: Bodengruppen nach DIN 18196
sehr gering	kleiner 40	SE, SU, SU+,ST, ST+
niedrig	über 40 bis 60	UL, UT
mittel	über 60 bis 85	UM, TM
hoch	über 85 bis 130	TA
sehr hoch	über 130	TA

Festgesteine
Der Wasseraufnahmeversuch wird an Bodenproben durchgeführt, die naturgemäß als Lockergesteine bzw. als lockergesteinsartig verwitterte Festgesteine (Halbfestgesteine) vorliegen. Im Zuge der Untersuchungen der Hebungsschäden wurde der Wasseraufnahmeversuch ebenfalls an aufgemahlenen Festgesteinsproben (Probenmasse: 1 g) durchgeführt. Damit sollten Aussagen über die Wasseraufnahmefähigkeit und das Quellpotenzial der im Festgestein vorkommenden quellfähigen Tonminerale und Anhydrit erhalten werden. Die Versuchsdauer betrug jeweils 24 Stunden.

Die größte Wasseraufnahme von 115,8 % wurde an der Probe EKB 2/40 (Tiefe: 35,75 m) ermittelt. Einen ähnlich hohen Wert von rund 113 % lieferte die Probe EKB 2/52 (Tiefe: 46,0 m) . Röntgenografisch wurde an dieser Probe ein Tonmineralgehalt von 75 % bestimmt, der aus etwa 25 % quellfähigem Corrensit besteht.

An der Probe EKB 2/82 (Tiefe: 67,65 m; Mineralgehalt: Gips 3 %, Anhydrit 30 %, Tonminerale 60 %, davon 30 % quellfähige Tonminerale) fiel auf, dass nach 24 Stunden im Enslingerät eine Wasseraufnahme von lediglich etwa 33 % erreicht wurde. Dies erscheint im Hinblick auf den hohen Anteil an quellfähigen Tonmineralen deutlich zu niedrig.

Zudem waren die Wasseraufnahmen bei relativ reinen Anhydritgesteinen auffallend gering. So ergaben Proben mit hohen Anhydritgehalten (z. B. EKB 2/117; Tiefe: 98,0 m) trotz des Aufmahlens Werte von lediglich 40 %. Eine Röntgenanalyse dieser Probe direkt

im Anschluss an die 24-stündige Versuchsdauer ließ keine Umwandlung von Anhydrit in Gips erkennen.

Wie anhand der aufgeführten Probenbeispiele zu erkennen ist, stellen die durchgeführten Wasseraufnahmeversuche an zum größten Teil unverwitterten Festgesteinen für die Abschätzung des potenziellen Quellvermögens keine belastbaren Werte dar. So scheint eine Versuchszeit von 24 Stunden nicht auszureichen, um Anhydrit in Gips umzuwandeln bzw. um die Quellfähigkeit diagenetisch verfestigter (quellfähiger) Tonminerale zu aktivieren. Möglicherweise können Lösungsprozesse bei der Untersuchung von gips- und anhydrithaltigen Proben die Werte des Wasseraufnahmevermögens ebenfalls beeinträchtigen.

Schwierigkeiten ergeben sich auch hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Wasseraufnahmen bei Gesteinsproben mit unterschiedlichen Reindichten. Besonders deutlich wird dies beim Vergleich von Gipsstein (~ 2,3 g/cm³) mit Anhydrit- bzw. Dolomitstein (~ 2,9 g/cm³). Bei gleicher Probenmasse (1 g) weisen Proben mit hoher Reindichte im Vergleich zu Proben mit niedriger Reindichte weniger Probenvolumen und damit eine geringere, benetzungsfähige Oberfläche auf.

Die Ergebnisse der an Festgesteinsproben durchgeführten Wasseraufnahmeversuche wurden aus oben genannten Gründen nicht grafisch dargestellt sondern sind lediglich in der Probentabelle vermerkt.

5.5.4.4 Röntgenografische Untersuchungen

Zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der Mineralzusammensetzung der Gesteinsproben wurden **Röntgen-Pulverdiffraktometrie-Analysen** (RDA) sowie **Röntgen-Fluoreszenz-Analysen** (RFA) durchgeführt.

5.5.4.4.1 Röntgen-Pulverdiffraktometrie-Analyse (RDA)

Mit Hilfe der Röntgen-Pulverdiffraktometrie (Röntgenbeugung) können Böden und Gesteine qualitativ und semiquantitativ auf ihren Mineralbestand hin untersucht werden. Das analysenfein gemahlene und bei 40 ℃ getrocknete Probenpulver wird auf einem Probe nträger aufgebracht (Pulverpräparat) und in einem Röntgendiffraktometer einer monochromatischen Röntgenstrahlung mit der Wellenlänge λ ausgesetzt. Gemessen wird die Intensität der reflektierten Welle sowie der zugehörige Beugungs- bzw. Glanzwinkel Θ bzw. 2 Θ, aus dem der Basisabstand d einer Kristallebene bzw. Netzebene über die **Gleichung nach Bragg** ermittelt wird:

$d = \lambda / (2 * \sin \Theta)$

Das Ergebnis einer Röntgen-Pulverdiffraktometrie-Analyse ist ein Röntgen-Diffraktogramm, bei dem die gemessene Intensität auf der Ordinate und der zugehörige Glanzwinkel (2 Θ) auf der Abszisse abgetragen werden. Aus der Lage und Intensität der Röntgenreflexe (Peaks) kann durch Vergleich mit internationalen Standardwerten auf die Mineralart und mittels Eichkurven auf den semiquantitativen Mineralbestand geschlossen werden.

Im ersten Schritt wird eine **Übersichtsanalyse** an einem texturarmen Pulverpräparat des Gesamtgesteins im Winkelbereich von 2° bis 40° (2 Θ) durchgeführt, bei der die am Gesteinsaufbau beteiligten Hauptminerale bestimmt werden. Sofern notwendig, werden in einem zweiten Analyseschritt die Art und der Anteil der Tonminerale bestimmt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf quellfähigen Tonmineralen (QTM). Die Identifizierung der Tonminerale erfolgt an speziell präparierten Proben (sog. **Texturpräparate**). Bei diesem Verfahren werden die Proben auf eine Glasplatte aufsedimentiert und gemessen. In einem zweiten Schritt werden die Texturpräparate in einer Atmosphäre von Ethylenglykol gelagert und erneut vermessen. Quellfähige Tonminerale bauen das Ethylenglykol bevorzugt in ihre Zwischenschichtgitter ein und vergrößern dadurch ihre Basisabstände d erheblich. Durch Vergleich der unbehandelten Probe mit den bedampften Proben sind qualitative Angaben über die Art und semiquantitative Angaben über den Anteil quellfähiger Tonminerale möglich.

5.5.4.4.2 Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA)

Zur Absicherung und Quantifizierung der Röntgenbeugungs-Analysen werden die Proben einer Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) unterzogen. Diese Methode wird zur qualitativen und quantitativen Bestimmung von Haupt-, Neben- und Spurenelementen einer Boden- bzw. Gesteinsprobe eingesetzt. Es wurden pro Probe jeweils eine Schmelz- und eine Presstablette hergestellt und untersucht.
Die Probentabletten werden mit monochromatischer Röntgenstrahlung zur Eigenstrahlung angeregt. Die von der Probe emittierte Röntgenstrahlung besteht aus verschiedenen, von den chemischen Elementen der Probe ausgehenden, charakteristischen Wellenlängen. Durch die Bestimmung dieser Wellenlängen und deren Intensität lassen sich durch den Vergleich mit internationalen Standards die Elementverteilung und die Elementkonzentration einer Probe ermitteln.

5.5.4.4.3 Ergebnisse der röntgenografischen Untersuchungen

Bei den röntgenografischen Untersuchungen an Proben der Erkundungsbohrungen wurden folgende Minerale nachgewiesen:

Sulfate: (Nachweisgrenze: 1 %)
Anhydrit ($CaSO_4$), Gips ($CaSO_4 \times 2\ H_2O$), Bassanit ($CaSO_4 \times ½\ H_2O$), Baryt ($BaSO_4$), Ettringit ($Ca_6Al_2\ [(OH)_4|SO_4]_3 \times 24\ H_2O$)

Karbonate: (Nachweisgrenze: 5 %)
Dolomit ($CaMg(CO_3)_2$); Calcit ($CaCO_3$), Magnesit ($MgCO_3$, Nachweisgrenze: 1 %)

Quarz, Feldspat und Glimmer: (Nachweisgrenze: 5 %)
Quarz (Qz), Feldspat (Fsp), Glimmer (Gl)

Tonminerale (inklusive quellfähige Tonminerale, QTM): (Nachweisgrenze: 5 %)
Kaolinit (Kaol), Illit (Ill), Chlorit (Chl), Corrensit (Corr)

Vorkommen und Verteilung der Sulfatminerale

Gips (Gy) und Anhydrit (Anh):
In der EKB 1 lagen die Gehalte von Gips und Anhydrit unterhalb der Nachweisgrenze.

In der EKB 2 wurden die Minerale Gips und Anhydrit in Sulfatgesteinen der Gipskeuper-Formation (km1) erbohrt und nachgewiesen. Gips kommt in einer Zone von 28,6 m bis 141,7 m vor. Maximalwerte von über 90 % wurden zwischen 45 m und 60 m sowie zwischen 126 m und 141 m nachgewiesen. Im Bereich von etwa 104 m bis 115 m erscheint Gips nur in Spuren. Der überwiegende Sulfatanteil liegt dort als Anhydrit vor. Anhydrit tritt in einem Bereich zwischen 61,55 und 126,0 m auf. Maximalwerte von über 75 % werden in einer Tiefe von 83 m, 98 m und 115 m erreicht.

Bassanit:
Bassanit oder "Halbhydrat" wurde lediglich in der Probe EKB 2/59 (Tiefe: 51,90 m) in einer Gipsknolle bestimmt. Bassanit entsteht beim Erhitzen von Gips unter Wasserabgabe. Er ist ein Umwandlungsprodukt und unter atmosphärischen Bedingungen nicht stabil. Natürlich entstandener Bassanit ist selten. Möglicherweise bildete sich der in der EKB 2 vorgefundene Bassanit künstlich bei der Probenaufbereitung.

Summenparameter "Gesamt-Calciumsulfatgehalt":
Zur besseren grafischen Darstellung wurde der Summenparameter "Gesamt-Calciumsulfatgehalt" gebildet, der sich aus den Anteilen der Calciumsulfate Anhydrit, Bassanit und Gips zusammensetzt. Andere Sulfate, wie z.B. Baryt oder Ettringit sind in diesem Parameter nicht enthalten.

Vergipsungsgrad:
Zur Abgrenzung von rein anhydritführenden sowie gips- und anhydritführenden Gebirgsabschnitten wurde der sogenannte Vergipsungsgrad eingeführt. Hierbei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass seit der Spätdiagenese sämtliches im Gestein vorhandenes Calciumsulfat als Anhydrit vorliegt (vgl. TUCKER 1985). Der Vergipsungsgrad wird aus dem Verhältnis von Gipsgehalt zum Gesamt-Calciumsulfatgehalt bestimmt und in Prozent angegeben. Für einen mehrere Meter langen Bohrkernabschnitt mit einem Vergipsungsgrad unter 3 % wird von einem sog. "Anhydritkern" gesprochen (siehe Kap. 5.5.4.7.2).

Ettringit:
Ettringit ist ein Calcium-Aluminium-Sulfat, das *in natura* sehr selten vorkommt und z. B. in bestimmten Vulkaniten auftritt. Es zählt zu den wasserreichsten Mineralen der Erdkruste. Ettringit bildet sich aber auch als sog. "Zementbazillus" beim Kontakt von im Boden oder Bodenwasser vorhandenen Sulfat-Ionen mit Kalk- und Tonerdeverbindungen des Ze-

mentsteins. Die Reaktion läuft unter erheblicher Volumenvergrößerung ab und führt zu einem Zertreiben des Zements.

Ettringit wurde in der EKB 2/138 (Tiefe: 118,0 m) nachgewiesen. Bei der Probe handelt es sich um die Ringraumverfüllung der EWS 5.

Baryt (By):
Baryt oder Bariumsulfat wurde als weißliches Nebengemenge in den Proben EKB 2/177 und EKB 2/178 (Tiefe: 162,9 m) qualitativ nachgewiesen. Dort füllt Baryt zusammen mit hellem Calcit feine Klüfte aus. Eine störungsgebundene, hydrothermale Genese ist anzunehmen.

Vorkommen und Verteilung der Karbonatminerale

Dolomit (Dol):
Dolomit wurde sowohl in der EKB 1 als auch in der EKB 2 in unterschiedlichen Mengen nachgewiesen. Als gesteinsbildendes Mineral baut es z.B. Dolomitsteine und Dolomitmergelsteine des Keupers und Oberen Muschelkalks auf. Im Oberen Muschelkalk (Trigonodus-Dolomit) werden Dolomitgehalte von 95 % (EKB 2/175) und im Unterkeuper von 99 % (EKB 1/13) erreicht.

Calcit (Cc):
Calcit tritt als Nebengemengeteil in Bohrproben der EKB 1 und EKB 2 auf. Verstärkt kommt Calcit als Sekundärbildung in Residualgesteinen der Gipsauslaugung (GAR) sowie in stärker geklüfteten, verheilten Störungszonen und manchmal am Rand von Fasergipslagen auf.

Magnesit (Mag):
Magnesit wurde nur in der EKB 2 beobachtet und tritt innerhalb der Gipskeuper-Formation (km1) nur zwischen Bohrmeter 60 und 131 auf. In der Probe EKB 2/91 erreicht der Gehalt 11%. Magnesit scheint damit eng an das Vorkommen von Anhydrit gekoppelt zu sein.

Summenparameter "Gesamt-Karbonatgehalt (Cc+Dol)":
Zur besseren grafischen Darstellung wurde der Summenparameter "Gesamt-Karbonatgehalt" gebildet, der aus den Ergebnissen der Karbonatbombe, des 1150°-Glühverlusts und der röntgenografischen Analysen rechnerisch ermittelt wird. Der Parameter "Gesamt-Karbonatgehalt" stellt wegen der unter Kap. 5.3.4.3.5 genannten Gründe nur den Gehalt von Calcit (Cc) und Dolomit (Dol) dar. Der röntgenografisch bestimmte Magnesit (Mag) wird separat dargestellt.

Vorkommen und Verteilung von Quarz, Feldspat und Glimmer

Quarz (Qz) wurde in fast allen untersuchten Proben qualitativ nachgewiesen. Quarz baut z.B. einen Teil der Feinfraktion von Ton- und Schluffsteinen des Keupers auf. Quarz, Feldspat (Fsp) und Glimmer (Gl) kommen z. T. makroskopisch sichtbar in Keupersandsteinen, in Residualbildungen der Gipsauslaugung, in quartärer Fließerde und in Neumagenschottern vor.

Vorkommen und Verteilung der Tonminerale

Kaolinit (Kaol):
Kaolinit wurde in der EKB 1 und in der EKB 2 in Proben aus Fließerde, Gipsauslaugungsresiduen sowie in Proben aus tonigen Fein- bis Mittelsandsteinen und Schluffsteinen des Schilfsandsteins (km2) und des Unterkeupers (ku, SPS) qualitativ bestimmt. Kaolinit ist häufig mit Feldspat vergesellschaftet.

Illit (Ill):
Illit wurde in der EKB 1 nicht nachgewiesen, tritt aber qualitativ in der EKB 2 in fast allen tonmineralhaltigen Gesteinsproben auf und kann als "Durchläufer" ohne eindeutigen Leitwert bezeichnet werden.

Chlorit (Chl):
Chlorit wurde nur in der EKB 2 qualitativ nachgewiesen. Chlorit tritt dort in Abschnitten von 28,65 m bis 39 m und von 60,9 m bis 93 m sowie sporadisch in 102 m, 107 m und 131 m Tiefe auf. Chlorit kommt somit erst unterhalb des Oberen Gipsspiegels vor und scheint auf den sulfatführenden Gipskeuper (km1) beschränkt zu sein.

Quellfähige Tonminerale (QTM)
Als quellfähiges Tonmineral wurde das Mineral Corrensit (Corr) qualitativ nachgewiesen und semiquantitativ bestimmt. Corrensit ist ein regelmäßiges Wechsellagerungsmineral (Mixed-Layer-Typ) mit ABAB-Struktur aus Chlorit und Smektit bzw. Chlorit und Vermiculit und besitzt die Fähigkeit, Wassermoleküle unter Volumenzunahme in seine Zwischengitterschichten einzubauen.

In der EKB 1 waren keine QTM in nachweisbaren Mengen bestimmbar. In der EKB 2 erscheint Corrensit erst unterhalb des Oberen Gipsspiegels zwischen 29,35 m und 138,0 m **mit einem Maximum bis zu 40 % zwischen 65,0 m und 90,0 m**. Zwischen 103 m und 113 m liegt der Corrensit unterhalb der Nachweisgrenze bzw. tritt nur vereinzelt in geringen Mengen auf.

Summenparameter "Gesamt-Tonmineralgehalt" (TM):
Der Tonmineralgehalt wurde qualitativ und semiquantitativ bestimmt und als Summenparameter "Gesamt-Tonmineralgehalt" zusammengefasst. Dieser Summenparameter setzt sich aus dem Anteil nicht quellfähiger (z. B. Kaolinit, Illit, Chlorit) und quellfähiger Tonminerale (z. B. Corrensit) zusammen.

5.5.4.5 Dünnschliffe

An Kernmaterial aus dem Mittleren Gipshorizont (km1, MGH) wurden im petrographisch-mineralogischen Labor des RFP/LGRB drei Dünnschliffe bei 66,3 m (2 x) und 70,55 m (1 x) angefertigt (Abb. 5.85 bis Abb. 5.87). Sie wurden im Trockenverfahren hergestellt und unter gekreuzten Nicols fotografiert (32-fache Vergrößerung).

In Abb. 5.85 zeigt sich Fasergips als schichtparallele Füllung in feinen Schichtfugen von tonig-mergeligem Gestein. Die Fasergipskristalle stehen senkrecht auf den Trennflächen. In weiteren parallel verlaufenden Schichtfugen sind teilweise noch unverfüllte Bereiche (schwarz) erkennbar. Diese offenen Trennfugen weisen auf den noch andauernden Prozess der Fasergipsausscheidung im Mittleren Gipshorizont (MGH) hin.

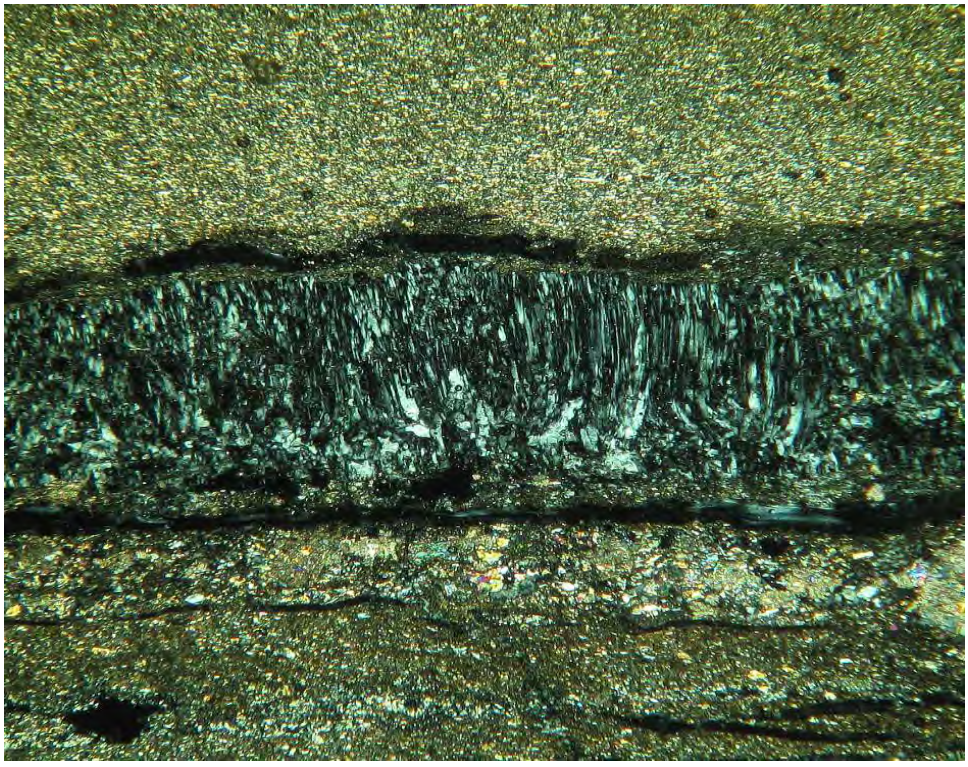


Abb. 5.85: Dünnschliff an Kernprobe aus EKB 2 bei 66,3 m (32-fache Vergrößerung).

Auch in Abb. 5.86 lassen sich Fasergipsausscheidungen in Schichtfugen und diagonal bis schräg verlaufenden feinen Rissen erkennen. Auch in dieser Abbildung sind noch Teile des Klufthohlraumes unverfüllt.

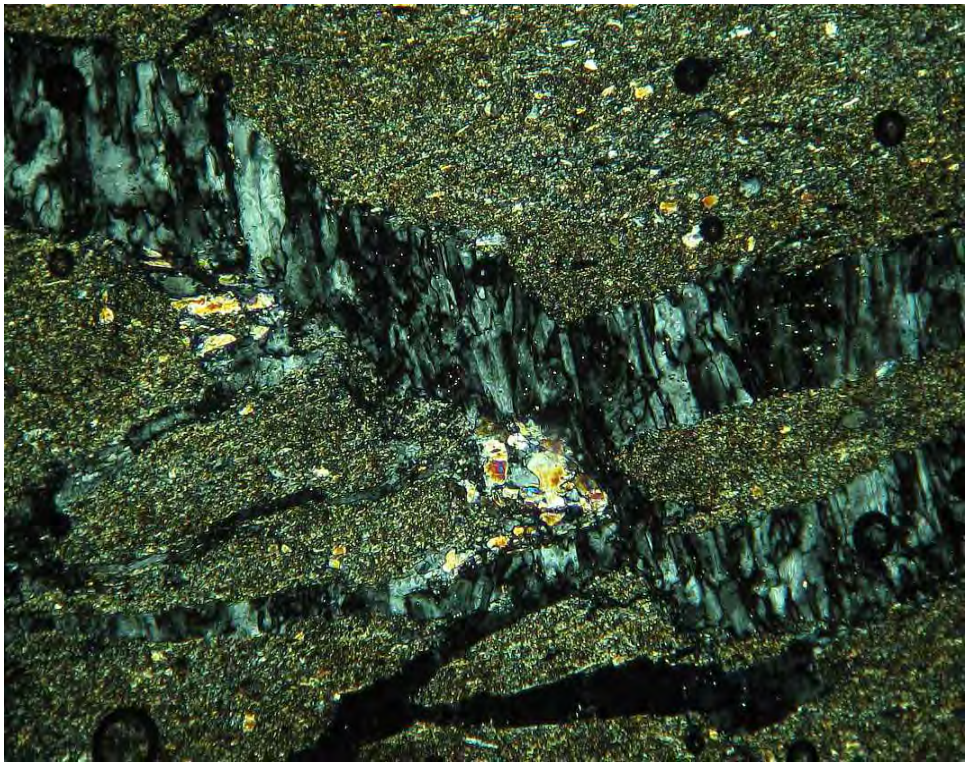


Abb. 5.86: Dünnschliff an Kernprobe aus EKB 2 bei 66,3 m (32-fache Vergrößerung).

In Abb. 5.87 (70,55 m) ist eine flächenhafte Verdrängung von Anhydrit (gelblich bis bunte hypidiomorphe Kristalle) durch Gips (graue bis fast schwarze Matrix) sichtbar, wobei im Gegensatz zu den Abb. 5.85 und 5.86 keine unmittelbare Aussage über das Bildungsalter getroffen werden kann. Die Probe stammt jedoch aus dem Quellhebungsbereich (gemessene Temperaturanomalie).

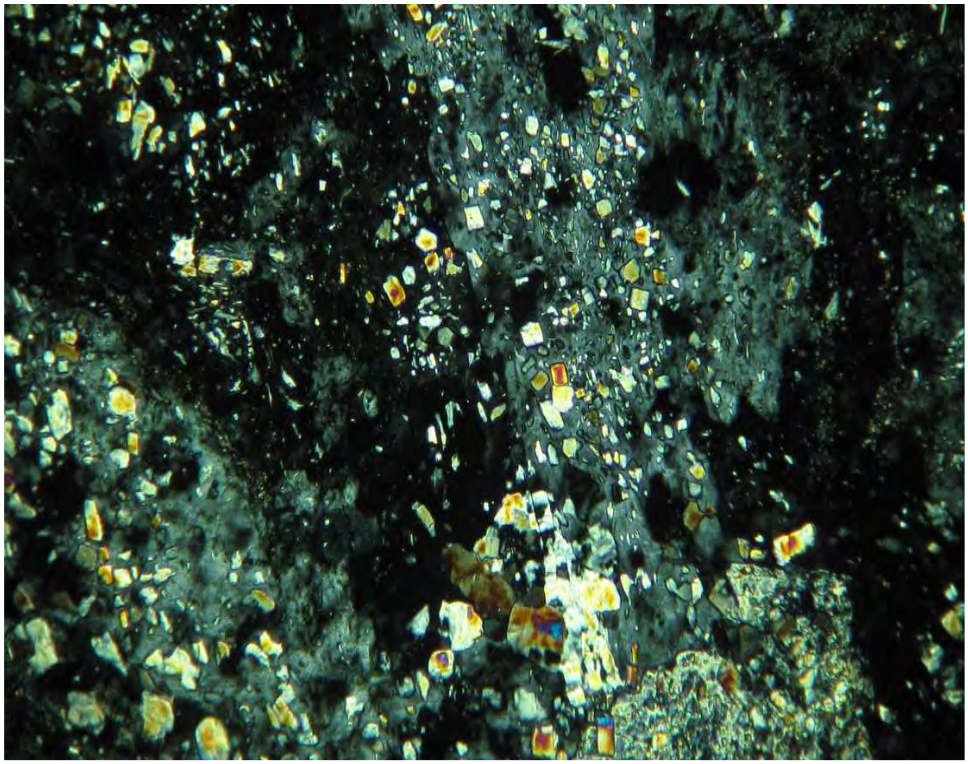


Abb. 5.87: Dünnschliff an Kernprobe aus EKB 2 bei 70,55 m (32-fache Vergrößerung).

5.5.4.6 Darstellung der Laborergebnisse

5.5.4.6.1 Probentabelle

Die Ergebnisse der Labor- und Röntgenuntersuchungen von Proben der Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 liegen als Probentabelle dem Anhang (Anl. 5.10 und Anl. 5.12) bei. Die jeweiligen Homogenbereiche (s. Kap. 5.5.4.7) wurden zur besseren Unterscheidbarkeit farblich hinterlegt.

5.5.4.6.2 Grafische Auswertung

Die Ergebnisse der Labor- und Röntgenuntersuchungen wurden in Diagrammen als Einzelwerte gegen die Bohrtiefe abgetragen. Dabei wurden z.B. verwandte bzw. korrelierende Parameter in jeweils einem Diagramm zusammengefasst.

Für EKB 1 wurden folgende Diagramme erstellt:

- Vereinfachte Lithologie mit Stratigraphie als Verwitterungsprofil ("Bohrprofil")
- Verteilung der Homogenbereiche
- Verteilung von Wassergehalt und Porenanteil
- Dichteverteilung (Trocken-, Feucht- und Reindichte)
- Verteilung der 550°- und 1150°-Glühverluste
- Verteilung der Hauptbestandteile: Gesamt-Tonmineral-, Gesamt-Calciumsulfat- und Gesamt-Karbonatgehalt

Für EKB 2 wurden folgende Diagramme erstellt:

- Gamma-Log (natürliche Radioaktivität)
- Vereinfachte Lithologie mit Stratigraphie als Verwitterungsprofil ("Bohrprofil")
- Verteilung der Homogenbereiche
- Verteilung von Wassergehalt und Porenanteil
- Dichteverteilung (Trocken-, Feucht- und Reindichte)
- Verteilung der 550°- und 1150°-Glühverluste
- Verteilung der Hauptbestandteile: Gesamt-Tonmineral-, Gesamt-Calciumsulfat- und Gesamt-Karbonatgehalt
- Verteilung von Gips und Anhydrit
- Verteilung von Anhydrit und Quellfähigen Tonmineralen
- Vergipsungsgrad und Vorkommen von Magnesit
- Gesamt-Tonmineralgehalt, Gehalt an Quellfähigen Tonmineralen und Wasseraufnahmevermögen (Lockergestein)

Die grafischen Darstellungen der im Labor ermittelten Boden- und Gesteinskennwerte der EKB 1 und EKB 2 sind als Anl. 5.11 und 5.13 dem Bericht beigefügt. Die jeweiligen Homogenbereiche (s. Kap. 5.5.4.7) sind zur besseren Unterscheidbarkeit farbig hinterlegt.

5.5.4.7 Gliederung der in EKB 1 und EKB 2 analysierten Profilabschnitte in Homogenbereiche

Als Homogenbereiche werden Zonen innerhalb des Gebirgsverbandes bezeichnet, deren Gesteinseigenschaften relativ einheitlich sind und innerhalb einer gewissen Bandbreite liegen. Gewöhnlich werden Homogenbereiche hinsichtlich Lithologie, Tektonik, Trennflächengefüge, Auflockerungsgrad, Verwitterungszustand und Grundwasserführung zusammengefasst. Die Charakterisierung der Homogenbereiche der beiden Erkundungsbohrungen geschah nach der Lithologie, der Sulfatführung und den boden- bzw. ge-

steinsphysikalischen Laborkennwerten wie der Trocken- und Feuchtdichte, dem Porenanteil und dem Wassergehalt. Die Homogenbereiche der EKB 1 und EKB 2 sind in getrennten Tabellen (Tab. 27 und Tab. 28) aufgelistet und ebenfalls farbig hinterlegt. Soweit möglich, wurden die Laborkennwerte und Mineralgehalte innerhalb der jeweiligen Homogenbereiche einer einfachen Mittelwertbildung unterzogen. Bei Werten unter der Nachweisgrenze wurde als Rechenwert die halbe Nachweisgrenze benutzt. Die Zahlen in Klammern geben die gemessenen minimalen und maximalen Werte an.

5.5.4.7.1 Homogenbereiche der EKB 1

Für die EKB 1 ergeben sich folgende Homogenbereiche (Tab. 5.27):

Quartär (inklusive anthropogene Aufschüttungen)
Das Quartär, bestehend aus Lockergestein (schluffigem Neumagenschotter sowie Aufschüttungen) mit einer Mächtigkeit von 5,2 m und einem durchschnittlichen Wassergehalt von 7 % bildet den obersten Homogenbereich der EKB 1.

GAR-Zone (km1)
Unter dem Quartär folgt eine 3,7 m mächtige Zone aus brecciösen Dolomitsteinen und lockergesteinsartig verwitterten Ton- und Schluffsteinen. Es handelt sich um ehemals sulfatführende Grundgipsschichten (GI) der Gipskeuper-Formation (km1), die durch oberflächennahe Grund- und Sickerwässer ausgelaugt wurden und allgemein als Gipsauslaugungsresiduen (GAR) bezeichnet werden. Der Sulfatgehalt und der Gehalt an quellfähigen Tonmineralen liegen unterhalb der Nachweisgrenze. Charakteristisch für diese verkarstete Zone sind die geringe Trockendichte < 2,0 g/cm³ sowie der hohe Porenanteil (28,5 %) und der hohe Wassergehalt (13 %).

Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (ku)
Unter der GAR-Zone stehen bis zur Endteufe (17,8 m) oberflächennah aufgelockerte Dolomitsteine und angewitterte Tonmergelsteine der Unterkeuper-Formation (ku) an, deren Trockendichte im Mittel 2,48 g/cm³ beträgt. Porenanteil und Wassergehalt sind deutlich niedriger als im Hangenden. Der Sulfatgehalt und der Gehalt an quellfähigen Tonmineralen liegen unterhalb der Nachweisgrenze.

Tab. 5.27: Gliederung der EKB 1 in Homogenbereiche (*= Wert entspricht der halben Nachweisgrenze).

Teufe (m)	Mächtigkeit (m)	Homogenbereich	Wassergehalt (%)	Porenanteil (%)	Trockendichte (g/cm³)	Feuchtdichte (g/cm³)	Reindichte (g/cm³)	Gips-Gehalt (%)	Anhydrit-Gehalt (%)	TM-Gehalt (%)	QTM-Gehalt (%)	Karbonat-Gehalt (%)	Glühverlust 550 ℃ (%)	Glühverlust 1150 ℃ (%)	Lithologie der untersuchten Proben
- 5,2	5,2	Quartär (inkl. anthropogene Aufschüttungen)	**7,0** (4 - 9)	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	Kies, sandig, schluffig
- 8,9	3,7	GAR-Zone (km1)	**13,0** (9 - 18)	**28,5** (28 - 29)	**1,99** (1,97 - 2,01)	**2,21** (2,19 - 2,22)	**2,77** (2,76 - 2,78)	**0,5***	**0,5***	**22,5** (20 - 25)	**2,5***	**45,3** (42,5 - 48,0)	**3,9** (3,6 - 4,3)	**23,8** (22,7 - 25,0)	Auslaugungsrückstände: Brecciöse Dolomitsteine und lockergesteinsartige Ton-/Schluffsteine
- 17,8	8,9	Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (ku)	**6,0** (3 - 10)	**13,0** (8 - 17)	**2,48** (2,26 - 2,65)	**2,61** (2,49 - 2,76)	**2,86** (2,79 - 2,90)	**0,5***	**0,5***	**12,0** (2,5* - 25)	**2,5***	**76,9** (46,0 -99,0)	**3,2** (2,4 - 4,2)	**35,9** (24,5 - 44,5)	Dolomitsteine, Tonmergelsteine; oberflächennah aufgelockert, angewittert

5.5.4.7.2 Homogenbereiche der EKB 2

Für die EKB 2 ergeben sich folgende Homogenbereiche (Tab. 5.28):

Quartär (inklusive anthropogene Aufschüttungen)
Den obersten Homogenbereich der EKB 2 bildet das 6 m mächtige Quartär aus Aufschüttungen, schluffig-sandigem Neumagenschotter sowie Fließerde. Typisch für die Lockergesteine sind der hohe Porenanteil (32,5 %) und die niedrige Trockendichte (1,83 g/cm³). Der durchschnittliche Wassergehalt liegt bei 11,5 %. Der hohe Tonmineralanteil von 50 % ist nicht repräsentativ, da dieser Wert nur an einer Probe aus Fließerde bestimmt wurde.

Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (km2 – km1, GES)
Unter dem Quartär folgen etwa 16,4 m mächtige Sandsteine, (dolomitische) Tonsteine sowie Dolomitsteine der Schilfsandstein-Formation (km2) und der oberen Grauen Estherienschichten (GES) der Gipskeuper-Formation (km1). Der Sulfatgehalt und der Gehalt an quellfähigen Tonmineralen liegen unterhalb der Nachweisgrenze. Im Vergleich zu tiefer vorkommenden, primär nicht oder nur gering sulfatführenden Gebirgsabschnitten (ku–mo) zeigen die relativ geringe Trockendichte von 2,21 g/cm³ und der erhöhte Porenanteil von 19 % dieses Homogenbereichs aus Festgesteinen deutlichen Einfluss der oberflächennahen Auflockerung und Anwitterung.

Obere GAR-Zone (GES)
Zwischen 22,4 m und 28,6 m wurden ca. 6,2 m mächtige Auslaugungsrückstände ehemals sulfatführender Grauer Estherienschichten (GES) der Gipskeuper-Formation (km1) erbohrt. Es handelt sich um lockergesteinsartig zerfallene Ton- und Schluffsteine sowie brecciöse Dolomitsteine, deren Sulfatanteil durch oberflächennahes Grundwasser, wahrscheinlich aus dem Stockwerk des Schilfsandsteins (km2) aufgelöst und abgeführt wurde (Gipskarst). Der Sulfatgehalt und der Gehalt an quellfähigen Tonmineralen liegen unterhalb der Nachweisgrenze. Dieser Homogenbereich zeichnet sich gegenüber anderen Abschnitten durch einen deutlichen Rückgang der Trockendichte auf 1,85 g/cm³ sowie den höchsten Porenanteil (Mittelwert: 33 %) und den höchsten Wassergehalt (Mittelwert: 16 %) der EKB 2 aus. Die Obere GAR-Zone ist stark wasserdurchlässig.

Zone zwischen Oberem Gipsspiegel und Oberem Anhydritspiegel (GES - MGH)
Diese etwa 33 m mächtige Zone aus einer dünnbankigen Wechselfolge aus Gipssteinen, dolomitischen Tonsteinen und Dolomitsteinen beginnt mit dem ersten Auftreten von nachweisbarem Gips (Oberer Gipsspiegel: 28,6 m Tiefe) und endet mit dem ersten Auftreten von Anhydrit (Oberer Anhydritspiegel: 61,5 m Tiefe). Dieser gipsführende Homogenbereich umfasst die unteren Abschnitte der Grauen Estherienschichten (GES), die Unteren Bunten Estherienschichten (UBE) und die oberen Abschnitte des Mittleren

Gipshorizonts (MGH). Wenig unterhalb des Oberen Gipsspiegels treten erstmals quellfähige Tonminerale in nachweisbarer Menge auf von im Mittel 9,1 % auf.
Markant ist der Rückgang des Porenanteils auf 8,4 % und des Wassergehalts auf 3,5 %. Parallel dazu steigt die Trockendichte von 1,85 g/cm³ auf 2,33 g/cm³ sprunghaft an. In der geringen Reindichte von 2,55 g/cm³ spiegelt sich der mit knapp 50 % recht hohe Gipsanteil des Gesteins wieder. Die Vergipsung setzt von den oberen, grundwasserführenden Stockwerken (GAR, km2) an und schreitet frontartig zur Tiefe hin fort. Möglicherweise sind geringe Trockendichten (< 2,25 g/cm³) und erhöhte Gesteinsporenanteile (> 15 %) zwischen 34 m und 47 m Tiefe Hinweise auf eine beginnende Verkarstung innerhalb dieses Homogenbereichs.

Zone zwischen Oberem Anhydritspiegel und Anhydritkern (MGH - DRM)
Dieser Homogenbereich beginnt unterhalb des Anhydritspiegels und setzt sich aus den unteren zwei Dritteln des Mittleren Gipshorizonts (MGH), des gesamten Weinsberg-Horizonts (WEH) und der oberen Hälfte der Dunkelroten Mergel (DRM) zusammen. Lithologisch besteht diese 42,5 m mächtige Zone aus einer dünnbankigen Wechselfolge aus dolomitischen Tonsteinen sowie Anhydrit- und Gipssteinen. Im Vergleich zum Gips nimmt Anhydrit zur Tiefe hin am Gesteinsaufbau vermehrt teil. Aufgrund der sehr hohen Reindichte (bis zu 2,97 g/cm³) des Anhydrits erhöht sich die Trockendichte der Gesteine im Mittel auf 2,44 g/cm³. Die quellfähigen Tonminerale erreichen mit durchschnittlich 13,7 % ihr Maximum. Wassergehalt und Porenanteil nehmen unterhalb des Anhydritspiegels im Vergleich zum Hangenden leicht ab. Möglicherweise weisen die geringfügigen Rückgänge der Trockendichten (< 2,30 g/cm³) bei 76,6 m und 83,8 m auf aktive Quellungshorizonte hin.

Anhydritkern (DRM - BH)
Der als Anhydritkern bezeichnete Gebirgsabschnitt wurde wegen seines geringen Vergipsungsgrades von unter 3 % ausgeschieden. Das im Gestein vorkommende Calciumsulfat tritt nahezu vollständig als Anhydrit auf. Der Gipsgehalt liegt im Bereich der Nachweisgrenze. Die ca. 12 m lange Bohrkernstrecke zwischen 104 m und 116 m ist aus dolomitischen Tonsteinen und Anhydritsteinen aufgebaut und setzt sich aus der unteren Hälfte der Dunkelroten Mergel (DRM) und der oberen Hälfte des Bochinger Horizonts (BH) zusammen. Es werden die höchsten Reindichten (2,77 g/cm³) und die höchsten Trockendichten (2,70 g/cm³) erreicht. Der Gesteinsporenanteil verringert sich auf 3,6 % und der Wassergehalt auf 1,3 %. Quellfähige Tonminerale liegen mit einem Gehalt von 3,1 % etwas über der halben Nachweisgrenze. Dieser Homogenbereich scheint den ursprünglichsten, noch am wenigsten durch Quell-, Umwandlungs- und Auflockerungsprozesse veränderten Gebirgsabschnitt der EKB 2 darzustellen.

Tab 5.28: Gliederung der EKB 2 in Homogenbereiche (*= Wert entspricht der halben Nachweisgrenze).

Teufe (m)	Mächtigkeit (m)	Homogenbereich	Wassergehalt (%)	Porenanteil (%)	Trockendichte (g/cm³)	Feuchtdichte (g/cm³)	Reindichte (g/cm³)	Gips-Gehalt (%)	Anhydrit-Gehalt (%)	TM-Gehalt (%)	QTM-Gehalt (%)	Karbonat-Gehalt (%)	Glühverlust 550 °C (%)	Glühverlust 1150 °C (%)	Lithologie der untersuchten Proben
- 6,0	6,0	Quartär (inkl. anthropogene Aufschüttungen)	**11,5** (10 - 14)	**32,5** (30-35)	**1,83** (1,80-1,86)	**2,06** (2,05 - 2,07)	**2,71** (2,70 - 2,71)	**0,5***	**0,5***	**50** (nicht repäsentativ)	**2,5***	**2,5***	**3,0**	**5,0**	Kies, schluffig; Ton, mittelplastisch
- 22,4	16,4	Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (km2 - km1 GES)	**9,0** (4 - 20)	**19,0** (10 - 39)	**2,21** (1,65 - 2,60)	**2,39** (1,99 - 2,69)	**2,71** (2,63 - 2,88)	**0,5***	**0,5***	**48,1** (20-60)	**2,5***	**16,3** (2,5* - 77)	**4,3** (2,2 - 6,3)	**13,3** (6,2 - 37,8)	Sandsteine, Tonsteine (dolomitisch), Dolomitsteine; oberflächennah aufgelockert, angewittert
- 28,6	6,2	Obere GAR-Zone (GES)	**16,0** (13 - 20)	**33,0** (27 - 37)	**1,85** (1,71 - 2,03)	**2,15** (2,06 - 2,29)	**2,74** (2,70 - 2,80)	**0,5***	**0,5***	**60,0** (55 - 65)	**2,5***	**7,3** (2,5* - 18)	**3,9** (3,1 - 5,2)	**10,6** (7,3 - 15,9)	Auslaugungsrückstände: Lockergesteinsartige, brecciöse Ton-/Schluff- und Dolomitsteine
- 61,5	32,9	Zone zwischen Oberem Gips- und Oberem Anhydritspiegel (GES - MGH)	**3,5** (0,5 - 8)	**8,4** (1 - 19)	**2,33** (2,12 - 2,53)	**2,40** (2,29 - 2,62)	**2,55** (2,33 - 2,77)	**49,8** (3 - 96)	**0,5***	**31,2** (2,5* - 75)	**9,1** (2,5* - 25)	**11,8** (2,5* - 61)	**12,2** (4,1 - 20,1)	**27,3** (14,5 - 37,2)	Gipssteine, Tonsteine (dolomitisch), Dolomitsteine
- 104,0	42,5	Zone zwischen Oberem Anhydritspiegel und Anhydritkern (MGH - DRM)	**3,0** (0,1 - 5,6)	**7,7** (1 - 15)	**2,44** (2,29 - 2,93)	**2,52** (2,31 - 2,94)	**2,67** (2,42 - 2,97)	**13,7** (0,5* - 78)	**20,2** (0,5* - 95)	**57,6** (2,5* - 85)	**13,7** (2,5* - 40)	**5,6** (2,5* - 35)	**10,3** (0,6 - 16,5)	**27,8** (7,6 - 39,9)	Tonsteine (dolomitisch), Anhydrit- und Gipssteine
-116,0	12,0	Anhydritkern (DRM - BH)	**1,3** (0,1 -2)	**3,6** (2 - 8)	**2,70** (2,53 - 2,90)	**2,73** (2,58 - 2,90)	**2,77** (2,71 - 2,95)	**0,5* - 1**	**33,5** (0,5* - 86)	**54,6** (5 - 70)	**3,1** (2,5* - 10)	**8,0** (2,5* - 35)	**7,0** (0,7 - 9,4)	**28,0** (6,6 - 35,7)	Tonsteine (dolomitisch), Anhydritsteine
- 126,0	10,0	Zone zwischen Anhydritkern und Unterem Anhydritspiegel (BH - GI)	**1,6** (0,1 - 3,5)	**8,8** (5 - 13)	**2,50** (2,35 - 2,66)	**2,54** (2,38 - 2,68)	**2,74** (2,60 - 2,86)	**26,6** (2 - 53)	**23,1** (3 - 44)	**40,5** (20 - 75)	**6,8** (2,5* - 20)	**9,4** (2,5* - 29)	**10,7** (4,5 - 16,5)	**31,0** (18,0 - 43,0)	Tonsteine (dolomitisch), Gips- und Anhydritsteine
- 141,7	15,7	Zone zwischen Unterem Anhydrit- und Unterem Gipsspiegel (GI)	**0,4** (0,1 - 1,7)	**2,8** (1 - 9)	**2,33** (2,31 - 2,40)	**2,35** (2,32 -2,40)	**2,40** (2,32 - 2,58)	**84,0** (70 - 99)	**0,5***	**12,8** (2,5* - 50)	**4,1** (2,5* - 10)	**3,2** (2,5* - 8)	**17,7** (14,1 - 19,9)	**29,0** (22,2 - 42,0)	Gipssteine, Tonsteine (dolomitisch), Dolomitsteine
- 142,8	1,1	Untere GAR-Zone (GI)	**13,0** (12 - 14)	**25,0**	**1,96**	**2,20**	**2,66** (2,60 - 2,72)	**0,5***	**0,5***	**52,5** (35 - 70)	**2,5***	**29,0** (2,5* - 53)	**5,2** (4,2 - 6,1)	**19,0** (9,6 - 28,5)	Auslaugungsrückstände: Lockergesteinsartige, brecciöse Ton-/Schluff- und Dolomitsteine
- 163,0	20,2	Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (ku - mo)	**3,0** (0,5 - 9)	**10,0** (2 - 19)	**2,54** (2,36 - 2,78)	**2,62** (2,51 - 2,80)	**2,81** (2,64 - 2,97)	**0,5***	**0,5***	**14,7** (2,5* - 50)	**2,5***	**62,7** (2,5* - 95)	**3,5** (2,1 - 5,9)	**32,2** (3,8 - 45,4)	Dolomitsteine, Tonsteine, Sandsteine, tektonische Breccien

Zone zwischen Anhydritkern und Unterem Anhydritspiegel (BH - GI)
Dieser 10 m mächtige Homogenbereich befindet sich zwischen dem Anhydritkern und dem Unterem Anhydritspiegel (ca. 126,0 m Tiefe) und ist aus (dolomitischen) Tonsteinen sowie Gips- und Anhydritsteinen der unteren Hälfte des Bochinger-Horizonts (BH) und dem obersten Drittel der Grundgipsschichten (GI) aufgebaut. Gips und Anhydrit sind in etwa gleichen Anteilen am Gesteinsaufbau beteiligt. Während die Rein- und Trockendichte zur Tiefe hin abnehmen, steigen der Gipsanteil und damit der Vergipsungsgrad an. Der Porenanteil erhöht sich auf 8,8 % und der Anteil quellfähiger Tonminerale auf 6,8 %.

Zone zwischen Unterem Anhydritspiegel und Unterem Gipsspiegel (GI)
Dieser 15,7 m mächtige Homogenbereich befindet sich zwischen dem Unteren Anhydritspiegel und dem Unteren Gipsspiegel (141,7 m Tiefe) und wird aus bankigen Gipssteinen, (dolomitischen) Tonsteinen und Dolomitsteinen der Grundgipsschichten (GI) aufgebaut. Die ermittelten Dichtewerte sind mit dem gipsführenden Homogenbereich über dem Oberen Anhydritspiegel vergleichbar. Quellfähige Tonminerale beteiligen sich mit 4,1 % am Gesteinsaufbau. Auffällig sind der minimale Porenanteil mit 2,8 % und der dazu korrelierende niedrige Wassergehalt von durchschnittlich nur 0,4 %. Der Anhydritgehalt liegt unterhalb der Nachweisgrenze. Die Umwandlung des Anhydrits in Gips fand wahrscheinlich von der Tiefe her kommend statt.

Untere GAR-Zone (GI)
Der lediglich 1,1 m mächtige Homogenbereich unterscheidet sich deutlich von den liegenden und hangenden Bohrabschnitten. Wie bei der Oberen GAR-Zone handelt es sich um Auslaugungsrückstände der ehemals sulfatführenden Grundgipsschichten (GI). Es sind lockergesteinsartige, brecciöse Ton-/Schluff- und Dolomitsteine mit einer auffallend niedrigen Trockendichte von 1,96 g/cm³, einem deutlich erhöhten Porenanteil von 25 % und einem hohen Wassergehalt von 13 %. Gips und quellfähige Tonminerale liegen in ihren Gehalten unter der Nachweisgrenze.

Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (ku – mo)
Bis zur Endteufe 163 m wurden Dolomitsteine, Tonsteine, Sandsteine sowie tektonische Breccien des Unterkeupers (ku) und Oberen Muschelkalks (Trigonodusdolomit) erbohrt und als ein gemeinsamer Homogenbereich ausgeschieden. Im Vergleich zur hangenden Verkarstungszone zeichnet sich dieser Homogenbereich durch einen niedrigen Wassergehalt (3 %) und hohe Rein- und Trockendichten aus. Der Gesteinsporenanteil beträgt im Mittel 10 %. Calciumsulfate sowie quellfähige Tonminerale liegen unterhalb der Nachweisgrenze.

5.5.4.8 Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Gesteinen der EKB 2

In Anlehnung an die Homogenbereiche (vgl. Kap. 5.5.4.7.2) erfolgte die repräsentative Probenahme am Kernmaterial der EKB 2 durch das RPF/LGRB. Die Wärmeleitfähigkeitsmessungen wurden von der Fa. GEOPHYSIKA, Aachen durchgeführt (GEOPHYSIKA 2010).

Methodik:
Die berührungslosen Messungen der Wärmeleitfähigkeit wurden mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) der Firma Lippmann & Rauen GbR durchgeführt. Das Verfahren basiert auf dem thermischen Abtasten der Probenoberfläche mit einer fokussierten Wärmequelle, die sichtbares Licht und Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) emittiert. Vor und hinter der Wärmequelle erfolgt eine "kalte" und "heiße" Temperaturmessung mittels Infrarot-Thermosensoren. Aus der Temperaturdifferenz der beiden Sensoren lässt sich die Wärmeleitfähigkeit der Probe berechnen.

Es wurden 32 Festgesteinsproben (Bohrkerne) untersucht, wobei die Sulfat führenden Proben nur trocken vermessen wurden.

Messergebnisse:
Die gemessenen Werte liegen zwischen 0,67 W/(m·K) (Tonstein) und 4,12 W/(m·K) (Dolomitstein). Die Werte für vier Proben mit einer Wechsellagerung von Anhydrit und Tonstein bewegen sich zwischen 1,43 W/(m·K) und 3,05 W/(m·K), die meisten Werte liegen bei etwa 2 W/(m·K). Die Werte von Gips und Tonstein liegen meist deutlich unter 2 W/(m·K).

Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten wurden den in Kap. 5.5.4.7.2 definierten Homogenbereichen zugeordnet (Tab. 5.29). Unter Berücksichtigung der Mächtigkeiten dieser Homogenbereiche wurden für sie Wärmeentzugsleistungen ermittelt. Setzt man die Summe der Wärmeentzugsleistungen mit der Gesamtmächtigkeit der Bohrung in Bezug, so errechnet sich für das gesamte Profil eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von ca. 2,0 W/(m·K).

Tab. 5.29: Zuordnung der Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen (λ, trocken) an Gesteinen der EKB 2 zu den Homogenbereichen

Teufe [m]	Mächtigkeit [m]	Homogenbereich	Lithologie der untersuchten Proben	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
- 6,0	6,0	Quartär (inkl. anthropogene Aufschüttungen)	Kies, schluffig; Ton, mittelplastisch	**3,12** (1,96 – 3,89)
- 22,4	16,4	Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (km2 - km1 GES)	Sandsteine, Tonsteine (dolomitisch), Dolomitsteine; oberflächennah aufgelockert, angewittert	**1,89** (1,11 – 2,87)
- 28,6	6,2	Obere GAR-Zone (GES)	Auslaugungsrückstände: Lockergesteinsartige, brecciöse Ton-/Schluff- und Dolomitsteine	**0,67** (0,67)
-61,55	32,95	Zone zwischen Oberem Gips- und Oberem Anhydritspiegel (GES - MGH)	Gipssteine, Tonsteine (dolomitisch), Dolomitsteine	**1,54** (1,34 – 1,77)
-104,0	42,45	Zone zwischen Oberem Anhydritspiegel und Anhydritkern (MGH - DRM)	Tonsteine (dolomitisch), Anhydrit- und Gipssteine	**1,82** (1,01 - 3,05)
-115,0	11,0	Anhydritkern (DRM - BH)	Tonsteine (dolomitisch), Anhydritsteine	**2,09** (2,09)
-126,0	11,0	Zone zwischen Anhydritkern und Unterem Anhydritspiegel (BH - GI)	Tonsteine (dolomitisch), Gips- und Anhydritsteine	**1,43** (1,43)
-141,7	15,7	Zone zwischen Unterem Anhydrit- und Unterem Gipsspiegel (GI)	Gipssteine, Tonsteine (dolomitisch), Dolomitsteine	**1,56** (1,23 – 1,87)
- 142,8	1,1	Untere GAR-Zone (GI)	Auslaugungsrückstände: Lockergesteinsartige, brecciöse Ton-/Schluff- und Dolomitsteine	**0,67** (0,67)
-163,0	20,2	Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (ku - mo)	Dolomitsteine, Tonsteine, Sandsteine, tektonische Breccien	**3,64 (gesättigt)** (3,2 – 4,35)

Spalte Wärmeleitfähigkeit: Mittelwerte in fetter Schrift; in Klammern: Minimum – Maximum

5.5.4.9 Analysenergebnisse zur Ringraumverfüllung der EWS 5 (Probe: EKB 2/138)

Beim Abteufen der EKB 2 wurde zwischen 117,50 m und 118,10 m Tiefe die Ringraumverfüllung der EWS 5 gequert. Dabei wurden die vier Sondenschläuche und das umgebende Verpressmaterial samt Nachbargestein zu Tage gefördert. Das im LGRB-Labor untersuchte Probenmaterial aus 118,00 m bis 118,05 m Tiefe wurde in die Proben EKB 2/137 (Nachbargestein aus gipsführendem Anhydritstein und dolomitischem Tonstein) und EKB 2/138 (mürbes und bröckeliges, weiß-gelbliches Verpressmaterial) separiert. Während die Kennwerte und Mineralgehalte der EKB 2/137 zum benachbarten Gebirgsverband korrelieren, wurden bei der Ringraumverfüllung der EKB 2/138 folgende, vom umgebenden Gestein stark abweichende Parameter ermittelt:

Wassergehalt:	118,6 %
Reindichte:	2,39 g/cm³
Feuchtdichte:	1,37 g/cm³
Trockendichte:	0,63 g/cm³
Porenanteil:	74 %
Porenzahl:	280 %
Sättigungsgrad:	1,0

Die röntgenografische Analyse der EKB 2/138 erbrachte einen sehr hohen Gehalt an **Ettringit**, der den außergewöhnlich hohen Wassergehalt, die extrem niedrige Trockendichte und den sehr hohen Porenanteil erklärt. Der wasserreiche Ettringit ist durch Kontakt des Ringraumzements mit Porenwasser und Sulfat-Ionen des gips- und anhydritführenden Gebirges unter Volumenvergrößerung entstanden. Durch den Sulfatangriff (sog. "Sulfattreiben") wird das Gefüge des ehemaligen Zementsteins stark aufgelockert und damit weniger erosionsstabil und stärker durchlässig.

Die Laborergebnisse der Ringraumverfüllung sind nicht in die Mittelwertbildung des Homogenbereichs "Zone zwischen Anhydritkern und Unterem Anhydritspiegel" einbezogen.

Die aus der Erkundungsbohrung EKB 2 aus einer Tiefe zwischen 117,50 m bis 118,10 m entnommene zementöse Ringraumverfüllung wurde am 06. August 2009 der Universität Karlsruhe, MPA, zur röntgenographischen Phasenanalyse und naßchemischen Untersuchung übergeben. Auf den Prüfungsbericht 09 20 65 0500 vom 23. September 2009 wird verwiesen (vgl. Anl. 5.14).

5.5.4.10 Bewertung der Untersuchungen

Die geologische Erkundung des Erdwärmesondenfeldes durch die beiden Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 erbrachte einen belastbaren Datensatz hinsichtlich

- des geologischen Baus (Schichtenabfolge, Lage der Gipsauslaugungszone, der Gips- sowie der Anhydritspiegel),
- der hydrogeologischen Stockwerksgliederung einschließlich der jeweiligen Ergiebigkeiten,
- der Grundwasserbeschaffenheit,
- der vorhandenen Druckpotentiale sowie
- umfangreiche petrographisch-mineralogische Untersuchungsergebnisse an Kernmaterial.

Als wichtigste Ergebnisse werden zusammengefasst:

1. Schichtenfolge und Tektonik

Mit den Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 wurde unterhalb der quartären Überdeckung die Schichtabfolge des Mittleren und Unteren Keupers sowie darunter des Oberen Muschelkalkes erbohrt. Durch die Bohrungen und die als Folge der Bohrergebnisse in der EKB 1 durchgeführten hybridseismischen Messungen (Kap. 7.2.3) wurde erstmals im Nordwesten des Erdwärmesondenfeldes eine für das Verständnis der

Hebungsfigur außerordentlich wichtige Störung mit einem Versatzbetrag von ca. 120 m nachgewiesen.

2. Identifikation von Homogenbereichen, Obere bzw. Untere Gips-/Anhydritspiegel

Anhand umfangreicher Laboruntersuchungen konnten Homogenbereiche als Zonen innerhalb des Gebirgsverbandes ausgewiesen werden, deren Gesteinseigenschaften (Lithologie, Sulfatführung, boden- bzw. gesteinsphysikalische Laborkennwerte wie Trocken- und Feuchtdichte, Porenanteil und Wassergehalt) relativ einheitlich sind und innerhalb einer gewissen Bandbreite liegen. Daneben wurde das sulfatführende Gebirge im Gipskeuper in Gips- bzw. Anhydrit-führende Abschnitte untergliedert und das erstmalige Auftreten von Gips bzw. Anhydrit als "Oberer Gipsspiegel" bzw. "Oberer Anhydritspiegel" und analog das letztmalige Auftreten von Anhydrit bzw. Gips als "Unterer Anhydritspiegel" bzw. "Unterer Gipsspiegel" bezeichnet.

3. Identifikation des im Quellungsprozess befindlichen Gebirgsabschnittes

Der in Quellungsprozess befindliche Gebirgsabschnitt lässt sich anhand der Bohrkerne makroskopisch nicht eindeutig bzw. nur sehr undeutlich erkennen. Eine Identifikation des im Quellungsprozess befindlichen Gebirgsabschnittes ist vielmehr nur in der Gesamtschau unter Einbezug indirekter und direkter Anzeichen möglich.

Indirekte Anzeichen: Der Tiefenabschnitt zwischen 66,80 und 99,50 m u. GOK, in dem vermehrt Bohrlochwandausbrüche auftreten, entspricht der Zone, in der aufgrund erhöhter Gebirgsspannung wiederholt Erschwernisse beim Niederbringen der Bohrung mit mehrfachem Nachfall auftraten. In den benachbarten EWS-Bohrungen zeichnet sich dieser Abschnitt in den dort gemessenen Temperaturprofilen mit einer eindeutigen positiven Temperaturanomalie (Kap. 6.3.3.2) aus. Die Temperaturanomalie wird als Beleg einer exothermen Reaktion bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips gewertet. Als Hinweis auf den Quellungsprozess sind zudem die zu beobachtenden Bohrkernverformungen sowie ein spontaner polyedrischer Zerfall der Bohrkerne in den schwarzgrauen Tonsteinsabschnitten zu werten.

Direkte Anzeichen: Wie die Auswertung von Dünnschliffen (Abb. 5.854 bis Abb. 5.87) erbrachte, lassen sich in diesem Abschnitt unmittelbare Anzeichen einer rezenten Gipsbildung (Fasergips-Bildungen im Bereich feiner Schichtfugen in Tonsteinlagen) nachweisen.

Die Laborresultate belegen, dass ab dem Oberen Anhydritspiegel bei 61,50 m u. GOK bis in eine Tiefe von 97 m u. GOK im Anhydrit-führenden Gebirge erhöhte Anteile an quellfähigen Tonmineralen vorliegen, die eine Voraussetzung für das "Gipskeuperquellen" darstellen. Zwar sind auch oberhalb des Oberen Anhydritspiegels quellfähige Tonminerale nachzuweisen. Sie liegen jedoch im Gips-führenden Gebirge in bereits gequollenem Zustand vor. Der beschriebene Gebirgsabschnitt zeichnet sich zudem durch einen geringen Rückgang der Trockendichten sowie durch einen gegenüber dem sonstigen Anhydrit führenden Gebirge erhöhten Wassergehalt aus.

Aufgrund der in direkten und indirekten Anzeichen wird der Tiefenabschnitt zwischen 61,50 m und 99,50 m als **der momentan in Quellungsprozess befindliche Gebirgsabschnitt** identifiziert. Dieser Gebirgsabschnitt ist einem derzeit noch ablaufenden Quellungsprozess unterworfen, der unter dem Überbegriff "Gipskeuperquellen" zusammenfassend als Ton- sowie als Anhydritquellung bezeichnet werden kann. Dieser Abschnitt zeichnet sich durch den engständigen Wechsel von Anhydrit- und Tonsteinlagen aus, wie er sich auch in anderen Fallbeispielen für Gipskeuperquellen in baden-württembergischen Tunnelbauprojekten als besonders problematisch erwiesen hat.

4. Gebirgsdurchlässigkeiten innerhalb des Hebungsbereiches

Innerhalb des Quellungsbereiches ist bei 76,40 m unter Gelände offenbar ein Gebirgsabschnitt vorhanden, der durchlässiger als die über- und unterlagernde Profilfolge ist (beobachteter Spülungsabgang in EKB 2). Möglicherweise ist diese erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit eine Folge von Biegescherung bzw. Biegegleitung im Gipskeuper, worauf die in den Bohrkernen immer wieder zu beobachtenden schichtparallelen Harnischflächen hindeuten. Diese im Quellungsbereich nachgewiesene erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit ist ein wesentlicher Baustein zum gesamten Prozessverständnis. Dadurch ist - in Zusammenhang mit einer Vergitterung tektonischer Störungen im Untergrund - ein flächenhafter lateraler Wassernachschub von Grundwasser möglich, das aus der Tiefe hauptsächlich über den undichten Ringraum der Erdwärmesonde EWS 7 in den quellfähigen Bereich des Gipskeupers aufsteigen kann.

5. Geometrie des Quellungskörpers

Die Geometrie des in Quellung befindlichen Gebirgsabschnittes wurde anhand eines geomechanischen Modells (Ingenieurgruppe Geotechnik) unter Einbezug der in Kap. 7 beschriebenen geologischen Verhältnisse sowie der an der Geländeoberfläche gemessenen Hebungsfigur ermittelt. Auf den Bericht der Ingenieurgruppe Geotechnik wird verwiesen.

6. Hydraulische und hydrochemische/isotopenhydrologische Verhältnisse, Nachweis artesisch gepannten Grundwassers unterhalb des Anhydrit-führenden Gebirgsabschnittes

Die während des Abteufens der Bohrungen durchgeführten zahlreichen hydraulischen Tests sowie hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen erlauben eine sehr differenzierte Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse (Kap. 5.5.2 und Kap. 5.5.3).

Es wurden vier hydraulisch und hydrochemisch/isotopisch voneinander getrennte Grundwasserstockwerke nachgewiesen, wobei die beiden oberen (Schilfsandstein und Gipskarst) stark gespannte, die beiden unteren (Lettenkeuper und Oberer Muschelkalk) artesisch gespannte Grundwässer führen. Für die Überprüfung der Arbeitshypothese sind (artesisch) gespannte Verhältnisse in den beiden unter dem Quellhebungsbereich liegenden Grundwasserstockwerken ein ausschlaggebendes Kriterium.

6 Untersuchungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7

Als wesentliche Grundlage zur Aufstellung der Arbeitshypothese und eines darauf aufbauenden geologischen Erkundungsprogrammes dienten geologische Auswertungen an allen dem RPF/LGRB zur Verfügung gestellten Bohrrückstellproben (Cuttings) der EWS 1, 2 und 3 sowie die im Juni 2008 in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 gemessenen Temperaturprofile.

6.1 Technische Angaben zu den Erdwärmesonden

In Tab. 6.1 sind die Stammdaten für die Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 7 zusammengestellt. Die bohrtechnischen Angaben nach den Fertigstellungsberichten der Bohrfirma W. vom 03. Dezember 2007 und vom 20. März 2008 sind in der Tab. 6.2 auszugsweise enthalten.

Nach den Aufzeichnungen der Bohrfirma W. vom 03. Dezember 2007 wurden alle Bohrungen bis 14 m u. GOK verrohrt und bis zur Endteufe von 135 m (EWS 1) bzw. 140 m (EWS 2 bis EWS 7) als Meißelbohrung mit Druckluftspülung niedergebracht. Diese Angaben wurden mit dem Fertigstellungsbericht der Bohrfirma W. vom 20. März 2008 dahingehend berichtigt, dass die Bohrung EWS 1 bis 14,00 m, die EWS 2 bis 36,00 m, die EWS 3a bis 38,00 m, die EWS 3b, 4, 5 bis 74,00 m und die EWS 6 und 7 bis 76,00 m u. GOK mit einem Außendurchmesser Ø 161 mm und einem Innendurchmesser Ø 135 mm verrohrt worden seien (Tab. 6.3). Die Verrohrungstiefen sollten vermutlich dazu dienen, dem in den Bohrungen EWS 1 und EWS 2 beobachteten Nachfall zu begegnen.

Die Bohrung EWS 3a musste bei einer Tiefe von 38 m u. GOK wegen eines abgebrochenen Flügels eines Exzentermeißels eingestellt werden. Sie wurde mit einer Zement – Bentonit – Mischung verpresst (gemäß Fertigstellungsbericht Bohrfirma W. vom 20. März 2008).

Wie oben aufgeführt, stellten die Bohrfirma W. bzw. die Stadt Staufen dem RPF/LGRB die Bohrproben der EWS 1 (zunächst nur als EWS bezeichnet, nach der angetroffenen Schichtenfolge handelt es sich vermutlich um die EWS 1), der EWS 2 und der EWS 3 zur Verfügung. Die Bohrproben wurden am 27. September 2007 vom RPF/LGRB bei der Stadt Staufen abgeholt. Die Proben zu den Bohrungen EWS 4 bis EWS 7 waren nicht auffindbar.

Wie dem Bohr- und Ausbau-Profil der Bohrfirma W. zu entnehmen ist, ist die Bohrung EWS 2 105 m tief (Fertigstellungsbericht Erdwärmesonden, Bohrfirma W. vom 03. Dezember 2007). Tatsächlich wurden dem RPF/LGRB jedoch Spülproben zu

EWS 2 bis in 140 m Tiefe zur Verfügung gestellt. Nach dem über die Anwaltskanzlei am 08. April 2008 erhaltenen Fertigstellungsbericht der Bohrfirma W. vom 20. März 2008 wurde die EWS 2 140 m tief gebohrt. Da das Bohrloch jedoch von 105 m u. GOK bis 140 m u. GOK zusammengefallen war, wurde die Erdwärmesonde nur bis 105 m u. GOK eingebaut und das Bohrloch anschließend verfüllt (Fertigstellungsbericht vom 20. März 2008).

Nach dem Fertigstellungsbericht der Bohrfirma W. vom 20. März 2008 wurde in der Bohrung der EWS 1 bei 32 m u. GOK artesisch gespanntes, in der Bohrung der EWS 2 "kurzfristig artesisch gespanntes" Grundwasser angetroffen. In den übrigen EWS-Bohrungen wurde das Grundwasser bei 32 m u. GOK angetroffen, war aber offensichtlich nicht artesisch, da dies im Fertigstellungsbericht vom 20. März 2008 nicht vermerkt wurde. Nach der ersten Version des Fertigstellungsberichts vom 03. Dezember 2007 wurde in allen EWS-Bohrungen artesisch gespanntes Grundwasser angetroffen.

Weitere Angaben aus den Fertigstellungsberichten der Bohrfirma W. sind auszugsweise in der Tab. 6.2 zusammengestellt.

Tab. 6.1: Koordinaten, Ansatzhöhen und Archivnummern des RPF/LGRB der Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 7 (Datum der Einmessung: 23. September 2009).

Bezeichnung	**RPF/LGRB-Nr.**	**Rechtswert**	**Hochwert**	**Geländeoberkanten [m NN]**
Erdwärmesondenbohrung EWS 1	8112/216	[redacted]	[redacted]	286,69
Erdwärmesondenbohrung EWS 2	8112/217	[redacted]	[redacted]	286,17
Erdwärmesondenbohrung EWS 3	8112/218	[redacted]	[redacted]	286,15
Erdwärmesondenbohrung EWS 4	8112/219	[redacted]	[redacted]	285,99
Erdwärmesondenbohrung EWS 5	8112/220	[redacted]	[redacted]	285,79
Erdwärmesondenbohrung EWS 6	8112/221	[redacted]	[redacted]	285,94
Erdwärmesondenbohrung EWS 7	8112/222	[redacted]	[redacted]	286,07

Tab. 6.2: Fertigstellungsberichte zu den EWS 1 (S1) bis EWS 7 (S7) (auszugsweise Angaben).

	Fertigstellungsbericht Erdwärmesonden, Bohrfirma W. vom 03.12.2007	**Fertigstellungsbericht Erdwärmesonden, Bohrfirma W. vom 20.03.2008**
Bohrzeit	03.09.2007 - 21.09.2007	03.09.2007 - 20.09.2007
Bohrbericht	Liegt dem RPF/LGRB nicht vor	Liegt vor
Lageplan	Bohrung S1 bis S7	Bohrung S1, S2, S3a und S3b, S4 bis S7, Bezeichnung der Bohrungen unterscheidet sich vom Fertigstellungsbericht 03.12.2007
Angaben zur Bohrung EWS 1	Endtiefe 135 m, Ausbautiefe 135 m	Endtiefe 140 m, Ausbautiefe 135 m
	Bohrzeit 03./04.09.2007	Bohrzeit 03./04.09.2007
	Verrohrung Ø Außen 161 mm, Innen 135 mm, Tiefe 14 m	Verrohrung Ø Außen 161 mm, Innen 135 mm, Tiefe 14 m
	Wasser erstmals angetroffen bei 32,00 m, Wassereintritt bei 32 m, artesisch ca. 10 l/min, Kopfdruck 0,1 bar	Wasser erstmals angetroffen bei 32,00 m, Wassereintritt bei 32 m, artesisch ca. 10 l/min, Kopfdruck 0,1 bar
	Schichtenverzeichnis: Grundwasser artesisch, bei 32,00 m, naß	Grundwasserspiegel 32,00 m (artesisch / 10 l/min / 0,1 bar Kopfdruck), naß
Angaben zur Bohrung EWS 2	Endtiefe 105,00 m, Ausbautiefe 105,00 m	Endtiefe 140,00 m, Ausbautiefe 105,00 m
	Bohrzeit 03. bis 21.09.2007	Bohrzeit 04./05./06.09.2007
	Verrohrung Ø Außen 161 mm, Innen 135 mm, Tiefe 14,00 m	Verrohrung Ø Außen 161 mm, Innen 135 mm, Tiefe 36,00 m
	Wasser erstmals angetroffen bei 32,00 m, Wassereintritt bei 32 m, artesisch ca. 10 l/min, Kopfdruck 0,1 bar	Wasser erstmals angetroffen bei 32,00 m, Wassereintritt bei 32 m, kurzfristig artesisch (ca. 10 l/min, Kopfdruck 0,1 bar) bei Gestängeausbau jedoch kein Wasseraustritt aus Bohrloch
Angaben zur Bohrung EWS 3 a	Keine Angaben	Endtiefe 38 m, verfüllt mit Bentonit-Zement Suspension
		Bohrzeit 06./07.09.2007
		Verrohrung Ø Außen 161 mm, Innen 135 mm, Tiefe 38,00 m
		Wasser erstmals angetroffen bei 32,00 m
		Grundwasserspiegel 32,00 m, naß
		nachdem Flügel bei Exzentermeißel abgebrochen ist, wurde die Bohrung verpresst (ohne Sondeneinbau)
Angaben zu den Bohrungen EWS 3 bis 7 (03.12.2007) bzw. 3 b bis 7 (20.03.2008)	Endtiefe 140,00 m	
	Bohrzeit 03. bis 21.09.2007	Bohrzeit S3b: 07./11.09.2007, S4: 11./12.09.2007, S5: 13./14.09.2007, S6: 17./18.09.2007, S7: 18./19./20.09.2007

	Fertigstellungsbericht Erdwärmesonden, Bohrfirma W. vom 03.12.2007	**Fertigstellungsbericht Erdwärmesonden, Bohrfirma W. vom 20.03.2008**
	Verrohrung Ø Außen 161 mm, Innen 135 mm, Tiefe 14,00 m	S3b, 4, 5: Verrohrung Ø Außen 161 mm, Innen 135 mm, Tiefe 74,00 m S6, 7: Verrohrung Ø Außen 161 mm, Innen 135 mm, Tiefe 76,00 m
	Wasser erstmals angetroffen bei 32,00 m, Wassereintritt bei 32 m, artesisch ca. 10 l/min, Kopfdruck 0,1 bar	
	Grundwasserspiegel artesisch 32,00 m, naß	Grundwasserspiegel 32,00 m, naß
	Bohrproben: Plastiktüten (alle 2 m) (Anm.: an der Bohrstelle am 24.09.2007 von RPF/LGRB und Stadt Staufen nicht auffindbar)	Bohrproben: Plastiktüten (alle 2 m) (Anm.: an der Bohrstelle am 24.09.2007 von RPF/LGRB und Stadt Staufen nicht auffindbar)
Abdichtungsprotokoll S1	Datum: 20.09.2007	Datum: 04.09.2007
	Theoretische Menge: 2000 Liter, tatsächliche Menge 2300 Liter	Theoretische Menge: 1650 Liter
Abdichtungsprotokoll S2	Datum: 20.09.2007	Datum: 06.09.2007
	Bohrteufe 105,0	Bohrteufe 140,0
	Theoretische Menge: 2000 Liter, tatsächliche Menge: 2000 Liter	Theoretische Menge: 1780 Liter, tatsächliche Menge: 2000 Liter
Abdichtungsprotokoll S3a	Keine Angaben	Datum: 07.09.2007
		Bohrteufe 38,0
		Theoretische Menge: 780 Liter, tatsächliche Menge: 800 Liter
Abdichtungsprotokoll S3-7 (03.12.2007) bzw. S3b-7 (20.03.2008)	Datum: 21.09.2007 Theoretische Menge: 2000 Liter, tatsächliche Menge: 2000 Liter	Datum: 11.09.2007 – 20.09.2007
		Theoretische Menge: 2000 Liter, tatsächliche Menge: 2000 Liter
Tagesberichte 03.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 04.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 05.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
		Bohrloch (Anm.: S2) artesisch mit 10 l/min
Tagesberichte 06.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
		Sonde (Anm.: S2) nach Absprache bei 105 m stehengelassen
Tagesberichte 07.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
		Kein artesisch gespanntes Wasser zu beobachten
		Verrohrt DN 161 mit Exzenter bis 38,0 m (Anm.: S3a), Exzenter defekt,

	Fertigstellungsbericht Erdwärmesonden, Bohrfirma W. vom 03.12.2007	**Fertigstellungsbericht Erdwärmesonden, Bohrfirma W. vom 20.03.2008**
		Gestängeausbau, 1 Flügel vom Exzenter abgebrochen und im BL verblieben, Bohrung injiziert 800 l mit sulfatbeständigem Zement ohne Sondeneinbau, Ausbau Rohre DN 161, Bohrgerät um 1 m versetzt (Anm. S3 bzw. S3b)
Tagesberichte 10.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 11.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 12.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 13.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 14.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 17.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 18.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 19.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	
Tagesberichte 20.09.2007	Liegen dem RPF/LGRB nicht vor	

Tab. 6.3: Verrohrungslängen der EWS-Bohrungen.

Erdwärmesonden-Bohrung	**Verrohrungstiefe [m]**
EWS 1	0 - 14 m
EWS 2	0 - 14 m , 14 - 36 m
EWS 3b*	0 - 28 m, 28 - 74 m
EWS 4	0 - 26 m, 26 - 74 m
EWS 5	0 - 74 m
EWS 6	0 - 76 m
EWS 7	0 - 40, 40 - 76 m

*) EWS 3a wurde bis 38 m gebohrt, dann brach der Exzentermeissel ab. Die Bohrung wurde abgebrochen und nach Angabe der Bohrfirma W. verpresst. Anschließend wurde die EWS 3b 1 m neben der EWS 3a angesetzt.

Im Abdichtungsprotokoll vom 20. März 2008 der Bohrfirma W. wird keine Produktbezeichnung des für die Ringraumhinterfüllung aller Erdwärmesonden und für die Verpressung der nicht ausgebauten Bohrung EWS 3 a verwendeten Materials angegeben. Stattdessen wird eine Mischung von "Wasser, Tonmehl und Zement" mit hohen Wasser-/Feststoff-Verhältnissen genannt. Dies legt die Vermutung nahe, dass das Verpressmaterial vor Ort an der Baustelle angemischt wurde.

6.2 Geologische Schichtenabfolge der Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 3

Die von der Stadt Staufen überlassenen Bohrproben der Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 3 erlauben - unter Berücksichtigung von auf Grund des Bohrverfahrens und der Probennahme zwangsläufig bedingten Ungenauigkeiten der absoluten Bohrtiefen - die folgende stratigraphische Gliederung der geologischen Schichtenfolge:

- anthropogene Aufschüttung und quartäre Schotter (yA und q),
- Schilfsandstein-Formation (km2),
- Gipskeuper-Formation (km1),
- Unterkeuper (ku)

Die mikroskopische und teils mineralogische Analyse der Bohrproben (Cuttings) erbrachte folgende Ergebnisse:

In den EWS-Bohrungen EWS 1 bis EWS 3 (Anl. 6.1 - 6.3) folgen unter 2 m mächtiger **anthropogener Aufschüttung** bis in 6 m Tiefe **quartäre Schotter** der **Neuenburg-Formation**. In den Bohrungen EWS 2 und EWS 3 folgen darunter stärker zersetzte und dicht gelagerte Kiese der **Breisgau-Formation**.

In der EWS 1 schließen bis 8 m u. GOK Schlufftonsteine des **Hauptsteinmergels (km3)** an. Die darunter bis 21 m u. GOK folgende **Schilfsandstein-Formation (km2)** besteht aus geschichtetem, im oberen Abschnitt glimmerführendem Feinsandstein mit kohligen Pflanzenhäckseln.

Darunter folgt bis 131 m u. GOK die insgesamt 110 m mächtige **Gipskeuper-Formation (km1)**. Sie kann weiter in Formationsglieder bzw. Formationsunterglieder unterteilt werden.

In der EWS 1 und EWS 2 bestehen die bis 32 m u. GOK reichenden Grauen Estherienschichten (GES) aus dolomitischen Schlufftonsteinen mit Auslaugungscalzit. Sie sind gipsfrei bzw. in der EWS 1 ab 30 m schwach gipsführend. In der EWS 3 tritt in den bis 34 m u. GOK reichenden GES erstmals in 28 m u. GOK Gips auf.

Darunter folgen die Unteren Bunten Estherienschichten (UBS). Sie bestehen aus wechselnd feinsandigen, schwach dolomitischen Schlufftonsteinen mit Gips (EWS 2: bis 47 m u. GOK, EWS 1 und EWS 3: bis 52 m u. GOK).

Der Mittlere Gipshorizont (MGH) und der Weinsberg-Horizont (WEH) reichen in der EWS 1 bis 98 m u. GOK, in der EWS 2 bis 94 m u. GOK und in der EWS 3 bis 96 m u. GOK. Sie bestehen aus einer Wechselfolge von glimmerführenden dolomitischen Schlufftonsteinen und Gips bzw. im unteren Teil aus Anhydrit und Gips (Abb. 6.1).

Die dunkelroten Mergel (DRM in EWS 1: bis 116 m u. GOK, in EWS 2: bis 111 m u. GOK, in EWS 3: bis 112 m u. GOK) bestehen im oberen Teil aus schwach gips- und anhydritführenden, schwach dolomitischen, glimmerführenden Schlufftonsteinen. An der Basis liegt eine 3 m bis 4 m mächtige Schicht mit überwiegend Gips und Anhydrit.

Unter dem Gips und Anhydrit führenden Bochingen-Horizont (BH, EWS 1 bis 119 m u. GOK, EWS 2 und EWS 3 bis 117 m u. GOK) folgen bis 130 m u. GOK (EWS 1) bzw. 131 m u. GOK (EWS 2 und EWS 3) die überwiegend aus Anhydrit und Gips bestehenden Grundgipsschichten (GI) mit glimmerführenden Schlufftonsteinen.

Den Abschluss der Schichtenfolge bilden die Dolomite, Tonmergelsteine und Schlufftonsteine des Unterkeupers (ku). Ihre Basis wurde bei der Endteufe von 140 m nicht erreicht.

Auffällig ist das gehäufte Auftreten von stark verwittertem Grundgebirge und Schilfsandstein im Bohrgut der Bohrung EWS 2 in der Tiefe zwischen 63 m u. GOK und 72 m u. GOK sowie in der EWS 3 zwischen 33 m u. GOK und 70 m u. GOK, wobei der Kristallinanteil in der EWS 3 in einigen Proben bei 50 % und darüber liegt (z. B. bei 44 m, 52 m, 62 m bis 68 m). Hierbei handelt es sich entweder um bohrtechnisch bedingten Nachfall (allerdings bindet die Verrohrung 8 m bis 10 m in den Schilfsandstein ein) oder um die Füllung von Lösungshohlräumen im Sulfatgestein. Allerdings wurden derartige Hohlraumfüllungen in der Erkundungsbohrung EKB 2 nicht beobachtet.

Bei der Aufnahme des Bohrkleins wurden Gips- und Anhydritanteile in den einzelnen Schichten der EWS 3 nach Augenschein abgeschätzt. Daneben wurden die Anteile an Gips, Bassanit (Halbhydrat, entsteht erfahrungsgemäß immer durch Trocknung

von Gips und nicht durch Hydratation von Anhydrit) und Anhydrit im Sulfatgestein in ausgewählten Proben des Bohrgutes durch Röntgenuntersuchungen bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Abb. 6.1 dargestellt.

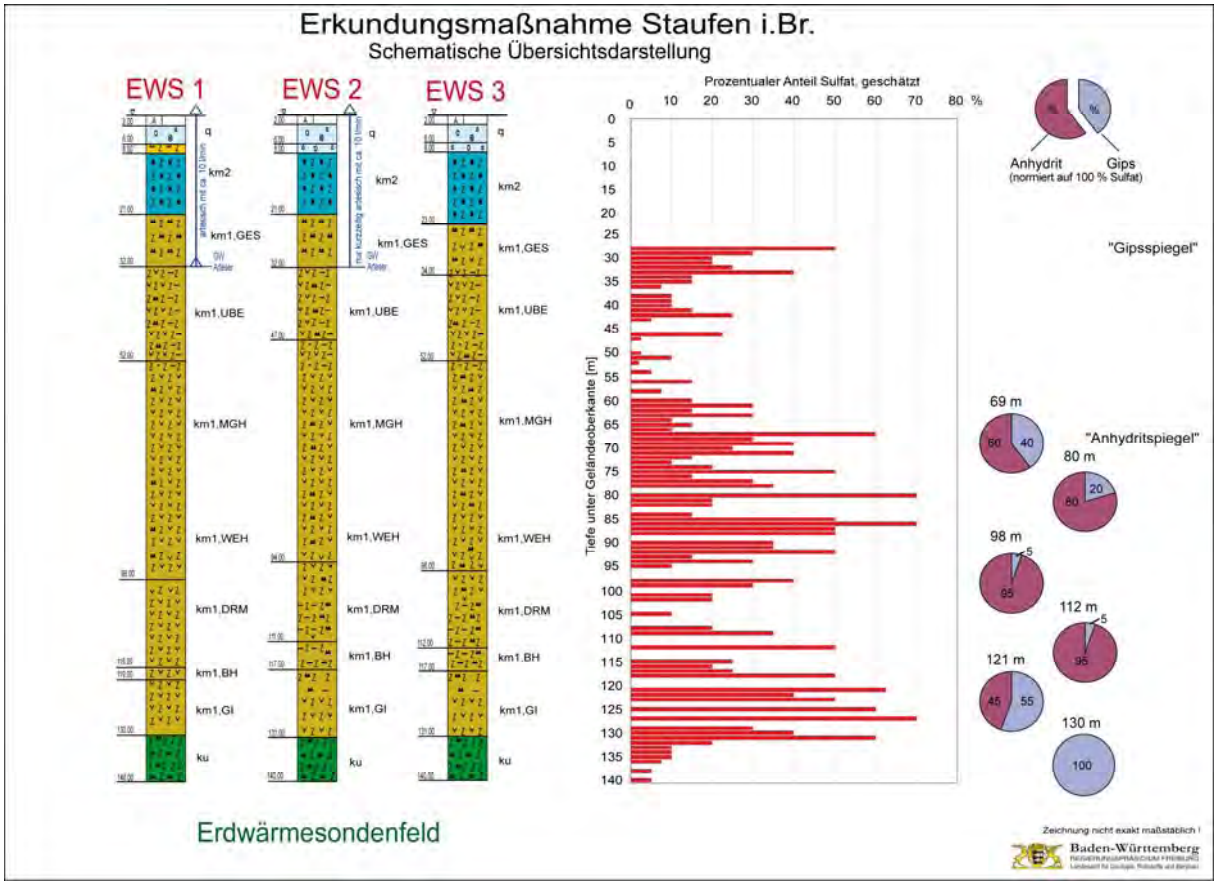


Abb. 6.1: Graphische Darstellung der Schichtabfolge der EWS 1 bis EWS 3; Gips- und Anhydrit-Anteile (halbquantitativ) in der Erdwärmesondenbohrung EWS 3 röntgenographisch bestimmt. Prozentualer Anteil an Sulfat nach Augenschein abgeschätzt.

6.3 Bohrlochgeophysikalische Messungen in den Erdwärmesonden

Die Messung von gesteinsphysikalischen Parametern bzw. Untergrundeigenschaften mit herkömmlichen Sonden, wie sie üblicherweise für bohrlochgeophysikalische Messungen z. B. in der Erdölgeologie oder bei der Grundwassererschließung in Brunnen und Grundwassermessstellen eingesetzt werden, ist in Erdwärmesondenschläuchen nur eingeschränkt möglich. Gründe hierfür sind die geringen Querschnitte der Erdwärmesondenschläuche (im vorliegenden Fall Innendurchmesser Ø 26,2 mm), baubedingte Bohrlochabweichungen, spiralförmig verdreht in die Bohrungen eingebaute Erdwärmesondenschläuche sowie durch die Quellungsverformungen deformierte Schlauchquerschnitte.

Der Miniaturisierung der Sonden sind technische Grenzen gesetzt. Nach Kenntnisstand des RPF/LGRB stehen derzeit kleinkalibrige Sonden lediglich für die Messungen der natürlichen Gammastrahlung (Sondendurchmesser 18 mm), des spezifischen elektrischen Widerstandes (BAUMANN et al. 2008), der Temperatur sowie von Neigung und Azimut der Sondenschläuche (als Prototyp) zur Verfügung.

In Staufen wurden in den Erdwärmesonden mit miniaturisierten Sonden Messungen der natürlichen Gammastrahlung, der Raumlage der Schläuche (Inklination und Azimut) sowie der Temperatur durchgeführt.

6.3.1 Messungen der natürlichen Gammastrahlung (Gamma-Log)

Von den Erdwärmesondenbohrungen EWS 4 bis EWS 7 liegen keine Bohrproben (Cuttings) zur Beschreibung der erbohrten lithologischen Abfolge vor. Deshalb wurde versucht, ausgehend von der EWS 3 über die Messung der natürlichen Gammastrahlung Informationen über die erbohrte Gesteinsabfolge für die EWS 7 zu gewinnen. Hierzu wurde eine von der Fa. terratec, Heitersheim, entwickelte Miniatur-Gamma-Temperatur Sonde eingesetzt, die es erstmals erlaubt, auch bei einem Messsondendurchmesser von 18 mm Gammamessungen in Erdwärmesondenschläuchen durchzuführen (terratec 2009 b). Zur Erhöhung der Flexibilität wurde die insgesamt 1,3 m lange Sonde durch zwei bewegliche Zwischenstücke in drei Abschnitte sektioniert.

Gamma- und Temperatur-Messungen wurden in der EWS 7 und zu Vergleichszwecken in der benachbarten EWS 3 durchgeführt. Sie erfolgten am 29. Oktober 2009 und reichten in der EWS 3 bis in eine Tiefe von 75 m und in der EWS 7 bis in eine Tiefe von 61 m. Darunter waren die Sondenschläuche wegen Querschnittsverengungen nicht mehr befahrbar.

Die Messergebnisse der natürlichen Gammastrahlung in EWS 3 und EWS 7 wurden mit denen in der Erkundungsbohrung EKB 2 parallelisiert (Abb. 6.2). Aufgrund unterschiedlicher Messsonden und unterschiedlicher Bohrlochgeometrien weichen die Zählraten in den Erdwärmesonden deutlich von denen der Erkundungsbohrung EBK 2 ab.

Die parallelisierbaren Messwertspitzen bzw. charakteristischen Kurvenabschnitte liegen in der EWS 7 jeweils in geringerer Tiefe als in der EWS 3.

Dies belegt, dass die Schichten der tektonischen Scholle, auf der die beiden EWS-Bohrungen liegen, in nordwestliche Richtung einfallen. Im oberen Kurvenabschnitt (bis ca. 30 m in der EWS 3 bzw. 25,5 m in der EWS 7) beträgt die vertikale Differenz

ca. 4,5 bis 5 m. Ab ca. 44,4 m u. GOK (EWS 3) bzw. 38,3 m u. GOK (EWS 7) liegt die Differenz bei ca. 6 m.

6.3.2 Messungen von Inklination und Azimut der EWS 1 bis EWS 7

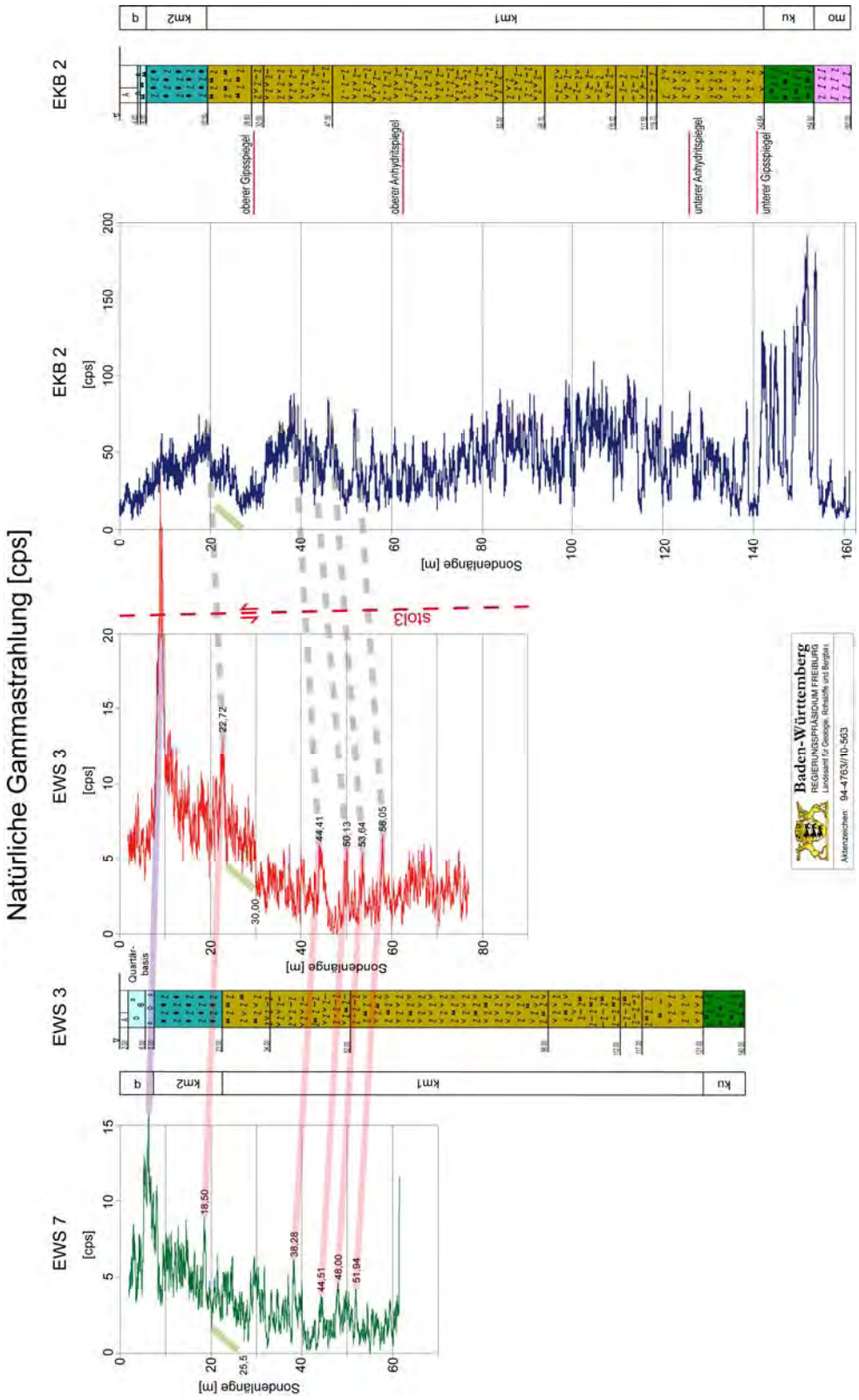
Für die Planung einer nachträglichen technischen Abdichtung der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7, wie z.B. Vertikalüberbohrung mit großem Bohrkaliber, Beräumung des Sondenausbaus und anschließender Bohrlochzementation, ist die Kenntnis der Raumlage ihrer Bohrspuren unabdingbare Voraussetzung. Bei größeren Bohrlochabweichungen aus der Vertikalen besteht die Gefahr, beim Überbohren das vorhandene Bohrloch der Erdwärmesonden zu verlieren.

Aus den nachträglich am 18. März 2008 von der Bohrfirma erhaltenen Unterlagen geht hervor, dass die Bohrungen EWS 1 bis EWS 7 als Meißelbohrungen abgeteuft wurden. Inwieweit bei dem gewählten Bohrverfahren die Vertikalität der Erdwärmesondenbohrungen als gewährleistet gelten durfte, war zunächst unbekannt und erforderte daher eine entsprechende messtechnische Überprüfung.

Zur Ermittlung der Raumlage der Erdwärmesonden konnten bei einem Innendurchmesser der Sondenschläuche von 26,2 mm herkömmliche, auf dem Markt verfügbare Inklinations- und Azimutmesssonden nicht eingesetzt werden.

Die vom Büro VOUTTA zusammen mit Temperatur-Profilmessungen durchgeführten ersten Inklinationsmessungen (einachsige Inklinationssonde ohne Azimutmessmöglichkeit) zeigten, dass die bereits verengten Erdwärmesondenschläuche der EWS 1 bis EWS 7 nur mit einem Messsondendurchmesser von 15 mm und mit geringer Messsondenlänge durchgängig befahrbar waren.

Abb. 6.2: Korrelation der Bohrprofile und der Ergebnisse der natürlichen Gammastrahlung in den EWS 3 und EWS 7 sowie in der EKB 2.



Daher entschloss sich das RPF/LGRB die Entwicklung einer kombinierten zweiachsigen Inklinations-/ Azimut-Messsonde in Auftrag zu geben (Abb. 6.3). Die wesentlichen Vorgaben zur Entwicklung dieser Messsonde waren:

- Messsonde: Außendurchmesser 15 mm, Länge < 100 mm
- Aufsteckbare Erweiterungshülsen mit Außendurchmesser: 18, 20 und 24 mm
- Messmöglichkeiten bis 200 m bei entsprechender Druckdichtigkeit
- Messgenauigkeit der Inklination +/- 1°
- Messgenauigkeit Azimut ohne Neigungskompensation +/-4°

Die von der Fa. Ebersbach Engineering, Gundelfingen, entwickelte Messsonde (Aluminium-Messdose) besteht aus einem zweiachsigen Beschleunigungssensor (verwendet zur Neigungsmessung in orthogonaler Messanordnung) und einem Mehrachsenmagnetfeldsensor. Die Sonde ist darüber hinaus mit einem Temperatursensor ausgestattet. Als Kabel dient ein kevlarverstärktes, 7 mm starkes hochflexibles Messkabel. Die generierten Messwerte werden über ein Multiplexersystem analog über die Kabeltrommel zur Auswerteeinheit übertragen. Dort erfolgt einerseits die digitale Ausgabe der Messwerte (Inklination, Azimut, Tiefe sowie Temperatur) als auch eine "bluetooth"-Übertragung zu einem Notebook mit entsprechender Spezialsoftware. Die Messwertdarstellung erfolgt durch ein vom RPF/LGRB entwickeltes Programm unter AutoCAD.

Abb. 6.3: Messsonde des RPF/LGRB für die Raumlagemessungen in den EWS-Schläuchen.

Das Messgerät stand dem RPF/LGRB ab dem 21. Juli 2009 einsatzbereit zur Verfügung. Nach zahlreichen Kalibrierungen an in ihrer Raumlage definiert orientierten PVC-Rohren und der Aufstellung eines geeigneten Auswertealgorithmus erfolgten Anfang August die Raumlagemessungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 in Staufen (siehe Befahrungs-Protokoll, Tab. 6.4).

Tab. 6.4: Befahrbarkeit der EWS am 3./4. August 2009 mit der Messsonde zur Bestimmung der Raumlage.

Befahrbarkeit der EWS in Staufen am 03./04. Aug. 2009			
EWS-Bohrung	Messsonden-durchmesser	Anzahl der zugänglichen Schläuche (1)	messbare Teufe (Messkabellänge)
EWS 1	20 mm	min. ein Schlauch	48-50 m GOK
	15 mm	vier Schläuche	48-50 m GOK
EWS 2	20 mm	ein Schlauch	44 m GOK
	18 mm	gleicher Schlauch	44 m GOK
	15 mm	gleicher Schlauch	96,5 m GOK
EWS 3	20 mm	ein Schlauch	≥ 124,5 m GOK (2)
EWS 4	20 mm	zwei Schläuche	68,5 m GOK
	15 mm	ein Schlauch	137 m GOK
EWS 5	20 mm	ein Schlauch	49 m GOK
	15 mm	gleicher Schlauch	≥ 134 m GOK (2)
EWS 6	20 mm	ein Schlauch	78,5 m GOK
	15 mm	gleicher Schlauch	135 m GOK
EWS 7	20 mm	ein Schlauch	74,5 m GOK
	15 mm	gleicher Schlauch	≥ 133 m GOK (2) (3)
Anmerkungen:			
(1) Die anderen Schläuche waren durch Temperaturmessungen besetzt bzw. auf Grund der Schachtgeometrie/Baustelleneinrichtung mit dem verwendetem Messgerät nicht zugänglich.			
(2) Befahrung wurde aus Sicherheitsgründen (fragliche Wiederziehbarkeit der Messsonde) abgebrochen.			
(3) Wiederholungsmessung am 07. Aug. 2009			

Die Schläuche der Erdwärmesonde EWS 1 waren mit der Messsonde nur bis 50 m messbar. Offenbar waren hier die Sondenschläuche durch den Quellungsvorgang des Gebirges bereits so stark deformiert, dass selbst bei der kleinen Messsondenabmessung keine weitere Passage zur Tiefe hin möglich war. Die Erdwärmesonde EWS 2 war bei einer von der Bohrfirma angegebenen Endteufe von 105 m nur bis 96,5 m befahrbar. Die Erdwärmesonde EWS 3 wurde aus Sicherheitsgründen nur bis 124,5 m Teufe gemessen, da auch bei 15 mm Messsondendurchmesser die Mantelreibungskräfte beim Ziehen der Sonde in größerer Tiefe stark zunahmen. Die übrigen Erdwärmesonden konnten jeweils bis annähernd in den Bereich ihrer Endteufen gemessen werden, wobei auch in diesen die Mantelreibungskräfte zwischen Sondenkabel und den Erdwärmesondenschläuchen in Folge der durchweg großen Abweichungen von der Vertikalen stark zunahmen.

In Abb. 6.4 sind die Ergebnisse der Raumlagemessungen in Projektion auf die Geländeoberfläche dargestellt. In dieser Abbildung wird veranschaulicht, dass die Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 7 in ihrer Raumlagenrichtung stark nach Südosten abweichen. Die EWS 1 weicht ab einer Sondenlänge von 20 m bis 30 m stark von der Vertikalen ab. Die EWS 2 weicht von Anbeginn, vor allem aber ab 20 m stark von der Vertikalen ab. Die übrigen Erdwärmesonden EWS 3 bis EWS 7 verlaufen in ihren ursprünglichen Verrohrungsstrecken (d. h. bis ca. 70 m - 80 m) noch weitgehend vertikal, um darunter sehr stark von der Vertikalen abzuweichen (im tiefsten Abschnitt bis 40° aus der Vertikalen). Diese Bohrabweichung erklärt sich daraus, dass sich das vergleichsweise flexible Bohrgestänge nach Verlassen der Verrohrung mit dem Bohrmeißel zunehmend senkrecht auf die Schichtflächen eingestellt hat.

Bei den Erdwärmesonden EWS 6 und EWS 7 beträgt der horizontale Abstand zwischen Bohransatzpunkt und Bohrendpunkt ca. 20 m, bei den übrigen Sonden wurden Abweichungen von Ansatz- und Endpunkt um 15 m gemessen. Die in der Rathausgasse angesetzte EWS 7 unterfährt das benachbarte Wohngebäude und endet unter der Kirchstraße. Auch weitere Erdwärmesonden verlassen die städtischen Grundstücksgrenzen und enden unter privaten Gebäuden.

In Abb. 6.5 ist der räumliche Verlauf der Erdwärmesondenbohrungen dreidimensional dargestellt. Wie die Auswertung ergab, beträgt der geringste Abstand einzelner Erdwärmesonden zueinander nur 2 m.

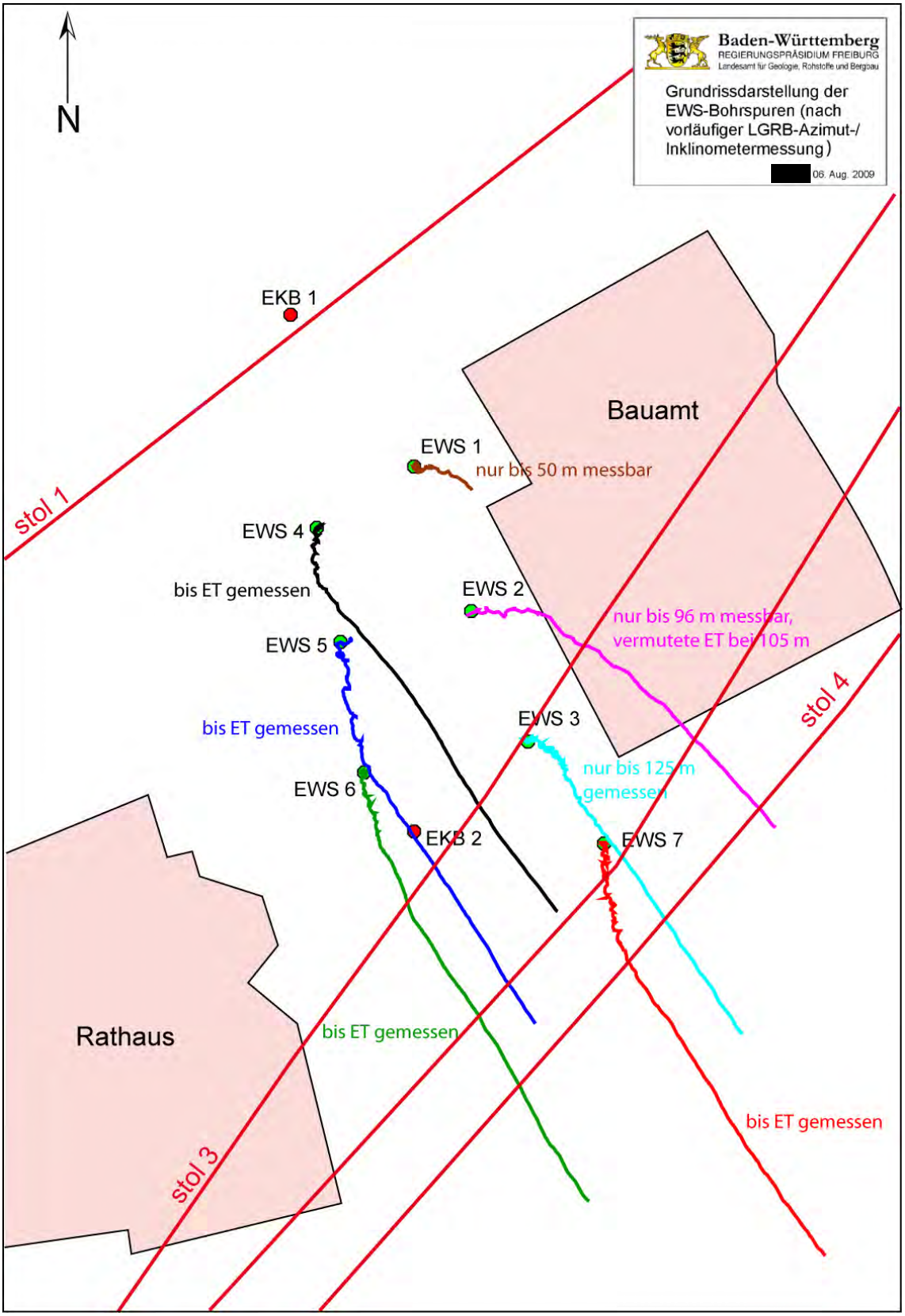


Abb. 6.4: Grundrissdarstellung der EWS-Bohrspuren durch das RPF/LGRB (Inklinometer-/ Azimutmessung).

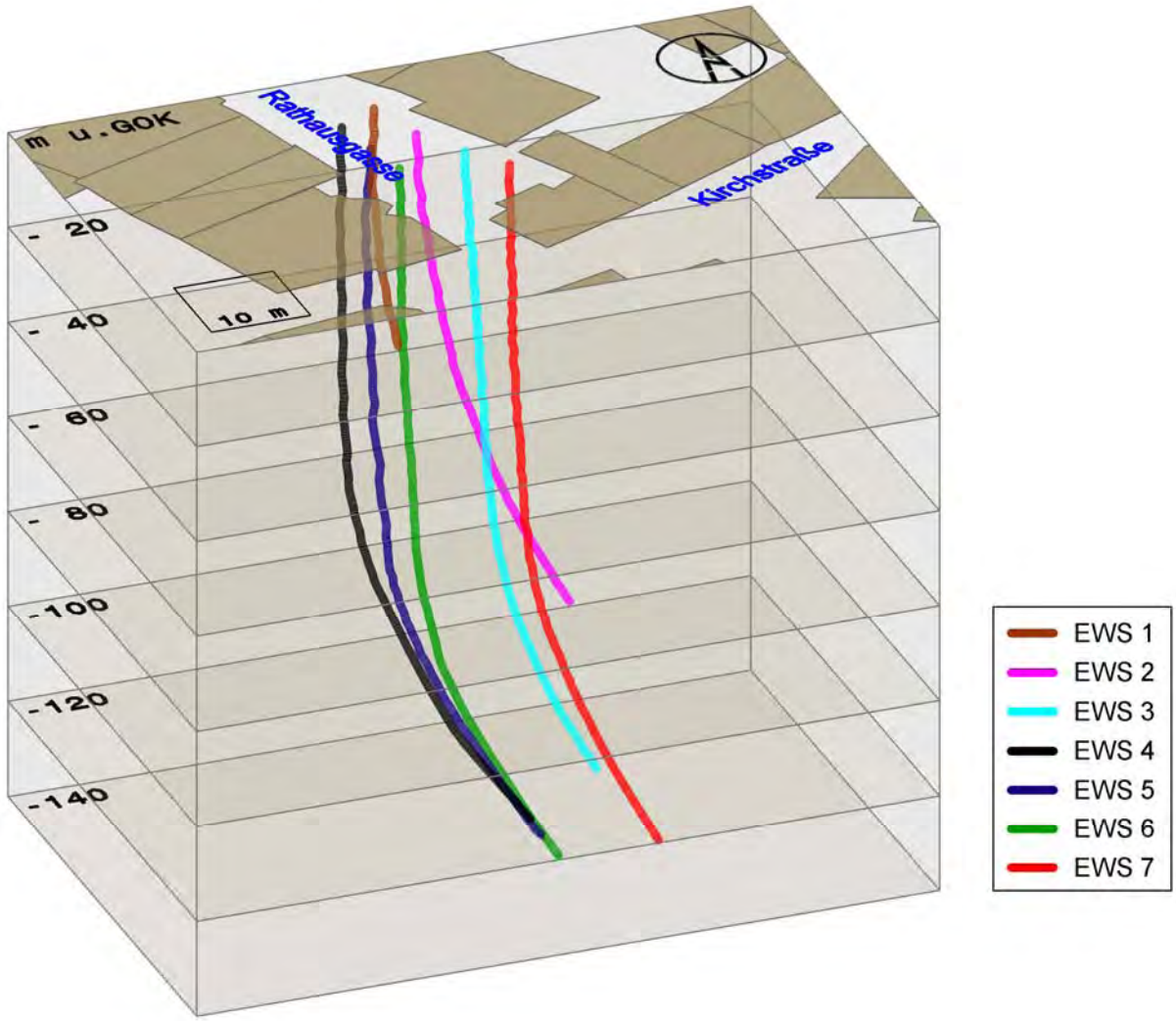


Abb. 6.5: Räumlicher Verlauf der Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 7.

Der Durchmesser der Messsonde von Ø 15 mm kann aufgrund der Verkippung des Messsensors in einem Erdwärmesondenschlauch mit einem Innendurchmesser von 26,2 mm die Genauigkeit der Messung beeinflussen. Geometrisch ist eine Verkippung um etwa 7° möglich. In der Praxis sind solche Verkippungen jedoch kaum vorstellbar, zumal der Messsensor auf Grund seines Eigengewichtes bei weitgehend vertikalen Erdwärmesondenschläuchen ebenfalls "nach unten" hängt. Bei größeren Abweichungen von der Vertikalen ist auf Grund des Eigengewichts von einem Aufliegen des Sensors an der unteren Seite des Erdwärmesondenschlauches auszugehen und erbringt daher Messergebnisse, die dem wahren Verlauf des Erdwärmesondenschlauches entsprechen.

Ähnlich verhält es sich bei einer denkbaren Azimutabweichung, wobei der Azimutfehler bei nahezu vertikalem Verlauf des Erdwärmesondenschlauchs erheblich werden kann. Dieser Fehler beeinflusst die Gesamtmessung der Bohrspur im vorliegenden Fall nicht wesentlich, da er nur bei geringer Bohrlochablenkung aus der Vertikalen auftritt.

Im Abschnitt oberhalb der Sondenschlauchverengungen wurde das 20 mm – Aufsatzrohr für die Messsonde verwendet. Damit wurde einem Messfehler - bedingt durch zu großes Spiel zwischen dem Erdwärmesondenschlauch und der Messsonde - vorgebeugt. Vergleichmessungen in diesen Abschnitten mit 15 mm bzw. 20 mm Messsondendurchmesser erbrachten im Übrigen keine wesentlichen Unterschiede in den Messergebnissen.

In fast allen Erdwärmesondenschläuchen wurden teilweise mehrere Wiederholungsmessungen ausgeführt. Die hierbei gemessenen Endpunkte differieren in ihrer Raumlage nur wenig vom ursprünglichen Messergebnis.

Ein Beleg für die Abweichungen der Sonden ergibt sich aus dem in Kap. 5.2.1 beschriebenen Ereignis, bei dem am 04. August 2009 in der Erkundungsbohrung EBK 2, die ihrerseits eine Bohrabweichung von durchschnittlich 3° aus der Vertikalen (Abweichung nach Südost) aufweist, bei einer Bohrteufe zwischen 117,5 m u. GOK und 118,1 m u. GOK die Erdwärmesonde EWS 5 zufällig angebohrt wurde. Wie Abb. 6.4 zu entnehmen ist, kreuzt die Bohrspur der Erdwärmesonde EWS 5 die der Erkundungsbohrung EKB 2.

6.3.3 Temperaturmessungen

Temperaturmessungen haben sich zur Bewertung von Qualität und thermischen Eigenschaften der Ringraumhinterfüllung, des Untergrundes und der Auslegung von Erdwärmesonden bewährt (ROHNER 2009, BAUMANN et al. 2008, SAUER und GRUNDMANN 2009, WALKER-HERTKORN et al. 2009). Sie werden daher häufig für die Qualitätsüberwachung von Erdwärmesonden eingesetzt.

6.3.3.1 Vorbemerkungen zu Temperaturmessungen in Erdwärmesonden

Der vertikale Temperaturverlauf in einer Erdwärmesonde wird am jeweiligen Standort u. a. durch natürliche Untergrundparameter bestimmt. Zu den natürlichen Einflüssen zählen die Oberflächentemperatur, die Wärmeleitfähigkeit der von der EWS-Bohrung durchteuften Gesteine, die Grundwasserführung sowie der geothermische Gradient.

Baubedingt können sich die Qualität der Ausführung der Ringraumverfüllung und ihre Wärmeleitfähigkeit sowie die Art der Einbringung der EWS-Schläuche auf die gemessenen Temperaturen bemerkbar machen. Zu den in der Literatur am häufigsten zitierten baubedingten Mängeln zählen undichte Ringraumverfüllungen (z. B. BERGER 2009) und bei Anwesenheit von Grundwasser damit verbundene Temperaturabweichungen (z. B. WALKER-HERTKORN et al. 2009, BAUMANN et al. 2008). Außerdem kann auch der nicht zentrierte bzw. spiralförmige Verlauf der Sondenschläuche in der Bohrung oder deren direkter Kontakt mit dem Gebirge einen Einfluss auf die gemessenen Temperaturprofile haben.

Beispiel eines ungestörten vertikalen Ruhetemperaturprofils in Erdwärmesonden

In Abb. 6.6 ist eine ungestörte Temperaturprofilmessung ohne signifikanten Grundwassereinfluss dargestellt (Ruhetemperaturmessung). Bis in 5 m Tiefe zeichnet sich der jahreszeitlich bedingte Temperaturgang deutlich ab, der durch die zur Zeit der Messung jeweils vorherrschende Lufttemperatur beeinflusst wird. Bis in etwa 15 m Tiefe reichen die klimatisch bedingten Temperatureinflüsse. Unterhalb von 15 m steigt die Temperatur entsprechend dem geothermischen Gradienten annähernd linear an.

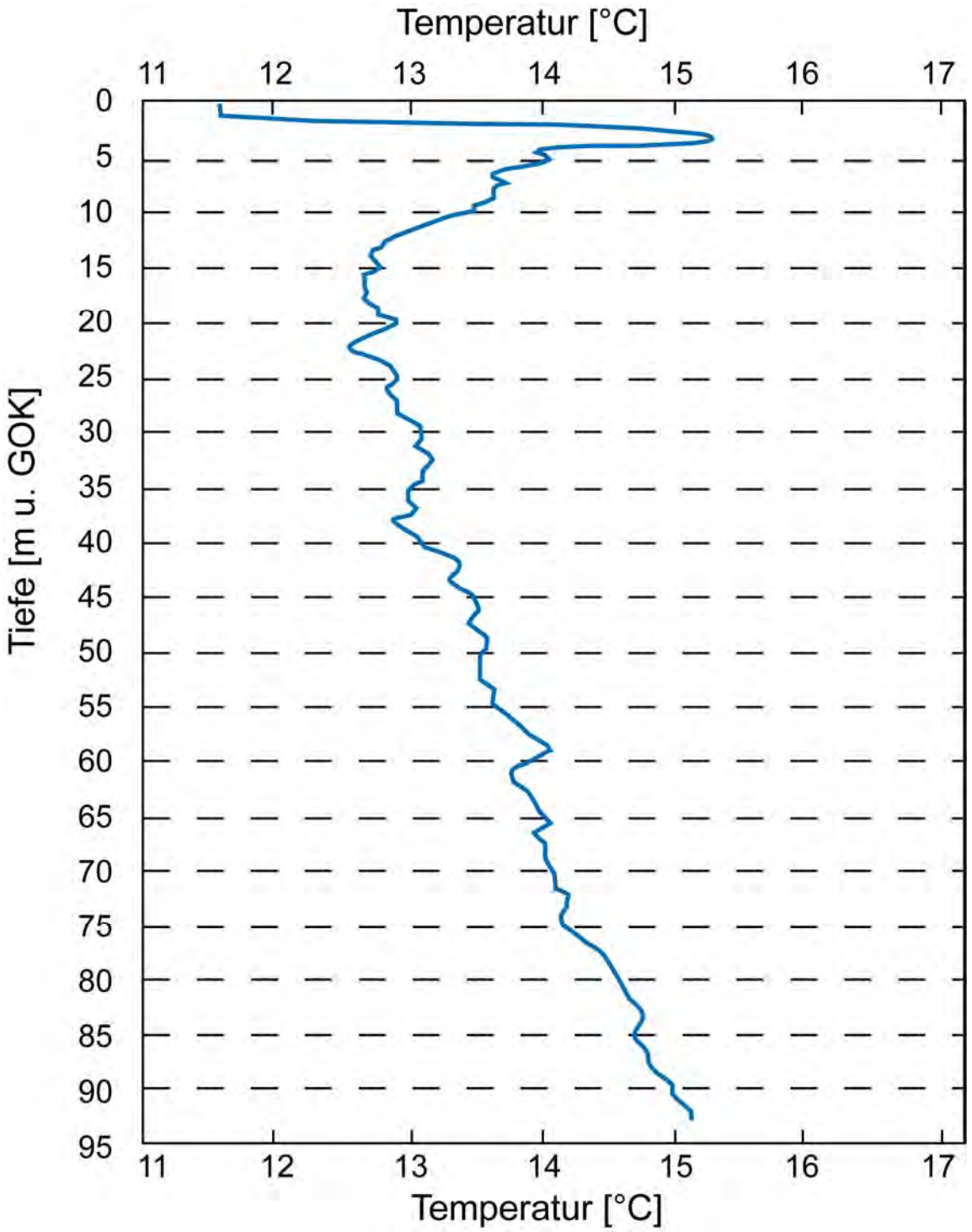


Abb. 6.6: Beispiel für ein weitgehend ungestörtes vertikales Ruhetemperaturprofil (Quelle: Fa. systherma).

Beispiel eines gestörten vertikalen Ruhetemperaturprofils in Erdwärmesonden

Abweichungen von dem oben dargestellten ungestörten Temperaturverlauf können z. B. durch Grundwassereinflüsse bedingt sein. Dabei kann es sich entweder um natürlich fließendes Grundwasser im Gebirge oder um Grundwasser in undichten Ringraumabschnitten handeln. Ein Beispiel für Grundwasserbewegungen in einem undichten Ringraum ist in der Abb. 6.7 (rote Messkurve) dargestellt. Das Temperaturprofil oberhalb von ca. 70 m weist keinen Gradienten auf und belegt damit aufsteigendes Grundwasser über einen undichten Ringraum.

Die in den drei weiteren Messprofilen deutlich erhöhten Temperaturen im oberflächennahen Bereich sind auf langjährige Wärmeeinträge durch städtische Einflüsse zurückzuführen (BANKS et al. 2009), die sich bis in eine Tiefe von ca. 55 m bemerkbar machen. Darunter folgt der Temperaturverlauf dem geothermischen Gradienten.

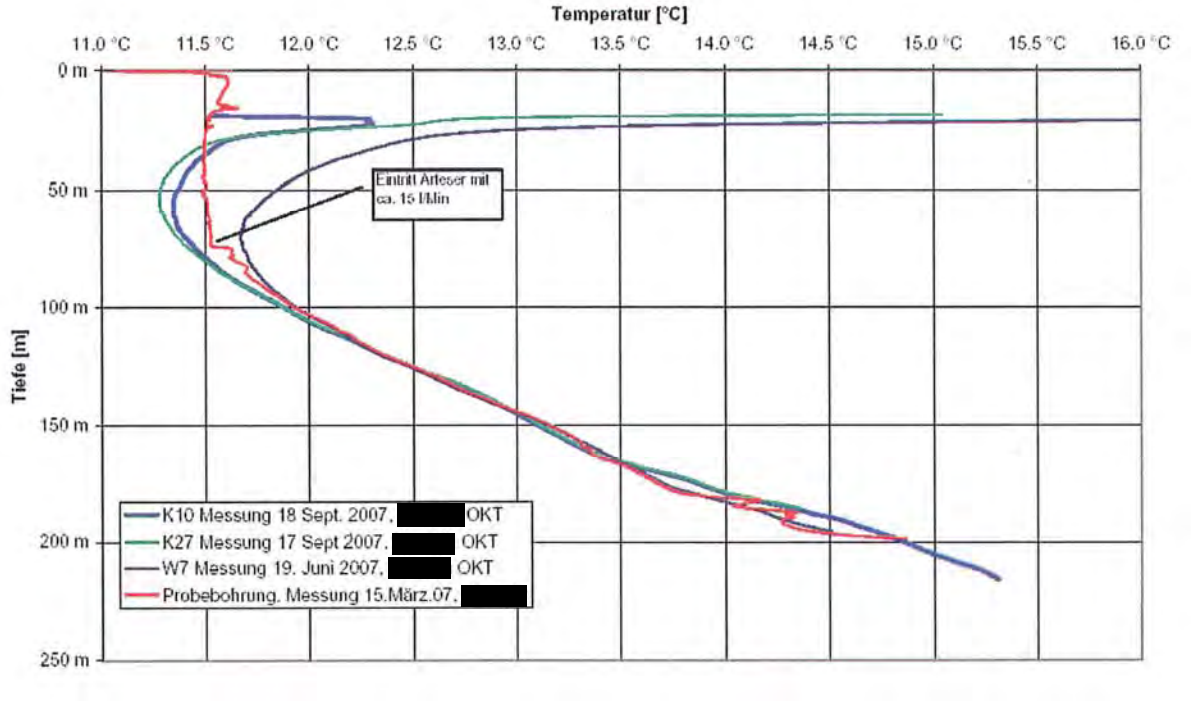


Abb. 6.7: Beispiele für Ruhetemperaturprofile, z. T. mit Grundwassereinfluss (GEOWATT 2008).

6.3.3.2 Temperaturprofilmessungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7

In den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 wurden zur Erkundung der Temperaturverteilung im Untergrund mehrere Verfahren eingesetzt.

6.3.3.2.1 Zielsetzungen der Temperaturmessungen, eingesetzte Verfahren

Die Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden in Staufen haben folgende Zielsetzungen:

- Messung der vertikalen Temperaturverteilung.
- Beobachtung der zeitlichen und räumlichen Temperaturentwicklung in den Erdwärmesonden.
- Nachweis von Temperaturanomalien, die auf mögliche Undichtigkeiten in Ringraumverfüllungen hinweisen.

Für die Temperaturmessungen wurden folgende Verfahren eingesetzt:

- Wiederholte Temperaturprofilmessungen als Ruhetemperaturprofile in allen EWS sowie im Rahmen der Kurzaufheizversuche in der EWS 3 und EWS 7.
- Thermal-Response-Test in der EWS 7.

Bei den Temperaturprofilmessungen kam zunächst der kabellose Datenlogger NIMO-T der Firma GEOWATT (FORRER et al. 2008), anschließend eine kabelgebundene Temperatursonde des Büros VOUTTA zum Einsatz. Mit der Sonde wurde in den EWS 1 bis EWS 7 in den mit Wasser gefüllten Erdwärmesondenschläuchen die Temperatur kontinuierlich mit einer vertikalen Auflösung von 1 cm gemessen. Der Messfühler hat eine Genauigkeit von 0,01 K.

6.3.3.2.2 Ergebnisse der Temperaturprofilmessungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7

Im Juni 2008 erfolgten erstmals in allen Erdwärmesonden Temperaturprofilmessungen, die eine Bestandsaufnahme der Temperaturverteilung im Untergrund ermöglichten (Abb. 6.8). Die Temperaturprofile im Sondenfeld lassen sich in vier charakteristische Abschnitte untergliedern:

- Oberer Abschnitt 0 - 14 m u. GOK mit jahreszeitlichem Schwankungsbereich,
- Oberer Abschnitt 14 - 50/60 m u. GOK mit langjährigen Temperatureinflüssen durch städtische Bebauung, und Grundwasserbewegung im Gipskarst
- Mittlerer Abschnitt zwischen 50/60 und ca. 90 m u. GOK mit charakteristischer Temperaturanomalie,
- Unterer, ab 90 m u. GOK durch geothermischen Gradienten und eine kleinere Temperaturanomalie bestimmter Abschnitt.

Oberer Abschnitt: Die Ruhe-Temperaturprofile in den EWS 1 und EWS 4, welche im oberen Abschnitt eine ungestörte vertikale Temperaturverteilung zeigen, lassen die kurzfristigen jahreszeitlichen Einflüsse bis etwa 15 m u. GOK erkennen. Darunter zeichnen sich im Temperaturprofil die langjährigen Temperatureinflüsse in Folge der städtischen Bebauung bis ca. 50 m u. GOK ab. Die steilen bis vertikalen Abschnitte in den Temperaturprofilen der übrigen Erdwärmesonden deuten auf unterschiedlich starke vertikale Grundwasserbewegungen in den Ringräumen der Sonden hin. Artesisch gespanntes Grundwasser wurde in der Erdwärmesondenbohrung EWS 1 und anfänglich in EWS 2 im Niveau des Gipskarstes bei 32 m u. GOK angetroffen (Tab. 6.2).

Mittlerer Abschnitt: In den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 6 ist zwischen etwa 50 m bis 60 m und etwa 95 m u. GOK eine markante positive, asymmetrische Temperaturanomalie ausgebildet. Die Anomalie liegt im Bereich des Mittleren Gipshorizonts (vgl. Abb. 6.8) und variiert in den Erdwärmesonden sowohl hinsichtlich ihrer Tiefenlage als auch ihrer Maximaltemperatur.

Unterer Abschnitt: In diesem Abschnitt bestimmt in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 6 der geothermische Tiefengradient den Verlauf der Temperaturprofile. Im Bereich der Dunkelroten Mergel ist das Temperaturprofil mehr oder weniger ausgeprägt von einer weiteren, kleineren Temperaturanomalie (DRM-Anomalie) überlagert.

Beachtenswert ist, dass das vertikale Temperaturprofil der Erdwärmesonde EWS 7 von denen der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 6 vollständig abweicht. Die geringen (zwischen 135 m und 70 m) bzw. weitgehend fehlenden Gradienten (zwischen 53 m und 33 m sowie 25 m und 5 m) belegen einen Grundwasserfluss in einem zumindest abschnittsweise undichten Ringraum.

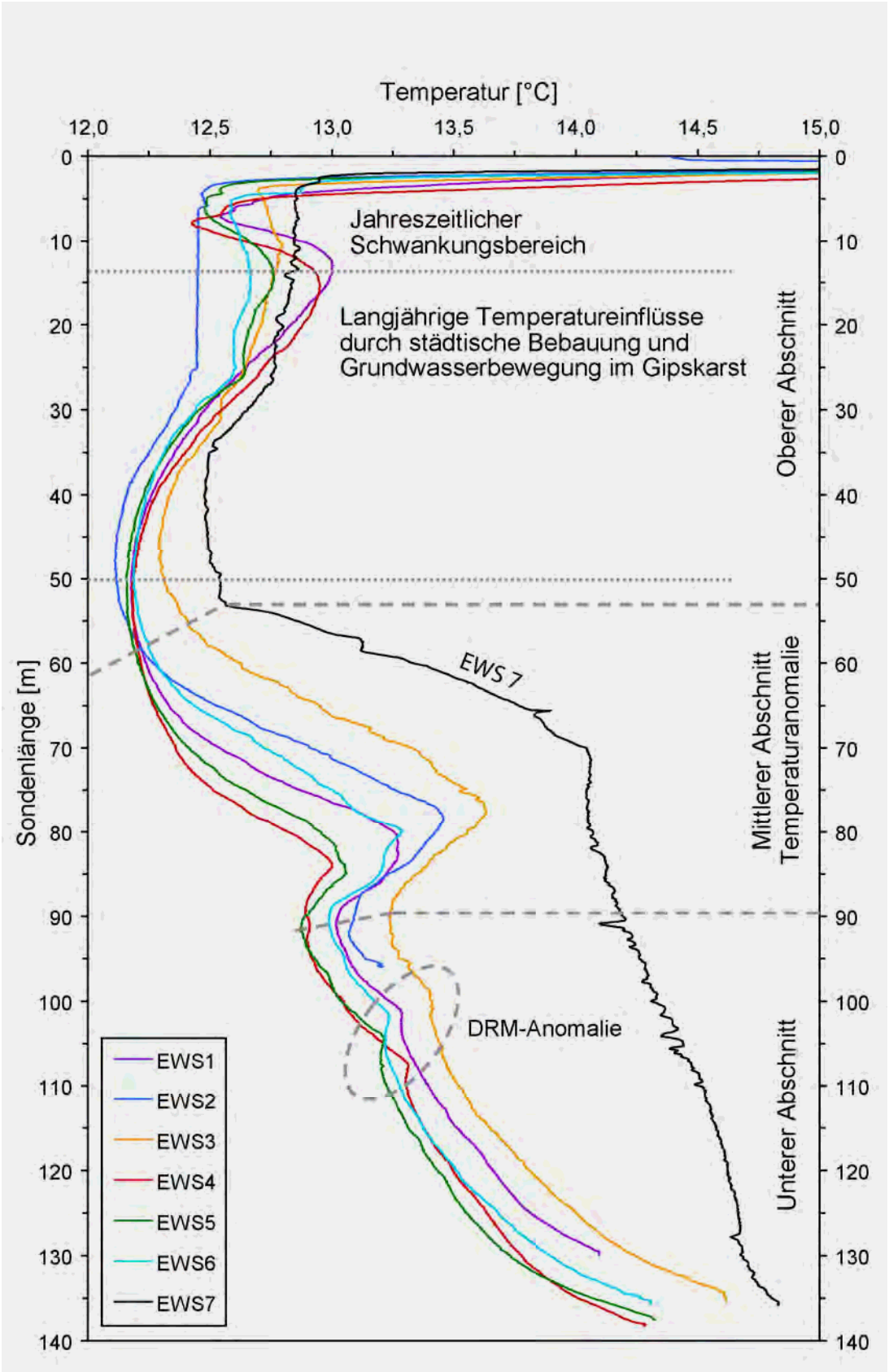


Abb. 6.8: Ruhetemperaturprofile in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 (12. Juni 2008).

Wie die Erkundungsbohrung EKB 2 zeigt, liegen die gemessenen Temperaturanomalien in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 6 in Anhydrit- und quellfähige Tonminerale führendem Gebirge. Diese Temperaturanomalien lassen sich durch eine exotherme Reaktion bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips erklären. Bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips ($\Delta_r H° = \Delta_f H°_{(Gips)} - \Delta_f H°_{(Anhydrit)} - \Delta_f H°_{(Wasser)}$), wird eine Energie von $\Delta_r H° = -16.86$ kJ/mol freigesetzt. Die anfängliche Annahme, wonach allein warmes, in der EWS 7 aufsteigendes Grundwasser die Temperaturanomalie durch im Schichtfallen abströmendes Grundwasser verursacht, wurde aufgrund der Ergebnisse der Folgemessungen verworfen.

Vertikale Temperaturprofile in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7

Das RPF/LGRB empfahl bereits im Frühjahr 2008 Temperaturprofilmessungen in den Erdwärmesonden (LGRB Az. 4764//08 1092 vom 13. Februar 2008).

Erste Messungen wurden am 21. Mai 2008 durch die Fa. GEOWATT mit dem kabellosen Datenlogger NIMO-T im Rahmen des Beweisverfahrens von [redacted] durchgeführt. Mit dem NIMO-T konnten die Sondenschläuche jedoch auf Grund seines zu großen Durchmessers nur bis in etwa 60 bis 80 m Tiefe befahren werden.

Am 12. Juni 2008 erfolgten erstmals Temperaturmessungen bis zur Endteufe mit der kabelgebundenen Sonde des Büros VOUTTA, die einen Durchmesser von nur 15 mm aufweist (Abb. 6.9). Durch im Abstand von wenigen Stunden aufeinander folgende Wiederholungsmessungen wurde eine hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte nachgewiesen.

Die Sonden waren zunächst mit der kabelgebundenen Temperatursonde bis in Sondenlängen zwischen 130 m (EWS 1) und 138 m (EWS 4 und EWS 5) zugänglich. Die EWS 2, die nur bis 105 m ausgebaut ist, war anfänglich bis etwa 96 m zugänglich. In der Tab. 6.5 sind die Endtiefen der Temperaturbefahrungen mit Angaben zur Temperatur bei der Endtiefe aufgelistet. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass sich im Laufe der Zeit die befahrbare Sondenlänge verringert hat. Bei den letzten Messungen waren nur noch die EWS 3, 5, 6 und 7 bis unter das Temperaturmaximum in der Temperaturanomalie befahrbar.

Als Referenzmessung der Temperaturprofile dient die Befahrung am 12. Februar 2009, bei der alle Erdwärmesonden vor Beginn der Bohrarbeiten der Erkundungsbohrung EKB 1 gemessen wurden.

Die Messungen vom 12. Juni 2008 können nicht direkt mit den darauf folgenden Messungen verglichen werden (vgl. auch Abb. 6.10 bis Abb. 6.16). Die Temperaturen sind kalibrierungsbedingt im Vergleich zu den Messungen vom 12. Februar 2009 um etwa 0,2 bis 0,6 °C niedriger. Sie werden d ennoch unkorrigiert in den Abb. 6.10 bis Abb. 6.16 übernommen. Ihre Gesamtcharakteristik stimmt mit den Folgemessungen jedoch gut überein.

Abb. 6.9: Kabelgebundene Temperaturmesssonde des Büros VOUTTA.

Die Temperaturen im jeweiligen Sondentiefsten unterscheiden sich mit Ausnahme der oben genannten Erstmessung kaum. Dies wird auf die einheitliche Temperatur des Grundwassers im Unterkeuper zurückgeführt. Die geringfügigen Unterschiede zwischen den Basistemperaturen in den Erdwärmesonden beruhen auf der unterschiedlichen Eindringtiefe der EWS-Bohrungen in den Unterkeuper als Folge ihrer Vertikalabweichungen.

In den Abb. 6.10 bis Abb. 6.16 sind die wichtigsten Ergebnisse der Ruhetemperatur-Profilmessungen zusammengestellt. In den Abbildungen wurden nur die Temperaturprofile bis zum Beginn der Nachverpressungen dargestellt, die die Temperaturanomalie erfasst haben. Die Tiefenangaben im Text beziehen sich auf die Sondenlängen, die sich auf Grund der starken Vertikalabweichungen der EWS-Bohrungen

von der tatsächlichen Bohrtiefe insbesondere im unteren Abschnitt dahingehend unterscheiden, dass die Sondenlänge größer als die tatsächliche Bohrtiefe u. GOK ist.

In Tab. 6.6 sind die maximalen Temperaturen im Bereich der Temperaturanomalie seit Februar 2009 zusammengestellt.

Die Temperaturanomalie in EWS 7 wurde erstmalig mit der Messung vom 12. Februar 2009 eindeutig nachgewiesen. In der vorangehenden Messung vom 12. Juni 2008 war sie noch nicht deutlich ausgebildet. Offenbar lag die durch Reaktionswärme überprägte Temperatur bis dahin noch unter der des aus dem Unterkeuper/ Oberen Muschelkalk im Ringraum aufsteigenden warmen Grundwassers.

Zeitliche Entwicklung der Temperaturen in den Erdwärmesonden

Um die zeitliche Entwicklung der Temperaturen im Erdwärmesondenfeld genauer zu beurteilen, wurden für drei Erdwärmesonden EWS 3, EWS 6 und EWS 7 in jeweils vier Referenztiefen die in den wiederholt ausgeführten Temperaturprofilmessungen ermittelten Temperaturen als Zeitreihe ausgewertet (Abb. 6.17 bis Abb. 6.19).

Tab. 6.7: Referenztiefen in den Erdwärmesonden EWS 3, 6 und 7 zur Auswertung der Temperaturmessungen als Zeitreihen.

	Referenztiefe 1 (oberer Profilabschnitt)	**Referenztiefe 2** (mittlerer Profilabschnitt, Maximum der Temperatur-anomalie)	**Referenztiefe 3** (unterer Profilabschnitt, DRM-Anomalie)	**Referenztiefe 4** (Sondenbasis)
EWS 3	40 m	76 - 77 m	96 - 99 m	130 m
EWS 6	50 m	79 - 81 m	101 - 103 m	130 m
EWS 7	45 m	70 - 72 m		130 m

Generell nehmen die Temperaturen in allen Referenztiefen seit Messbeginn am 12. Februar 2009 bis zur Aufnahme der schadensbegrenzenden Maßnahmen am 25. September 2009 mit Ausnahme der EWS 7 (Einhängetiefe 130 m) unterschiedlich stark zu.

Tab. 6.5: Temperaturmessungen bei erreichter Sondentiefe (ET) in den EWS 1 bis 7 (Messung mit der Kabelsonde (Ø 15 mm), in blau: Temperaturmessungen während der schadensbegrenzenden Maßnahmen).

	EWS 1		EWS 2		EWS 3		EWS 4		EWS 5		EWS 6		EWS 7	
	ET [m]	*Temp. [°C]*	ET [m]	*Temp. [°C]*	ET [m]	*Temp. [°C]*	ET [m]	*Temp. [°C]*	ET [m]	*Temp. [°C]*	ET [m]	*Temp. [°C]*	ET [m]	*Temp. [°C]*
12.06.08	1/129,9 2/130,3	*14,10* *14,06*	1/95,9 2/95,8	*13,21* *13,16*	135,40	*14,62*	138,3	*14,28*	137,5	*14,32*	135,7	*14,31*	135,8	*14,55*
12.02.09[1]	130,1	*14,56*	95,8	*13,84*	136,2	*14,95*	138,0	*14,80*	1/138,6 2/137,9	*14,96* *14,90*	135,3	*14,84*	1/135,1 2/135,4	*14,95* *14,97*
14.03.09	130,8	*14,53*												
10.06.09	1/48,9 2/48,7	*12,70* *12,70*	1/44,7 2/95,9	*12,69* *13,94*	136,2	*14,87*	66,8	*13,02*	1/49,50 2/138,1	*12,707* *14,96*	135,7	*14,88*	60,7	*14,86*
24.07.09													134,7[2]	*14,94*[2]
28.07.09					134,4[2]	*14,86*[2]								
02.09.09	49,2	*12,61*	96,0	*13,97*	136,3	*14,87*	67,5	*13,08*						
06.09.09													134,7	*14,94*
29.09.09					135,9	*14,86*					136,0	*14,90*	136,0	*15,02*
01.10.09			95,3	*13,90*	135,7	*14,86*					135,4	*14,85*	133,6	*14,97*
09.10.09					135,7	*14,88*					135,3	*14,86*	134,9	*14,99*
17.10.09			95,9	*13,96*	135,0	*14,89*	137,0	*14,81*	117,9 [3]	*14,55*	135,5	*14,89*	134,8	*14,97*
25.10.09											135,5	*14,88*	135,1	*14,89*
06.11.09					136,0	*14,90*					135,0	*14,87*	134,8	*14,92*
16.11.09											135,0	*14,87*	134,8	*14,90*
18.11.09											135,3	*14,87*	134,2[4]	*15,09*
27.11.09			69,7	*14,63*	134,3	*15,03*							128,3	*15,97*
03.12.09											133,7	*14,75*	1/95,8 2/96,3	*1/14,69* *2/14,69*
17.12.09											109,6	*14,22*		
09.01.10	52,1	*12,69*	66,3	*14,28*	133,8	*14,89*	69,0	*13,20*	89,2	*14,10*	109,0	*14,26*	90,7	*14,39*
03.02.10					83,6	*15,03*					108,2	*14,27*	70,9	*15,09*
09.02.10	50,6	*17,4*	65,7	*13,97*	85,1	*14,88*	68,7	*13,43*	101,8	*14,04*	111,0	*14,29*	88,9	*14,80*

[1] mit Inklinometermessungen (VOUTTA)
[2] Korrigierte Daten der Profilmessungen in EWS 7 am 24. Juli 2009 und EWS 3 am 28. Juli 2009.
[3] von EKB 2 bei 117,5 m angebohrt
[4] nach Verpressung in EWS 7 bei 129 m am 17. November 2009

Tab. 6.6: Maximale Temperatur in den Erdwärmesonden im Bereich der Temperaturanomalie, Tiefe bezogen auf die Sondenlängen.

	EWS 1		EWS 2		EWS 3		EWS 4		EWS 5		EWS 6		EWS 7	
Datum	**Tiefe [m]**	***Temp. [°C]***	**Tiefe [m]**	***Temp. [°C]***	**Tiefe [m]**	***Temp. [°C]***	**Tiefe [m]**	***Temp. [°C]***	**Tiefe [m]**	***Temp. [°C]***	**Tiefe [m]**	***Temp. [°C]***	**Tiefe [m]**	***Temp. [°C]***
12.02.09	81,6	*14,32*	78,0	*14,69*	76,8	*14,69*	83,8	*13,93*	82,6	*14,06*	80,2	*14,34*	71,6	*15,03*
14.03.09	81,5	*14,33*												
10.06.09			78,1	*15,05*	77,2	*14,89*			82,7	*14,27*	80,1	*14,60*		
24.07.09													71,4*	*15,38**
28.07.09					76,8*	*14,99**								
02.09.09			77,8	*15,10*	76,9	*15,11*								
06.09.09													71,3	*15,60*
29.09.09					76,5	*15,18*					79,4	*14,90*	70,7	*15,70*
01.10.09			78,1	*15,16*	76,4	*15,19*					79,2	*14,88*	71,1	*15,71*
09.10.09					76,6	*15,25*					79,5	*14,90*	71,1	*15,72*
17.10.09			77,8	*15,26*	76,6	*15,31*	82,8	*14,17*	81,4	*14,40*	79,3	*14,94*	71,4	*15,71*
25.10.09											79,5	*14,95*	70,6	*15,68*
06.11.09					76,8	*15,32*					79,8	*14,93*	70,4	*15,72*
16.11.09											79,8	*14,93*	70,5	*15,70*
18.11.09											79,3	*14,96*	70,3	*15,75*
27.11.09					76,3	*15,37*							70,2	15,90
03.12.09											80,8	*14,84*	70,3	*16,00*
17.12.09											79,9	*14,92*		
09.01.10					76,5	*15,44*			81,7	*14,53*	79,6	*15,00*	70,3	*15,89*
03.02.10					76,9	*15,50*					80,5	*15,00*	72,4	*16,21*
09.02.10					76,7	*15,50*			82,4	*14,54*	80,5	*15,03*	72,5	*15,75*

* Korrigierte Daten der Profilmessungen in EWS 7 am 24. Juli 2009 und EWS 3 am 28. Juli 2009.

Anzahl der Messungen	Tiefenlage der Temperatur-anomalie	Maximaltemperatur der Temperatur-anomalie und Temperatur bei erreichter Sondentiefe	Tiefenlage der DRM-Anomalie	Max. Temperaturdifferenz zwischen 12. Februar 2009 und 17. Oktober 2009
3	63 m - 92 m	14,33 °C (14.03.2009) 14,53 °C (130,8 m)	102 m	n. b

Bemerkungen:

Temperaturdifferenz zwischen 12. Juni 2008 und den Folgemessungen messtechnisch bedingt.

Abb. 6.10: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 1.

Anzahl der Messungen	Tiefenlage der Temperatur-anomalie	Maximaltemperatur der Temperatur-anomalie und Tem-peratur bei erreich-ter Sondentiefe	Tiefenlage der DRM-Anomalie	Max. Tempe-raturdifferenz zwischen 12. Februar 2009 und 17. Oktober 2009
6	50 m - 92 m	15,26 °C (17.10.2009) 13,96 °C (95,9 m)	–	0,6 °C

Bemerkungen:

- Ausbau der Erdwärmesonde EWS 2 nur bis 105 m u. GOK
- Hinweis auf aufsteigendes Grundwasser ab 32 m u. GOK (Gipskarst).

Temperaturdifferenz zwischen 12. Juni 2008 und den Folgemessungen messtechnisch bedingt

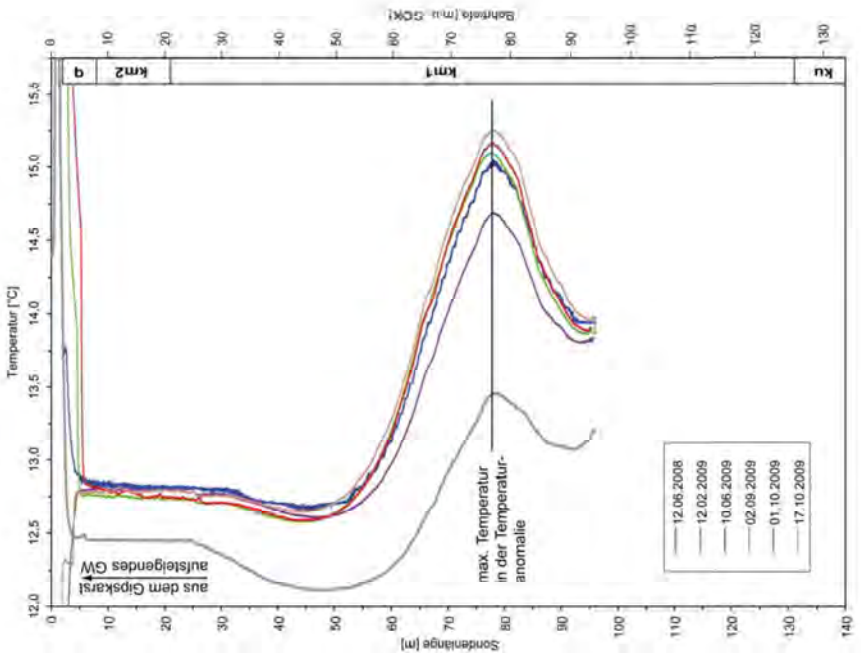


Abb. 6.11: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 2

Anzahl der Messungen	Tiefenlage der Temperatur-anomalie	Maximaltemperatur der Temperatur-anomalie und Tem-peratur bei erreich-ter Sondentiefe	Tiefenlage der DRM-Anomalie	Max. Tempe-raturdifferenz zwischen 12. Februar 2009 und 17. Oktober 2009
10	50 m - 94 m	15,32 °C (06.11.2009) 14,90 °C (136,0 m)	97 m	0,6 °C

Bemerkungen:

- Temperaturrücksprung bei 28 m (Gipskarst) erkennbar.
- Geringer Gradient oberhalb 25 m als Hinweis auf aufsteigendes Grundwasser (Gipskarst).

Temperaturdifferenz zwischen 12. Juni 2008 und den Folgemessungen messtechnisch bedingt.

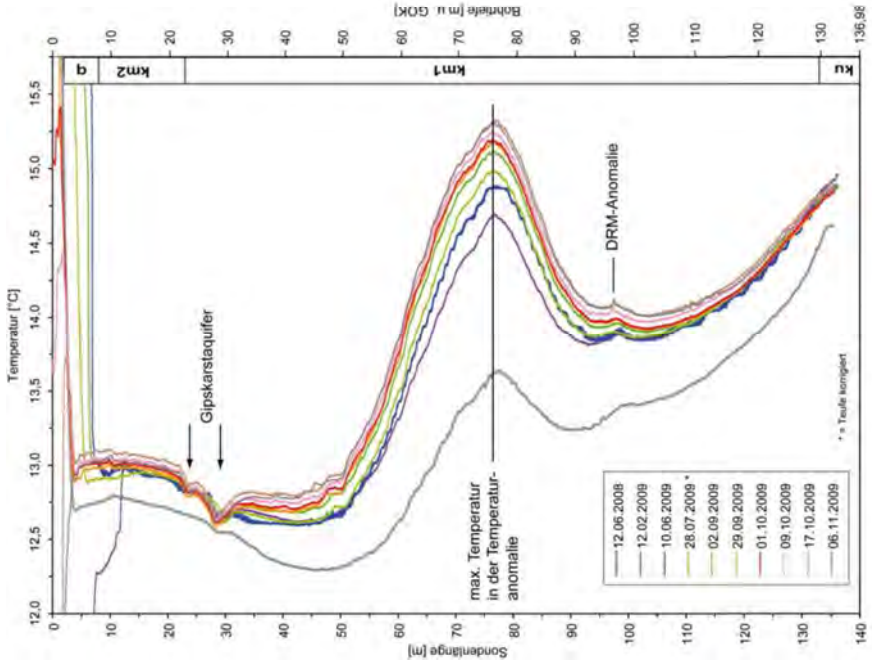


Abb. 6.12: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 3.

Anzahl der Messungen	Tiefenlage der Temperatur-anomalie	Maximaltemperatur der Temperatur-anomalie und Temperatur bei erreichter Sondentiefe	Tiefenlage der DRM-Anomalie	Max. Temperaturdifferenz zwischen 12. Februar 2009 und 17. Oktober 2009
3	54 m - 93 m	14,17 °C (17.10.2009) 14,81 °C (137 m)	108 m	0,2 °C

Bemerkungen:

Temperaturdifferenz zwischen 12. Juni 2008 und den Folgemessungen messtechnisch bedingt

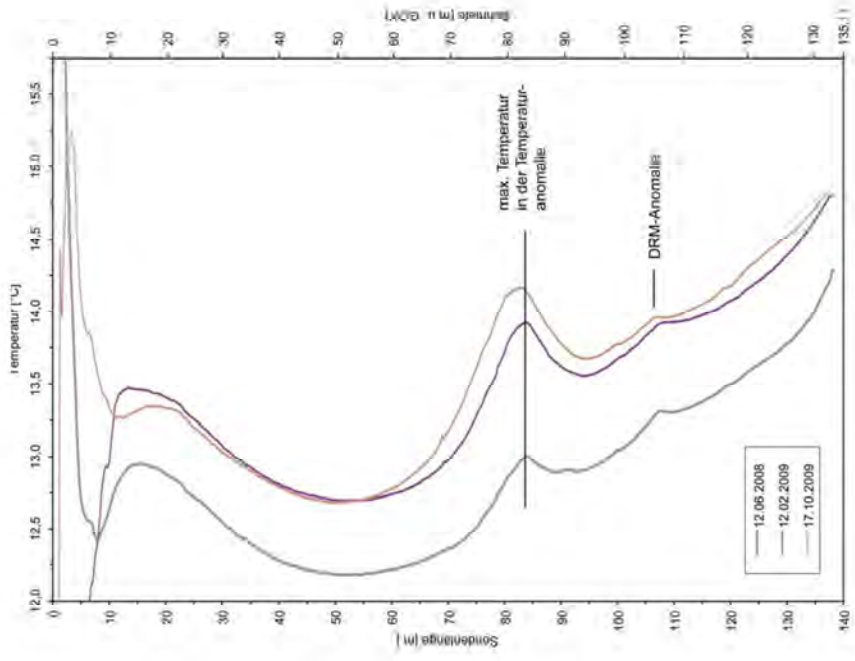


Abb. 6.13: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 4.

Anzahl der Messungen	Tiefenlage der Temperatur-anomalie	Maximaltemperatur der Temperatur-anomalie und Temperatur bei erreichter Sondentiefe	Tiefenlage der DRM-Anomalie	Max. Temperaturdifferenz zwischen 12. Februar 2009 und 17. Oktober 2009
4	53 m - 94 m	14,40 °C (17.10.2009) 14,55 °C (117,9 m)	105 m	0,3 °C

Bemerkungen:

- EWS 5 am 04. August 2009 zwischen 117,5 m bis 118,1 m Tiefe durch EKB 2 angebohrt.
- Am 17. Oktober 2009 im unteren Abschnitt erhöhte Temperaturen in Folge von Hydratationswärme durch Ringraumzementation in EKB 2.

Temperaturdifferenz zwischen 12. Juni 2008 und den Folgemessungen messtechnisch bedingt.

Abb. 6.14: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 5.

Anzahl der Messungen	Tiefenlage der Temperatur-anomalie	Maximaltemperatur der Temperatur-anomalie und Tem-peratur bei erreich-ter Sondentiefe	Tiefenlage der DRM-Anomalie	Max. Tempe-raturdifferenz zwischen 12. Februar 2009 und 17. Oktober 2009
10	55 m - 92 m	14,93 °C (06.11.2009) 14,87 °C (135 m)	102 m	0,6 °C

Bemerkungen:

- Bohransatzpunkt nur 3,5 m von Erkundungsbohrung EKB 2 entfernt.
- Bei 30 m Tiefe temporäre Temperaturerhöhung in Folge Zementation in EKB 2 (Gipskarst).
- Zwischen 10. Juni 2009 und 29. September 2009 Temperaturzunahme um 0,4 °C oberhalb 125 m in Folge Zementation Sperrrohre EKB 2 und Wärmeeintrag durch Bohrspülung in EKB 2.
- Wegen starker Vertikalabweichung der Bohrung unterhalb von 125 m außerhalb des Temperatureinflusses der EKB 2.

Temperaturdifferenz zwischen 12. Juni 2008 und den Folgemessungen messtechnisch bedingt

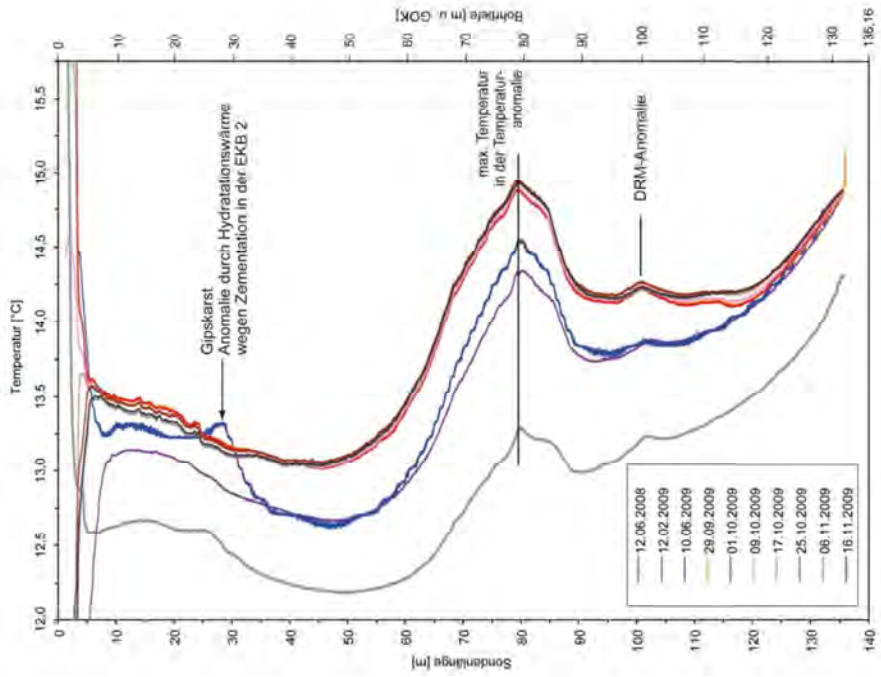


Abb. 6.15: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 6.

Anzahl der Messungen	Tiefenlage der Temperatur-anomalie	Maximaltemperatur der Temperatur-anomalie und Tem-peratur bei erreich-ter Sondentiefe	Tiefenlage der DRM-Anomalie	Max. Tempe-raturdifferenz zwischen 12. Februar 2009 und 17. Oktober 2009
11	48 m - 78 m	15,72 °C (06.11.2009) 14,90 °C (135 m)	fehlt	0,7 °C

Bemerkungen:

- Temperaturprofilverlauf unterscheidet sich deutlich von dem der EWS 1 bis EWS 6.
- Deutlicher Unterschied im Temperaturverlauf zwischen der Messung am 12. Juni 2008 und den folgenden.
- Geringer Gradient oberhalb 34 m als Beleg für im undichten Ringraum aufsteigendes Grund-wasser (Gipskarst)
- Geringer Gradient von 48 m bis 34 m u. GOK als Hinweis auf aufsteigendes Grundwasser.
- Temperaturanomalie im Vergleich zu den übrigen Erdwärmesonden von deutlich geringer vertikaler Ausdehnung und stark asymmetrisch (bedingt durch aufsteigendes Grundwasser im Ringraum).

DRM-Anomalie durch aufsteigendes Grundwasser überprägt.

Temperaturdifferenz zwischen 12. Juni 2008 und den Folgemessungen messtechnisch bedingt.

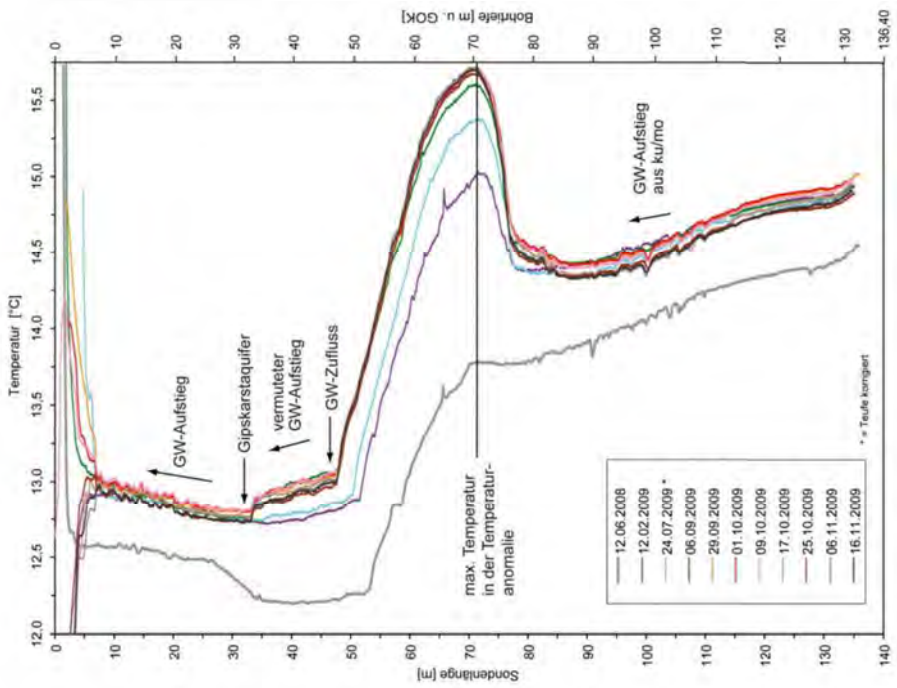


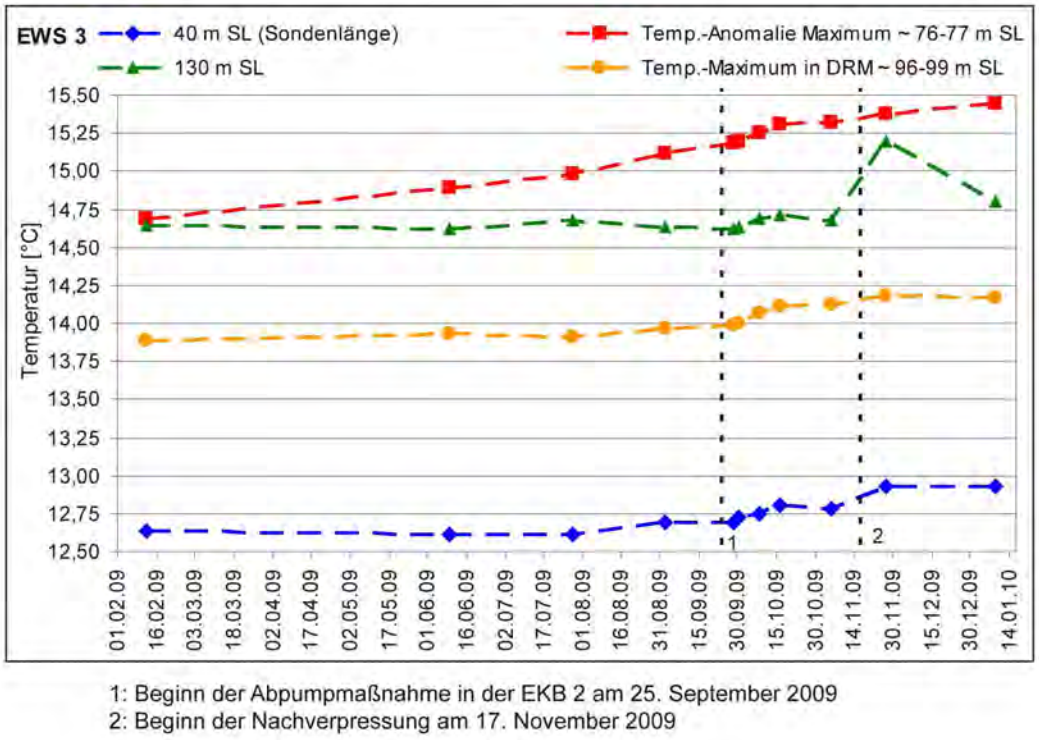
Abb. 6.16: Temperaturprofile und wichtige Angaben zur Erdwärmesonde EWS 7.

In den Abb. 6.17 bis Abb. 6.19 ist die zeitliche Entwicklung der Temperaturen in den EWS 3, 6 und 7 in den ausgewählten Tiefen dargestellt.

Die stärksten Temperaturzunahmen erfolgen im Maximum der Temperaturanomalie (Tab. 6.7: Referenztiefe 2). Sie werden auf die dort ablaufende exotherme Reaktion bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips zurückgeführt. Die Reaktion setzt mehr Wärme frei, als über konduktiven Wärmetransport im Gebirge abgeführt werden kann.

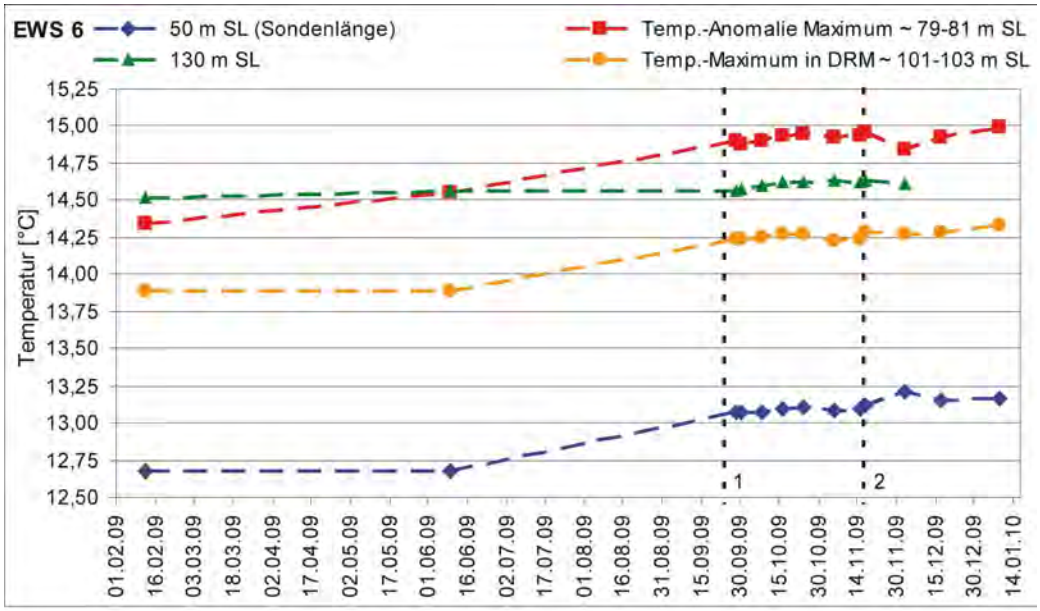
Mit dem Beginn der Nachverpressung der Erdwärmesonden zeichnet sich vor allem in der EWS 7 in allen Referenztiefen und in der EWS 3 in 130 m Referenztiefe ein markanter Temperaturanstieg ab. Dieser ist auf die Abbindewärme des in den Ringraum injizierten Zementes zurückzuführen. Die Temperaturentwicklung in EWS 7 belegt, dass mit der Injektionsmaßnahme weitgehend der gesamte Ringraum erreicht wurde (vgl. Abb. 8.5).

Die EWS 6 liegt der Erkundungsbohrung EKB 2 am nächsten (Minimalabstand der Bohrspuren nur 2 m). In Folge dessen zeichnen sich in ihr bohrbedingte Wärmeeinträge (Temperatur der Bohrspülung, mehrfache Zementagen) am deutlichsten ab (Abb. 6.18).



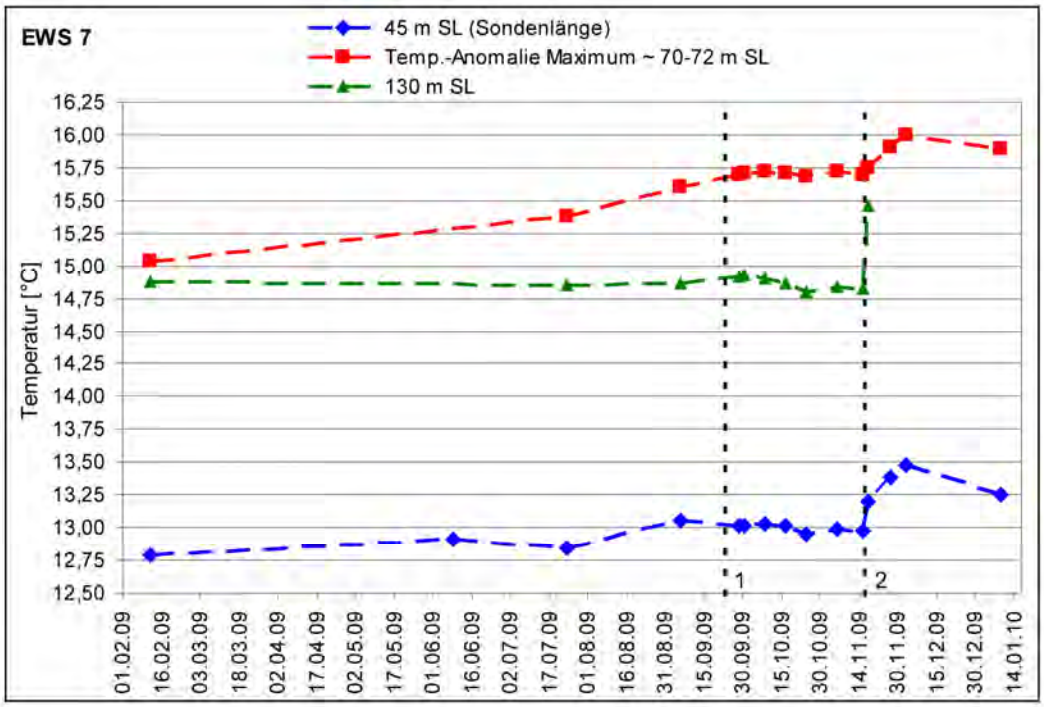
1: Beginn der Abpumpmaßnahme in der EKB 2 am 25. September 2009
2: Beginn der Nachverpressung am 17. November 2009

Abb. 6.17: EWS 3: Zeitliche Entwicklung der Temperaturen in vier Referenztiefen auf der Grundlage der Ruhe-Temperaturprofile.



1: Beginn der Abpumpmaßnahme in der EKB 2 am 25. September 2009
2: Beginn der Nachverpressung am 17. November 2009

Abb. 6.18: EWS 6: Zeitliche Entwicklung der Temperaturen in vier Referenztiefen auf der Grundlage der Ruhe-Temperaturprofile.



1: Beginn der Abpumpmaßnahme in der EKB 2 am 25. September 2009
2: Beginn der Nachverpressung am 17. November 2009

Abb. 6.19: EWS 7: Zeitliche Entwicklung der Temperaturen in drei Referenztiefen auf der Grundlage der Ruhe-Temperaturprofile. In 130 m Tiefe konnte nach dem 16. November 2010 auf Grund der Arbeiten zur Nachverpressung nicht mehr gemessen werden.

In der Abb. 6.20 sind die Temperaturentwicklungen in den Temperaturmaxima der sieben EWS zwischen dem 12. Februar 2009 (Referenzmessung) und dem 9. Januar 2010 dargestellt. Die EWS 1 war seit dem 14. März 2009 nur noch bis in 50 m Tiefe messbar. In den EWS 2, 3, 6 und 7 betrug der Temperaturanstieg während des achtmonatigen Zeitraums vom 12. Februar 2009 bis 17. Oktober 2009 etwa 0,6 ℃ bis 0,7 ℃. In den EWS 4 und 5 betrug der Anstieg i m gleichen Zeitraum nur 0,2 ℃ bis 0,3 ℃. Die deutlichen Temperaturanstiege seit dem 17. November sind auf die Injektionsmaßnahmen in den Erdwärmesonden zurückzuführen.

Die rückwärtige Extrapolation der Temperaturen von der ersten Messung im Juni 2008 bis zum Beginn der Erdwärmesondenbohrungen im September 2007 lässt einen ähnlich ausgebildeten Temperaturanstieg vermuten (Annahme: Temperatur-profil war normal ausgebildet). Somit sind die Temperaturen in den EWS 2, 3, 6 und 7 seit Abschluss der EWS-Bohrungen weitgehend linear um etwa 0,08 ℃ pro Monat gestiegen.

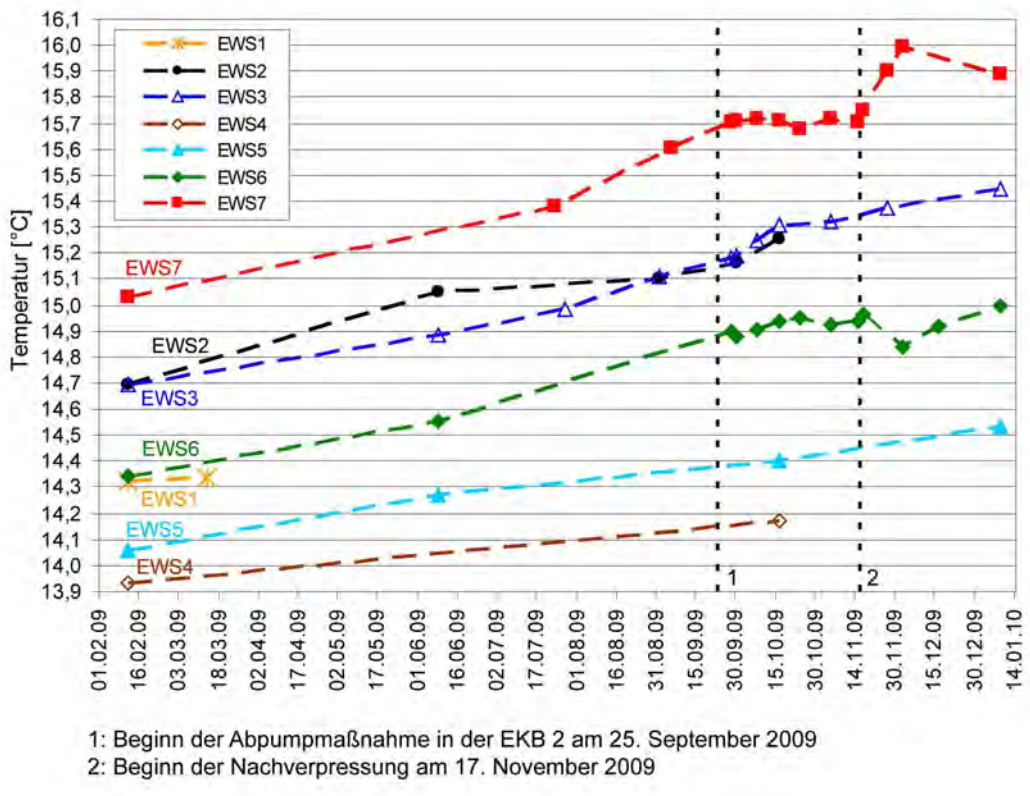


Abb. 6.20: Vergleichende Darstellung der zeitlichen Entwicklung der maximalen Temperaturen in der Temperaturanomalie in EWS 1 bis EWS 7.

Räumliche Verteilung der Temperaturen im Erdwärmesondenfeld

Die an einem Stichtag in den Erdwärmesonden gemessenen vertikalen Temperaturprofile unterscheiden sich untereinander sowohl in der absoluten Maximaltemperatur der jeweiligen Temperaturanomalie als auch in ihrer Tiefenlage.

Abb. 6.21 zeigt das Temperaturfeld im Erdwärmesondenfeld. Grundlage ist die Maximaltemperatur der Temperaturanomalien in den jeweiligen Erdwärmesonden für die Messung am 12. Februar 2009 (vgl. Tab. 6.6). Da die EWS-Bohrungen im unteren Abschnitt stark von der Vertikalen abweichen, wurde die tatsächliche Raumlage des Temperaturmaximums mit dem Raummodell ermittelt und auf Geländeniveau projiziert. Dies führt zu den dargestellten Lageverschiebungen zwischen den Stützpunkten des Temperaturfeldes und den Bohransatzpunkten der Erdwärmesonden.

Wie an allen Stichtagen war auch bei der exemplarisch dargestellten Messung vom 12. Februar 2009 die Temperatur in der Temperaturanomalie der EWS 7 am höchsten und nahm in den Erdwärmesonden in nordwestliche Richtung ab. Die absolute Temperaturdifferenz zwischen der Maximaltemperatur in der EWS 7 und der EWS 4 beträgt etwa 1 °C.

In der Abb. 6.22 sind die Tiefenlagen der Maximaltemperaturen in den Temperaturanomalien der Erdwärmesonden in Meter über NN eingetragen. Die Lagekorrektur der Stützstellen erfolgte wie oben beschrieben. Die daraus konstruierten Isolinien bilden eine Fläche ab, die ausgehend von der EWS 7 ein Gefälle zur EWS 4 aufweist. Diese Einfallsrichtung entspricht in etwa dem Schichteinfallen innerhalb der Grabenscholle, auf der die EWS 1, 4, 5 und 6 liegen.

Aus dem Temperaturfeld und der Raumlage der Temperaturmaxima lässt sich folgern, dass die Wärme produzierende Hydratation ihren Ursprung bei der EWS 7 hat und in diesem Bereich am stärksten abläuft. Von dort ausgehend breitet sich Grundwasser im vormals trockenen Gebirge auf sich neu bildenden bevorzugten Wegsamkeiten (Schicht- bzw. Trennfugen) dem Schichtfallen folgend aus und führt flächenhaft unter Wärmefreisetzung zur Gipskeuperquellung. Für die Entstehung der neuen Wasserwegsamkeiten ist nach HAUBER et al. (2005) das Tonquellen von ausschlaggebender Bedeutung. Das Einfallen der Tiefenlage der maximalen Temperaturen ist unregelmäßig ausgebildet. Zwischen der EWS 7 und der EWS 4 beträgt das gemittelte Einfallen etwa 34 °, liegt also in der G rößenordnung des bekannten Schichteinfallens.

Über die Ausbildung des Temperaturfeldes in nordöstliche Richtung liegen keine Informationen vor, da dort Stützstellen fehlen. Aufgrund der Geometrie der Hebungsfigur ist jedoch davon auszugehen, dass auch in diesem Bereich, Quellungsvorgänge ablaufen, die Reaktionswärme frei setzen und zu erhöhten Untergrundtemperaturen führen.

Stratigraphische Gliederung der Erdwärmesondenbohrungen

Zur stratigraphischen Gliederung aller Erdwärmesondenbohrungen sind in Abb. 6.23 für die sieben Erdwärmesonden die Ruhetemperaturprofilmessungen vom 12. Februar 2009 und - wo vorhanden - geologische Schichtprofile und Gamma-Logs gemeinsam dargestellt. Als weitere Grundlage wurden das Schichtprofil und das Gamma-Log der Erkundungsbohrung EKB 2 herangezogen.

Aus der Abb. 6.23 ergibt sich, dass das Maximum der Temperaturanomalie wenige Meter über dem Weinsberg-Horizont liegt. Die gesamte Temperaturanomalie umfasst somit den oberen Teil des Weinsberg - Horizonts und nahezu den gesamten Mittleren Gipshorizonts. Die ca. 20 m bis 25 m tiefer liegende kleinere Anomalie befindet sich im Niveau der Dunkelroten Mergel (DRM-Anomalie).

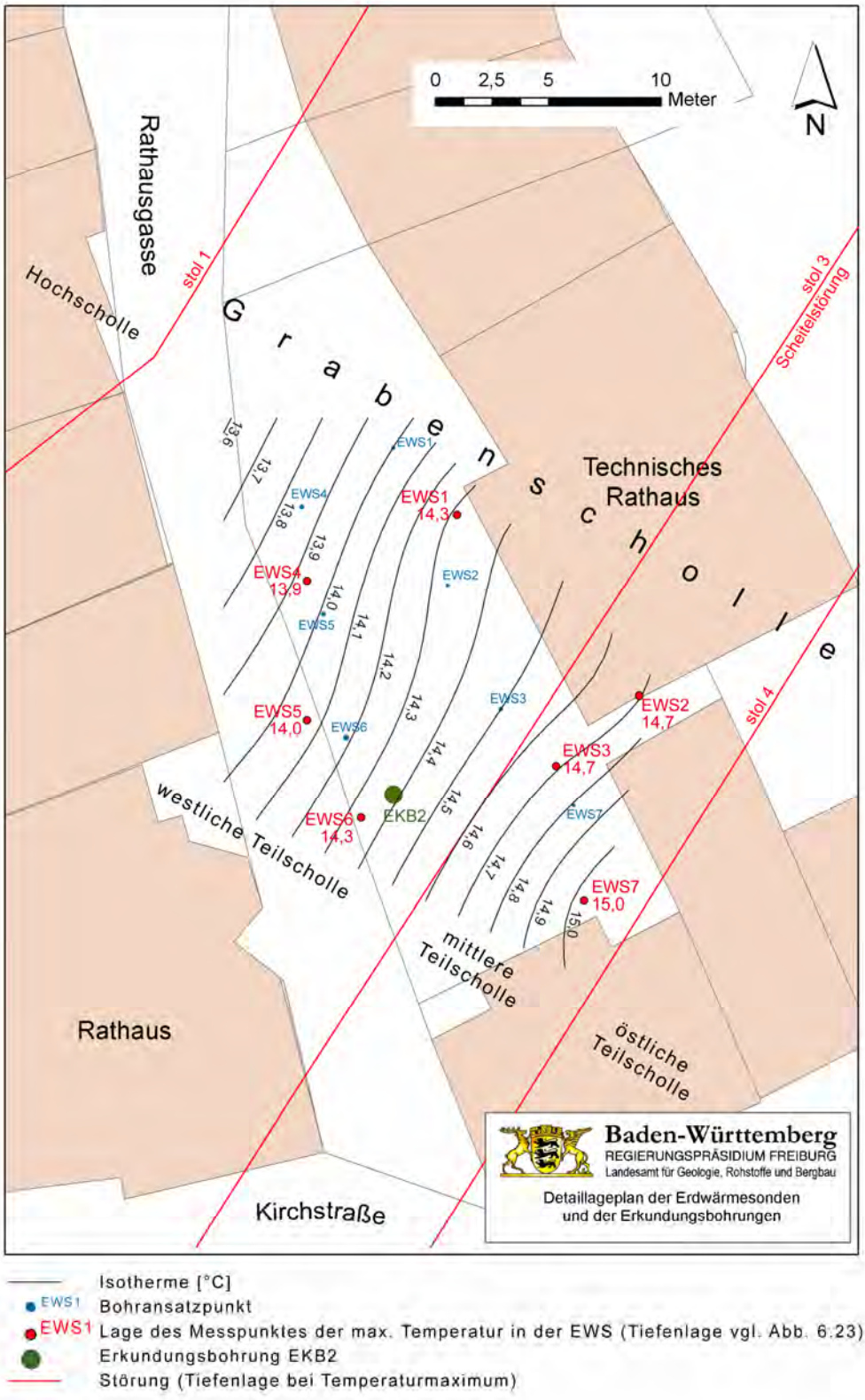


Abb. 6.21: Temperaturverteilung im Untergrund des Erdwärmesondenfeldes am Stichtag 12. Februar 2009 (Tiefenbezug: Maximaltemperatur der Temperaturanomalie, die Bezugspunkte wurden lagekorrigiert).

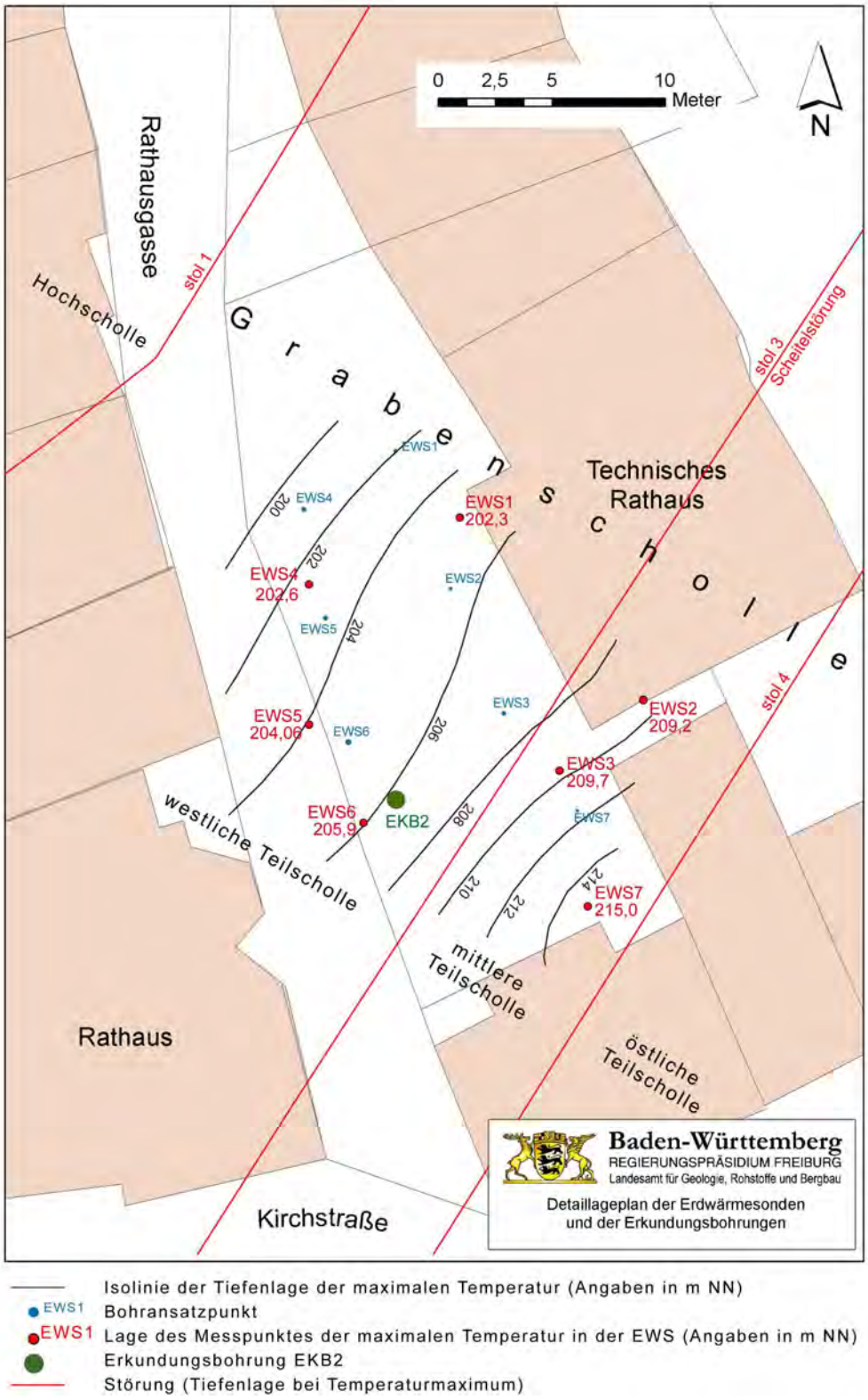


Abb. 6.22: Raumlage der Temperaturmaxima in den Temperaturanomalien.

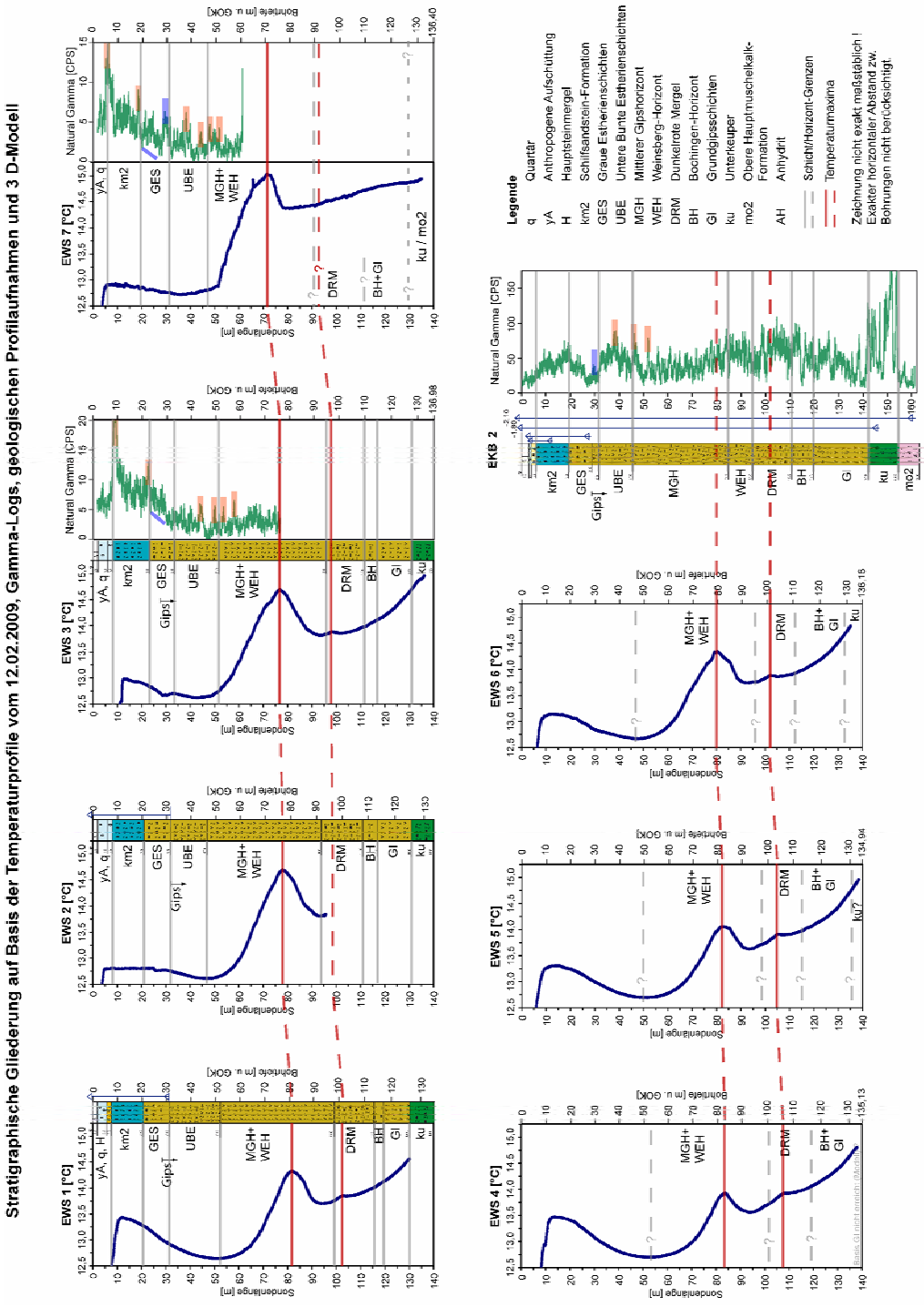


Abb. 6.23: Stratigraphische Gliederung der EWS-Bohrungen auf Basis der Temperaturprofile vom 12. Februar 2009, der Gamma-Logs, der geologischen Profilaufnahmen und des 3D-Modells.

6.2.3.3 Aufheiz-Temperaturprofile in den EWS 3 und EWS 7

Methodik (VOUTTA 2009):
Der von einer Erdwärmesonde erfasste Untergrund besteht i.d.R. aus unterschiedlichen Gesteinsarten. Jede Gesteinsart weist eine charakteristische vom Wassergehalt beeinflusste Wärmeleitfähigkeit auf. Fließendes Grundwasser im Einflussbereich einer Erdwärmesonde hat wegen der konvektiven Wärmetransportwirkung einen besonderen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Untergrund. Die Aufgabenstellung einer Aufheiz-Temperaturprofil-Messung besteht darin, die vertikal variierende Wärmeleitfähigkeit der durchteuften, wechselnden geologischen Gesteinsabfolge tiefendifferenziert abzubilden.

Mit einer Anlage zur Durchführung von Thermal-Response-Tests wurde ein kurzes aber starkes Temperatursignal mit aufgeheiztem, zirkulierendem Wasser als Wärmeträgermedium (ca. 100 Watt pro Sondenmeter) auf eine der beiden U-Rohr-Sonden der EWS 3 und EWS 7 gegeben. Während der zweistündigen Aufheizzeit mit gleich bleibender Energiezufuhr wurden in der zweiten, ebenfalls wassererfüllten U-Rohr-Sonde Temperaturprofile innerhalb von 2 Stunden gemessen.

Die kurze aber intensive Aufheizung führt dazu, dass vor allem die Ringraumhinterfüllung der Erdwärmesonden erfasst wird. Daneben zeichnen sich insbesondere bei längerer Beobachtungsdauer auch Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit der erbohrten Gesteinsschichten ab. Folgende Effekte sind bei einem Aufheizprofil zu beachten:

- Bereiche in denen die Temperatur während der Anregungsphase schnell ansteigt, weisen auf eine geringe thermische Leitfähigkeit des Untergrundes hin. Dagegen sind Bereiche mit geringer Temperaturzunahme durch hohe thermische Leitfähigkeit charakterisiert.
- Abschnitte, in denen die Temperatur während der Anregungsphase nicht oder nur sehr gering steigt, weisen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf strömendes Grundwasser hin.
- Die Sondenschläuche in den EWS von Staufen liegen nicht zentrisch im Bohrloch. Die Lage der Sondenschläuche zueinander und die Lage zum anstehenden Gebirge kann besonders bei kurzen Aufheizphasen ebenfalls einen Einfluss auf die Messungen haben.

Ergebnisse:
In den EWS 3 und EWS 7 wurden am 24. Juli 2009 und am 28. Juli 2009 Aufheiz-Temperatur-Profile gemessen. In der Abb. 6.24 sind die Aufheiz-Temperaturprofile zusammen mit dem Ruhe-Temperaturprofil vor Beginn der Aufheizphase und dem geologischen Profil der EWS 3 dargestellt.

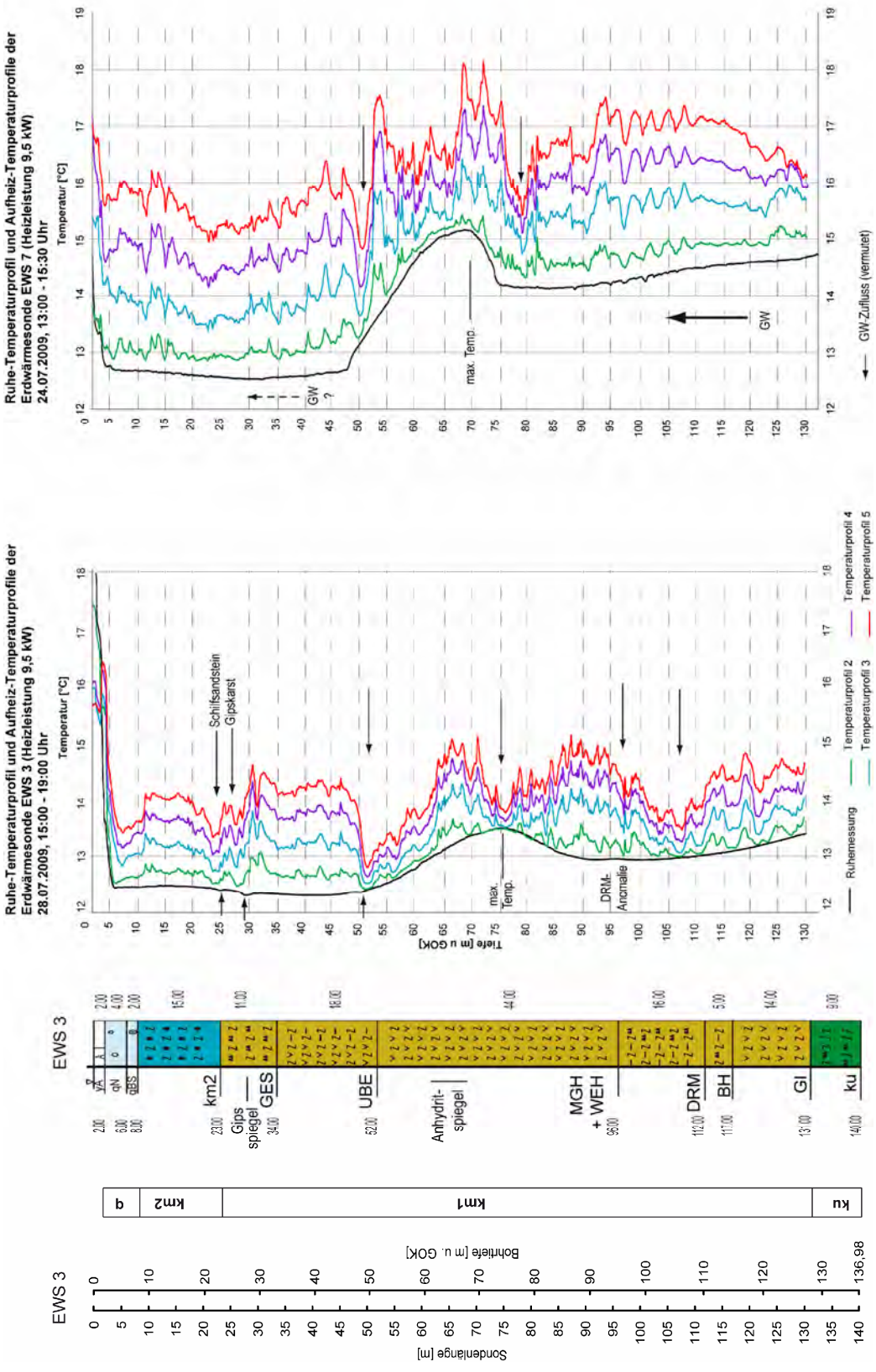


Abb. 6.24: Aufheiztemperaturprofile in den EWS 3 und EWS 7.

EWS 3

In den Aufheiz-Temperaturprofilen der EWS 3 ist die bereits erläuterte Dreiteilung der Ruhetemperaturprofile erkennbar und zeichnet sich durch ein unterschiedliches Aufheizverhalten des Gebirges ab:

- Oberer Abschnitt 0 m - 50 m Sondenlänge,
- Mittlerer Abschnitt 50 m - 95 m Sondenlänge,
- Unterer Abschnitt 95 m - 130 m Sondenlänge.

Markante Temperaturrücksprünge zeigen sich zwischen 20 m und 25 m, 28 m und 30 m, bei 50 m zwischen 73 m und 77 m.

Der Temperaturrücksprung zwischen 20 m und 25 m wird auf Grundwassereinfluss im Schilfsandstein zurückgeführt, der Temperaturrücksprung zwischen 28 m und 30 m auf Grundwasser im Gipskarst. Der markanteste Temperaturrücksprung liegt bei 50 m noch oberhalb des Anhydritspiegels und deutet auf einen weiteren lateralen Grundwasserfluss hin. Er ist auch in den Aufheiz-Temperaturprofilen der EWS 7 deutlich ausgeprägt (s. u.).

Der Temperaturrücksprung zwischen 73 m und 77 m fällt mit dem Maximum der Temperaturanomalie der Ruhemessung zusammen. In diesem ehemals trockenen Gebirgsabschnitt handelt es sich vermutlich nicht um ein mit dem Schilfsandstein bzw. Gipskarst vergleichbares Grundwasserfließen, sondern um Auswirkungen der lateralen Grundwasserausbreitung auf Schicht- und Trennfugen, die im Laufe des Quellungsprozesses entstanden.

Der nur schwach ausgeprägte Temperaturrücksprung bei 97 m deutet auf einen Grundwassereinfluss hin, der ursächlich für den im Bereich der DRM-Anomalie ablaufenden Quellungsprozess sein dürfte. Auch zwischen 100 m und 107 m und bei 122 m gibt es Hinweise auf laterale Grundwasserbewegungen.

EWS 7

Die Dreiteilung der Ruhetemperaturprofilmessungen ist in EWS 7 grundsätzlich erkennbar, wobei der untere Abschnitt von 75 m bis 130 m u. GOK durch den vertikalen Grundwasserfluss im Ringraum stark überprägt ist.

Eindeutige Hinweise auf laterale Grundwasserbewegungen zeigen sich in ausgeprägten Temperaturrücksprüngen bei 50 m und zwischen 75 m und 80 m, undeutlicher zwischen 55 m und 66 m.

Der untere Profilabschnitt weist unterhalb von 80 m einen auffällig gleichmäßigen Verlauf auf, der sich völlig vom Temperaturverlauf der EWS 3 im unteren Abschnitt unterscheidet. Zum Unterkeuper hin nähern sich die Aufheiztemperaturprofile einander an. Dies deutet ebenfalls auf Wärmeabfuhr durch strömendes Grundwasser hin.

6.2.3.4 Thermal-Response-Test in der EWS 7

Methodik (VOUTTA 2009):
Der **T**hermal-**R**esponse-**T**est (TRT) ist eine in-situ Messung der über die Tiefe gemittelten thermischen Leitfähigkeit einer ausgebauten Erdwärmesonde unter Einbeziehung der Ringraumverfüllung. Die Erdwärmesonde besteht meist aus zwei U-Rohren. Im ersten Schritt wird das Wärmeträgerfluid (im Fall Staufen Wasser) innerhalb der U-Rohre bis zum Erreichen der ungestörten Untergrundtemperatur im Kreis gepumpt. Danach wird das Heizelement zugeschaltet, um das Wasser zu erwärmen (ca. 50 Watt pro Sondenmeter). Mit dem Vorlauf wird damit über einen bestimmten Zeitraum eine gleichbleibende Energiemenge mittels des Wärmeträgers Wasser in den Untergrund eingebracht. Während der Untergrundpassage überträgt das Wärmeträgerfluid die Wärmeenergie an das angrenzende Gestein. Im Rücklauf wird die Temperatur des nach Passage der Erdwärmesonde abgekühlten Wassers gemessen und aufgezeichnet. Entsprechend der über die Tiefe integrierten thermischen Leitfähigkeit des Untergrundes stellt sich ein Temperatur-Gleichgewicht im Sinne einer thermischen Beharrung ein. Die sich dabei einstellende Temperaturzunahme über die Zeit sowohl im Vorlauf wie auch im Rücklauf ist die "Temperaturantwort" (= "Response") des durchteuften Untergrundes.

An Hand des zeitlichen Verlaufes des Mittelwertes aus Eintritts- und Austritttemperatur während der konstanten Energieeinspeisung über den Vorlauf wird die standortspezifische, über die Tiefe der Erdwärmesonde integrierte Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes abgeleitet.

Wenn die daraus ermittelte thermische Leitfähigkeit deutlich gegenüber der für diesen Untergrund charakteristischen thermischen Leitfähigkeit positiv abweicht, ist die Anwesenheit von fließendem Grundwasser im Einflussbereich der Erdwärmesonde sehr wahrscheinlich.

Ergebnisse:
Vom 24. bis 28. Juli 2009 wurde ein Thermal-Response-Test über 91 Stunden durchgeführt. Die Daten und die Auswertung können im Detail aus der Abb 6.25 (Durchführung und Auswertung Büro VOUTTA) entnommen werden. Es wurde eine mittlere thermische Leitfähigkeit des Untergrunds von 3,36 W/(m•K) ermittelt.

Diese mittlere Wärmeleitfähigkeit ist im Vergleich zu der aus Gesteinsmessungen abgeschätzten mittleren Wärmeleitfähigkeit in der EKB 2 (ca. 2,0 W/(m·K) zu hoch (vgl. Kap. 5.5.4.8). Die Abweichung wird auf den Einfluss des in der EWS 7 aufsteigenden bzw. sie umströmenden Grundwassers zurückgeführt.

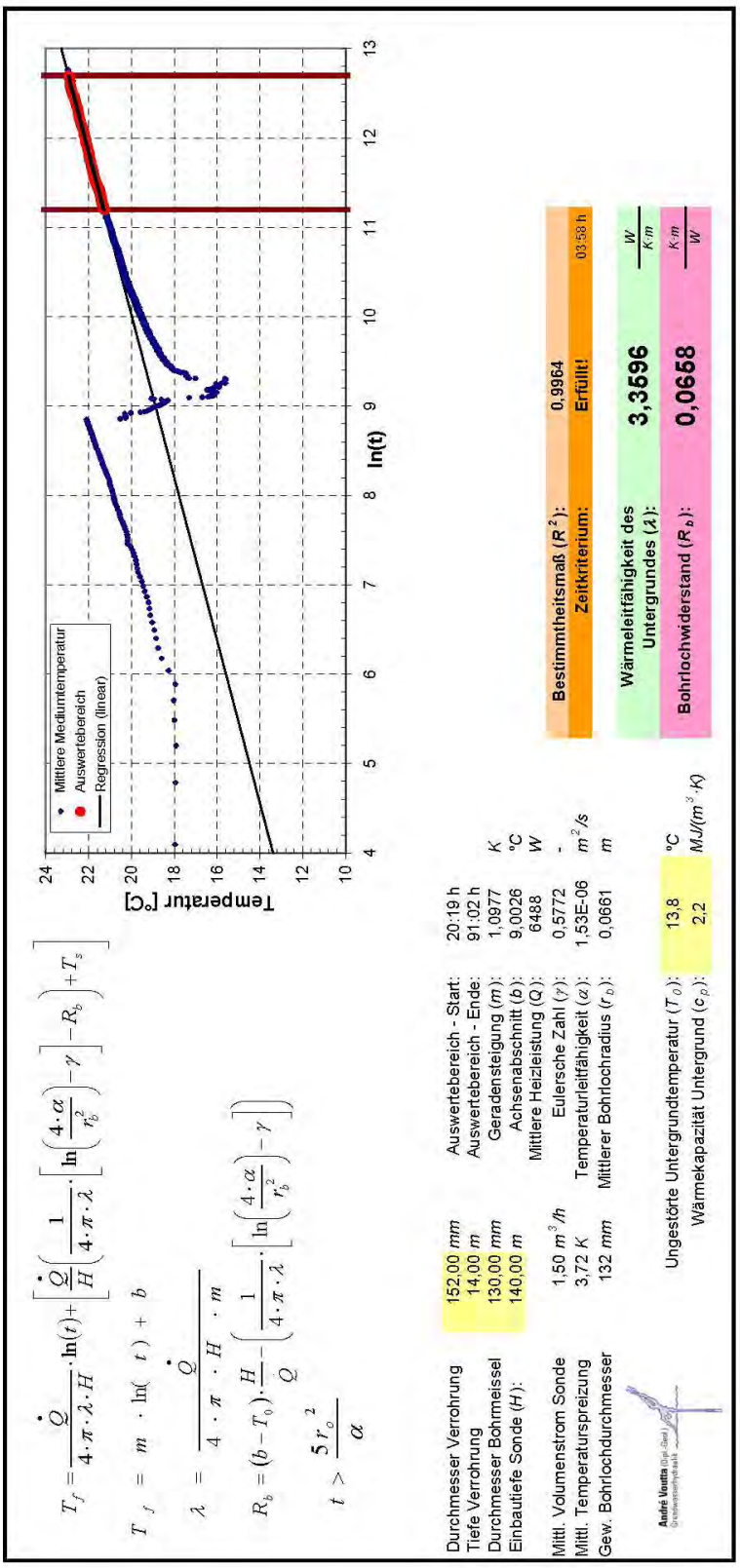


Abb. 6.25: Auswertung des Thermal-Response-Tests in der EWS 7 vom 24. Juli bis 28. Juli 2009.

Zur Beobachtung der Temperaturentwicklung im Nachgang zum Thermal-Response-Test in der EWS 7 wurden in die EWS stationär in 40 m und 85 m Tiefe Messfühler (PT 1000) eingehängt. Die Temperaturen der stationären Messungen entsprechen nicht genau denen der Ruhe-Temperaturprofile, geben aber den Temperaturverlauf gut wieder. Die Temperaturauswirkungen des TRT sind noch ca. einen Monat nach dem TRT nachzuweisen. Die erhöhten Temperaturen klingen erst Anfang September 2009 aus. Dieses Ergebniss belegt, dass auch Wärmeeintrage über die Bohrarbeiten (Spülung, Zementagen) das Temperaturfeld langfristig beeinflussen.

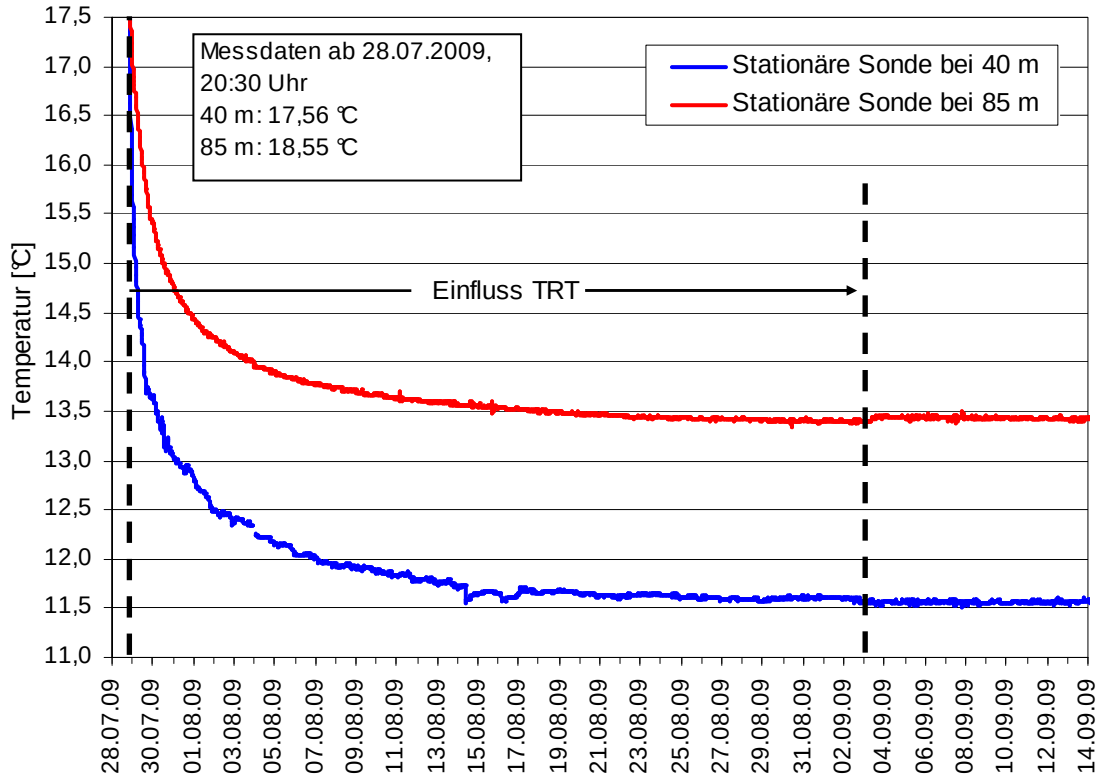


Abb. 6.26: Temperaturentwicklung in der EWS 7 nach dem Thermal-Response-Test (24. - 28. Juli 2009).

6.2.3.5 Bewertung der Temperaturuntersuchungen

In den sieben Erdwärmesonden wurden Temperaturmessungen mit folgenden Zielsetzungen durchgeführt:

- Messung der vertikalen Temperaturverteilung.
- Beobachtung der Temperaturentwicklungen in den Erdwärmesonden .
- Nachweis von Temperaturanomalien, die auf mögliche Undichtigkeiten in Erdwärmesondenhinterfüllungen hinweisen.

Daneben wurden Temperaturmessungen beim Thermal-Response-Test in der EWS 7 zur Ermittlung der mittleren Wärmeleitfähigkeit des erfassten Gebirgsabschnittes durchgeführt.

Neben der durch die exotherme Reaktion bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips frei werdenden Wärme wird das Temperaturfeld im Untergrund durch den Wärmeeintrag während der Bohrarbeiten in der EKB 2 und durch die Injektionsarbeiten beeinträchtigt.

Gliederung der Temperaturprofile: Die Temperaturprofile lassen sich in vier charakteristische Abschnitte untergliedern (von oben nach unten):

- Oberer Abschnitt 0 - 14 m u. GOK mit jahreszeitlichem Schwankungsbereich.
- Oberer Abschnitt 14 - 50/60 m u. GOK mit langjährigen Temperatureinflüssen durch städtische Bebauung und Grundwasserbewegung im Gipskarst.
- Mittlerer Abschnitt 50/60 m u. GOK bis ca. 90 m u. GOK mit charakteristischer Temperaturanomalie.
- Unterer, durch geothermischen Gradienten und eine kleinere Temperaturanomalie bestimmter Abschnitt.

Das vertikale Temperaturprofil der Erdwärmesonde EWS 7 weicht gegenüber denen der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 6 stark ab. Die geringen (135 m u. GOK bis 70 m u. GOK) bzw. fehlenden Gradienten (53 m u. GOK bis 33 m u. GOK und 25 m u. GOK bis 5 m u. GOK) belegen eine Grundwasserzirkulation in abschnittsweise undichtem Ringraum.

Temperaturanomalien: Die gemessenen Temperaturanomalien in den Erdwärmesonden liegen in Anhydrit und quellfähige Tonminerale führendem Gebirge. Sie werden auf eine exotherme Reaktion bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips zurückgeführt.

Temperaturentwicklung: Generell nehmen die Temperaturen in allen Tiefenbereichen seit Messbeginn (12. Februar 2009) bis zur Aufnahme der schadensbegrenzenden Maßnahmen (ab 25. September 2009) mit Ausnahme der EWS 7 (Referenztiefe 130 m) unterschiedlich stark zu. Ausgeprägte Temperaturzunahmen zeigen sich in den EWS 3 und EWS 6.

Die stärksten Temperaturzunahmen erfolgen im Maximum der Temperaturanomalie. Der Quellungsprozess setzt mehr Wärme frei, als über konduktiven und konvektiven Wärmetransport im Gebirge abgeführt werden kann.

Räumliche Temperaturverteilung: Aus dem Temperaturfeld und der Raumlage der Temperaturmaxima folgt, dass die Wärme produzierende Reaktion bei EWS 7 ihren Ursprung hat und dort am intensivsten abläuft. Von dort ausgehend breitet sich Grundwasser auf bevorzugten Wegsamkeiten (Schicht- bzw. Trennfugen) dem Schichtfallen folgend aus und führt dort zu weiteren Quellungsprozessen. Zusätzlich wirken vermutlich Störungen als Wegsamkeiten für einen flächenhaften lateralen Wassernachschub.

Grundwassereinflüsse: Aus den Ruhetemperaturprofilen aller Erdwärmesonden und den Aufheiztemperaturprofilen in den EWS 3 und EWS 7 ergeben sich eindeutige Hinweise auf Grundwassereinflüsse in den Ringräumen der Erdwärmesonden. Die in den EWS-Bohrungen lokalisierten Wasserwegsamkeiten konnten nicht alle in der Erkundungsbohrung EKB 2 identifiziert werden. Eindeutige Belege für vertikale Grundwasserbewegungen gibt es in der Erdwärmesonde EWS 7 im Abschnitt zwischen 130 m und 75 m und zwischen 35 m und der Quartärbasis. Weitere Hinweise für vertikale Grundwasserbewegung zeigen sich in den Erdwärmesonden EWS 2 und EWS 3 zwischen 35 m und der Quartärbasis. Die Aufheiztemperaturprofile belegen in den EWS 3 und EWS 7 laterale Grundwassereinflüsse, die in den anhydritführenden Gebirgsabschnitten mit den dort zu beobachtenden Temperaturanomalien zusammenfallen.

Wärmeleitfähigkeit: Die durch einen Thermal-Response-Test ermittelte mittlere Wärmeleitfähigkeit für das gesamte Profil der EWS 7 beträgt 3,36 W/(m·K) und ist im Vergleich zu den an den Gesteinen der EKB 2 gemessenen Wärmeleitfähigkeiten deutlich erhöht. Dies wird auf vertikalen Grundwasserfluss im Ringraum der EWS 7 und auf laterale Grundwasserflüsse im Gebirge zurückgeführt.

Wärmefluss: Der Wärmeeintrag durch den Thermal-Response-Test in der EWS 7 macht sich noch vier Wochen nach dem Test durch erhöhte Temperaturen in der Erdwärmesonde bemerkbar. Dies belegt, dass auch Wärmeeintrag über die Bohr- und Injektionsarbeiten (Spülung, Zementagen) das Temperaturfeld langfristig beeinflussen kann.

7 Geologisches und hydrogeologisches Untergrundmodell

Das geologische und hydrogeologische Untergrundmodell bildet die Grundlage zum Verständnis der Hebungen in der Altstadt von Staufen. Es erklärt die Geometrie der beobachteten Hebungsfigur und ist Voraussetzung für die Bewertung und Konzeption von Sicherungs- bzw. Sanierungsstrategien.

Als Grundlagen für das geologische und hydrogeologische Modell im Untersuchungsbereich dienten:

- die Untersuchungsergebnisse der Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2,
- die geologischen Profilaufnahmen der Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 3,
- die Befunde der Baugrundbohrungen auf dem Gelände des Hotels Kreuz-Post (LGRB-Archivnummer 8112/229 – 234),
- die Befunde einer 6 m tiefen Erkundungsbohrung auf dem Marktplatz vor dem Rathaus, die im November 2005 im Zusammenhang mit der ursprünglich geplanten Energieversorgung des Rathauses durch eine Grundwasserwärmepumpe niedergebracht wurde (LGRB-Archivnummer 8112/178) ,
- Ergebnisse weiterer Erdwärmesondenbohrungen im Stadtgebiet (vgl. Anl. 7.1 und Anl. 7.2),
- geologische Kartierungen (GENSER 1957, 1958, 1959, 1992, SCHREINER 1991, GKV1992, GROSCHOPF et al. 1996),
- die Ergebnisse der seismischen Messungen im Altstadtgebiet von Staufen sowie vom RPF/LGRB durchgeführten Bodenunruhemessungen.

Das geologische Modell wurde vom RPF/LGRB mit der 3-D - Modellierungssoftware GoCAD erstellt. Aufgrund des hohen Detaillierungsgrades des geologischen Modells, der Kleinräumigkeit der dargestellten Strukturen im Untergrund sowie durch die Probenahme in den EWS-Bohrungen bedingte Unsicherheiten in der Höhenlage der geologischen Grenzflächen ließen sich nicht alle Befunde widerspruchsfrei in das Modell integrieren.

7.1 Geologischer Kenntnisstand vor Beginn der Erkundungsmaßnahmen

7.1.1 Geologische Verhältnisse

Die geologischen Verhältnisse im Stadtgebiet von Staufen werden in geologischen Karten von GENSER (1957, 1958, 1959, 1992), SCHREINER (1991), in der Vorläufigen

Geologischen Karte Blatt 8112 (GKV Staufen, 1992) sowie von GROSCHOPF et al. (1996) dargestellt.

Nach der geologischen Kartierung von GENSER (1959, Anl. 3.2) wird der Bereich zwischen dem Bötzen/Roten Berg und dem Schloßberg von nach Nordwesten steil einfallenden Schichten des Mittleren Muschelkalks bis Hauptrogenstein mit einem störungsbedingten Schichtausfall des Oberen Muschelkalks aufgebaut. Diese Scholle wird im Süden ("Roter-Berg-Störung") und im Norden ("Bötzen-Störung") durch jeweils eine Nordwest – Südost verlaufende Störung begrenzt. Im südwestlich daran anschließenden Gebiet, in dem in ca. 150 m von der "Roter-Berg-Störung" das Erdwärmesondenfeld Rathaus Staufen liegt, wird der Festgesteinsuntergrund von den quartären Ablagerungen des Neumagens überdeckt. Hier können aus den vorliegenden geologischen Karten keine gesicherten Aussagen über den Festgesteinsuntergrund entnommen werden.

Weiter südwestlich wurde in den Erkundungsbohrungen des BV Hotel Kreuz-Post unter der quartären Überlagerung Keuper angetroffen.

Die Schichtlagerung auf der Scholle nördlich der "Roter Berg - Störung" ist in einem mehrere hundert Meter nordöstlich vom EWS-Feld in Südost – Nordwest – Richtung verlaufenden Profilschnitt dargestellt (Abb. 7.1, verändert nach SCHREINER 1991 und GENSER 1992). Die westlich an die Hauptverwerfung des Oberrheingrabens anschließende Grabenscholle ist tektonisch stark gestört und am Grabenrand hochgeschleppt, in Oberflächennähe infolge von Bodenfließen (Frostbodenbewegung) sogar überkippt. Die Schichten fallen steil nach Nordwesten ein. Im Gegensatz zur Kartierung von GENSER (1959) reicht die Schichtenfolge im Profilschnitt von SCHREINER (1991) an der Hauptverwerfung bis zum Oberen Buntsandstein. Nach Ergebnissen von Erdwärmesondenbohrungen (LGRB-Archivnummer 8112/235 bis 239) wurden auf der von GENSER und SCHREINER als Muschelkalk kartierten, steil stehenden Scholle unter mächtigem Hangschutt- bzw. Hanglehm Muschelkalk (mm/mo?) oder Keupersedimente (km1-ku?) angetroffen.

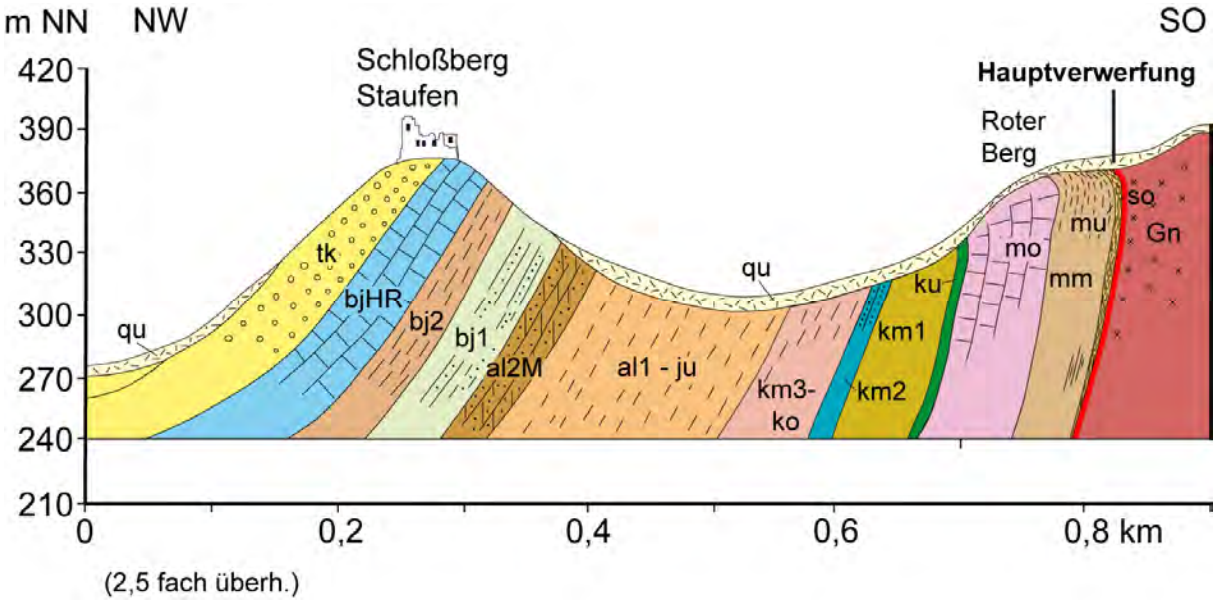


Abb. 7.1: Schematischer geologischer Profilschnitt vom Roten Berg über den Schloßberg in Staufen, verändert nach SCHREINER (1991) und GENSER (1992).

qu: Hangschutt- bzw. Hanglehm, tk: Küstenkonglomerat, bjHR: Hauptrogenstein, bj2: Ostreenkalk-Formation, bj1: Wedelsandstein-Formation, al2M: Murchinsonae-Oolith-Formation, al1-ju: Opalinuston-Formation bis Unterjura, km3-ko: Bunte Mergel-Formation bis Oberkeuper, km2: Schilfsandstein-Formation, km1: Gipskeuper-Formation, ku: Unterkeuper, mo: Oberer Muschelkalk, mm: Mittlerer Muschelkalk, mu: Unterer Muschelkalk, so: Oberer Buntsandstein, Gn: Gneis

In einer ingenieurgeologischen Stellungnahme des ehemaligen Geologischen Landesamts (GLA 1995) wird ausgeführt, dass auf der Sohle der Baugrube für das Hotel Kreuz-Post (ca. 120 m südwestlich der EWS-Bohrungen am Rathaus) im südlichen Drittel der Baugrube Dolomitsteinbänke und Mergelsteinschichten des Keupers (vermutlich km2 und km3) angetroffen wurden, die "flexurartig nach Norden abtauchen". An dieser flexurartigen Störung ist die nördliche Scholle über 10 Meter abgeschoben. Entsprechend der Neigung der Signatur in den Profilsäulendarstellungen in GLA (1995) liegen die Keupersedimente nördlich dieser Trennfläche horizontal, südlich davon sind sie verstellt (Einfallsrichtung und genauerer Einfallswinkel unbekannt). Insgesamt deuten die oben beschriebenen Befunde darauf hin, dass die Bohrungen im Nordteil der ehemaligen Baugrube Kreuz-Post auf einer tektonischen Scholle mit nur geringer Schichtneigung liegen. Da durch die Neigungsmessungen in der EKB 2 ein Schichteinfallen von ca. 42° nach NNW (320°) festgestellt wurde, ist zwischen dem EWS-Feld und der Baugrube Hotel Kreuz-Post eine weitere Störung anzunehmen.

7.1.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Im zentralen, südlichen und westlichen Stadtgebiet von Staufen bilden die quartären Kiese und Sande des Neumagen-Schwemmfächers den oberen, flächenhaft verbreiteten Grundwasserleiter (Abb. 3.1 und Abb. 3.2). Im Osten der Stadt folgt die Verbreitungsgrenze am Ausgang des Münstertals dem Fuß des Messerschmiedfelsens und des Roten Bergs. Nach Norden verzahnen sich die kiesig-sandigen Schotter des Neumagens mit Hangschutt und Hanglehm.

Am nordöstlichen Rand des Neumagen-Schwemmfächers ist die Grundwasserführung in den kiesig-sandigen Schottern gering. In den Schichtenverzeichnissen der EWS Bohrungen 1 bis 3 am Rathaus (LGRB-Archivnummer 8112/216 – 218) wurde in den Kiesen kein Grundwasser beschrieben. In der Bohrung 8112/178 vor dem Rathaus betrug die Grundwassermächtigkeit an der Basis der sandigen Kiese lediglich 0,85 m Meter (eingestellter Wasserspiegel bei ca. 283,45 m NN), in den Bohrungen KB1 bis KB6 Baugrube Hauptstraße (8112/229 – 234) wurde nur in der Bohrung KB4 in den Neumagenschottern ca. 1 m unter Bausohle (ca. 2,5 m u GOK) eine Wasserführung notiert. Im Brauchwasserbrunnen der Fa. Schladerer (LGRB-Archivnummer 8112/15) stellte sich der Grundwasserstand nach der Ausbauzeichnung des Brunnens im Kies bei 286,84 m NN ein. Bei einer Kiesmächtigkeit von 12,3 m beträgt hier die Aquifermächtigkeit 10,8 m. Allerdings sind die Kiese ab einer Tiefe von 5,8 m u. GOK (282,49 m NN) etwas schluffig mit reichlich Grob- und Mittelsand.

In den Bohrungen im weiteren Stadtgebiet (hauptsächlich für Erdwärmesonden), die bis in den Festgesteinsuntergrund reichen, wurde im Festgestein Grundwasser in verschiedenen Tiefen und in unterschiedlichen stratigraphischen Schichten angetroffen.

Mit Ausnahme der EWS-Bohrungen am Rathaus lagen alle angetroffenen und eingespiegelten Grundwasserstände im Kiesgrundwasserleiter mehrere Meter und im Festgestein mehrere Meter bis Zehner Meter unter der Geländeoberfläche.

Auf Grundlage der wenigen Bohrungen, die in den Keuper bzw. Jura abgeteuft wurden und in denen Grundwasser angetroffen wurde, lassen sich keine Aussagen über die flächenhafte Ausbildung weiterer tieferer Grundwasserleiter und darin enthaltener Grundwasservorkommen machen. Hinzu kommen noch die Ungenauigkeiten der Grundwasserstandsmessungen während der Bohrarbeiten und die unterschiedlichen Stichtage der Messungen. Nach den Aufzeichnungen der Bohrfirma W. vom 03. Dezember 2007 wurde in den sieben EWS-Bohrungen am Rathaus (LGRB-Archivnummer 8112/216 bis 222) in der Tiefe von 32 m u. GOK, d.h. innerhalb der Grauen Estherienschichten der Gipskeuper-Formation (km1), artesisch gespanntes Grundwasser angebohrt, das mit einer Schüttung von 10 l/min im freien Auslauf über

Gelände austrat (Kopfdruck 0,1 bar). In einer Besprechung am 29. Januar 2008 wurde von Vertretern der Fa. W. diese Aussage dahin gehend korrigiert, dass lediglich in der Bohrung EWS1 artesisch gespanntes Grundwasser angetroffen worden sei. Im nachgereichten Fertigstellungsbericht vom 20. März 2008 ist beschrieben, dass das Grundwasser in der EWS 1 artesisch, und in der EWS 2 "kurzfristig artesisch" war. In den weiteren Bohrungen wurde laut Fertigstellungsbericht kein artesisch gespanntes Grundwasser angetroffen (vgl. Tab. 6.2).

7.2 Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Die Grundlagen des geologischen und hydrogeologischen Untergrundmodells sind oben aufgeführt.

7.2.1 Erkundungsbohrungen und Erdwärmesondenbohrungen

Die Ergebnisse der Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 sind im Kap. 5, die der Erdwärmesondenbohrungen und der darin durchgeführten Untersuchungen im Kap. 6 dargestellt.

7.2.2 Messungen der natürlichen Bodenunruhe

Zur Erkundung des Untergrundes wurden im April 2008 vom RPF/LGRB in der Innenstadt an 25 Punkten Messungen der natürlichen Bodenunruhe durchgeführt und nach der H/V-Methode ausgewertet. Die Ergebnisse sind in einem Bericht des RPF/LGRB dargelegt (RPF/LGRB, 2008 b: Bericht über die Ergebnisse der H/V-Messungen im Stadtgebiet von Staufen, Az. 94/4763//08_4164 vom 19. Mai 2008).

7.2.2.1 Messverfahren und Auswertung

Als seismische Bodenunruhe (ambient noise/vibrations) bezeichnet man die ständig vorhandenen, kleinen Bewegungen des Untergrundes, die vor allem durch Industrie, Verkehr, Wind und Niederschlag angeregt werden. Diese Bewegungen lassen sich mit Standardseismometern in horizontaler und vertikaler Richtung messen und zur weiteren Auswertung digital aufzeichnen.

Von der so genannten "Quelle" (z. B. einer Straße oder einem Industriebetrieb) breitet sich die Bodenbewegung als seismische Welle durch den Untergrund aus und kann an der Erdoberfläche registriert werden. Die Signale enthalten Informationen über die durchlaufene Struktur (erwünscht) und die Quelle (unerwünscht). Die Auswertung nach der H/V-Methode zielt darauf ab, die Strukturinformation zu extrahieren. Dazu wird von einer ca. halbstündigen Aufzeichnung das Power-Spektrum (Energiegehalt aufgetragen gegen die Frequenz) der horizontalen Bodenbewegung (H) durch das der vertikalen Bewegung (V) dividiert. Das Resultat ist das so genannte H/V-Spektrum, in dem sich mögliche Resonanzen des Untergrundes widerspiegeln. Resonanzen können sich bilden, wenn im einfachsten Fall Untergrund mit einer niedrigen seismischen Geschwindigkeit (kleines Vs) söhlig, d. h. horizontal über Material mit hoher seismischer Geschwindigkeit (großes Vs) liegt, weil es an dieser Grenzfläche zu starken Reflexionen kommt. Passt gerade eine Viertelwellenlänge (λ/4) einer seismischen Welle in die Mächtigkeit der langsamen Schicht hinein, kommt es bei der zugehörigen Frequenz zu einer Resonanz, die sich als große Amplitude (Ausschlag) im H/V-Spektrum abbildet. Schichtmächtigkeit, Geschwindigkeit und Frequenz stehen also in einem festen Verhältnis zueinander. Bei konstanter Geschwindigkeit entspricht eine höhere Frequenz einer geringeren Schichtmächtigkeit.

Vergleicht man verschiedene Messungen an benachbarten Punkten im Untersuchungsgebiet, kann man unter günstigen Umständen die jeweiligen Resonanzfrequenzen in Verbindung bringen. Das Verfahren kann so Informationen über den Untergrundaufbau (Schichtmächtigkeiten, Tiefenlage von Grenzflächen zwischen Einheiten, die sich seismisch unterscheiden) sowie über tektonische Strukturen liefern.

7.2.2.2 Ergebnisse

Aufgrund charakteristischer Eigenschaften konnten die Frequenzspektren in sechs Gruppen klassifiziert werden. Diese sind in Abb. 7.2 dargestellt.

Insgesamt weisen die H/V-Spektren auf starke lokale Unterschiede im Aufbau des Untergrundes hin. Dies gilt sowohl für die Basis der Lockergesteinsüberlagerung als auch für Grenzflächen in den darunter folgenden Festgesteinen. Diese Feststellung trifft auch für den Bereich östlich der Nordwest – Südost verlaufenden so genannten "Roter Berg-Störung" zu, in dem nach dem Kartierergebnis von GENSER (1959) von einer steil in nordwestliche Richtung einfallenden Schichtlagerung auszugehen ist.

Zum Zeitpunkt der Auswertung der H/V – Messungen konnten diese Gruppierungen noch nicht mit einer geologischen Modellvorstellung in Einklang gebracht werden. Die Ergebnisse führten deshalb bei der Erstauswertung zu keinen eindeutigen geologischen Aussagen. Im Zuge der Erarbeitung des geologischen Modell zeichnete sich jedoch ab, dass sie mit unterschiedlichen tektonischen Schollen korreliert werden können und sich die Ergebnisse der H/V-Messungen gut in das Gesamtbild des komplexen Schollenmosaiks einfügen (s. u.).

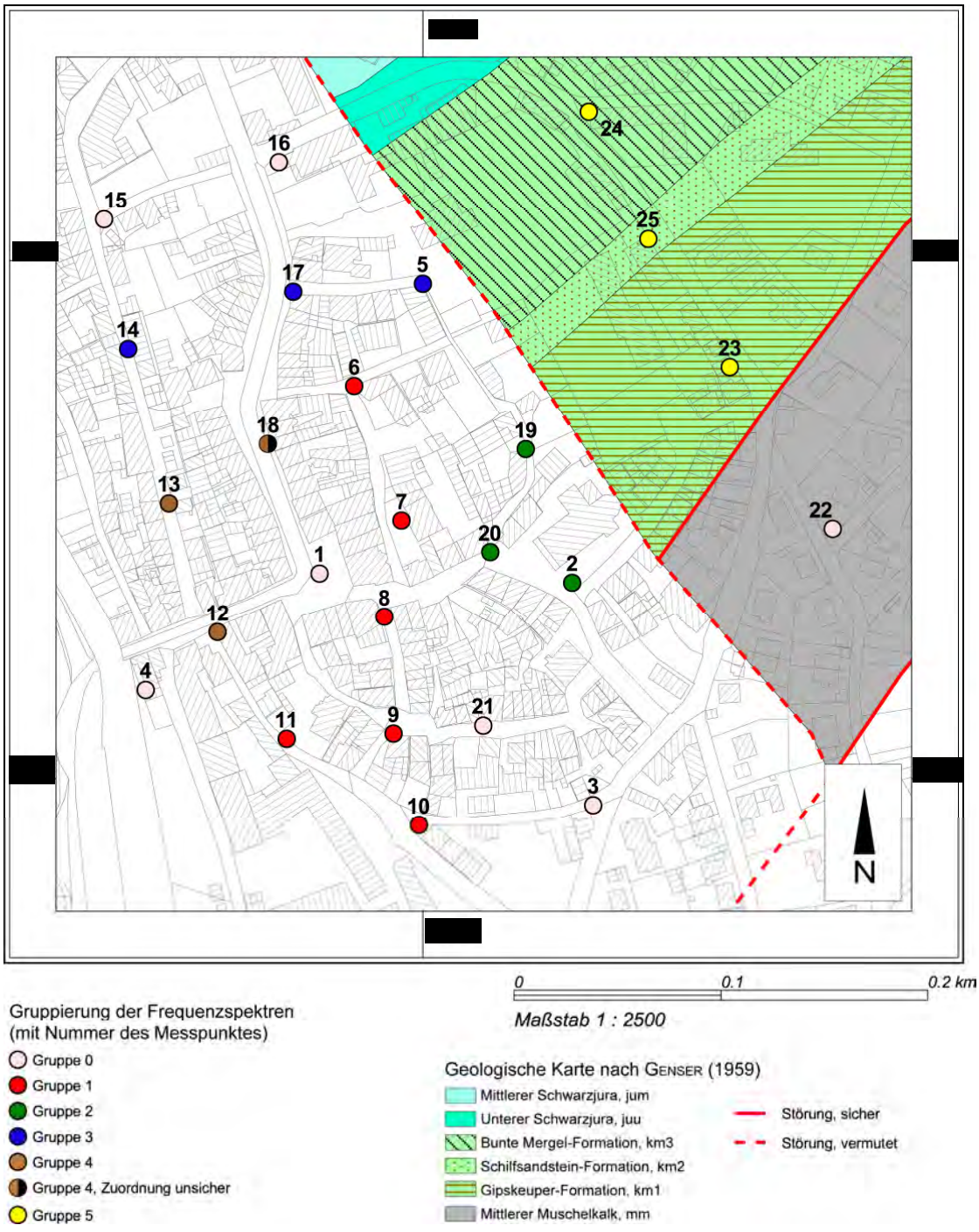


Abb. 7.2: Gruppierung der Frequenzspektren (Kartenhintergrund: Geologische Karte nach GENSER, 1959).

7.2.3 Seismische Erkundung

Neben den geologischen Informationen aus den beiden Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 (Kap. 5) und aus den Erdwärmesonden (Kap. 6) lieferte die seismische Erkundung entlang von Profilen wichtige Informationen über den strukturellen Aufbau des Untergrundes im Altstadtbereich von Staufen. Die Messungen wurden am 13. März 2009 (Profile 09STAUF-1 bis 09STAUF-3) und am 11. August 2009 (Profile 09STAUF-4 und 09STAUF-5) von der Fa. GEOEXPERT AG, Geophysikalische Untersuchungen, Schwerzenbach, Schweiz durchgeführt. Als seismische Erkundungsmethode wurde eine Kombination aus Ref*lex*ions- und der Ref*rakt*ionsseismik (Hybridseismik) eingesetzt.

Für die geologische Interpretation seismischer Daten sind Bohrungen eine unabdingbare Voraussetzung. Mit ihrer Hilfe können seismische Reflektoren und Reflektorenmuster zu Grenzflächen bzw. geologischen Einheiten zugeordnet werden. Da im unmittelbaren Umfeld des Erdwärmesondenfeldes lediglich aus den Schichtbeschreibungen der EWS 1 bis EWS 3 und von den südwestlich davon gelegenen Baugrundbohrungen des Bauvorhabens Hotel Kreuz-Post punktuelle Informationen über die Schichtenfolge vorlagen, war die Durchführung der seismischen Messungen erst zeitgleich mit dem Niederbringen der Erkundungsbohrungen Ziel führend.

7.2.3.1 Messverfahren

Bei den seismischen Messverfahren wird an der Erdoberfläche ein seismisches Quellensignal, ein Schlag oder eine kontrollierte Vibration erzeugt. In Staufen kam ein beschleunigtes Fallgewicht zum Einsatz (Abb. 7.3). Dieser Impuls breitet sich als seismische Welle allseitig im Untergrund aus. An den Grenzen zwischen Gesteinsschichten, die sich in ihrer Schallhärte (als Produkt aus Gesteinsdichte und seismischer Fortpflanzungsgeschwindigkeit) voneinander unterscheiden, werden die Wellenstrahlen gemäß optischer Gesetzmäßigkeiten zurückgeworfen (reflektiert) oder gebrochen (refraktiert). Die an die Oberfläche auftreffenden Signale werden mit Erschütterungsaufnehmern (sog. Geophonen) erfasst. Die Empfängeranordnungen sind bei der 2-dimensionalen Erkundung, wie sie in Staufen zur Anwendung kam, lineare Auslagen. Kennt man die gesteinsabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen, lässt sich aus ihrer Laufzeit im Untergrund die Tiefenlage der reflektierenden bzw. refraktierenden Grenzfläche ableiten.
Detaillierte Angaben zum Mess- und Auswerteverfahren sind in den beiden Berichten des Büros GEOEXPERT, Schwerzenbach vom 07. April 2009 (GEOEXPERT 2009 a) und vom 21. August 2009 (GEOEXPERT 2009 b) dokumentiert.

Abb. 7.3: Seismische Untergrunderkundung mit Hilfe eines beschleunigten Fallgewichts (Typ Fallgewicht VAKAIMPAKT & SAWD) als Energiequelle zur Auslösung des seismischen Impulses im Untergrund.

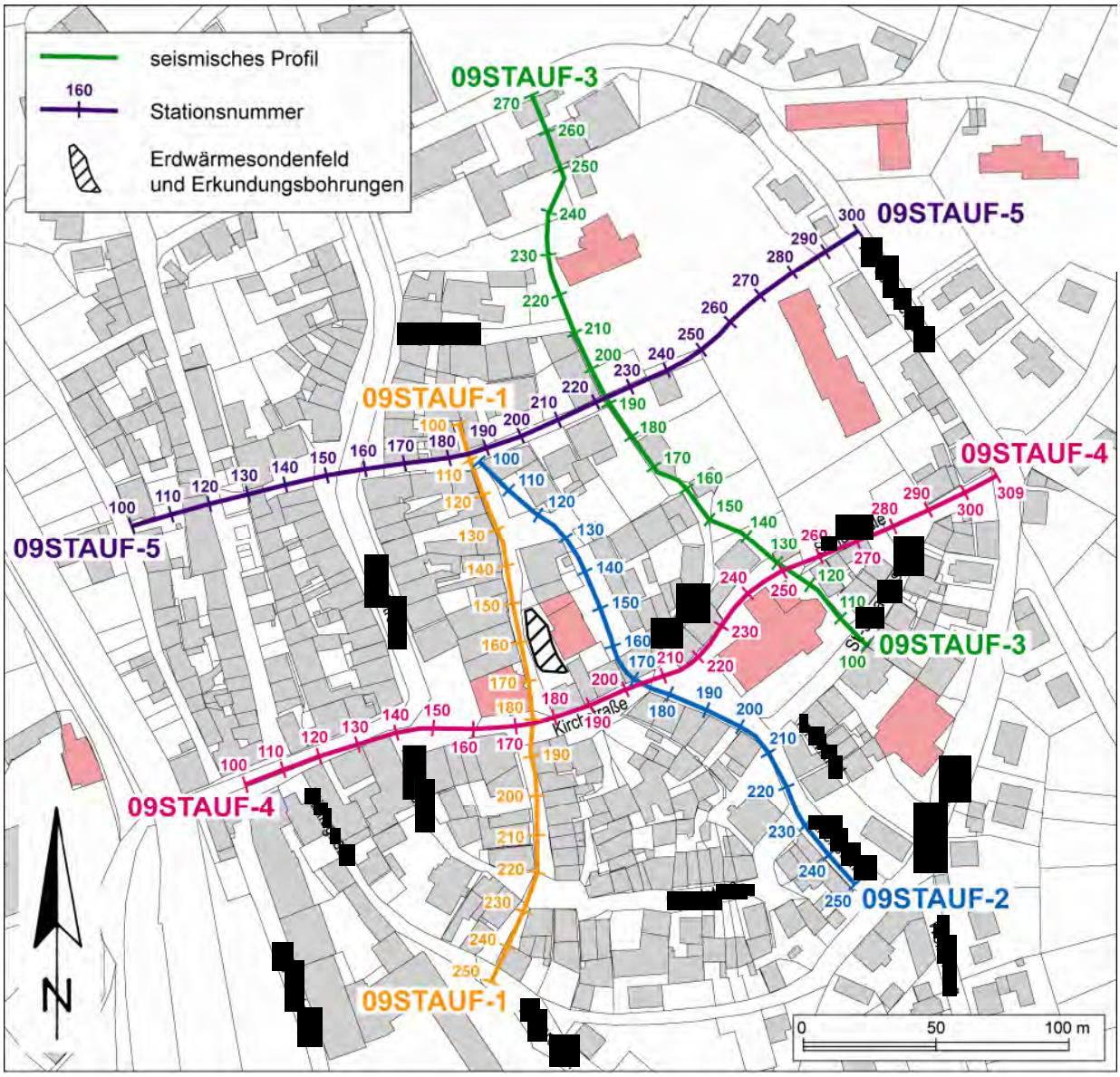


Abb. 7.4: Lageplan der reflexionsseismischen Profile 09STAUF-1 bis 09STAUF-5 in der Altstadt.

Die Lage der seismischen Profile ist in Abb. 7.4 dargestellt. Soweit es das Straßennetz zuließ, wurde der Verlauf der Profile möglichst an der Fall- (09STAUF-1 bis 09STAUF-3) bzw. Streichrichtung der Schichten (09STAUF-4 und 09STAUF-5) orientiert, die aus den geologischen Karten und den Bohrlochmessungen in der EKB 1 bzw. EKB 2 bekannt waren. Abb. 7.5 zeigt die Raumlage der miteinander vernetzten seismischen Profile als Grundlage für die dreidimensionale Rekonstruktion der Schichtlagerung. In Tab. 7.1 ist die Länge der jeweiligen Profile aufgelistet.

Tab. 7.1: Bezeichnung und Länge der seismischen Profile.

Profil	Länge [m]	Messung am
09STAU-**1**	217,0	13.03.2009
09STAU-**2**	225,0	13.03.2009
09STAU-**3**	252,0	13.03.2009
09STAU-**4**	314,5	11.08.2009
09STAU-**5**	304,5	11.08.2009
gesamt	**1313,0**	

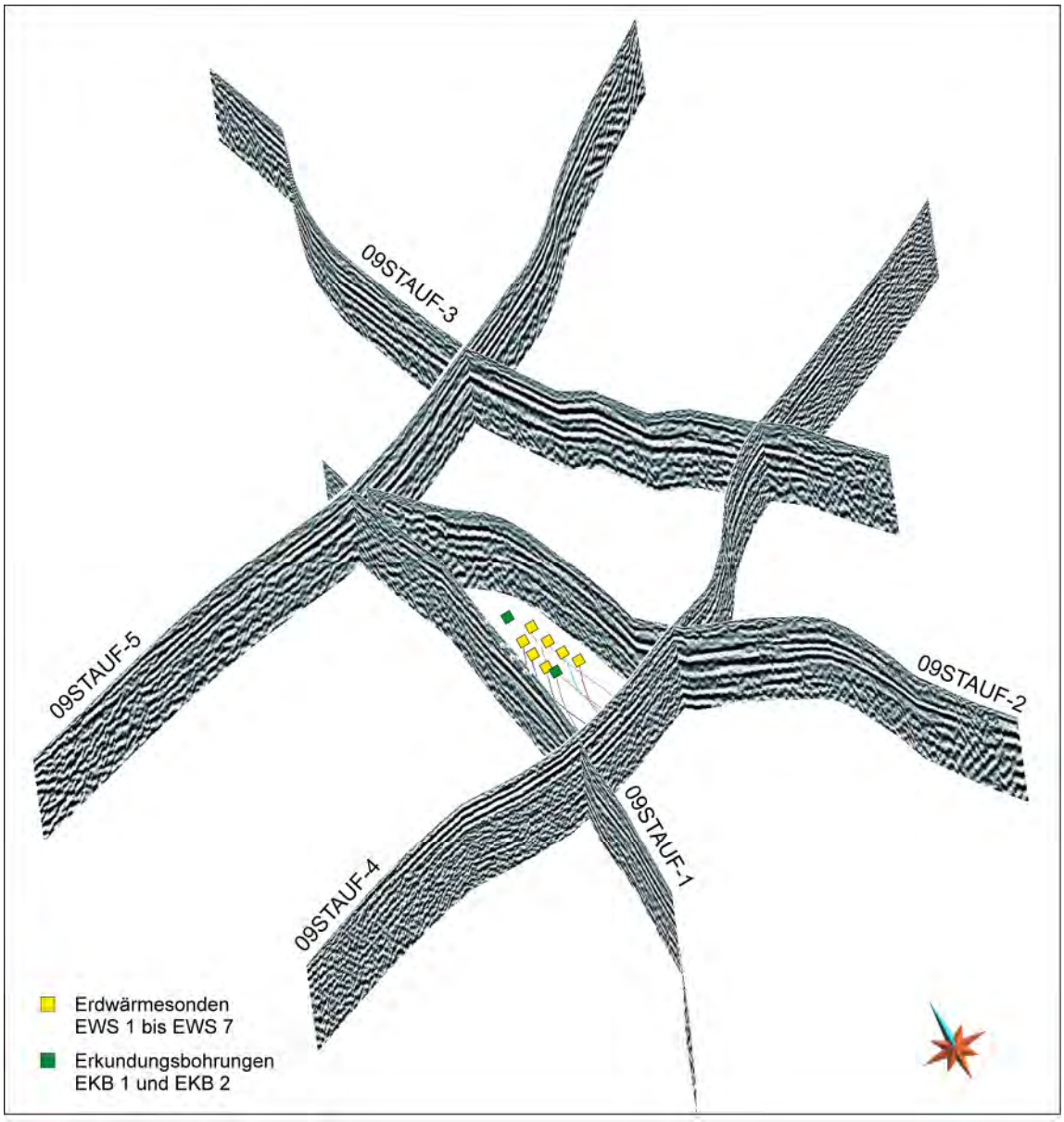


Abb. 7.5: Raumlage der hybridseimischen Profile mit Lage der Erdwärmesondenbohrungen, der Erkundungsbohrungen sowie mit den Bohrspuren.

7.2.3.2 Auswertung

Die Interpretation der seismischen Messungen setzte am seismischen Profil 09STAUF-1 an, welches unmittelbar westlich der beiden zur geologischen Interpretation dienenden Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2 liegt (Abb. 7.4). Davon ausgehend erfolgte die integrierte Interpretation aller Profile, wobei jedoch Inkonsistenzen nicht völlig ausgeschlossen werden konnten (z. B. Kreuzungspunkt der beiden Profile 09STAUF-2 und 09STAUF-4).

Die Tiefen der in den Bohrungen EKB 1 und EKB 2 erkannten geologischen Grenzflächen wurden auf das seismische Profil 09STAUF-1 projiziert. In der EKB 1, bei Stationsnummer 150 des Seismikprofils 1, liegt die Basis des Unterkeupers in ca. 20 - 21 m u. GOK. Dementsprechend wurden die vier parallel zueinander verlaufenden, in nordwestliche Richtung einfallenden Reflektoren gleicher Amplitude, Reflektivität und Signalstärke nördlich der Stationsnummer 150 dem Schichtpaket "Unterkeuper und oberer Abschnitt des Oberen Muschelkalks" zugeordnet.

In der EKB 2, die auf das Seismikprofil 1 bei Stationsnummer 167 projiziert wurde, fällt der markante Reflektor hoher Signalstärke in ca. 61,5 m u. GOK mit dem ersten Auftreten von massigem Anhydrit im Gipskeuper zusammen ("Anhydritreflektor").

Ausgehend von den beiden Referenzbohrungen wurden mit der Modellierungssoftware GoCAD in einer vernetzenden Interpretation der fünf Seismikprofile der "Anhydritreflektor" und das Reflexionsmuster des Schichtpaketes "Unterkeuper und oberer Abschnitt des Oberen Muschelkalkes" identifiziert und möglichst konsistent in eine räumliche Beziehung zueinander gebracht. Das Ergebnis dieser Auswertung wurde in den interpretierten Seismikprofile (Abb. 7.6 bis 7.8), der abgedeckten geologischen Karte (Abb. 7.9), dem Isolinienplan des Anhydritreflektors (Abb. 7.10) sowie in dem schematisierten geologischen Profil durch das Hebungszentrum Staufen (Abb. 7.11) dargestellt.

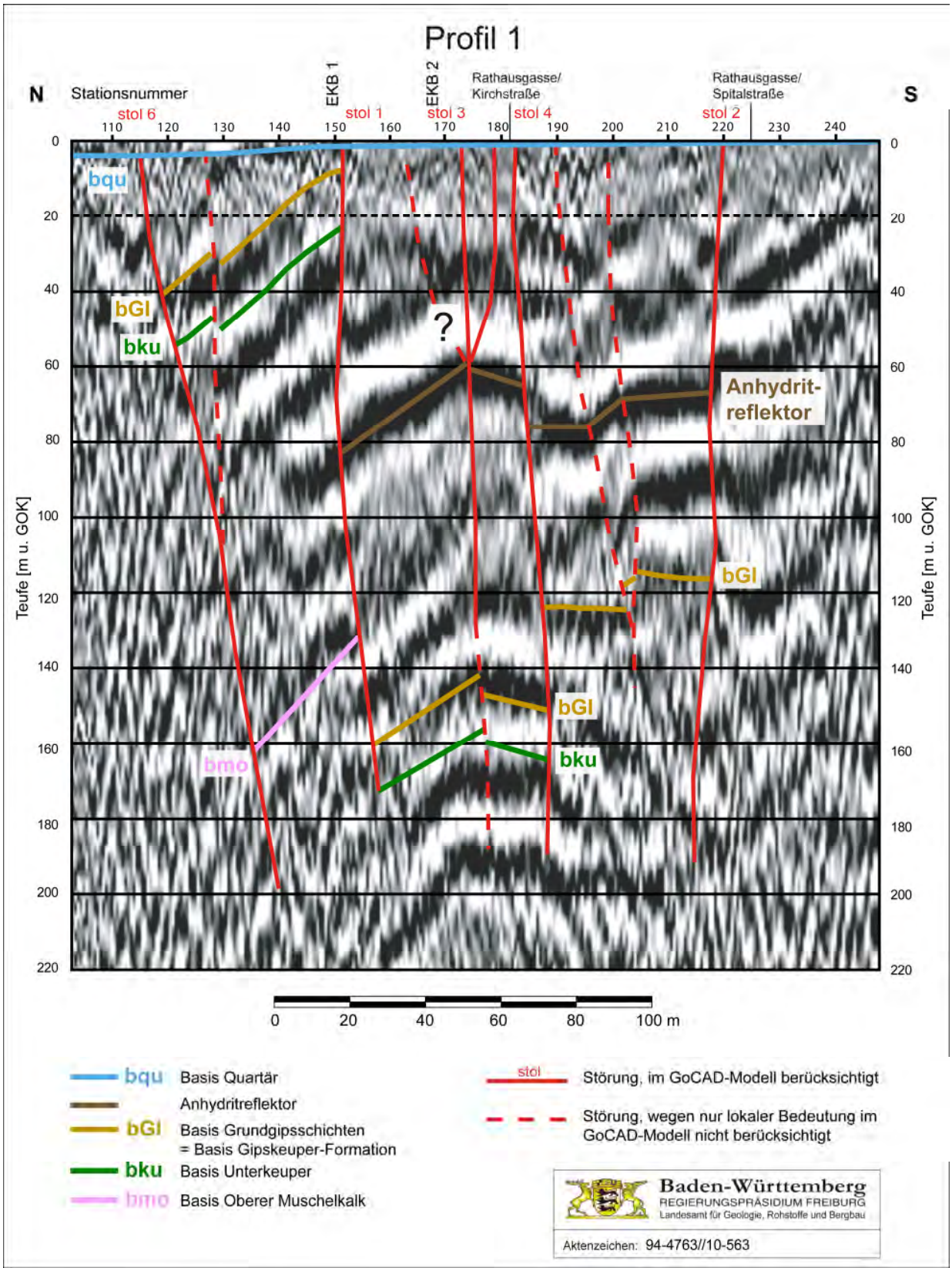


Abb. 7.6: Reflexionsseismisches Tiefenprofil 09STAUF-1.

Im reflexionsseismischen Profil 09STAUF-1 (Abb. 7.6) ist die Störung stol 1 zwischen den beiden Bohrungen EKB 1 und EKB 2 durch die Bohrbefunde belegt und trennt mit einem vertikalen Versatzbetrag von ca. 120 m die nordwestliche, aus Unterkeuper und Oberem Muschelkalk aufgebaute Hochscholle von der südöstlich angrenzenden Tiefscholle aus Schilfsandstein, Gipskeuper, Unterkeuper und Oberem Muschelkalk ("Grabenscholle", vgl. auch Abb. 7.11, Abb. 7.12, Abb. 7.13). Diese "Grabenscholle" wird im Südosten durch die Störung stol 2 begrenzt. Aufgrund des seismischen Musters und der gesamtgeologischen Situation werden die Gesteine auf der südöstlich daran anschließenden Hochscholle dem Unterkeuper/Oberen Muschelkalk zugeordnet, jedoch fehlen dort Bohrungen. Die Grabenstruktur kann auch im seismischen Profil 09STAUF-2 identifiziert werden (Abb. 7.7).

Im Seismikprofil 09STAUF-3 (Abb. 7.8) fehlt die aus Unterkeuper/Oberem Muschelkalk bestehende Hochscholle im Nordwesten der Störung stol 6. Dort lässt sich der Anhydritreflektor nur nordwestlich der Störung stol 2 bis zur Störung stol 6 weiterverfolgen. In Verbindung mit der Interpretation des Seismikprofils 09STAUF-05 wird angenommen, dass der Bereich zwischen stol 2 und stol 6 aus Gesteinen des Mittelkeuper aufgebaut ist und an der Querstörung stol 2 mit einem Versatzbetrag von mehreren Zehner Metern an die südwöstlich anschließende Scholle aus Unterkeuper/ Oberem Muschelkalk grenzt (Abb. 7.8). Bohrungen fehlen auf diesen Schollen. An der Störung stol 6 schließen im Nordwesten vermutlich Gesteine des Unterjura an.

Die zentrale Grabenscholle ist intern kleinräumig in eine Südwest – Nordost streichende Sattel- und Muldenstruktur sowie durch weitere, annähernd parallel dazu verlaufende Störungen gegliedert (Abb. 7.9). Dies zeichnet sich in den beiden NW-SO verlaufenden Seismikprofilen 09STAUF-1 und 09-STAUF-2 (Abb. 7.6 und 7.7) ab. In der Sattelachse verläuft die so genannte " Scheitelstörung" (stol 3 in Abb. 7.6 bis 7.8, Abb. 7.10 bis Abb. 7.12). Westlich davon fallen die Schichten in nordwestliche Richtung ein, östlich davon bis etwa zur Stationsnummer 184 (09STAUF-1) bzw. 190 (09STAUF-2) in südöstliche Richtung. Daran schließt im Profil 09STAUF-1 die südöstliche Muldenflanke an, im Profil 09STAUF-2 verläuft die Störung stol 2 in der Muldenachse und trennt die Grabenscholle im Westen von der Unterkeuper/Oberer Muschelkalk – Scholle im Osten. Im Seismik-Profil 09STAUF-3 ist die Muldenstuktur nicht mehr vorhanden.

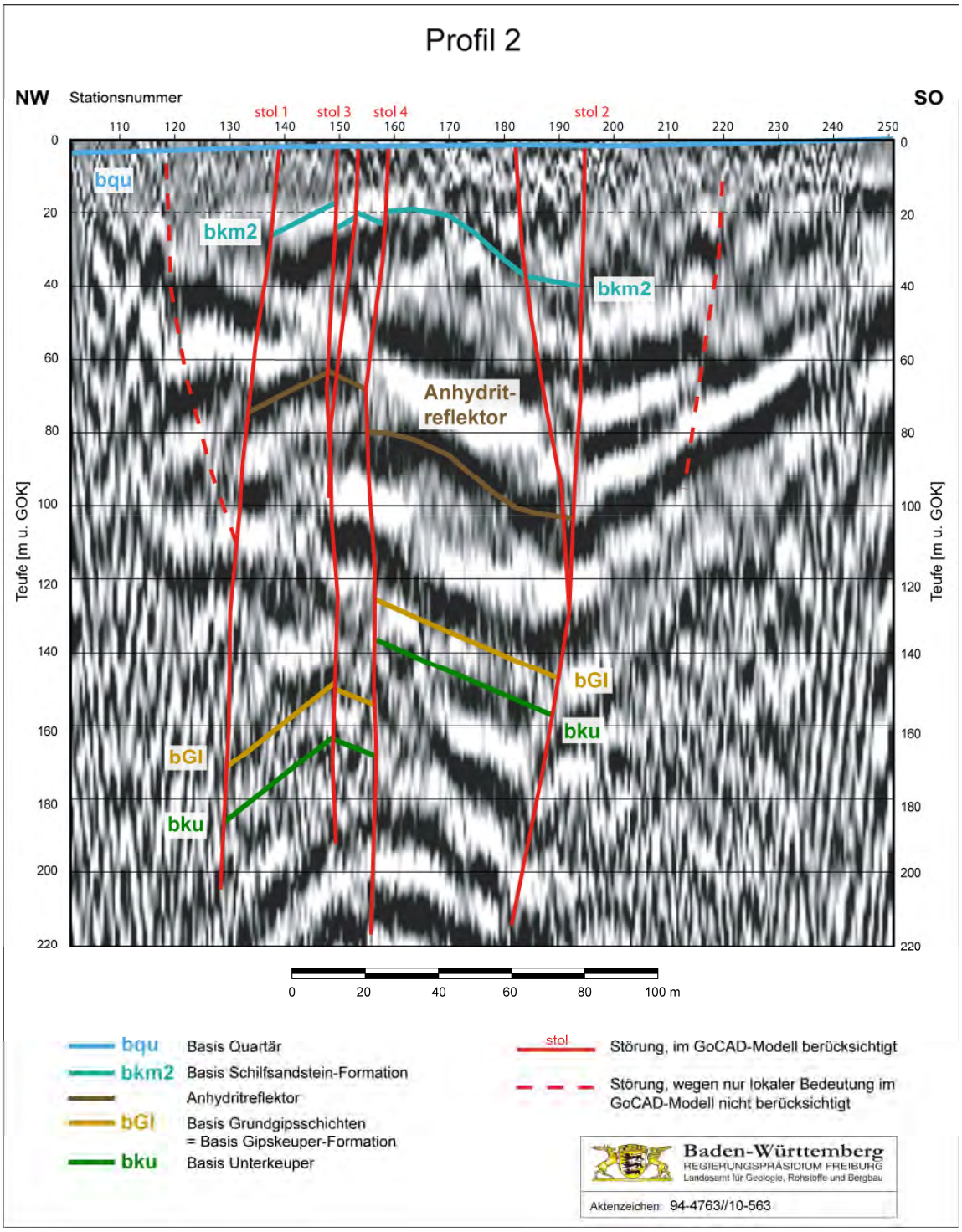


Abb. 7.7: Reflexionsseismisches Tiefenprofil 09STAUF-2.

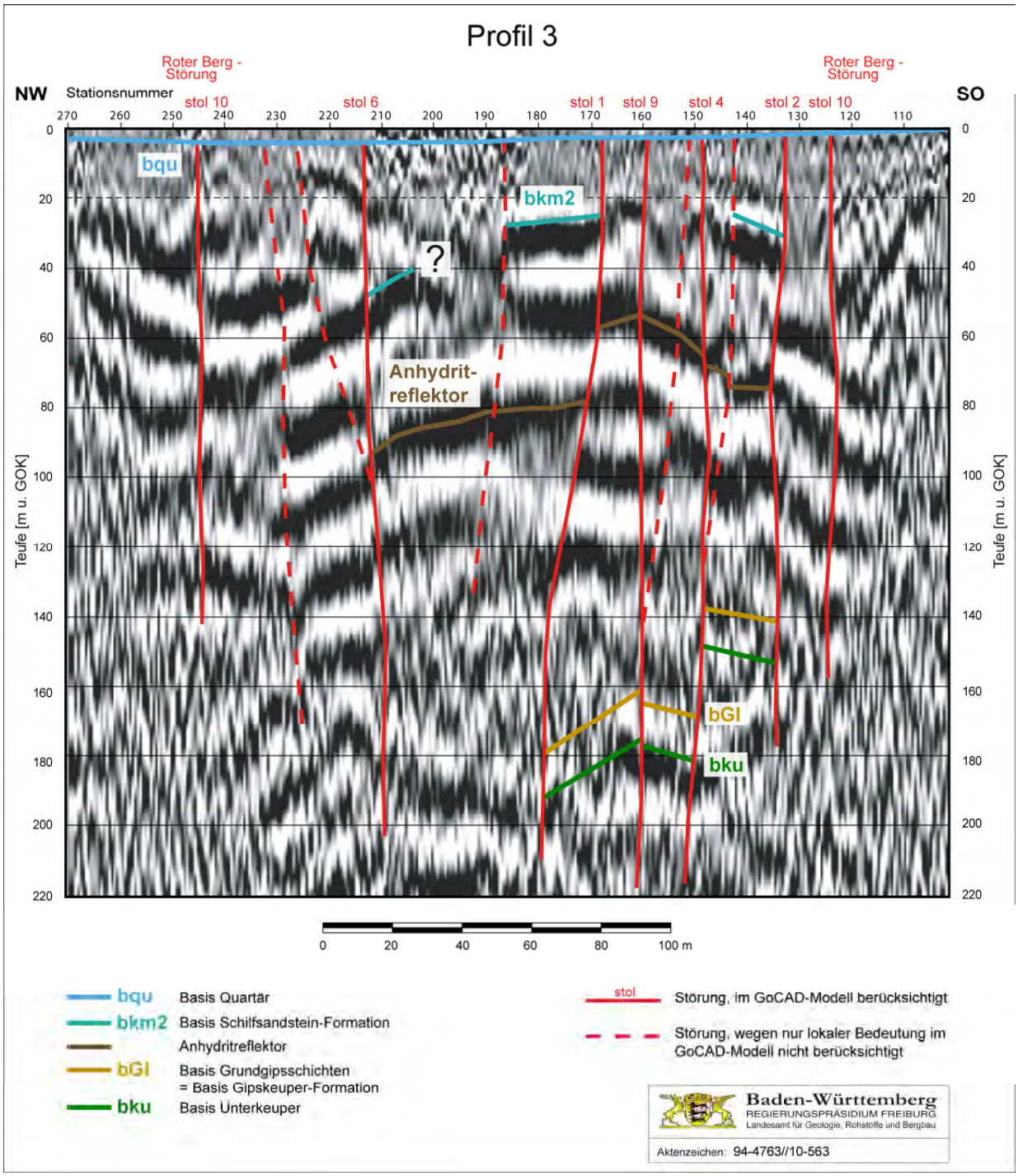


Abb. 7.8: Reflexionsseismisches Tiefenprofil 09STAUF-3.

7.3 Geologisches Untergrundmodell

Das geologische Untergrundmodell bildet die Ergebnisse der Erkundungsmaßnahmen möglichst plausibel und konsistent ab und stellt die Gesamtinterpretation aller Einzelbefunde dar. Aufgrund der komplizierten geologischen und tektonischen Verhältnisse und wegen der strikten Beschränkung auf Erkundungsmaßnahmen, die zur Überprüfung der Arbeitshypothese und für die Sanierungsplanung unbedingt erforderlich waren, gibt es jedoch mehrere Bereiche, in denen die derzeitige Datenbasis verschiedene Interpretationen zulässt. Dargestellt wird die Interpretation, die auf der vorhandenen Datengrundlage am plausibelsten erscheint.

Das geologische Modell muss gegebenenfalls bei neu auftretenden Fragestellungen durch weitergehende Untersuchungen überprüft bzw. verfeinert werden. Dies kann z.B. erforderlich werden, falls weitere, über die derzeitigen Maßnahmen hinaus gehende Sicherungs- oder Sanierungsverfahren mit speziellen Fragestellungen an den Untergrundaufbau geplant werden müssen.

Der Untergrund im Bereich des Erdwärmesondenfeldes in der Altstadt von Staufen besteht aus einem kleinräumigen Schollenmosaik (vgl. Kap. 7.2, Abb. 7.9 bis Abb. 7.11). Die Störungen streichen hauptsächlich in Nordost-Südwest Richtung und senkrecht dazu in Nordwest –Südostrichtung. Eine bedeutende in Nordwest-Südost - Richtung verlaufende Struktur nordöstlich des EWS-Feldes ist die "Roter-Berg-Störung", deren vermuteter Verlauf nach GENSER (1959) vom Roten Berg kommend in nordwestliche Richtung bis zum Staufener Schlossberg zieht. Sie konnte auch im reflexionssseimischen Profil 09STAUF-3 (Abb. 7.8) nachvollzogen werden. Nördlich dieser Störung fällt das aus Mittlerem Muschelkalk bis Jura bestehende mesozoische Schichtpaket von der Schwarzwaldrandverwerfung im Osten bis zum Staufener Schloßberg mit ca. 40° bis 45° nach Nordwesten ein.

Südwestlich der vermuteten "Roter Berg Störung" bildet unter dem Sondenfeld beim Rathaus eine Keuperscholle eine durch Schichtverbiegungen und parallel zur Hauptverwerfung Nordost-Südwest streichende Störungen kleinräumig gegliederte Grabenscholle (Abb. 7.9 bis 7.11). An diese Scholle grenzen im Bereich der beiden seismischen Profile 09STAUF-1 und 09STAUF-2 im Südosten und Nordwesten Hochschollen aus Unterkeuper/Oberem Muschelkalk an. Die geologische Situation wird in einem schematisierten geologischen Schnitt durch das Hebungszentrum verdeutlicht (Abb. 7.11).

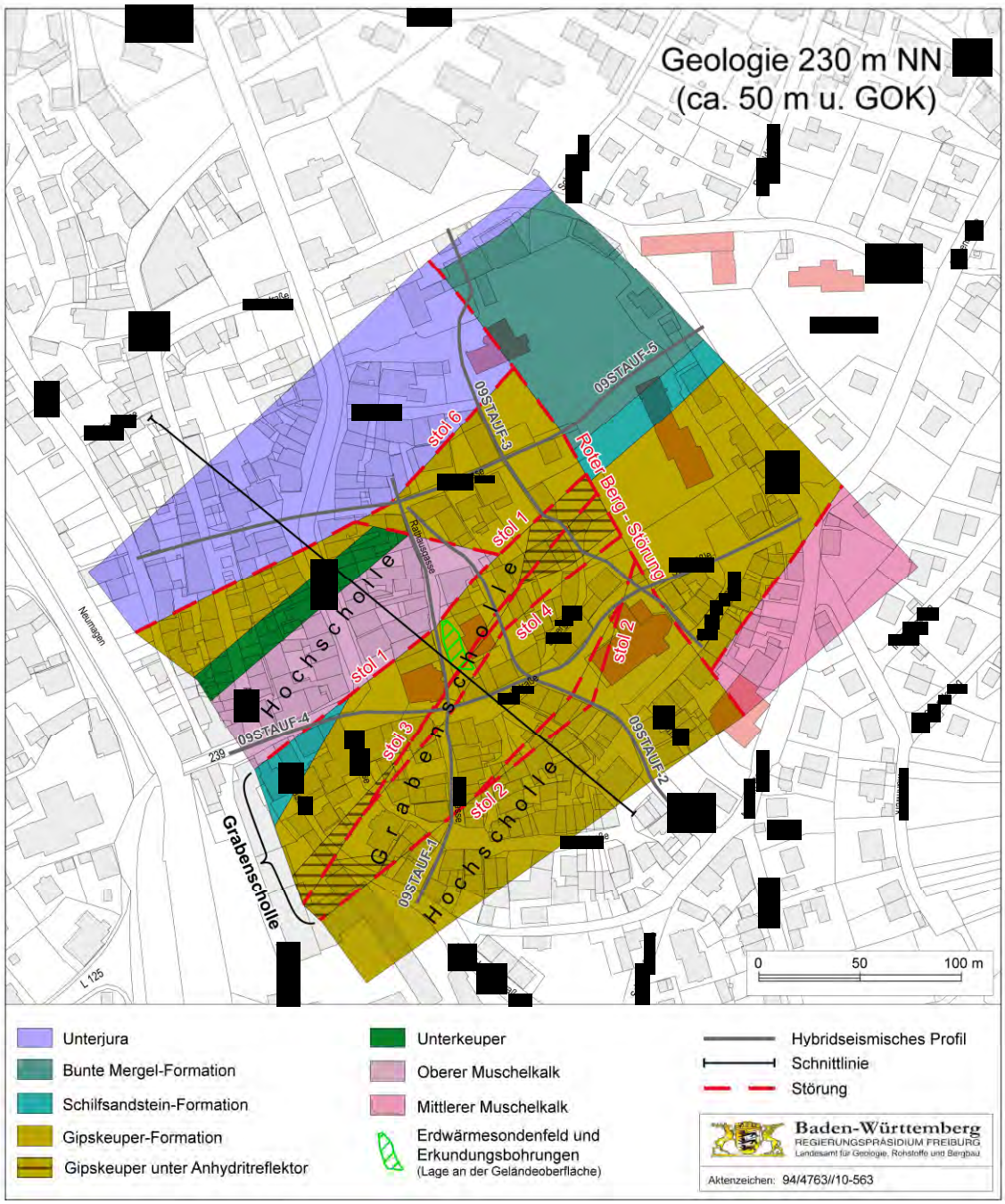


Abb. 7.9: Abgedeckte geologische Karte der Altstadt Staufen (Bezugsniveau ca. 230 m NN bzw. ca. 50 m u. GOK).

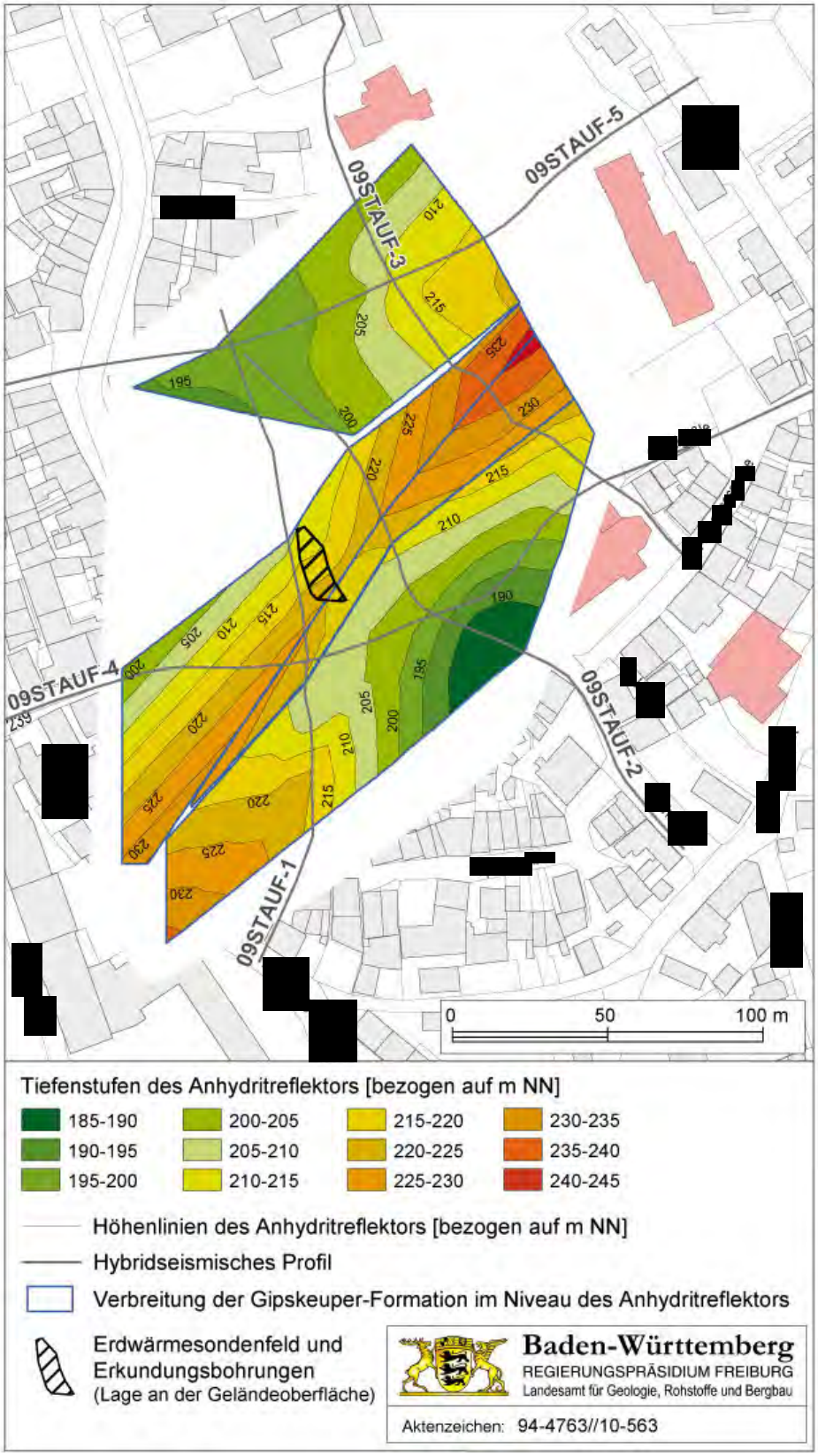


Abb. 7.10: Höhenlinienplan des Anhydritreflektors (bezogen auf m NN).

Von besonderer Bedeutung für das Verständnis der Prozesse, die zur Ausbildung und Form der Hebungsfigur führen, ist die Sattelstruktur auf der Grabenscholle und die auf ihrer Längsachse verlaufende, so genannte Scheitelstörung (stol 3, Abb. 7.9 bis Abb. 7.11). Gemeinsam mit einer Parallelstörung (stol 4) gliedert sie die Grabenscholle in eine westliche, zentrale und östliche Teilscholle. Entlang der Scheitelstörung konzentrieren sich sowohl die stärksten Risse an der Geländeoberfläche, als auch in der Bausubstanz (Kartierung durch Büro für Baukonstruktion, BfB, Karlsruhe, Abb. 7.12). Die am stärksten geschädigten Gebäude liegen auf dieser Struktur. Die Schichtlagerung in der Keuperscholle ist in Abb. 7.10 durch die Isolinien des Anhydritreflektors, bezogen auf m NN, dargestellt.

Die Erkundungsbohrung EKB 1 liegt auf der aus Unterkeuper und Oberem Muschelkalk aufgebauten Hochscholle nordwestlich der Grabenscholle, die Erkundungsbohrung EKB 2 auf der westlichen Teilscholle der Grabenscholle. Beide Schollen fallen mit ca. 42° in nordwestliche Richtung (320°) ein. Die Bohransatzpunkte der Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 6 liegen ebenfalls auf der westlichen Teilscholle der Grabenscholle, die Bohrung der EWS 7 setzt dagegen auf der zentralen Teilscholle an. Aufgrund der starken Abweichungen der Erdwärmesondenbohrungen in südöstliche Richtung liegen die Endpunkte aller Erdwärmesonden jedoch eindeutig auf der östlichen Teilscholle der Grabenscholle. Dabei queren die EWS-Bohrungen die so genannte Scheitelstörung (stol 3 in Abb. 7.11) und die östlich davon liegende Störung stol 4 (Abb. 7.14).

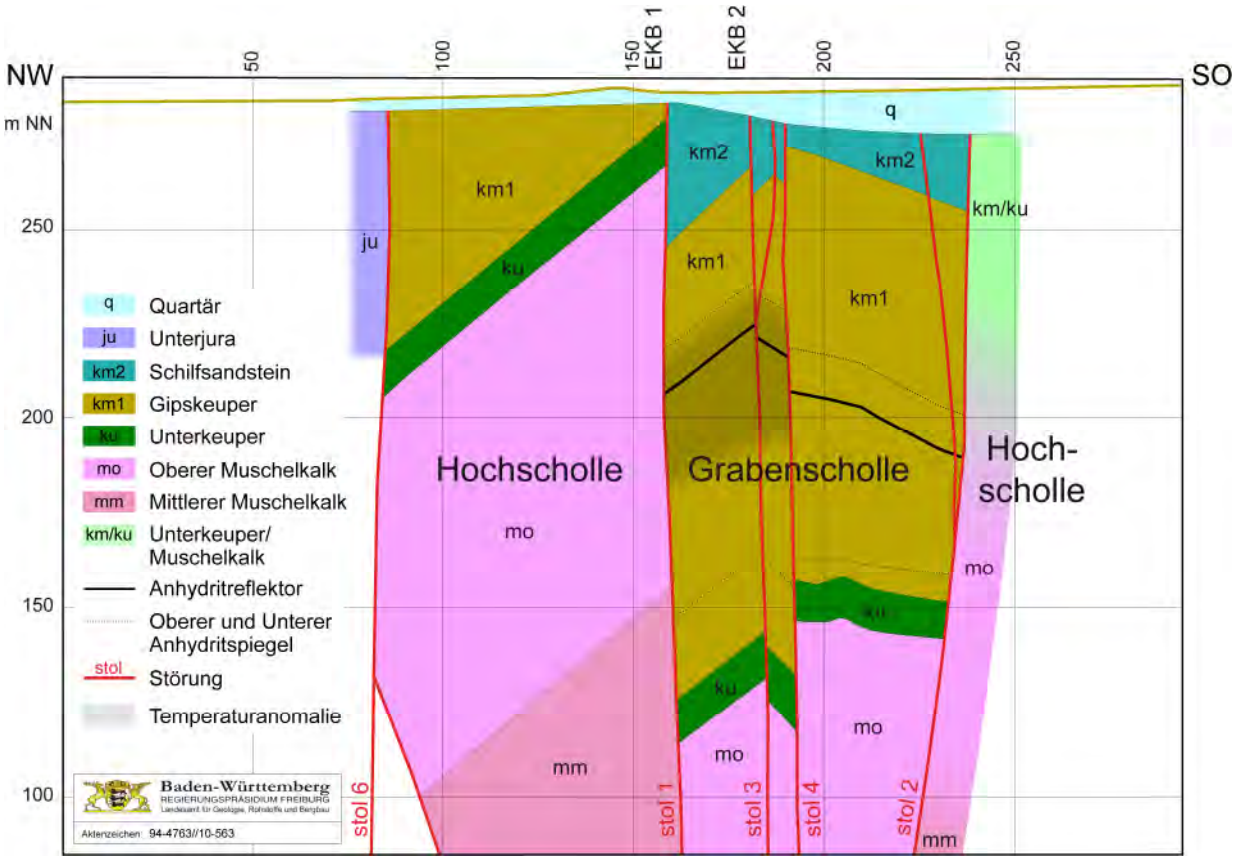


Abb. 7.11: Schematischer geologischer Schnitt durch das Hebungszentrum Staufen, Schnittverlauf siehe Abb. 7.9. Die Bohransatzpunkte der EKB 1 und EKB 2 wurden auf die Schnittlinie projiziert.

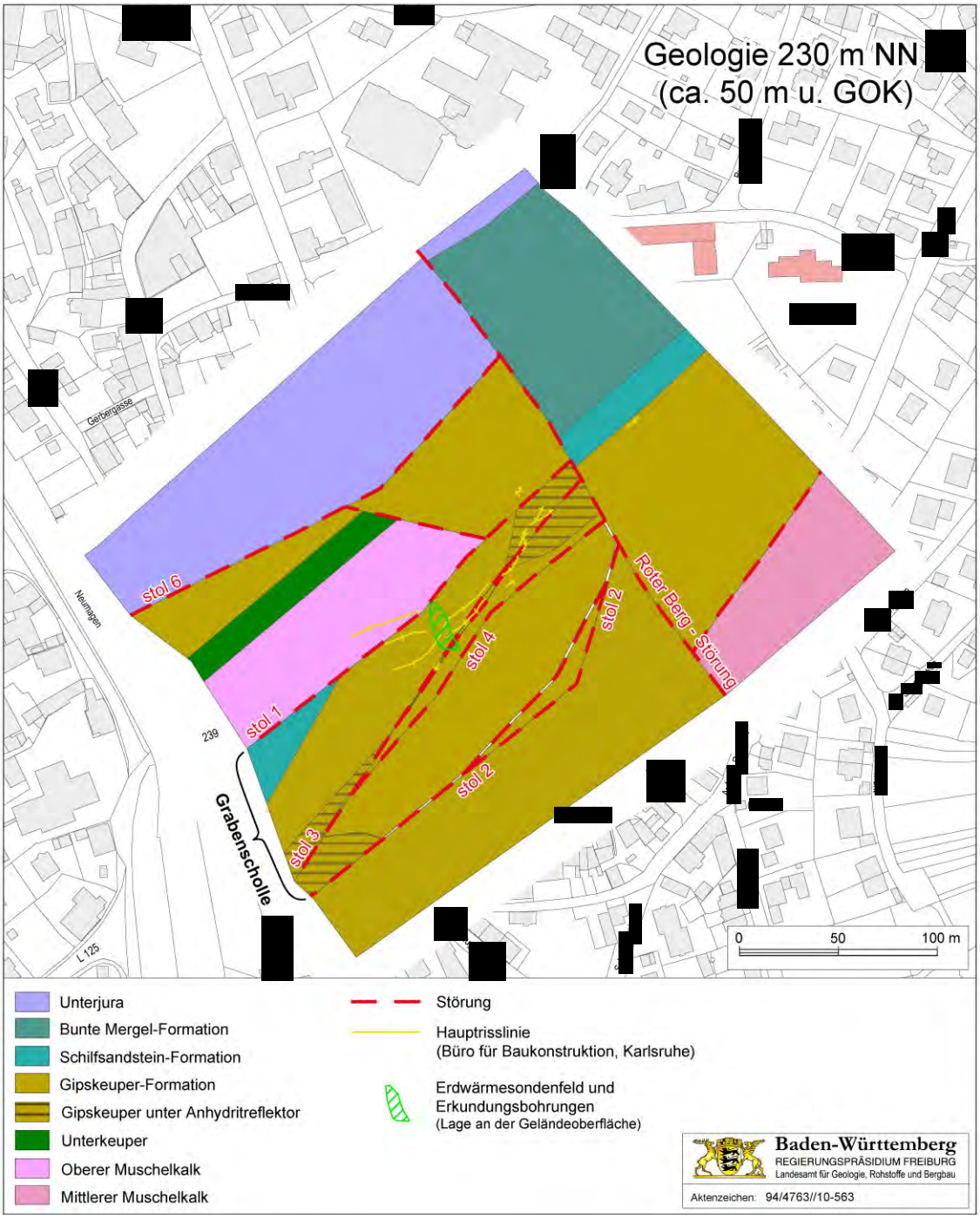


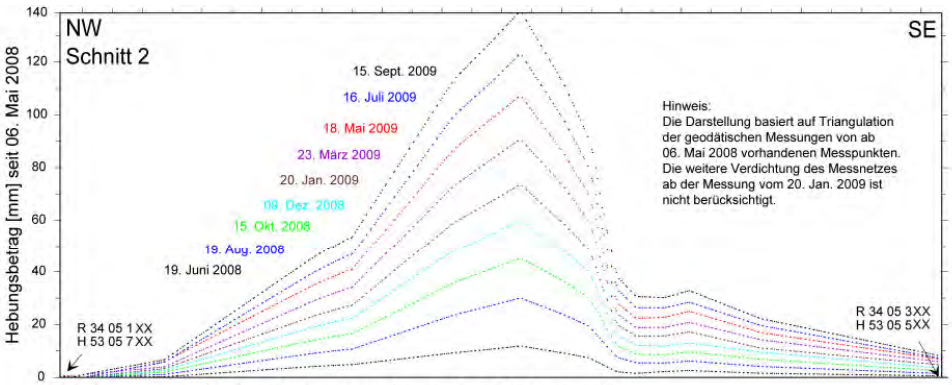
Abb. 7.12: Abgedeckte geologische Karte der Altstadt von Staufen (Bezugsniveau ca. 230 m NN bzw. ca. 50 m u. GOK) mit den störungsparallel verlaufenden Hauptrisslinien (Bezugsniveau: Geländeoberfläche, nach Büro für Baukonstruktion, BfB, Karlsruhe).

Auf der Grabenscholle ist der vertikale Abstand zwischen dem Anhydritreflektor und der Basis der Grundgipsschichten auf der östlichen Teilscholle deutlich geringer als auf der westlichen und zentralen Teilscholle (Abb. 7.11). Dies wird darauf zurückgeführt, dass der Anhydritreflektor auf den Teilschollen in einem unterschiedlichen stratigraphischen Niveau liegt.

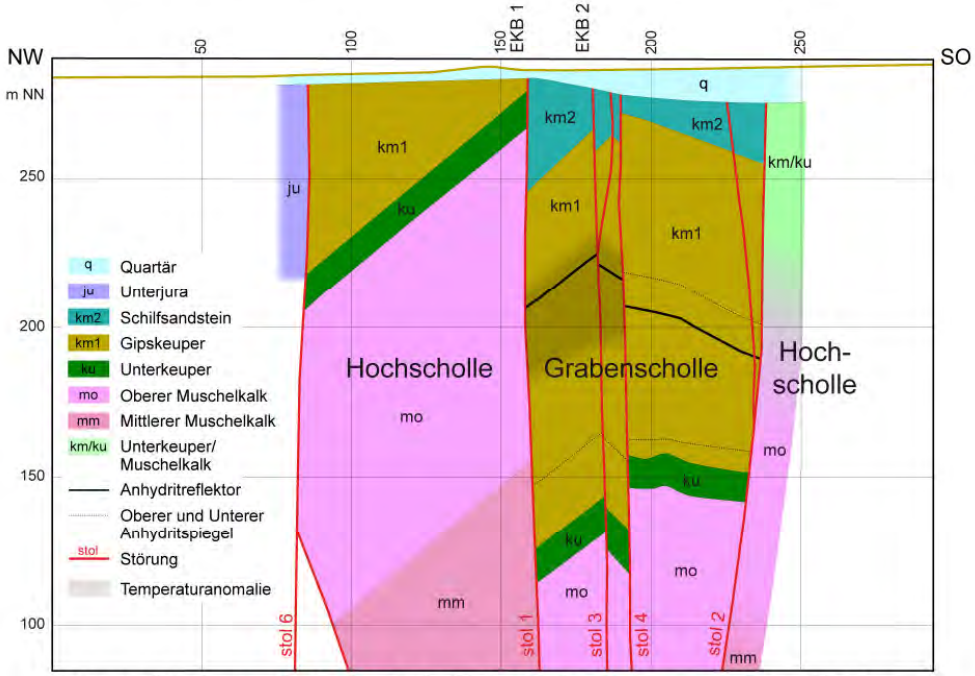
Der in Quellung befindliche, Anhydrit führende Abschnitt des Gipskeupers (entspricht der Temperaturanomalie) liegt auf der westlichen und zentralen Teilscholle in einer Tiefe zwischen ca. 60 und 90 m u. GOK (Abb. 7.11). Für Quellungsprozesse im Anhydrit führenden Gipskeuperabschnitt auf der östlichen Teilscholle der Grabenscholle (östlich von stol 4 in Abb. 7.11) gibt es keine Hinweise.

Probleme ergaben sich bei der geologischen Modellierung im Bereich der westlichen Teilscholle der Grabenscholle, die von den Störungen stol 1 und stol 3 begrenzt wird (Abb. 7.6). Nach den Bohrlochmessungen in der EKB 2 fallen die Schichten auf dieser Scholle mit ca. 42° nach NNW ist ein. Während sich die Bohrergebnisse der EKB 2 und der EWS 2 am Beispiel des Referenzhorizonts Basis Schilfsandstein-Formation (km2) gut in das Gesamtbild des geologischen Modells einfügen, liegt die Basis km2 in der EWS 1 fünf Meter höher als die modellierte Fläche. Diese Diskrepanz beruht wahrscheinlich auf einem Versatz an einer wegen ihrer nur lokalen Bedeutung nicht in das GoCAD-Modell integrierten Störung (in Abb. 7.6 strichliert). Eine weitere Erklärung wären möglicherweise geringfügige Lageungenauigkeiten der seismischen Stationen oder Probenahmeeffekte in der EWS 1 und daraus resultierende Abweichungen in der Tiefenlage der Basis km2.

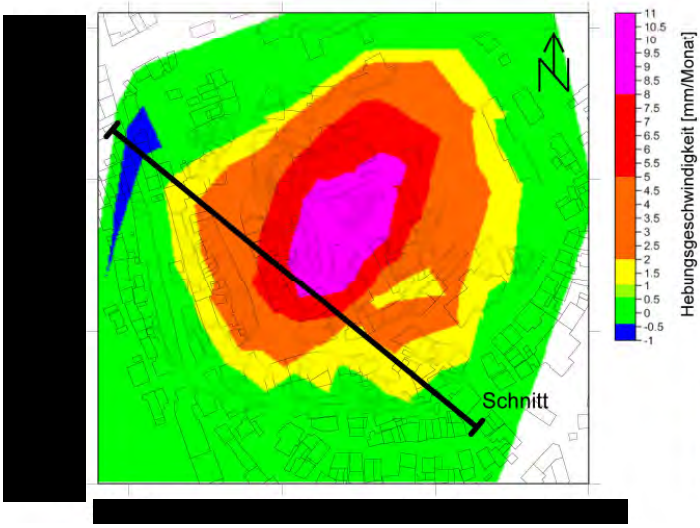
In Abb. 7.13 wird das schematische geologische Profil mit der Hebungsfigur im Hebungszentrum in Bezug gesetzt. Die Abbildung verdeutlicht, dass das Hebungszentrum nicht unmittelbar vertikal über dem in Quellung befindlichen Gebirgsbereich liegt. Entsprechend dem Schichteinfallen wirkt der Quelldruck auf der westlichen Teilscholle in nordwestliche und auf der zentralen Teilscholle in südöstliche Richtung. Dies führt zu der an der Geländeoberfläche beobachteten Hebungsfigur. Der Bereich maximaler Hebung weist im Bezug zur Lage des Hebungsbereiches im Untergrund auf der westlichen Teilscholle einen Versatz in nordwestliche Richtung auf. Die Quellhebung in der zentralen Teilscholle führt dagegen zur Ausbildung des Hebungsbereiches mit kleineren Hebungsraten südöstlich vom Hebungsmaximum (Bereich kath. Kirche).



Hebungsprofil durch das Zentrum der Hebungsfigur



Schematisierter geologischer Schnitt durch das Hebungszentrum Staufen



Hebungsfigur und
Verlauf des schematischen
geologischen Profilschnitts

Hebungsgeschwindigkeit
23. März bis 18. Mai 2009

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Abb. 7.13: Hebungsfigur, schematisiertes geologisches Profil durch das Hebungszentrum und Hebungsprofil durch das Zentrum der Hebungsfigur Staufen.

7.4 Hydrogeologisches Modell

Bedingt durch den komplexen geologischen Aufbau des Untergrundes als in kleinräumiges Schollenmosaik stellt das geologische Modell ebenso wie das hydrogeologische Modell eine möglichst plausible und konsistente, jedoch nicht in allen Punkten völlig widerspruchsfreie Interpretation der Befunde dar. So liegen z.B. wegen fehlender stockwerksbezogener Grundwassermessstellen auf den verschiedenen Schollen keine ausreichenden Informationen über die hydraulische Wirkung der die Schollen begrenzenden Störungen vor. Aufgrund verschiedener hydrochemischer und isotopenhydrologischer Befunde sowie fehlender Hinweise auf hydraulische Ränder während der Pumpversuche bzw. des Dauerabsenkbetriebes wird davon ausgegangen, dass die Störungen im Abschnitt Unterkeuper/Oberer Muschelkalk keine hydraulisch wirksamen Begrenzungen der einzelnen Schollen darstellen. Zu einer Überprüfung dieser Annahme wären weitere, in den unterschiedlichen Grundwasserstockwerken getrennt voneinander ausgebaute Grundwassermessstellen erforderlich.

Quartär

Die Basis der quartären sandigen Kiese liegt in der Erkundungsbohrung EKB 2 bei 281,50 m NN. Im quartären Grundwasserleiter wurde im Bereich des Erdwärmesondenfeldes kein Grundwasser angetroffen. Allerdings ist aus umliegenden Bohrungen bekannt, dass die Neumagen-Schotter an anderer Stelle im Stadtgebiet Grundwasser führen (z.B. Innenhof der Fa. Schladerer, Brauchwasserbrunnen der Fa. Schladerer, Brauchwasserbrunnen der Fa. INEOS).

Festgesteinsuntergrund

Im Festgesteinsuntergrund wurden in der Erkundungsbohrung EKB 2 vier Grundwasserstockwerke in folgenden geologischen Einheiten angetroffen (vgl. Kap. 3.5):

- Schilfsandstein-Formation (km2)
- Gipskeuper-Formation (Gipskarst, km1)
- Unterkeuper (ku)
- Oberer Muschelkalk (mo).

Die vier Grundwasserstockwerke werden durch gering durchlässige Gesteinsschichten voneinander getrennt, in denen kein oder nur ein sehr untergeordneter Grundwasserfluss möglich ist. Die gering durchlässige Deckschicht über dem Grundwasserstockwerk im Schilfsandstein wird von feinsandigen Tonsteinen (in der EKB 2 oberhalb 11,50 m u. GOK), die des Gipskarststockwerkes im Gipskeuper von Tonsteinen,

Tonmergelsteinen und Gipsauslaugungsresiduen (in der EKB 2 oberhalb 26,40 m u. GOK), die des Unterkeuperstockwerkes von Gipsauslaugungsrückstände und tonigen Dolomitsteinen (in der EKB 2 oberhalb 143,95 m u. GOK) und die des Oberen Muschelkalkes von Dolomitsteinen mit Tonsteinlagen (in der EKB 2 oberhalb 154,80 m u. GOK) gebildet.

Die Grundwasserstockwerke unterscheiden sich hydraulisch und hydrochemisch deutlich von einander. Dies zeigen die Ergebnisse der in der EKB 2 durchgeführten Pumpversuche (vgl. Kap. 5.3.2.1) und die hydrochemischen und isotopenhydrologischen Messungen (vgl. Kap. 5.3.3).

Der Druckwasserspiegel im Schilfsandstein der EKB 2 liegt bei ca. 1,60 m unter GOK und der Druckwasserspiegel im Gipskarst liegt bei ca. 3,30 m unter GOK. In den darunter folgenden Stockwerken nehmen die hydraulischen Potenziale mit der Tiefe zu, im Unterkeuper bei ca. 1,80 m über GOK und der im Oberen Muschelkalk bei ca. 2,10 m über GOK.

Gesicherte Aussagen über das hydraulische Gefälle in den vier Grundwasserstockwerken sowie über die Abströmrichtung der Grundwässer sind wegen fehlender grundwasserstockwerksbezogen ausgebauter Grundwassermessstellen nicht möglich. Aufgrund der allgemeinen hydrogeologischen Situation wird davon ausgegangen, dass die Grundwasserfließrichtung in westliche Richtung zum Rhein hin ausgerichtet ist und dass das Grundwasser an Störungen aufsteigt, um schließlich in den quartären Kiesgrundwasserleiter überzutreten.

Die in den jeweiligen Stockwerken durchgeführten Pumpversuche lieferten keine Hinweise auf hydraulisch wirksame Ränder, weder als Anreicherungs- noch als Staugrenze (vgl. Kap. 5.5.2.1). Gleiches gilt auch für die über eine Dauer von 13 Tagen (04. November bis 17. November 2009) bzw. seit dem 18. Dezember 2009, 16:20 Uhr neun Wochen laufenden Dauerabsenkmaßnahmen in der Erkundungsbohrung EKB 2 (vgl. Kap. 8.1). Beim Pumpversuch in der (km1) der EKB 2 reagierte der Grundwasserstand in der im Unterkeuper (ku) der Nachbarscholle ausgebauten Grundwassermessstelle EKB 1 deutlich (vgl. Kap. 5.5.2.1, Abb. 5.28). Allerdings gibt es hydrochemisch und isotopisch keine Anzeichen für einen Beizug von Grundwasser aus diesem Grundwasservorkommen, so dass es sich ausschließlich um eine Druckreaktion handeln dürfte.

Hydrochemisch und isotopenhydrologisch unterscheiden sich die Wässer in den vier Grundwasserstockwerken der EKB 2 deutlich voneinander (vgl. Kap. 5.5.3), wobei die Grundwasseralter mit der Tiefe zunehmen. Auch die unterschiedlichen Sättigungszustände der Grundwässer im Hinblick auf Calcit, Dolomit, Gips und Anhydrit belegen die hydraulische Entkopplung der einzelnen Grundwasserstockwerke. In der EKB 2

wird seit dem 04. November 2009 bzw. 18. Dezember 2009 dauerhaft aus dem Unterkeuper/Muschelkalkgrundwasser gepumpt (vgl. Kap. 8.1).

Für den Muschelkalk- und Unterkeuperaquifer zeigen die bemerkenswerte Konstanz der Grundwasserbeschaffenheit einerseits sowie die über die gesamte Entnahmephase während der Pumpversuche gleich bleibende isotopische Zusammensetzung bei hohem Grundwasseralter andererseits, dass es sich bei den beiden tiefen Grundwasservorkommen um stagnierende Systeme mit fehlendem Grundwasserdurchsatz handelt. Da sich jedoch während der Dauerabsenkung ein annähernd konstanter Grundwasserspiegel von ca. 130 m u. GOK eingestellt hat, muss sich dieses Grundwasservorkommen über ein größeres Reservoir erstrecken und kann nicht entsprechend dem Schollenmosaik kleinräumig begrenzt sein. Bemerkenswert ist ferner das anhand der kontinuierlich aufgezeichneten elektrischen Leitfähigkeit dokumentierte, über den gesamten Beobachtungszeitraum gleich bleibende Mischungsverhältnis des entnommenen Grundwassers in der stockwerksübergreifend ausgebauten Entnahmestelle EKB 2.

Das Einzugsgebiet des Grundwasservorkommens schließt den Bötzen bzw. den Roten Berg im Osten des Stadtgebietes ein. Dort stehen die Gesteine des Buntsandsteins, sowie des Mittleren und Oberen Muschelkalkes - bereichsweise unter einer Überdeckung aus Umlagerungssedimenten – an. Es reicht außerdem wahrscheinlich über die Hauptverwerfung hinaus bis in den kristallinen Grundgebirgsschwarzwald. Gesicherte Aussagen über die Größe (Volumen bzw. räumliche Ausdehnung) und das Neubildungsgebiet dieser (artesisch) gespannten Grundwasservorkommen sind in Ermangelung weiterer Grundwassermessstellen in den verschiedenen Grundwasserstockwerken sowie begleitender Untersuchungen nicht möglich.

7.5 Modellvorstellung zur Entstehung der Hebungsvorgänge in der Altstadt von Staufen

Die Erkundungsmaßnahmen im Altstadtgebiet von Staufen führten zu einem im Detail sehr differenzierten geologischen Modell (Abb. 7.14), das die Mechanismen weitgehend erklärt, die zu den Hebungsvorgänge in Staufen führen .

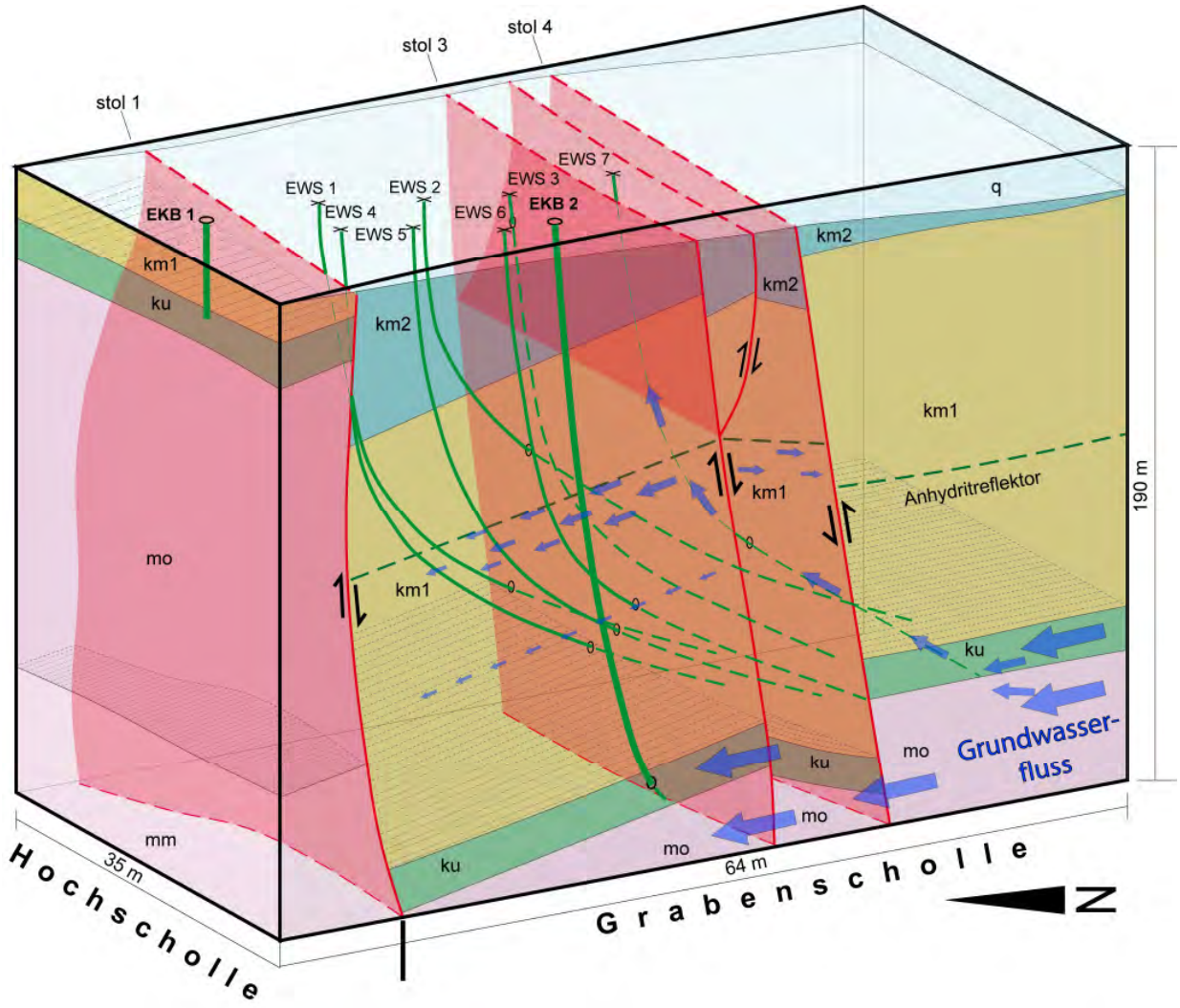


Abb. 7.14: Blockbild zur Verdeutlichung der Prozesse, die zur Hebung im Bereich des EWS-Feldes Rathaus Staufen führen.

7.5.1 Hydraulische Verhältnisse vor dem Abteufen der EWS-Bohrungen

Der Festgesteinsuntergrund im Altstadtbereich von Staufen ist durch eine Vielzahl von Störungen in ein kleinräumiges Schollenmosaik gegliedert. Die vier im Festgestein vorhandenen Grundwasserstockwerke (Schilfsandstein (km2), Gipskarst (km1), Unterkeuper (ku) und Oberer Muschelkalk (mo)) sind durch gering durchlässige Trennschichten hydraulisch voneinander getrennt.

Die zahlreichen Störungen im Untergrund des EWS-Feldes sind ebenfalls gering durchlässig und führen zu keinen hydraulischen Verbindungen zwischen den Grundwasserstockwerken. In Abschnitten, in denen an den Störungen die Grundwasserstockwerke des Unterkeupers und des Oberen Muschelkalks aneinandergrenzen,

machen sich die Störungen jedoch nicht hydraulisch bemerkbar. Dies wurde bei den nachfolgenden Dauerabsenkmaßnahmen durch die über den langen Zeitraum stationären Verhältnisse belegt.

Als Folge dieser hydraulischen Verhältnisse weist das Grundwasser in den einzelnen Stockwerken unter weitgehend stagnierenden Bedingungen hohe Grundwasseralter auf. Aufgrund der zumindest im Bereich der Residualsedimente unter dem Unteren Gipspiegel hydraulisch weitgehend „dichten“ Störungen gibt es keine natürlichen Wegsamkeiten, über die gespanntes Grundwasser aus tieferen Stockwerken zu den anhydritführenden Gesteinsbereichen im Gipskeuper gelangen kann. Nur so war es möglich, dass in dieser tektonisch stark überprägten Situation der Vorbergzone im Gipskeuper Anhydrit über geologisch lange Zeiträume erhalten bleiben konnte und nicht bereits früher mit Grundwasser in Kontakt kam.

7.5.2 Veränderungen des natürlichen hydraulischen Systems durch die Erdwärmesondenbohrungen als Auslöser der Gipskeuperquellung

Das ursprünglich im anhydritführenden Gipskeuper hydraulisch dichte Gebirge wurde durch Wasserzutritte über den unzureichend abgedichteten Ringraum der EWS 7 beeinflusst (vgl. Kap. 8). Die EWS 1 bis EWS 6 sind an den Wasserzutritten möglicherweise untergeordnet beteiligt. Die in ihrem Verlauf im unteren Abschnitt stark von der Vertikalen abweichenden Erdwärmesondenbohrungen reichen unter Querung mehrerer Störungen bis in das Grundwasserstockwerk des Unterkeupers (vgl. Abb. 7.14), die EWS 7 eventuell sogar bis in den Oberen Muschelkalk. Das dort angebohrte, artesisch gespannte Grundwasser steigt über Wegsamkeiten im Ringraum der EWS 7 bzw. möglicherweise weiterer EWS auf und kommt so mit ehemals trockenen, Anhydrit und quellfähige Tonminerale führenden Gebirgsabschnitten des Gipskeuper in Kontakt. Dies setzt den Prozess des „Gipskeuperquellens“ in Gang, der zu einer Volumenvergrößerung, verbunden mit zunehmenden Wasserwegsamkeiten des Gesteinsverbandes führt. Ob in Staufen ausschließlich die undichte(n) EWS-Bohrung(en) zum Wassereintrag in die quellenden Gebirgsabschnitte führen, oder ob über den Wasseraufstieg im Ringraum der Bohrung(en) ein Wasserübertritt in die durchbohrten Störungen erfolgt und diese als zusätzliche Wasserwegsamkeiten wirken, kann derzeit nicht abschließend beurteilt werden.

Die Temperaturprofilmessungen in den EWS (Abb. 6.10 bis Abb. 6.16) zeigen, dass die Anhydritumwandlung innerhalb des zwischen 61,55 und 126 m u. GOK anhydritführenden Gebirgsabschnittes in den Tiefenbereichen 61,5 m u. GOK bis 99,5 m u. GOK (Mittlerer Gipshorizont und Weinheim-Schichten, MGH+WEH) und untergeordnet in den Dunkelroten Mergeln (DRM) zwischen ca. 93 und 105 m u. GOK abläuft. In diesen Abschnitten setzt die Umwandlung ausgehend von der Bohrung EWS 7 bevor-

zugt in Gesteinsschichten an, die hinsichtlich ihrer mineralogischen Zusammensetzung (Tonminerale, Anhydritführung) und Textur hierfür besonders anfällig sind. Eventuell können durch bohrbedingte Auflockerungen im Umfeld des Bohrloches der EWS-Bohrung zusätzlich Wasserwegsamkeiten im Gebirge geschaffen worden sein, von denen die Umwandlungsprozesse bevorzugt ausgehen. Die vom Quellungsprozess betroffenen Gebirgsabschnitte wurden mit der EKB 2 durchteuft. Sie sind durch einen leicht erhöhten Wassergehalt gekennzeichnet (Tab. 5.28). Die Tonsteine in diesem Gebirgsabschnitt zerfallen aufgrund des quellungsbedingt erhöhten Spannungszustands des Gebirges kurz nach Entnahme aus dem Kernrohr in polyedrische Bröckchen.

Im Gebirge schreitet das „Gipskeuperquellen“ ausgehend von der EWS 7 entsprechend dem Schichteinfallen nach NW fort. Dies zeigt sich daran, dass die Temperaturanomalien mit zunehmender Entfernung von der EWS 7 geringer werden und dass die Temperaturmaxima in den sieben EWS nach Nordwesten zunehmend tiefer liegen (Kap. 6, Abb. 6.21, Abb. 6.22 und Abb. 6.23).

Das artesisch gespannte Grundwasser im höher gelegenen Gipskarst ist von den unterlagernden anhydritführenden Gesteinspartien durch ca. 33 m mächtige (scheinbare Mächtigkeit) Gipssteine, Tonsteine und Dolomitsteine getrennt. Es ist am Quellhebungsprozess nicht beteiligt.

8 Bisherige Maßnahmen zur Schadensbegrenzung

Wie die geologischen Untersuchungen im Erdwärmesondenfeld ergeben haben, ist in den quellfähigen Gesteinsschichten des Gipskeupers noch genügend Quellpotenzial vorhanden, um den Quellungsprozess über lange Zeiträume aufrecht zu erhalten (vgl. hierzu auch den Bericht der Ingenieurgruppe Geotechnik). Daher wurden im Zuge der geologischen Erkundung und der Untersuchungen an den Erdwärmesonden verschiedene Möglichkeiten untersucht, wie man den Quellhebungsprozess schadensbegrenzend beeinflussen kann. Vordringlichstes Ziel ist es, den weiteren Zufluss von Grundwasser in den in Quellung befindlichen Gebirgsabschnitt zu verhindern. Aus Sicherheitsgründen mussten nach genauer Analyse und unter Einbezug der aktuellen Untersuchungsergebnisse verschiedene zunächst in Betracht gezogene Maßnahmen wieder verworfen werden. In diesem Zusammenhang wird auf eine Bewertungsmatrix der Ingenieurgruppe Geotechnik verwiesen, aus welcher auch die bisherigen Kontakte zu nationalen und internationalen Firmen und Experten hervorgehen.

Derzeit werden zwei Maßnahmen durchgeführt, um einen weiteren Zufluss von Grundwasser in den in Quellung befindlichen Gebirgsbereich des Gipskeupers zu verhindern:

- Dauerpumpmaßnahme (Hydraulischer Abwehrbetrieb) in der Erkundungsbohrung EKB 2

- Nachträgliche technische Abdichtung (Nachverpressung) der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7

Ziel der Dauerpumpmaßnahme in EKB 2 ist das Erzeugen einer hydraulischen Drucksenke im Bereich des Erdwärmesondenfeldes für das artesisch gespannte Grundwasser des Oberen Muschelkalkes und des Unterkeupers im Erdwärmesondenfeld. Damit soll verhindert werden, dass weiterhin Grundwasser aus diesen tiefen Grundwasserstockwerken über einen oder eventuell auch mehrere undichte Ringräume der Erdwärmesonden in den derzeit in Quellung befindlichen Gebirgsabschnitt aufsteigt.

Die Dauerpumpmaßnahme wird unter Sicherstellung einer ständigen Überwachung der Parameter Entnahmerate, Absenkungsbetrag, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert vorgenommen, um sicherzustellen, dass die Absenkung zu keinen unerwünschten Erosions- bzw. Auslaugungserscheinungen im Untergrund führt. Zusätzlich werden in regelmäßigen Abständen ausführliche hydrochemische und isotopenhydrologische Analysen durchgeführt.

Neben dem hydraulischen Abwehrbetrieb wurde nach Möglichkeiten gesucht, vorhandene Fließwege in undichten bzw. unverfüllten Ringraumabschnitten der Erdwärmesonden nachträglich technisch abzudichten. Da die Ringraumverfüllungen in den EWS 1 bis EWS 7 dem vorhandenen Sulfatangriff gegenüber erwiesener Maßen nicht resistent sind (Ettringit-Bildung), wurde nach Maßnahmen gesucht, diese Ringraumabschnitte durch lagenweises Verpressen mit sulfatrestistentem Zement zu verbessern. Damit soll vermieden werden, dass sich langfristig neue Fließwege entwickeln.

Bis wann diese beiden Abwehrmaßnahmen zu einer an der Geländeoberfläche messbaren Verminderung der Geländehebungen führen, ist unter anderem davon abhängig, wie viel Grundwasser bereits in den quellfähigen Gebirgsabschnitt eingedrungen ist und wie lange dieses Wasser den Quellungsprozess weiter in Gang hält.

8.1 Dauerpumpmaßnahme (Hydraulischer Abwehrbetrieb) in der EKB 2

Seit dem Erbohren der artesisch gespannten Grundwasserstockwerke im Unterkeuper und im Oberen Muschelkalk wurde der Wasserstand in der Erkundungsbohrung EKB 2 dauerhaft auf Geländehöhe abgesenkt.

Darüber hinaus wurde in der Erkundungsbohrung EKB 2 ab dem 25. September 2009 während längerer Zeitabschnitte Grundwasser abgepumpt.

Tab. 8.1: Überblick über die Pumpphasen des hydraulischen Abwehrbetriebs in EKB 2.

Zeitraum	Grundwasserleiter	Absenkung
25.09. - 12.10.2009	Unterkeuper	60 m
12.10. - 17.10.2009	Unterkeuper	122 m
22.10. - 27.10.2009	Oberer Muschelkalk	124 m

Nachdem die Erkundungsbohrung EKB 2 zwischen der Basis des 4. Sperrrohres (145,2 m) und der Bohrlochsohle (163 m) mit einem temporären Ausbau versehen ist, erfolgt der hydraulische Absenkbetrieb in der EKB 2 als Brunnen.

Tab. 8.2: Dauerabsenkbetrieb EKB 2 (04. November bis 16. November 2009).

Phase	Datum, Uhrzeit Beginn	Flurabstand [m u. GOK]	Absenkung [m]	Entnahmerate [l/s]
Beginn Dauerab-senk-betrieb	04.11.2009 10:23	ca. - 2,0m		1,26 – 1,28
Ende Dauerab-senk-betrieb	16.11.2009 10:12	127-128	129-130	0

In der Zeit vom 04. November 2009 bis 16. November 2009 wurde in der Erkundungsbohrung EKB 2 ein Dauerabsenkbetrieb mit einer konstanten Entnahmerate von 1,26 bis 1,28 l/s gefahren (Abb. 8.1) und damit der Grundwasserspiegel in der EKB 2 zunächst um ca. 130 m auf 127 m u. GOK abgesenkt. Im Laufe der Pumpmaßnahme stieg der Grundwasserspiegel wieder auf 126 m u. GOK an, was auf Freispülvorgänge im Kluftgrundwasserleiter zurückzuführen ist. Temperatur und elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers blieben während der Absenkphase bis zum 16. November konstant bei 16,7 ℃ bzw. 1,26 bis 1,27 mS/cm.

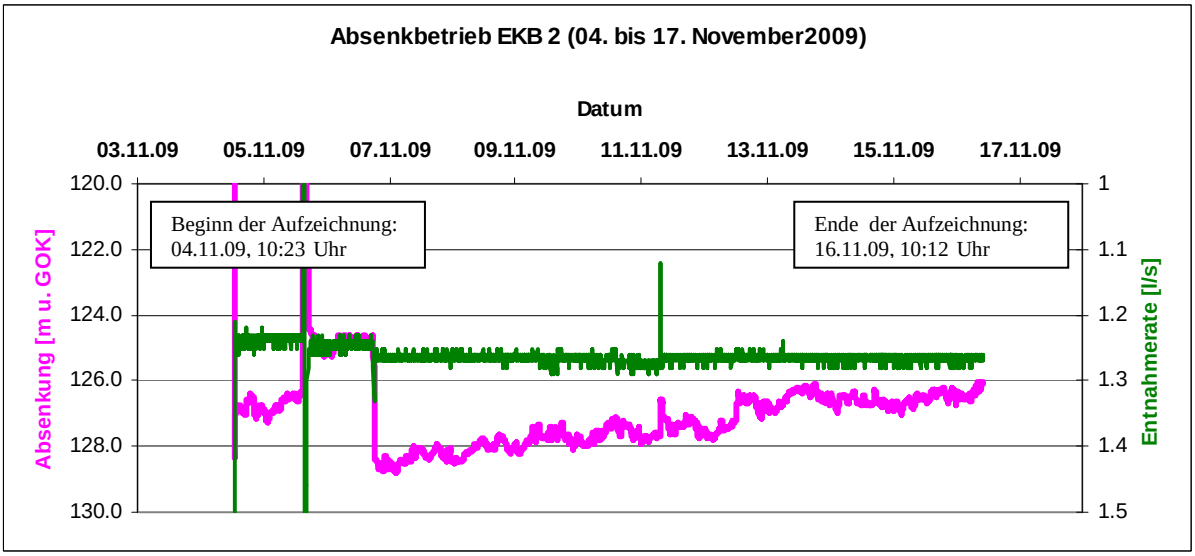


Abb. 8.1: Dauerentnahme während des Absenkbetriebes in der EKB 2; Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

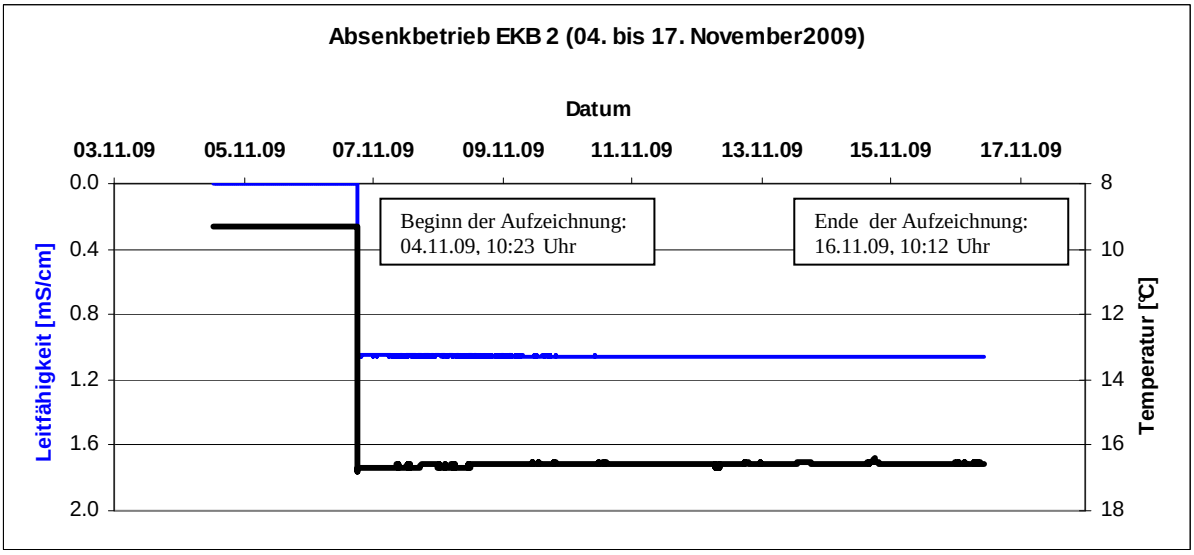


Abb. 8.2: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser während der Dauerentnahme in der EKB 2.

Der Abwehrbetrieb musste aus Sicherheitsgründen während der Injektionsmaßnahme in EWS 7 am 17. November 2009 vorübergehend eingestellt werden. Beim Herstellen erster Schnitte im Sondenschlauch zur nachträglichen technischen Abdichtung der EWS 7 wurde eine hydraulische Verbindung zu der als Absenkbrunnen genutzten EKB 2 festgestellt: Der Wasserstand im Sondenschlauch sank nach dem Schnitt spontan ab und musste durch Zugabe von Wasser ständig gestützt werden. Somit war belegt, dass sich der durch den Pumpbetrieb in EKB 2 induzierte Absenktrichter bis zur EWS 7 auswirkt. Dadurch bestand jedoch auch die Gefahr, Injektionsgut in den Absenkbrunnen bei zu ziehen und diesen damit unbrauchbar zu machen.

Nachdem die Ringräume der EWS 1 bis EWS 7 in ihren unteren Abschnitten (zwischen 140 m bis 95 m unter GOK) in - wenn auch zunächst noch weitständigen - Intervallen nachverpresst waren, wurde der Absenkbetrieb am 18. Dezember 2009 wieder aufgenommen. Er dauert seit dem an. Die Entnahmerate in EKB 2 beträgt 1,35 l/s, der abgesenkte Druckwasserspiegel liegt bei 130 m unter GOK. Die elektrische Leitfähigkeit verharrt bei 1,07 - 1,09 mS/cm, der pH-Wert schwankt in geringer Variation um 7,0, die Temperatur des geförderten Wassers liegt konstant bei 16,4°C. Alle Parameter, die auf etwaige Auslaugungsvorgänge hindeuten könnten (v.a. Leitfähigkeit) bleiben seither unauffällig. Ein zeitweise geringfügiger Anstieg der Sauerstoffkonzentration dürfte messtechnisch bedingt sein.

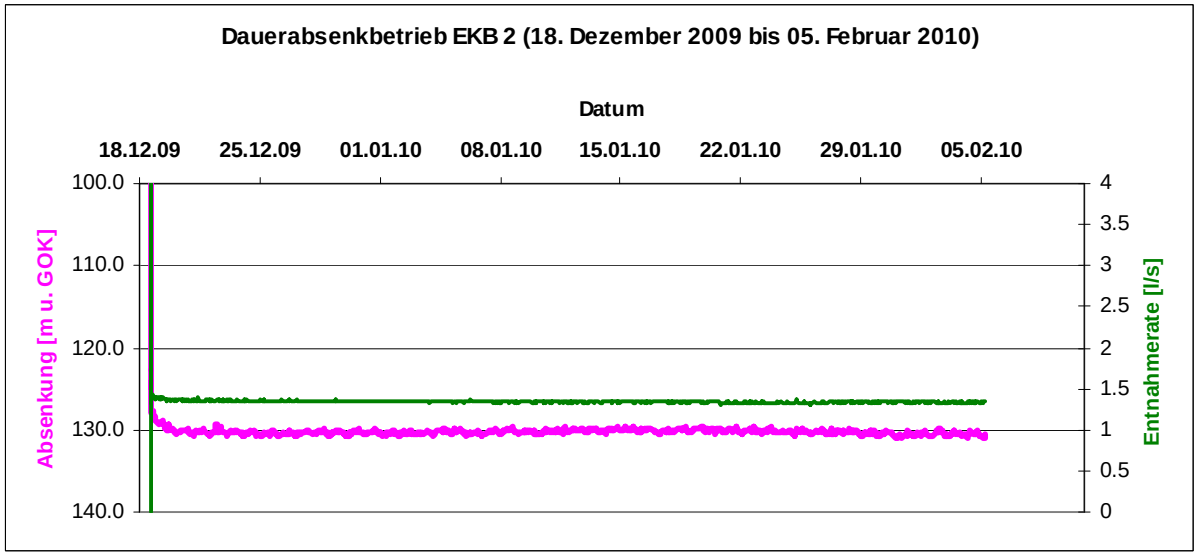


Abb. 8.3: Dauerentnahme während des Absenkbetriebes in der EKB 2: Wasserstandsänderungen und Entnahmeraten.

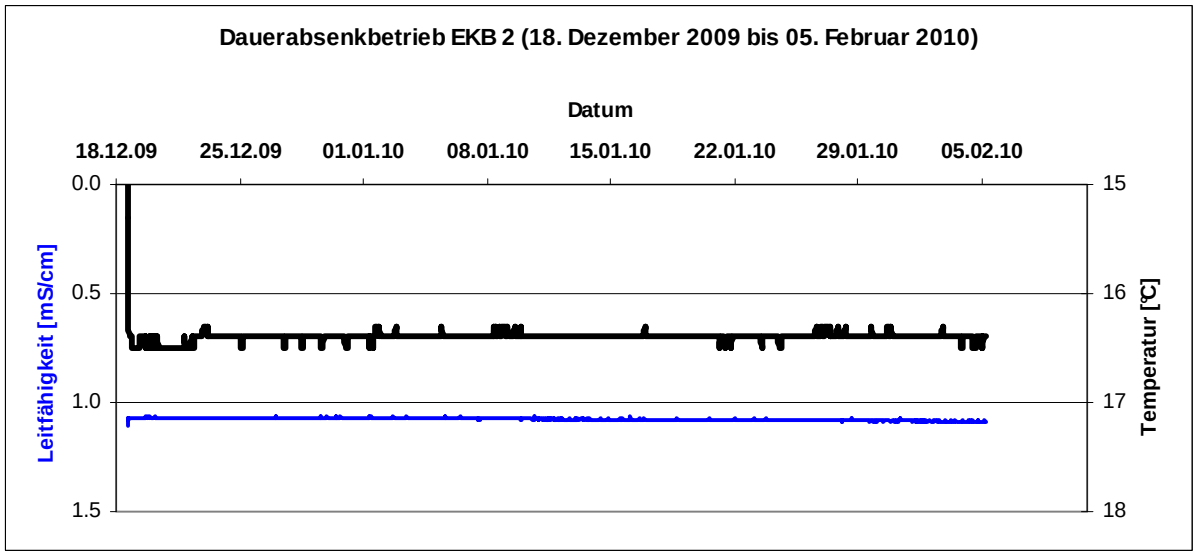


Abb. 8.4: Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im entnommenen Grundwasser während der Dauerentnahme in der EKB 2.

8.2 Nachverpressung der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7

Die Raumlagemessungen der Erdwärmesonden belegen, dass diese stark von der Vertikalen abweichen, so dass ein vertikales Überbohren der Erdwärmesonden ausscheiden muss. Recherchen bei renommierten Bohrfirmen ergaben, dass derzeit kein gesichertes Überbohren von Erdwärmesonden in der zu fordernden Maßgenauigkeit möglich ist, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, das ursprüngliche Bohrloch zur Tiefe hin zu verlieren. Ferner verfügen die Erdwärmesonden auf Grund ihrer Bauart über keinerlei Vorrichtungen zur nachträglichen Ringrauminjektion (z. B. zusammen mit dem Sondenstrang eingebaute Injektionsrohre). Insofern stellen nur die Erdwärmesondenschläuche selbst einen zuverlässigen Zugang zu dem bzw. den undichten Ringräumen dar. Dies gilt allerdings nur solange die Sondenschläuche durch den Quellungsvorgang noch nicht zu stark deformiert und zur Tiefen hin befahrbar sind.

Der Zugang zum Ringraum erfolgt über horizontiert ausgeführte Perforationsstellen der Sondenschläuche. In einem der beiden U-förmigen EWS-Schläuche werden mit Hochdruckwasserstrahl zunächst 30 cm lange Schnitte hergestellt. Mit spezieller Injektionstechnik erfolgt dann entweder - wie z.B. in der Talsperren-Injektionstechnik üblich - im Pilgerschrittverfahren oder auch sukzessive von unten nach oben eine gezielte Ringrauminjektion. Nach erfolgter Nachverpressung wird der Sondenschlauch wieder gespült und für den nächsten Injektionsschritt vorbereitet. Der zweite U-Sondenschlauch bleibt unverritzt und kann weitere Temperatur-Profilmessungen zur Dokumentation des Injektionserfolges bzw. der weiteren Temperaturentwicklung im Bereich des Temperaturmaximums genutzt werden.

Die Fa. Keller, Renchen, hat im Auftrag der Stadt Staufen ein spezielles Verfahren zur nachträglichen technischen Abdichtung von EWS-Ringräumen entwickelt. Nach intensiven Vorversuchen an einer in einem Bergwerkschacht unter realen Umschließungsdrücken eingebauten 150 m langen Erdwärmesonde war das Verfahren soweit erprobt, dass es zur nachträglichen Abdichtung der EWS in Staufen zum Einsatz kommen konnte. Neben der nicht als Standardverfahren verfügbaren Ringraum-Injektionstechnik kam auch der Wahl eines geeigneten Injektionsmediums zur Nachverpressung der Erdwärmesonden größte Bedeutung zu. Dabei standen sowohl die verarbeitungstechnischen Eigenschaften des Injektionszements als auch folgende Anforderungen im Vordergrund:

- Beständigkeit gegenüber permanent zusickernde sulfathaltige Wässer bzw. gegenüber sulfathaltigem Gebirge,
- Raumbeständigkeit,
- Erosionsbeständigkeit bei Kontakt mit zusickernden Wässern.

Eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber sulfathaltigen Wässern weist Sulfathüttenzement auf, der in Deutschland jedoch nicht mehr produziert wird. In Österreich und in der Schweiz wurde dieser Zement weiterentwickelt und steht mit EU-Zulassung zur Verfügung (Fa. Wopfinger, Markenname "Slagstar"). Injektionssysteme auf Basis dieses Zementes waren allerdings nicht bekannt. Die Rezeptur eines auf dieser Basis hergestellten Injektionszements unter Zugabe spezieller Additive zur Verbesserung der Sedimentationsstabilität wurde, da bisher nicht bekannt, eigens entwickelt und zur Anwendungsreife gebracht. Der verwendete Injektionszement zeichnet sich durch eine vergleichsweise geringe Abbindewärme aus, was sich hinsichtlich der Überwachung der Temperaturentwicklungen günstig auswirkt.

Die Nachverpressung der Erdwärmesonden findet unter ständiger fachtechnischer Überwachung der Ingenieurgruppe Geotechnik statt. Auf den Bericht der Ingenieurgruppe Geotechnik zu den technischen Details der Nachverpressung der Erdwärmesonden wird verwiesen.

Am 17. November 2009 erfolgte in Schlauch 1 der EWS 7 ein erster Schnitt mit nachfolgender Injektion. Im Anschluss an einzelne Injektionsabschnitte wurde ein Temperaturprofil im unverritzten zweiten U-Sondenschlauch gemessen.

In Abb. 8.5 sind beispielhaft die Temperaturprofile in der EWS 7 vor Beginn der Injektionen (schwarz) und die Temperaturentwicklung nach zeitlich nacheinander erfolgten Ringrauminjektionen (blau, violett, rot) dargestellt.

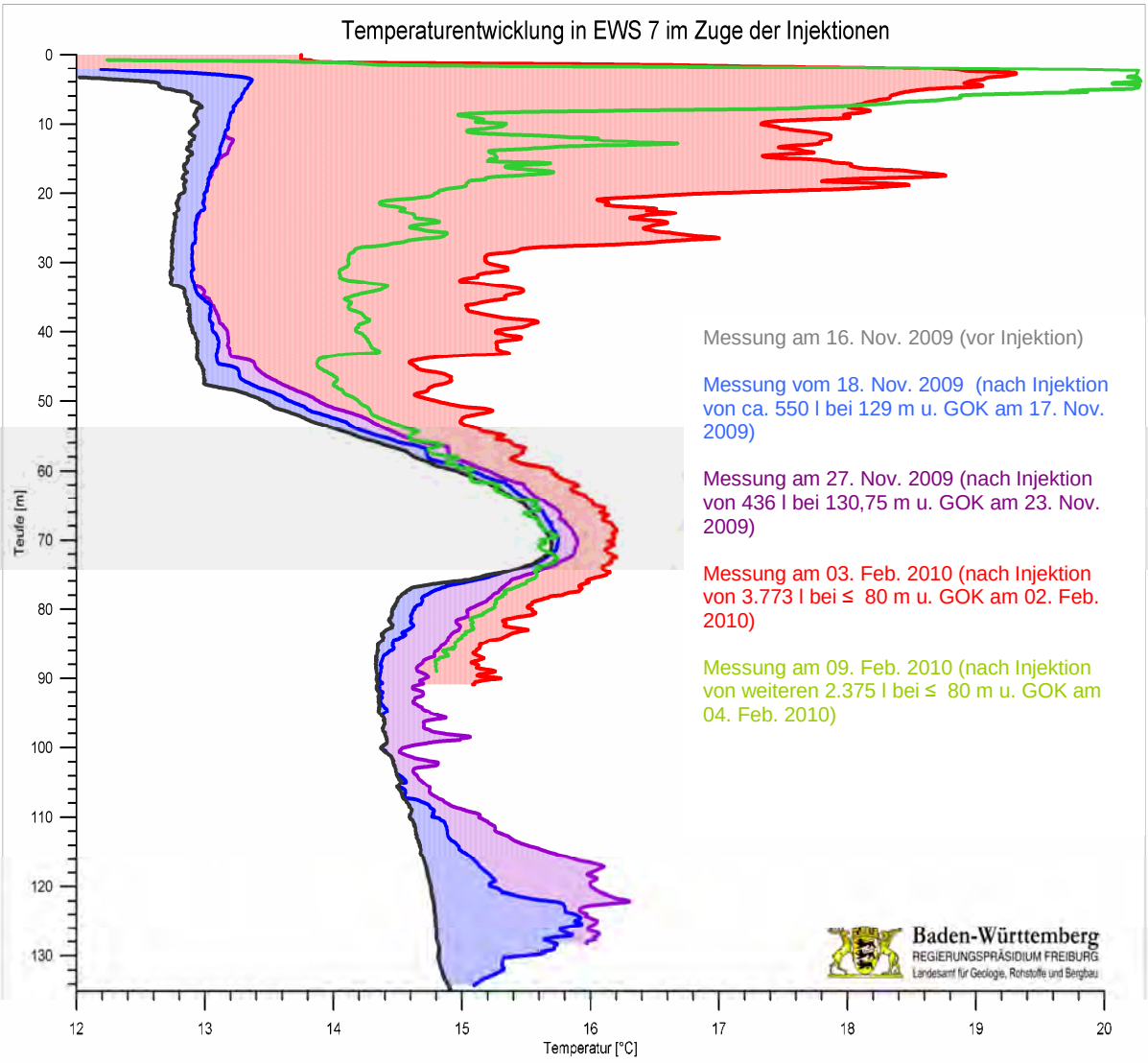


Abb. 8.5: Temperaturprofile in EWS 7 vor (schwarz) und nach Ringrauminjektionen.

Die Abb. 8.5 veranschaulicht, dass bereits die erste Injektion am 17. November 2009 (Schnitt bei 129 m, Verpressmenge ca. 550 l Zementsuspension) zu einer deutlichen Temperaturbeeinflussung des unteren Sondenastes im Abschnitt zwischen Endteufe bei 135 m bis ca. 105 m und die zweite Injektion (Schnitt bei 130,75 m, Verpressmenge ca. 436 l Zementsuspension) zu einer weiteren Temperaturbeeinflussung bis in das Niveau der markanten Temperaturanomalie (und vermutlich darüber hinaus) geführt hat. Die Temperaturbeeinflussung wird durch die unmittelbare Reaktionswärme beim Abbinden des Zements bewirkt und kann als Beleg dafür gelten, dass bereits durch die beiden ersten Injektionen (zusammen ca. 1000 l Zementsuspension) ein unterer, offener bzw. injektionsgängiger Ringraumabschnitt abgedichtet wurde. Die zackenförmigen Temperaturspitzen deuten zudem darauf hin, dass durch die Ringrauminjektion auch Schichtfugen oder Klüfte im Nahbereich der Erdwärmesondenbohrung erreicht wurden.

Am 02. Februar 2010 kam es in der EWS 7 beim Spülen der Sondenschläuche zu einer Leckage im zweiten Sondenschlauchpaar. Es wird vermutet, dass der durch den Quellungsvorgang bereits stark beanspruchten Sondenschlauch oberhalb von 80 m undicht wurde. Eine daraufhin am selben Tag vorgenommene Versiegelungsinjektion am 02. Februar 2010 führte zu einer ungewöhnlich großen Aufnahme von ca. 3773 l und am 04. Februar 2010 zu weiteren Aufnahme von 2375 l Zementsuspension. Wie die Temperaturprofilmessungen am 03. Februar 2010 und 09. Februar 2010 veranschaulicht, hat die große Zementmenge vor allem den Ringraum in der oberen Hälfte der EWS 7 erreicht. Auch hier lassen sich die Temperaturspitzen geologisch dahingehend deuten, dass durch die Ringrauminjektion Schichtfugen, Klüfte sowie Verkarstungsstrukturen im Niveau des Gipskarsts erreicht wurden. Letztere dürften die Ursachen dafür sein, dass durch die Zementverpressung in EWS 7 auch der obere Abschnitt der benachbarten EWS 3 mit beeinflusst wurde (Abb. 8.6). Die Temperaturprofilmessung am 09. Februar 2010 zeigt die Abkühlung des injizierten Zements und belegt in EWS 7 einen erstmaligen Temperaturrückgang im Bereich der Temperaturanomalie.

Im Vergleich zu allen anderen Erdwärmesonden zeichnet sich die EWS 7 bislang (Stand Februar 2010) durch die höchste Zementaufnahme aus. Das Temperaturprofil nach der dritten Zementinjektion lässt vermuten, dass die in den vorangehenden Temperaturprofilmessungen erkennbare vertikale Grundwasserbewegung im Ringraum offenbar unterbrochen wurde.

Bei den übrigen Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 6 wurden bislang Zementaufnahmen zwischen 118 l und 439 l festgestellt. Am Beispiel der Erdwärmesonde EWS 3 wird in Abb. 8.6 der Injektionserfolg anhand der vorgenommenen Temperaturprofilmessungen dargestellt. Es zeichnet sich die oben beschriebene Beeinflussung durch die großen Injektionsmengenaufnahme in EWS 7 durch einen deutlichen Temperaturanstieg in der benachbarten EWS 3 im Abschnitt oberhalb von ca. 50 m ab. Es wird dokumentiert, dass in EWS 3 ein horizontaler Grundwasserfluss im Niveau des Gipskarsts bei 30 m u. GOK besteht.

Im Schneidewasser der Erdwärmesonden EWS 2, EWS 3 und EWS 7 wurde z. T. Trübung festgestellt. Der gewonnene Feststoffanteil wurde im petrographisch-mineralogischen Labor des RPF/ LGRB mittels Röntgenbeugungsanalyse untersucht. Die Analysen führten zu folgendem Ergebnis:

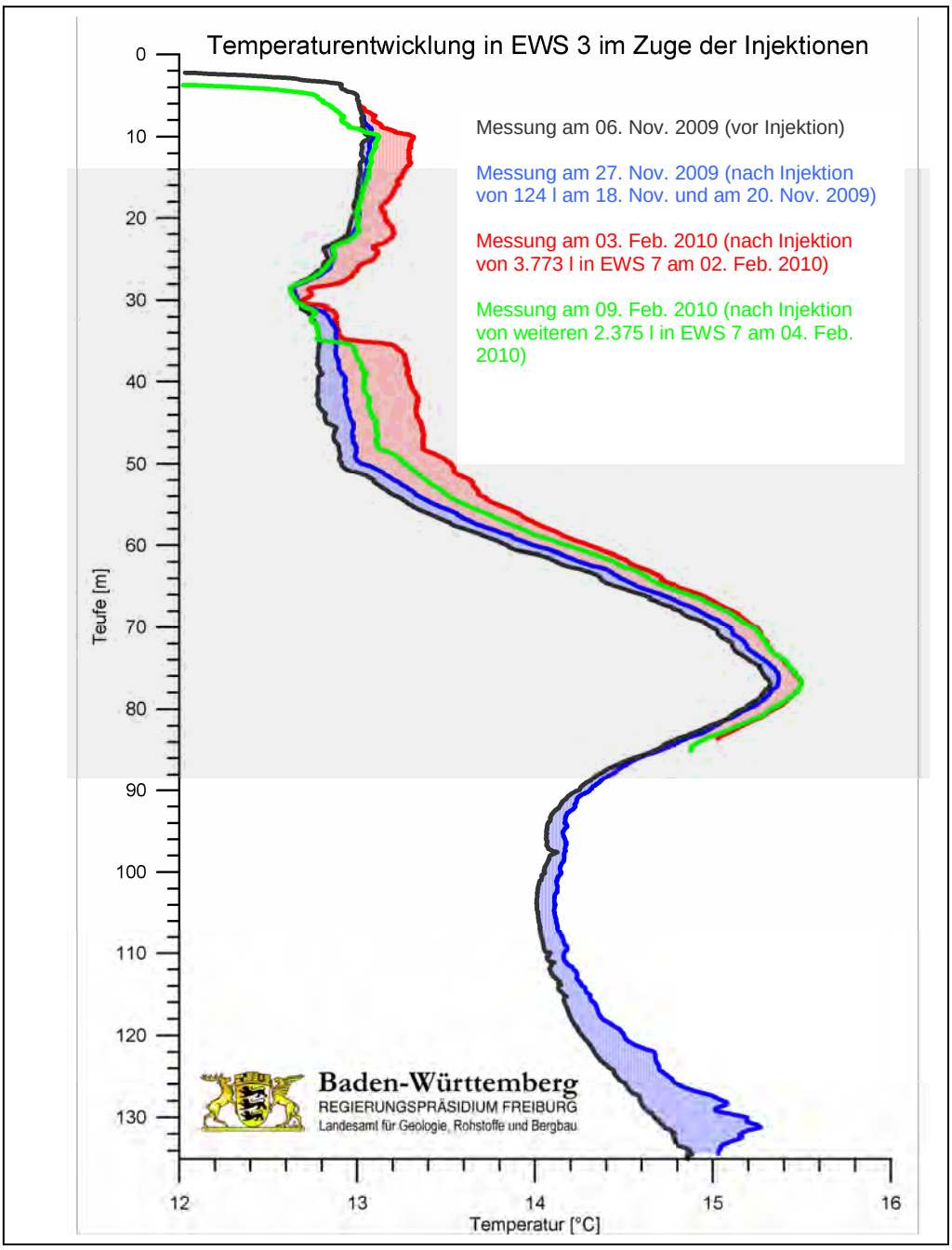


Abb. 8.6: Temperaturprofile in EWS 3 vor (schwarz) und nach drei Ringrauminjektionen, davon eine in EWS 3 (blau) und zwei überlagernde aus EWS 7 (rot und grün).

EWS 2, Spülung 24. + 25.11.09	Nur Calcit u. evtl. Zementphase nachweisbar
EWS 3, Schneid- und Spülgut 108,00 m, 19.12.09	Calcit und Ettringit
EWS 3, Rohr 1, 128,00 m, 17.12.09	Ganz überwiegend Calcit, sehr wenig Ettringit
EWS 3, Rohr 2, 135,40 m, 24.11.09	Calcit und Ettringit u. evtl. Zementphase
EWS 7, 102,00 m	Calcit, Quarz und wenig Ettringit

Demnach wurden einschließlich der Untersuchungen der MPA Uni Karlsruhe (vgl. Kap. 5) in den drei Erdwärmesonden EWS 3, EWS 5 und EWS 7 Ettringit nachgewiesen. Nach dem Prüfbericht der MPA Karlsruhe (Anl. 5.14) "liegt die Vermutung nahe, dass kein sulfatbeständiger Zement verwendet wurde."

Nach dem ersten Nachverpressen der Erdwärmesonde EWS 3 kam es im Schneidewasser der benachbarten Erdwärmesonde EWS 2, die auf 140 m gebohrt, jedoch in den unteren 35 m verstürzt ist, zu einem zeitweiligen Austritt von Injektionszement. Dies legt eine hydraulische Verbindung zwischen der EWS 3 und dem verstürzten Bohrlochabschnitt der EWS 2 nahe. Es darf angenommen werden, dass die Versturzmassen in der Erdwärmesondenbohrung 2 zumindest teilweise durch den Injektionszement nachträglich zementiert wurden.

In Abb. 8.7. ist die bisherige Injektionsmengenaufnahme für die Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 (Stand Februar 2010) dargestellt.

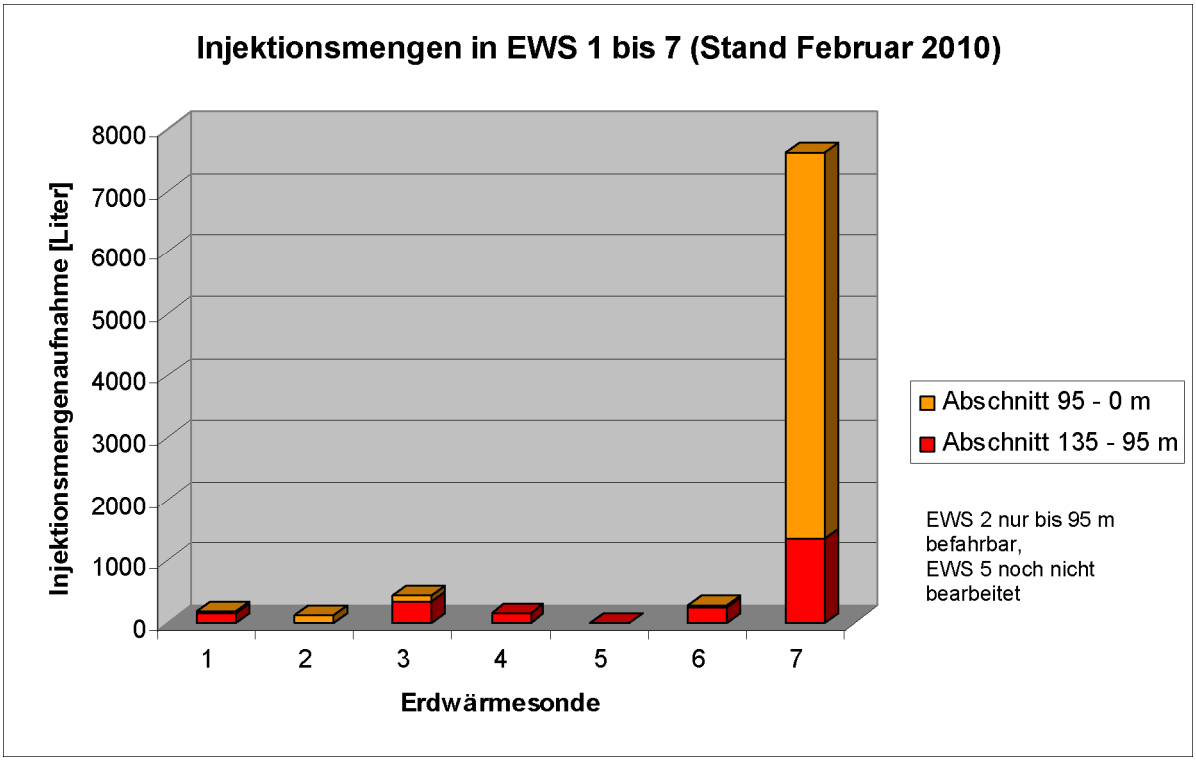


Abb. 8.7: Übersichtsgrafik zu den Injektionsmengenaufnahmen in den EWS 1bis EWS 7 (Stand Februar 2010).

Auf Grund der bisher erfolgten Nachverpressungen in den Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7 kann davon ausgegangen werden, dass mit der Injektion der EWS 7 ein nahezu offener Ringraum und damit ein hydraulischer Fließweg verschlossen werden konnte. Die Nachverpressungen der Erdwärmesonden werden noch mindestens bis Ende des ersten Quartals 2010 andauern.

Erste Ergebnisse über die längerfristigen thermischen Reaktionen auf die Nachverpressungen in den Erdwärmesonden werden in Kap. 6 diskutiert.

9 Zusammenfassung

Veranlassung, Auftrag

Die Stadt Staufen i.Br. hatte beabsichtigt, das denkmalgeschützte renovierte Rathaus mit Erdwärmetechnologie zu heizen und zu kühlen. Hierzu wurden im September 2007 Bohrungen für sieben Erdwärmesonden (EWS 1 bis EWS 7) ausgeführt. Sie lösen Prozesse aus, die zu den seit Ende 2007 zunehmenden Schäden an Gebäuden und Infrastruktur im historischen Altstadtbereich führen.

Das Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RPF/LGRB), erhielt von der baden-württembergischen Landesregierung den Auftrag, die geologischen Ursachen der Schadensvorgänge in Staufen zu untersuchen und Möglichkeiten für schadensbegrenzende Maßnahmen aufzuzeigen. Die bislang durchgeführten Untersuchungen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden im vorliegenden Sachstandsbericht zusammengefasst.

Arbeitshypothese

Zur Planung der Untersuchungen hat das RPF/LGRB nach Vorliegen des Sachverständigengutachtens Prof. [redacted] vom 19. September 2008 auf Grundlage aller bis dahin verfügbaren Einzelhinweise die nachstehende Arbeitshypothese aufgestellt:

- **a)** Die Gebäudeschäden werden durch Hebungen des Untergrundes verursacht.
- **b)** Für die Hebungen verantwortlich sind Schichten des Gipskeupers mit darin eingelagerten sulfatführenden Abschnitten (Anhydrit) und quellfähigen Tonmineralen (insbesondere Corrensit).
- **c)** Die schnell einsetzenden und langfristig linear verlaufenden Hebungen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Quellungsvorgänge im Gipskeuper (sogenanntes "Gipskeuperquellen") zurückzuführen.
- **d)** Die räumliche Nähe wie die zeitliche Abhängigkeit der eingetretenen Hebungen legen einen Zusammenhang mit den Erdwärmesonden-Bohrungen EWS 1 bis EWS 7 nahe.
- **e)** Das Temperaturprofil in der EWS 7 deutet auf einen Aufstieg von gespanntem Grundwasser aus tieferen Schichten des Unterkeupers über eine undichte Ringraumverfüllung hin.
- **f)** Die Quellungsvorgänge im Gipskeuper werden aktiviert, wenn Wasser in vormals "trockene" quellfähige Abschnitte des Gipskeupers eindringt.

Das "Gipskeuperquellen" umfasst ein schnell eintretendes Quellen von quellfähigen Tonmineralen ("Schwellen") und eine Umwandlung von Anhydrit in Gips. Beide Prozesse sind mit einer Volumenzunahme verbunden.

Es war daher wichtig, zu klären, auf welche Weise das Wasser zutritt, wo der in Quellung befindliche Gebirbsabschnitt liegt, wie es zu einer flächenhaften Ausbreitung des Wassers im Quellungsbereich kommt, wie sich die Hebungsfigur entwickelt und wie dieser Prozess schadensbegrenzend beeinflusst werden kann.

Erkundungsmaßnahmen

Zur Überprüfung der Arbeitshypothese wurde nach Vorlage des Kabinettsbeschlusses der baden-württembergischen Landesregierung entschieden, den Untergrund im Bereich der Rathausgasse, dem zentralen Bereich der Hebung, geologisch-hydrogeologisch eingehend zu erkunden.

Erkundungsbohrungen

Die geologische Erkundung der Untergrundverhältnisse im Bereich des Erdwärmesondenfeldes der EWS 1 bis EWS 7 erfolgte im Zeitraum vom 02. März bis 30. Oktober 2009.

Mit der 18,20 m tiefen Erkundungsbohrung EKB 1 und der 163,00 m tiefen Erkundungsbohrung EKB 2, sowie den durchgeführten Begleituntersuchungen und seismischen Erkundungen konnte ein belastbarer geologischer, mineralogischer und hydrogeologischer Datensatz gewonnen und die Arbeitshypothese überprüft werden.

Die geologische Profilaufnahme erbrachte, dass bei einem lateralen Abstand von knapp 10 m zwischen der Erkundungsbohrung EKB 1 und der nächstgelegenen Erdwärmesonde EWS 1 eine tektonische Störung die geologische Profilfolge um ca. 120 Höhenmeter versetzt, wobei die EKB 1 auf der Hochscholle liegt.

In der Erkundungsbohrung EKB 2 wurde die für das Erdwärmesondenfeld typische Schichtabfolge erbohrt. Sie reicht unter geringmächtiger quartärer Überdeckung von der Schilfsandstein-Formation über die Gipskeuper-Formation und den Unterkeuper bis in den Oberen Muschelkalk.

Die Obere Auslaugungszone mit Gipskarst in der Gipskeuper-Formation (km1) wurde zwischen 22,40 m u. GOK und 28,60 m u. GOK angetroffen. Darunter folgt der sulfatführende Gebirgsabschnitt mit dem Oberen Gipsspiegel bei 28,60 m u. GOK, dem

Oberen Anhydritspiegel bei 61,50 m u. GOK, dem Unteren Anhydritspiegel bei 126,10 m u. GOK und dem Unteren Gipsspiegel bei 141,70 m u. GOK.

Unterhalb des Oberen Gipsspiegels wurde im gesamten Sulfatgebirge ausschließlich mit inhibierter Bohrspülung aus Trinkwasser mit organischen und mineralischen Zusätzen gearbeitet, um Lösungsvorgänge und weitere Gipskeuperquellung zu verhindern. Im Bereich einzelner Grundwasserhorizonte sowie im Quellungsbereich des Gipskeupers wurde das Bohrloch mit vier Stand-/ Sperrrohren teleskopiert ausgebaut. Die einzelnen Rohrtouren wurden dabei mit hochsulfatbeständigem Brunnendämmer hinterfüllt.

Der Tiefenabschnitt zwischen 61,5 m und 99,5 m wird als der momentan in Quellungsprozess befindliche Gebirgsabschnitt identifiziert. Er lässt sich anhand der Bohrkerne makroskopisch nicht eindeutig bzw. nur sehr undeutlich erkennen. Seine Identifikation ist vielmehr nur in der Gesamtschau unter Einbezug indirekter und direkter Anzeichen möglich.

Es wurden vier hydraulisch und hydrochemisch/isotopisch voneinander getrennte Grundwasserstockwerke nachgewiesen. Die beiden oberen Grundwasserstockwerke (Schilfsandstein und Gipskarst) führen stark gespannte, die beiden unteren (Unterkeuper und Oberer Muschelkalk) artesisch gespannte Grundwässer. Mit der Tiefe nehmen die Grundwasseralter zu. Die Stockwerke weisen jeweils voneinander abweichende, eigenständige hydrochemische und isotopische Signaturen auf, so dass eine eindeutige Stockwerkstrennung vorliegt.

Die Bohrungen wurden in Homogenbereiche gegliedert, in denen die Gesteinseigenschaften (Lithologie, Sulfatführung, gesteinsphysikalische Kennwerte) relativ einheitlich sind. Der Anhydritbereich lässt sich in eine Zone zwischen Oberem Anhydritspiegel und Anhydritkern (durchschnittlicher Anhydritgehalt: 20,2 %), dem Anhydritkern (durchschnittlicher Anhydritgehalt: 33,5 %), sowie eine Zone zwischen Anhydritkern und Unterem Anhydritspiegel (durchschnittlicher Anhydritgehalt: 23,1 %) gliedern.

In Quellung befindet sich die Zone zwischen Oberem Anhydritspiegel und Anhydritkern, die einen Wassergehalt von 3 % aufweist. Dieser Wassergehalt ist etwa doppelt so hoch wie der in dem darunter liegenden, nicht quellenden Anhydritbereich. Der Quellungsbereich zeichnet sich auch durch den höchsten Anteil an quellfähigen Tonmineralen (im Wesentlichen Corrensit) aus.

In der Erkundungsbohrung EKB 2 wurde zwischen 117,50 m u. GOK und 118,10 m u. GOK die Erdwärmesonde EWS 5 angebohrt. Die Ringraumverfüllung der EWS 5 besteht nach Untersuchungen der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt der Uni-

versität Karlsruhe (MPA) überwiegend aus Ettringit. Nach dem Prüfbericht der MPA "liegt die Vermutung nahe, dass kein sulfatbeständiger Zement verwendet wurde": Ettringit wurde vom RPF/LGRB mittels Röntgenbeugungsanalyse im Schneidewasser der EWS 3, EWS 5 und EWS 7 nachgewiesen.

Untersuchungen in den Erdwärmesonden

Zur Beurteilung in Frage kommender Varianten zur nachträglichen Abdichtung der Erdwärmesonden ist die Kenntnis der Raumlage der Bohrspuren unabdingbare Voraussetzung. Hierfür wurde vom RPF/LGRB die Entwicklung einer kombinierten zweiachsigen Inklinations-/Azimut-Messonde in Auftrag gegeben.

Die Erdwärmesondenbohrungen EWS 1 bis EWS 7 weichen in ihrer Raumlagerichtung stark nach Südosten ab (im tiefsten Abschnitt bis 40° aus der Vertikalen). Diese Bohrabweichung erklärt sich daraus, dass sich das vergleichsweise flexible Bohrgestänge nach Verlassen der Verrohrung mit dem Bohrmeißel senkrecht auf die Schichtflächen einstellt. Bei den Erdwärmesonden EWS 6 und EWS 7 beträgt der horizontale Abstand zwischen Bohransatzpunkt und Bohrendpunkt ca. 20 m, bei den übrigen gemessenen Sonden wurden Abweichungen von Ansatz- und Endpunkt um 15 m gemessen. Die in der Rathausgasse angesetzte EWS 7 unterfährt das benachbarte Wohngebäude und endet unter der Kirchstraße.

Ein eindeutiger Beleg für die Abweichungen der Sonden ergibt sich aus der Tatsache, dass am 04. August 2009 in der Erkundungsbohrung EKB 2 zwischen 117,50 m und 118,10 m u. GOK zufällig die Erdwärmesonde EWS 5 zentral angebohrt wurde.

Parallel zur Messung der Raumlage erfolgten in den Erdwärmesonden Untersuchungen zur zeitlichen und räumlichen Temperaturentwicklung sowie zu einer nachträglichen differenzierteren lithologischen Gliederung anhand von Messungen der natürlichen Gammastrahlung. Die Temperaturprofile der EWS lassen sich in vier charakteristische Abschnitte untergliedern. Der Obere Abschnitt (0 bis 14 m u. GOK) mit jahreszeitlichem Schwankungsbereich bzw. zwischen 14 m bis 50/60 m u. GOK mit langjährigen Temperatureinflüssen durch städtische Bebauung und Grundwasserfluß im Gipskarst, der Mittlere Abschnitt (50/60 m u. GOK bis ca. 90 m u. GOK) mit charakteristischer Temperaturanomalie und der Untere (ab 90 m u. GOK), durch den geothermischen Gradienten und eine kleinere Temperaturanomalie bestimmte Abschnitt.

Die charakteristischen Temperaturanomalien in den Erdwärmesonden liegen in Anhydrit- und quellfähige Tonminerale führendem Gebirge. Sie werden auf eine exotherme Reaktion bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips zurückgeführt. Die Temperaturmessungen ermöglichen somit eine indirekte Kontrolle der Entwicklung der Hebungsvorgänge.

Aus den Ruhetemperaturprofilen aller Erdwärmesonden und den Aufheiztemperaturprofilen in den EWS 3 und EWS 7 ergeben sich eindeutige Hinweise auf Grundwassereinflüsse auf die Erdwärmesonden. Belege für vertikale Grundwasserbewegungen gibt es in der Erdwärmesonde EWS 7 im Abschnitt zwischen 130 m bis 75 m und zwischen 35 m bis zur Quartärbasis. Weitere Hinweise für vertikale Grundwasserbewegung zeigen sich in den Erdwärmesonden EWS 2 und EWS 3 zwischen 35 m bis zur Quartärbasis. Die Aufheiztemperaturprofile belegen laterale Grundwassereinflüsse in den EWS 3 und EWS 7, die in den anhydritführenden Gebirgsabschnitten mit den dort zu beobachtenden Temperaturanomalien zusammenfallen. Die Temperaturverteilung im Sondenfeld zeigt, dass die EWS 7 eine wesentliche Rolle für das Auslösen der Quellungsvorgänge spielt.

Hebungsfigur

Die in Staufen seit Ende 2007 beobachteten Geländehebungen werden seit Anfang 2008 geodätisch vermessen. Von Hebungen betroffen ist ein elliptischer Bereich, dessen große Halbachse eine Nordost-Südwest- (280 m) und dessen kleine Halbachse eine Nordwest-Südost-Orientierung (180 m) aufweist.

Die Hebungsfigur hat bereits seit Juni 2008 weitgehend ortsfest ihre markante elliptische Ausbildung angenommen. Die Hebung verläuft seit Beginn der Messungen weitgehend linear mit einer im Hebungszentrum maximalen vertikalen Hebungsrate bis zu 10 mm/Monat. Das Hebungszentrum liegt um den Bereich der Rathausgasse. Nach einer etwa fünfmonatigen ersten Phase seit Abschluß der EWS-Bohrarbeiten mit geringen Hebungsgeschwindigkeiten steigt die Hebungsgeschwindigkeit zumindest in den ersten 100 Tagen des Meßzeitraumes in einer zweiten Phase rasch bis auf maximal 0,37 mm/Tag an, um anschließend in einer dritten Phase in eine niedrigere "Plateau-Geschwindigkeit" überzugehen.

Die Hebungsbewegung setzt sich aus einer vertikalen und in Teilbereichen einer um den Faktor von ca. 1,7 größeren horizontalen Komponente zusammen.

Die quellungsbedingte Volumenzunahme des Hebungskörpers verläuft bis September 2009 linear und hat sich seither verlangsamt.

Untergrundmodell

Die Ergebnisse der Erkundungsmaßnahmen flossen in ein geologisches Untergrundmodell ein. Aufgrund der komplizierten geologischen und tektonischen Verhältnisse und wegen der strikten Beschränkung auf Erkundungsmaßnahmen, die zur Überprüfung der Arbeitshypothese und für die Sanierungsplanung unbedingt erforderlich waren, gibt es jedoch mehrere Bereiche, in denen die derzeitige Datenbasis verschiedene Interpretationen zulässt. Dargestellt wird die Interpretation, die auf der vorhandenen Datengrundlage am plausibelsten erscheint.

Der Untergrund im Bereich des Erdwärmesondenfeldes in der Altstadt von Staufen besteht aus einem kleinräumigen Schollenmosaik. Die Störungen streichen hauptsächlich in Nordost-Südwest Richtung und senkrecht dazu in Nordwest-Südost-Richtung. Das Sondenfeld liegt im Bereich einer durch Schichtverbiegungen und parallel zur Hauptverwerfung Nordost-Südwest streichende Störungen kleinräumig gegliederten Grabenscholle. An die Grabenscholle grenzen im Südosten und Nordwesten Hochschollen aus Unterkeuper/Oberem Muschelkalk an. Aufgrund der hydraulisch weitgehend "dichten" Störungen im anhydritführenden Gebirge der Grabenscholle gab es vor den Erdwärmesondenbohrungen keine natürlichen Wegsamkeiten, über die gespanntes Grundwasser aus tieferen Stockwerken zu den quellfähigen Gesteinsbereichen im Gipskeuper gelangen konnte. Nur so war es möglich, dass in dieser tektonisch stark überprägten Situation der Vorbergzone im Gipskeuper Anhydrit über geologisch lange Zeiträume erhalten bleiben konnte und nicht bereits früher mit Grundwasser in Kontakt kam bzw. gelöst wurde.

Nach dem Abteufen der Erdwärmesondenbohrungen kam es in Folge von Wasserzutritten im westlichen Teil der Grabenscholle im Abschnitt zwischen Oberem Anhydritspiegel und Anhydritkern zu Quellungsprozessen, im östlichen Teil treten diese nicht auf. Für den in Quellung befindlichen Bereich gibt es untrügliche Belege für vertikale und laterale Grundwasserbewegungen.

Die im Quellungsbereich nachgewiesenen Grundwasserbewegungen sind ein wesentlicher Baustein zum gesamten Prozessverständnis. Nur dadurch ist im Zusammenhang mit den tektonischen Verhältnissen ein flächenhafter Nachschub von Grundwasser möglich, das über undichte Ringräume einer oder mehrerer Erdwärmesonden aufsteigen kann.

Die Hebungsfigur wird maßgeblich durch das tektonische Schollenmosaik und die Schichtlagerung bestimmt. Entsprechend dem Schichteinfallen liegt das Hebungszentrum an der Geländeoberfläche nicht vertikal über dem in Quellung befindlichen Gebirgsbereich. Der zwischen 61,50 m u. GOK und 99,50 m u. GOK liegende Quel-

lungskörper wirkt sich an der Geländeoberfläche in einer wesentlich größeren Hebungsfigur aus.

Bisherige Maßnahmen zur Schadensbegrenzung

Im Zuge der geologischen Erkundung sowie der Untersuchungen an den Erdwärmesonden wurden verschiedene Möglichkeiten geprüft, den momentan ablaufenden Quellhebungsprozess schadensbegrenzend zu beeinflussen. Vordringlichstes Ziel dabei ist es, einen weiteren Zufluss von Grundwasser in den in Quellung befindlichen Gebirgsabschnitt zu verhindern.

Hierzu werden zeitgleich zwei Maßnahmen durchgeführt: Dauerpumpmaßnahme (hydraulischer Abwehrbetrieb) in der Erkundungsbohrung EKB 2 und nachträgliche technische Abdichtung (Nachverpressung) der Ringräume der Erdwärmesonden EWS 1 bis EWS 7.

Der hydraulische Abwehrbetrieb erfolgt in der im Unterkeuper/Oberem Muschelkalk temporär als Brunnen ausgebauten Erkundungsbohrung EKB 2. Bei dem hydraulischen Abwehrbetrieb wird der Druckwasserspiegel des Grundwassers im Unterkeuper und im Oberen Muschelkalk unter kontinuierlicher Überwachung der Lösungsfracht in der EKB 2 auf ca. 130 m u. GOK dauerhaft abgesenkt.

Bei den bisherigen Nachverpressungen (Stand Februar 2010) wurden in der EWS 7 mit insgesamt über 7000 l Injektionszement die höchsten Aufnahmemengen verzeichnet. Dies ist ein eindeutiger Beleg für die unzureichende Abdichtung des Ringraums der EWS 7. Es wird davon ausgegangen, dass mit dieser Injektion ein nahezu offener Ringraum und damit der wichtigste Wassernachschub in den Quellhebungsbereich verschlossen werden konnte. Weitere untrügliche Hinweise auf eine unzureichende Ringraumabdichtung ergeben sich aus den in der EWS 7 gemessenen steilen Temperaturgradienten im Unteren Profilabschnitt sowie aus der nachgewiesenen hydraulischen Verbindung zwischen EWS 7 und EKB 2.

Die kontinuierlich weiterzuführenden Messungen der räumlichen und zeitlichen Entwicklung des Hebungsverlaufs stellen die wichtigste Grundlage zum Nachweis der Wirksamkeit der eingeleiteten schadensbegrenzenden Maßnahmen dar. Mit den Temperaturmessungen kann zusätzlich beobachtet werden, ob die Anhydritumwandlung nachlässt. Jedoch werden die Temperaturmessungen durch die schwindende Zugänglichkeit der Sondenschläuche auf Dauer nur eingeschränkt oder sogar überhaupt nicht mehr möglich sein.

In wie weit das "Gipskeuperquellen" monokausal oder ggf. noch von weiteren Teilprozessen überlagert ist, lässt sich derzeit noch nicht abschließend beurteilen. Diese Fragestellung wird u. a. im Rahmen des geomechanischen Modells der Ingenieurgruppe Geotechnik näher untersucht.

In der Gesamtschau führen alle Einzelergebnisse beider Erkundungsbohrungen und der durchgeführten Begleituntersuchungen zu einer widerspruchsfreien Verifizierung der Arbeitshypothese.

LITERATUR

ANAGNOSTOU, G. (1992): Untersuchungen zur Statik des Tunnelbaus in quellfähigem Gebirge. – Veröffentlichung des Instituts für Geotechnik der ETH Zürich, Band 201, August 1992.

BANKS, D., GANDY, C.J., YOUNGER, P.L., WITHERS, J. & UNDERWOOD, C. (2009): Anthropogenic thermogeological 'anomaly' in Gateshead, Tyne and Wear, UK. – Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrology, **42**, no. 3, S. 307 – 312, London.

BAUMANN, K., BÜCHNER, U., GROßWIG,S., HURTIG, E., SENZE, A., TRILLER, F. (2008): Qualitätssicherung und Qualitätsüberwachung von Erdwärmesondenanlagen durch geophysikalische Bohrlochmessungen. – Der Geothermiekongress 2008, Kongressband, S. 280 – 289.

BERGER, H. (2009): Erdwärmesonden - Hauptprobleme durch fehlerhafte Planung und Erstellung, bbr 04/2009, S. 16 – 21.

EINSTEIN, H. H., BISCHOFF, N., HOFMANN, E. (1972): Verhalten von Stollensohlen in quellendem Mergel. – Veröff. Int. Symp. f. Untertagebau, S. 296, Luzern.

FORRER, S., MÉGEL, T., ROHNER, E., WAGNER, R., GEOWATT AG. (2008): Mehr Sicherheit bei der Planung von Erdwärmesonden, bbr 05/2008, S. 42 – 47.

FURTAK, H. & LANGGUTH, H.R. (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. – Mem. IAH-Congress, 1965, VII: 86-96, 5 Fig.; Hannover.

GENSER, H. (1957): Stratigraphie und Lagerungsverhältnisse des nördlichen Teils der Sulzburger Vorbergzone (vom St. Gotthard-Hof bis Sulzburg).– Unveröff. Dipl.- Arb. Geol. Inst. Freiburg, 67 S.; Freiburg i. Br.

GENSER, H. (1958): Geologie der Vorbergzone am südwestlichen Schwarzwaldrand zwischen Staufen und Badenweiler. – Diss. maschschr. Univ. Freiburg,119+IX S.; Freiburg i. Br.

GENSER, H. (1959): Stratigraphie und Tektonik der Vorbergzone am südwestlichen Schwarzwaldrand zwischen Staufen und Badenweiler. – Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br., **49**, S. 59 – 112, 2 Abb., 1 Karte; Freiburg i. Br.

GENSER, H. (1992): Geologischer Abriß über die Vorbergzone des südöstlichen Oberrheingebietes. in: Schwarzwald und Oberrheintiefland. Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau. – Freiburger Geographische Hefte, H. 36, 25 – 55, 18 A., Selbstverlag des Institutes für Physische Geographie der Albert-Ludwigs-Universität; Freiburg i. Br.

GEOEXPERT (2009 a): Seismische Erkundung der Untergrundstrukturen, Staufen i. Br. – Bericht der Fa. GEOEXPERT AG vom 07. April 2009; CH-Schwerzenbach.

GEOEXPERT (2009 b): Seismische Erkundung / Ergebnisse ergänzende Messungen. – Bericht der Fa. GEOEXPERT AG vom 21. August 2009, 18 S., 5 Beilagen; CH-Schwerzenbach.

GEOWATT AG (2008): Temperaturmessungen in 6 Erdwärmesonden in Staufen im Breisgau. – Bericht 03. Juni 2008, 20 S.

GEOPHYSIKA (2010): Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Probenmaterial im Auftrag des Regierungspräsidiums Freiburg, Messbericht zu Laboruntersuchungen, durchgeführt im November / Dezember 2009, 17 S, 12. Januar 2010; Aachen.

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

GLA (1995) Geologisches Landesamt Baden-Württemberg: Geologischer Aufbau des Untergrundes in der Baugrube für das Hotel Kreuz-Post und angrenzende Gebäude an der Hauptstraße 65 in Staufen. – Az. 0873.01/95- 4764 vom 01. März 1995; Freiburg i. Br. [unveröff.].

GROSCHOPF, R., KESSLER, G., LEIBER, J., MAUS, H., OHMERT, W., SCHREINER, A., WIMMENAUER, W. mit Beitr. von ALBIEZ, G., HÜTTNER, R., WENDT, O. (1996): Geol. Karte von Baden-Württ. 1 : 50 000. – Erl. . Freiburg i. Br. u. Umgebung, 3., ergänzte Aufl., 364 S., 27 Abb., 7 Tab., 7 Taf. 1 Beil.; Freiburg i. Br.

HAUBER, L., JORDAN, P., MADSEN, F., NÜESCH, R., VÖGTLI, B. (2005): Tonminerale und Sulfate als Ursache für druckhaftes Verhalten von Gesteinen; Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Straßen.

HENKE, K. F., KRAUSE, H., MÜLLER, L., KIRCHMAYER, M., EINFALT, LIPPMANN, F. (1975): Sohlhebungen beim Tunnelbau im Gipskeuper. – Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr Baden-Württemberg.

HYDROISOTOP (2009): Ergebnisse der Isotopen- und Spurenstoffuntersuchungen an Grundwasserproben der Erkundungsbohrungen I und II in Staufen, März – Oktober 2009. – Bericht vom 17. Dezember 2009, 17 S., 7 Tab., 7 Anl.; Emmendingen.

Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie, 16. Auflage, Stuttgart, Enke 1978.

Ingenieurgruppe Geotechnik (2010): Bericht, Kirchzarten.

LGRB (2002) Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg, 30 S., 11 Anl., 15 Karten.; Freiburg i. Br. [unveröff.].

LUTZ, M., ETZOLD, A. (2003): Der Keuper in Untergrund des Oberrheingrabens in Baden. – Jh. Landesamt f. Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, **39**, 55 – 110, 7 Abb., 2 Tab., Freiburg im Breisgau.

RAUH, F. (2009): Untersuchungen zum Quellverhalten von Anhydrit und Tongesteinen im Tunnelbau. – Münchner Geowiss. Abh., 11, S. 1-110, München.

REIMANN, M. (1991): Geologisch-lagerstättenkundliche und mineralogische Untersuchungen zur Vergipsung und Volumenzunahme der Anhydrite verschiedener geologischer Formationen unter natürlichen und labormäßigen Bedingungen. – Geologisches Jahrbuch, Reihe D, Heft 97, Hrsg. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland.

RPF/LGRB (2008 a): Geologische, tektonische und hydrogeologische Verhältnisse im Stadtgebiet von Staufen, Stadt Staufen, Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald, TK25: 8112 Staufen im Breisgau; Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (erstellt im Auftrag des gerichtlich bestellten Sachverständigen Prof. Dr. Schad). – 16 S., 5 Anl., RPF/LGRB Az. 94/4763//08-2761 vom 11. April 2008; Freiburg i. Br.

RPF/LGRB (2008 b): Bericht über die Ergebnisse der H/V-Messungen im Stadtgebiet von Staufen; Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. – RPF/LGRB Az. 94/4763//08-4164 vom 19. Mai 2008; Freiburg i. Br.

SAUER, M., GRUNDMANN, E. (2009): Praxiserfahrungen mit der Auswertung des geothermal Response Tests. – Symposium "10 Jahre TRT in Deutschland", Göttingen 16. September 2009.

SCHREINER, A. (1992): Geologie und Landschaft – in: HOPPE, A. (Hrsg): Das Markgräflerland: Entwicklung und Nutzung einer Landschaft, Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br. . – **81**, 7 – 24, 6 Abb., Freiburg i. Br., Dez. 1991.

terratec (2009 a): Bohrlochmessungen in der Bohrung EKB 2 in Staufen, 12. Juni – 21. Oktober 2009, Pr.-Nr. 295-2009 vom 17. November 2009, 14 S.; Heitersheim.

terratec (2009 b): Bohrlochmessungen in den Bohrungen EWS3 und EWS7 in Staufen, 29. Oktober 2009, Pr.-Nr. 295-2009 vom 18. November 2009, 5 S.; Heitersheim.

ROHNER, E. (2009): TRT in Kombination mit hoch aufgelösten Temperatur-Tiefenprofilen zur Qualitätssicherung. – TRT-Symposium, 16. September 2009, Göttingen

TUCKER, M. E. (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie - 265 S., 219 Abb., 20 Tab.; Enke Verlag Stuttgart.

UM (2005), Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg., 2005): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 4. überarbeitete Neuauflage, Mai 2005.

VOUTTA, A. (2009): Ergebnis Erdwärmesonden-Revision, Lilienstraße 5, 73614 Schorndorf, unv. Bericht, 04. Juni 2009, 29 S.

WALKER-HERTKORN, S., KÜBERT, M., VOUTTA, A. (2009): Messmethoden bei Erdwärmesondenbohrungen, GtV 3/2009, S. 19 – 23.

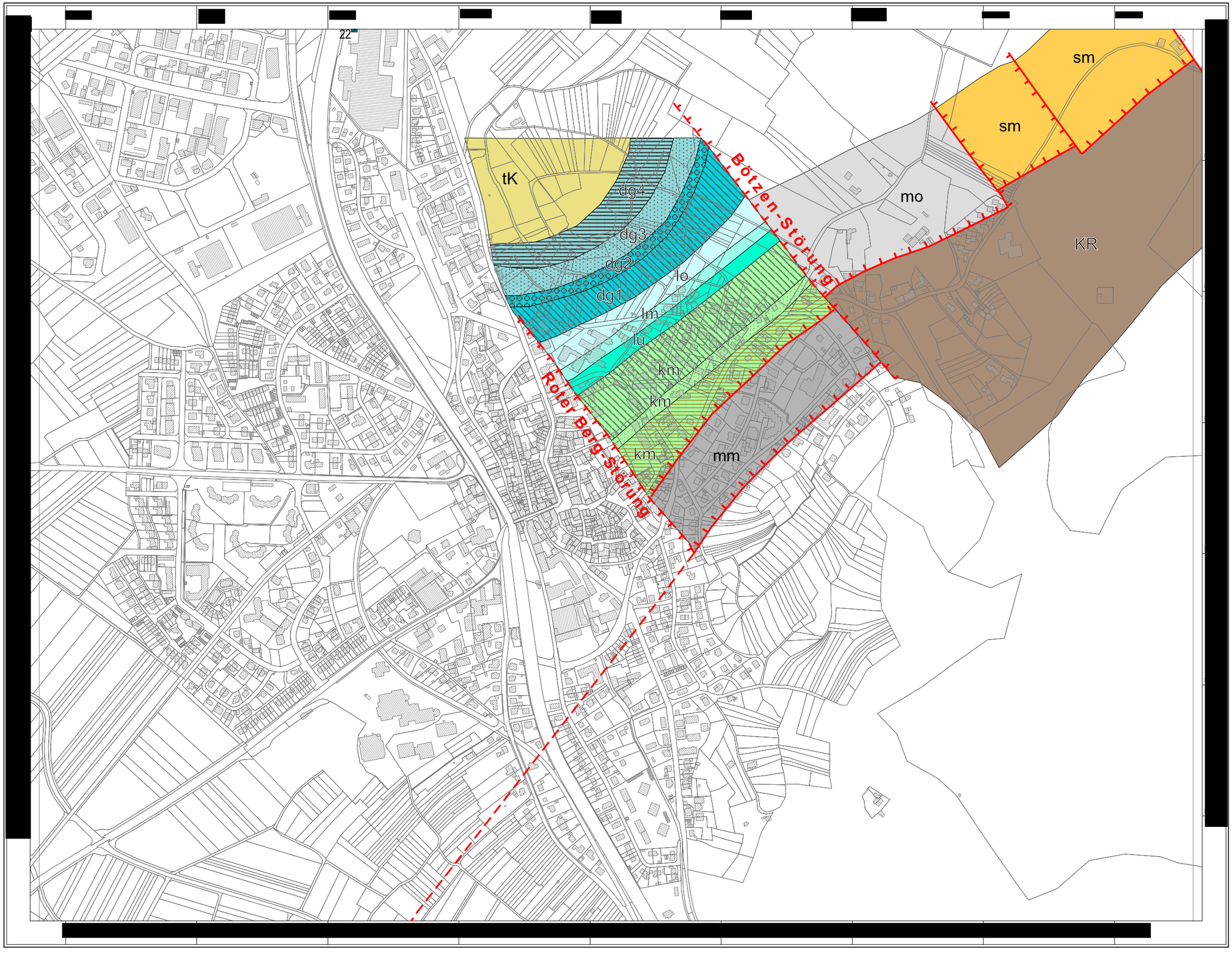
WITTKE, M., WITTKE-GATTERMANN, P., WAHLEN, R.(2007): Möglichkeiten der Optimierung des Tunnelbaus im quellfähigen Gipskeuper durch Berücksichtigung der Selbstabdichtung. – Zeitschrift Geotechnik 4/2007.

Anl. 3.1: Stratigraphische Tabelle der Festgesteinsabfolge im Bereich des Erdwärmesondenfeldes.

Abk.	Formation	Sub-Formation	Bank/Lage
km	**Mittelkeuper**		
km2	**Schilfsandstein-Formation**		
DM		Dunkle Mergel	
km2s		Schilfsandstein	
km1	**Gipskeuper-Formation**		
OBE		Obere Bunte Estherien-Schichten	
GES		Graue Estherien-Schichten	
UBE		Untere Bunte Estherien-Schichten	
MGH		Mittlerer Gipshorizont	
WEH		Weinsberg-Horizont	
DRM		Dunkelrote Mergel	
			Entringen-Sulfat
BH		Bochingen-Horizont	
GI		Grundgipsschichten	
ku	**Unterkeuper***		
GRE	**Grenzschichten**		
Gd		Grenzdolomit	
GRM	**Grüne Mergel**		
LI	**Lingulaschichten**		
LD		Lingula-Dolomit	
BGi		Böhringen-Gipshorizont	
AP	**Anoplophoraschichten**		
OGM		Obere Graue Mergel	
Ad		Anoplophoradolomit	
LGT		Liegendton	
ABS	**ALBERTI-Schichten**		
SPS		Sandige Pflanzenschiefer	
Ab		ALBERTI-Bank	
HSS	**Hauptsandsteinschichten (nicht nachgewiesen)**		
ES	**Estherienton**		
B	**Basisschichten**		
UDO		Untere Dolomite	
Bk		Blaubank	
VS		Vitriolschiefer	
mo	**Oberer Muschelkalk**		
moR	**Rottweil-Formation (früher: Obere Hauptmuschelkalk-Formation)**		
mo2D		Trigonodus-Dolomit	
HAD			Hangenddolomit

* Der Unterkeuper wurde nicht in vollständiger Abfolge angetroffen.

Geologische Karte nach Genser (1959)



0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 km

Geologische Karte nach Genser (1959)
(in Klammern: Abkürzung nach Symbolschlüssel Geologie RPF/LGRB Febr. 2010)

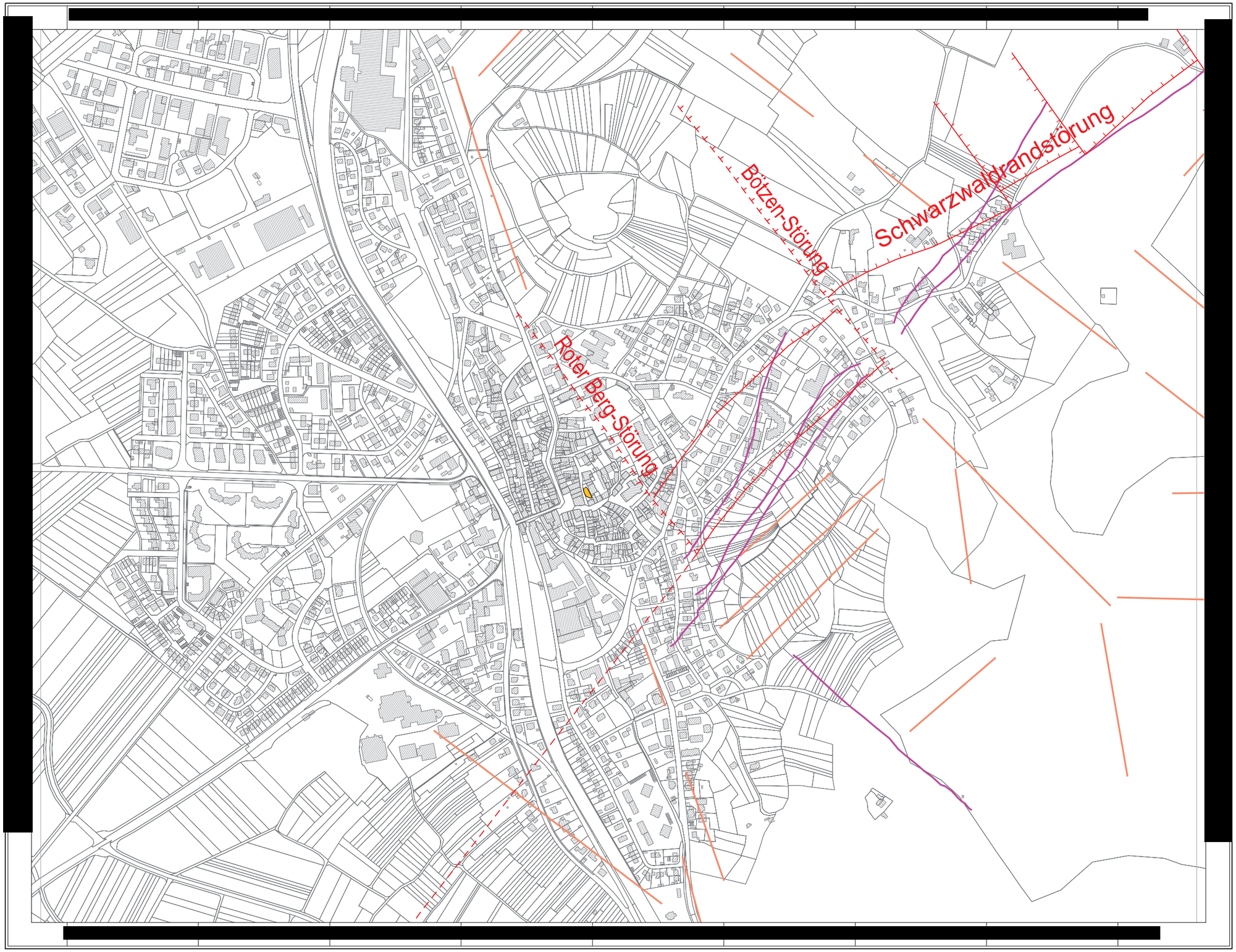
- tK Tertiärkonglomerat (tK)
- dg4 Humphriesi- u. Blagdenischichten (HUG bis BG)
- dg3 Sowerbyi- und Sauzeischichten (bj1)
- dg2 Murchisonaeschichten (al2M)
- dg1 Opalinuston (al1)
- lo Oberer Lias (juo)
- lm Mittlerer Lias (jum)
- lu Unterer Lias (juu)
- km Bunte Mergel (km3)
- km Schilfsandstein (km2)
- km Gipskeuper (km1)
- mo Oberer Muschelkalk (mo)
- mm Mittlerer Muschelkalk (mm)
- sm Mittlerer Buntsandstein (sm)
- KR Grundgebirge, ungegliedert (KR)
- Fläche nicht kartiert

- Störung
- Störung mit Abschiebungsrichtung
- Störung, vermutet
- Störung, vermutet mit Abschiebungsrichtung

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763//10-563 Anlage: 3.2

Tektonisches Inventar im Stadtgebiet von Staufen



0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 km

Störungen

- nach Vorläufiger Geologischer Karte 1 : 25 000 (1992)
  - Störung
- nach Genser (1958, 1959)
  - Störung
  - Störung mit Abschiebungsrichtung
  - Störung, vermutet
  - Störung, vermutet mit Abschiebungsrichtung
- nach Luftbild-/Geländemodellauswertung (RPF/LGRB 2008)
  - Störung

Erdwärmesondenfeld

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763//10-563 Anlage: 3.3

Anlage 3.4: Hydrogeologische Gliederung des Buntsandsteins (LGRB 2002).

Kurzbezeichnung	Stratigraphie		Lithologie	Mächtigkeit (m)	hydrogeologische Beschreibung	Hydraulische Eigenschaften
sot	Oberer Buntsand-stein	Rötton-Formation	Ton- und Schluffstein, z. T. im Wechsel mit Feinsandsteinbänken	10 - 70 m	Grundwassergeringleiter	
sos		Plattensandstein-Formation			Kluftgrundwasserleiter; gute Grundwasserführung im Mittleren Buntsandstein (sm), insbesondere in den konglomeratischen Lagen, im Unteren Buntsandstein (su) im Bausandstein unmittelbar über dem ECKschen Horizont sowie im Bereich von Auflockerungszonen (z. B. Störungen, Tälern)	$T/H_m = 1*10^{-5} - 3*10^{-5}$ m/s
smK	Mittlerer Bunt-sandstein	Kristallsandstein	Mittelsandstein, stark verkieselt; Fein- bis Mittelsandstein sowie Wechselfolge von Sand- und Schluffstein; Mittel- und Grobsandstein, z. T. verkieselt, z. T. mit karneolführenden dolomitischen Knollen, Dolomitstein	Bis > 400 m		
smgo		Hauptgeröllhorizont				
smgm		Mittlerer Geröllhorizont				
smgu		Unterer Geröllhorizont				
suso	Unterer Bunt-sandstein	Oberer Bausandstein				
susu		Unterer Bausandstein				
suE		ECKscher Horizont				

T Transmissivität
H hydraulisch wirksame Mächtigkeit
T/H Gebirgsdurchlässigkeit
T/H_m mittlere Werte für T/H
braun Grundwassergeringleiter

Anlage 3.5: Hydrogeologische Gliederung des Muschelkalks (LGRB 2002).

Kürzel	Stratigraphie			Lithologie	Mächtigkeit (m)	Hydrogeologische Beschreibung	Hydraulische Eigenschaften
mo2	Oberer Muschelkalk	Oberer Hauptmuschelkalk		Kalkstein- mit Tonstein- und Tonmergelsteinlagen, Dolomitstein, Schalentrümmerkalk	20 – 55	geklüfteter, überwiegend schichtig gegliederter, regional verkarsteter Kluft- und Karst-grundwasserleiter	$T=1*10^{-1}$ -$1*10^{-3}$ m^2/s $T/H=1*10^{-5}$ -$1*10^{-3}$ m/s
mo1		Unterer Hauptmuschelkalk	Baulandschichten		25 – 40		
			Neckarwestheim-Schichten				
			Haßmersheim-Schichten	Schalentrümmerkalk und Mergelstein in Wechsellagerung		Grundwassergeringleiter	
			Zwergfauna-Schichten	knollige, bioturbate Kalksteine, Oolithe, Hornsteinlagen		Kluft- und Karstgrundwasserleiter	
mmDo	Mittlerer Muschelkalk	Obere Dolomit-Formation		Dolomitstein, dolomitischer Kalkstein, Mergelstein	10 – 25		
mmS		Salinar-Formation		Steinsalz, Anhydrit, Gips, Dolomitstein	20 – 90	Grundwassergeringleiter	
mmDu		Untere Dolomit-Formation		Mergelstein, Tonmergelstein, Dolomitstein, Kalkstein mit Schalentrümmerkalk	< 10	geklüfteter, schichtig gegliederter, z. T. verkarsteter Kluftgrund-wasserleiter mit überwiegend geringer, bei Verkarstung mäßiger bis mittlerer Grundwasserführung	$T=1*10^{-5}$ -$1*10^{-4}$ m^2/s
mu	Unterer Muschelkalk			Mikritischer Kalkstein (Wellenkalk), Dolomitstein, untergeordnet Tonstein, Mergelstein und bioklastischer Kalkstein (Schaumkalk)	50 – 60		

T Transmissivität
H hydraulisch wirksame Mächtigkeit
T/H Gebirgsdurchlässigkeit
T/H_m mittlere Werte für T/H
braun Grundwassergeringleiter

Anl. 3.6: Hydrogeologische Gliederung des Keupers (LGRB 2002).

Kurzbezeichnung	Stratigraphie	Lithologie	Mächtigkeit (m)	hydrogeologische Beschreibung	Hydraulische Eigenschaften
ko	Oberkeuper	Feinsandstein, z. T. verkieselt, und Tonstein, z. T. feinsandig	bis 25	Grundwassergeringleiter; langgestreckte klüftige, z. T. poröse Sandsteinkörper (wenig ergiebige Grundwasserleiter) in lateraler Verzahnung mit Tonsteinen (Grundwassergeringleiter)	
km5	Knollenmergel-Formation	Mergelstein mit Kalkknollen	10 – 50	Grundwassergeringleiter	
km4	Stubensand-stein-Formation	Mittel- und Grobsandstein mit Tonsteinzwischenlagen; Mergel-stein mit Sandsteinbänken	10 – 140	schichtig gegliederter Kluftgrundwasser-leiter; Grundwasserführung in den Sand-steinhorizonten (bei Verwitterung Über-gang zu Porengrundwasserleiter)	$T = 2*10^{-3}$- $1*10^{-4} m^2/s$ Q ≈ 0,1 - 5 l/s, z. T. auch höher
km3	Bunte Mergel-Formation	Tonmergelstein mit Mergelstein-bänken, Tonstein; fein - bis Grob-sandstein, verkieselt (Kieselsandsteinschichten)	20 – 80	überwiegend Grundwassergeringleiter, geringe Wasserführung auf geklüfteten Sandstein- und Dolomitsteinbänken der Kieselsandsteinschichten; in Ostwürt-temberg Kieselsandsteinschichten, Grundwasserleiter	
km2	Schilfsandstein-Formation	geringmächtiger sandiger Ton-stein (Normalfazies), verzahnt mit Feinsandstein z. T. mächtig (Flutfazies)	5 – 40	Sandsteinbänke der Flutfazies, wenig ergiebige Kluftgrundwasserleiter, tonig-sandige Schichten der Normalfazies, Grundwassergeringleiter	Q ≈ 0,1 - 2,5 l/s
km1	Gipskeuper-Formation	Ton- und Mergelstein, einzelne dolomitische Mergel- und Dolo-mitseinbänke mit Gips in Knollen und Bänken; bei Auslaugung Zellenkalk; an der Basis mächti-ger Gipslager	< 50 – 165	im unverwitterten und unausgelaugten Zustand Grundwassergeringleiter; im verwitterten und ausgelaugten Zustand schichtig gegliederter Grundwasserleiter, Grundwasserführung bevorzugt oberhalb des Gipsspiegels, wenn dieser in den Grundgipsschichten verläuft, sowie im Bochinger Horizont und in den Blei-glanzbankschichten (Mittlerer Gipskeu-per)	T ≈ bis $10^{-3} m^2/s$ (Grundgips-schichten, ausgelaugt) $T_m \approx 1*10^{-4} m^2/s$ (Bochinger Horizont) $T_m \approx 5*10^{-5} m^2/s$ (Bleiglanzbank)
ku	Unterkeuper	Wechselfolge von Ton-, Mergel-, Dolomit- und Sandstein	10 bis > 30	schichtig gegliederter Kluftgrundwasser-leiter; Grundwasserführung im Oberen Unterkeuper überwiegend in Dolomit-steinbänken (Grenzdolomit, Linguladо-lomit), im Unteren Unterkeuper im lokal mächtigen Hauptsandstein	T ≈ $1*10^{-2}$ - $1*10^{-6}$ m²/s

T Transmissivität Q Quellschüttung T_m mittlere Transmissivität braun Grundwassergeringleiter

Anlage 5.1
Bauzeitenplan für die Erkundungsbohrungen EKB 1 und EKB 2
(erstellt von der Ingenieurgruppe Geotechnik GbR, Kirchzarten)

Hebungsschaden Staufen

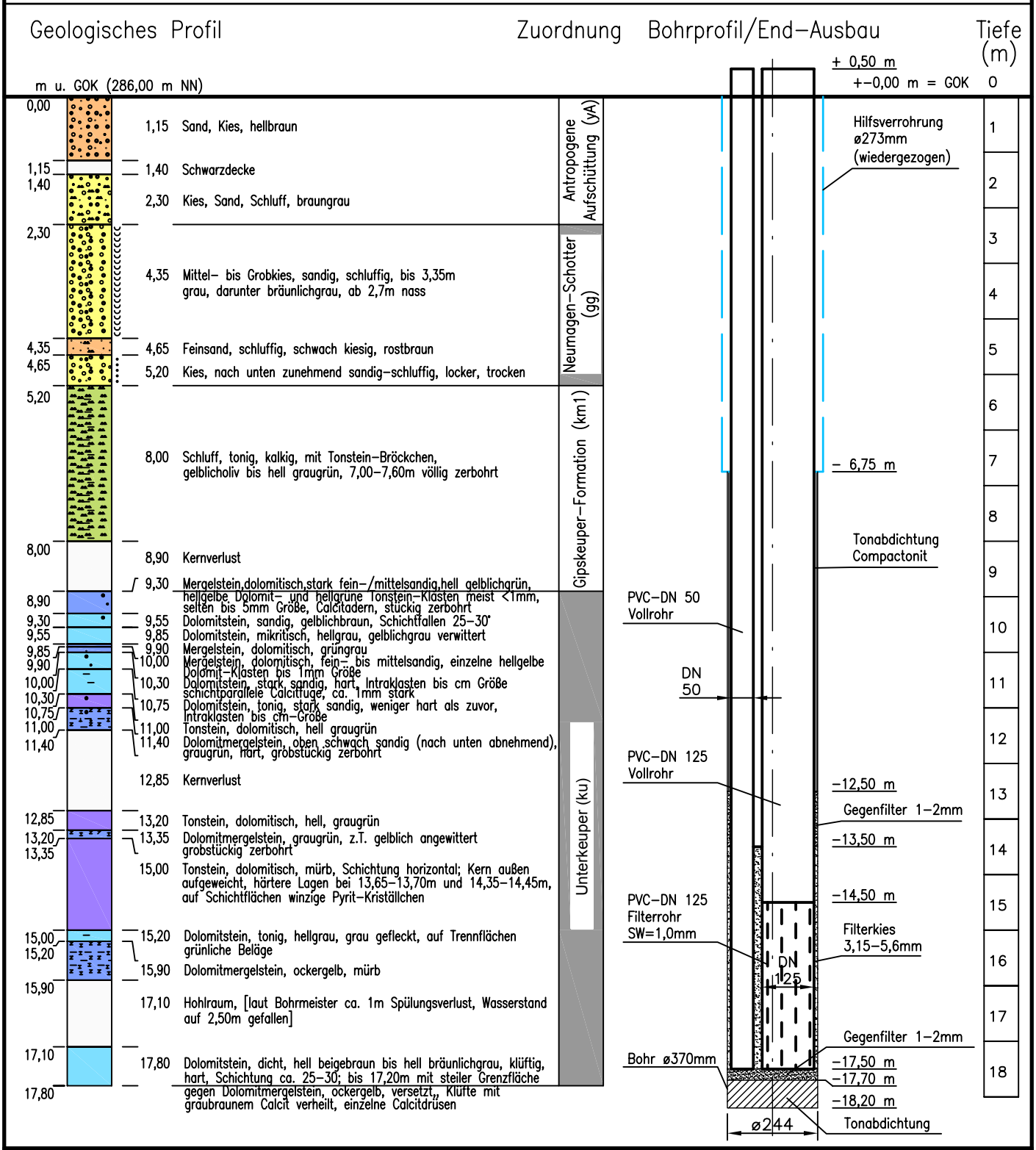
EKB 1

Bohrprofil

Kom.-Nr.: 1401

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763//10-563 Anlage: 5.2



Maßstab breit: 1 : 15 tief: 1: 100

ANGER seit 1863

H. Anger's Söhne

37235 Hess. Lichtenau

63244

18.05.2009

Regierungspräsidium Freiburg
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

B O H R P R O F I L

Bezeichnung:	EKB 1	**TK 25 Nr.:**	8112	**Archiv-Nr.:**	287
Projekt:	Hebungsschaden Staufen	**Blatt:**	Staufen		
Lage:	[redacted]	**Koordinaten** (nach Einmessung):			
		R: [redacted]		**H:** [redacted]	
Gemeinde:	Staufen	**Höhen** (nach Einmessung):			
Teilort:		**Ansatzpunkt:**	ca. 286		m ü. NN
Kreis:	Breisgau-Hochschwarzwald	**Messpunkt:**	285,76		m ü. NN
Geol. Aufnahme:	12.03.2009	**Ruhewasserspiegel:**			m u. A.
Bearbeiter/in:	[redacted]	21. Okt 2009	3,28		m u. MP
Bohrfirma:	Anger's Söhne				m ü. NN
Bohrzeit:	09.03.2009 - 12.03.2009				m ü. NN
Bohrverfahren (m u. A./Ø mm)**:**		**Endteufe:**	17,80		m u. A.

Filterstrecken (m u. A./Ø mm)**:** siehe Ausbauzeichnung der Fa. Anger´s Söhne, Anl. 5.2

Abdichtungen (m u. A.)**:** siehe Ausbauzeichnung der Fa. Anger´s Söhne, Anl. 5.2

Bemerkungen:
- ET gemäß Ausbauplan Fa. Anger's: 18,20 m u. GOK. Proben lagen bis 17,8 m unter GOK vor.
- Die angegebenen Rechts- und Hochwerte sowie die Höhe des Ansatzpunktes und des MP geben den Stand vom 23. September 2009 bzw. 11. Januar 2010 wieder. Aufgrund der Hebungsvorgänge unterliegen sie mit Stand des Jahres 2009/2010 einer laufenden Veränderung.

Kurzprofil (mit stratigr. Deutung):

0	–	2,3	m	Anthropogene Aufschüttung (yA)
	–	5,2	m	Neumagenschotter
	–	8,9	m	Gipskeuper-Formation (km1)
	–	17,8	m	Lettenkeuper-Formation (ku)

Bezeichnung/Projekt: EKB 1 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.3 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

Teufe (m u. A.)**:** Gesteinsart (Haupt-, Nebengemengeteile usw.), Farbe, Gefüge Verwitterungsgrad, Konsistenz, Fossilinhalt, Klüftung u. a.

0	-	1,0	m	**Probe EKB 1/1** (0–1,0 m): Kies, sandig, kalkhaltig, erdfeucht, vergrünte Gerölle, Ziegelreste
	–	1,15	m	Sand u. Kies, hellbraun
	–	1,4	m	Schwarzdecke
	–	2,0	m	**Probe EKB 1/2** (1,0–2,0 m): Kies, steinig, sandig, schluffig, dunkelgrau, kalkhaltig, feucht, Geruch nach Schwefelwasserstoff, mit Block > 10 cm
	–	2,3	m	Kies, Sand, Schluff, braungrau
	–	2,7	m	Mittel- bis Grobkies, sandig, schluffig, grau
	–	3,0	m	**Probe EKB 1/3** (2,0–3,0 m): Kies, stark sandig, schluffig, steinig, dunkelgrau, kalkhaltig; mit Schluff- und Sandlagen, schwarzgrau, feucht, ab 2,7 m nass, H_2S-Geruch
	–	4,00	m	**Probe EKB 1/4** (3,0–4,0 m): Kies und Steine, sandig, schluffig, grau, sehr nass
	–	4,35	m	Mittel- bis Grobkies, sandig, schluffig, bräunlichgrau
	–	4,65	m	Feinsand, schluffig, schwach kiesig, rostbraun
	–	5,0	m	**Probe EKB 1/5** (4,0–5,0 m): Kies, stark sandig, schluffig, steinig, graubraun-braun, erdfeucht, kalkhaltig, Kiesfraktion deutlich angewittert
	–	5,2	m	Kies, nach unten zunehmend sandig-schluffig, locker, trocken
	–	5,80	m	Schluff, tonig, kalkig, mit Tonstein-Bröckchen, gelblicholiv bis hell graugrün
	–	5,90	m	**Probe EKB 1/7:** Schluff, kiesig, sandig, tonig, schwach steinig, hellgrau-graugrün, steif-halbfest, stark kalkhaltig, Komponenten innig vermengt (GAR)
	–	6,10	m	Schluff, tonig, kalkig, mit Tonstein-Bröckchen, gelblicholiv bis hell graugrün
	–	6,20	m	**Probe EKB 1/8:** Sand, schluffig, tonig, kiesig, graugrün-graugelb, trocken, stark kalkhaltig, fest; brecciös mit Kalk-/ Dolomitsteinbröckchen (GAR)
	–	8,00	m	Schluff, tonig, kalkig, mit Tonstein-Bröckchen, gelblich oliv bis hell graugrün, 7,00–7,60 m völlig zerbohrt
	–	8,90	m	Kernverlust
	–	9,30	m	Mergelstein, dolomitisch, stark fein- bis mittelsandig, hell gelblichgrün, hellgelbe Dolomit- und hellgrüne Tonstein-Klasten meist <1 mm, selten bis 5 mm Größe; Calcitadern; stückig zerbohrt
	–	9,55	m	Dolomitstein, sandig, gelblichbraun, Schichtfallen 25–30°
	–	9,85	m	Dolomitstein, "mikritisch", hellgrau, gelblichgrau verwittert
	–	9,90	m	Mergelstein, dolomitisch, grünlichgrau
	–	10,00	m	Mergelstein, dolomitisch, fein- bis mittelsandig, einzelne hellgelbe Dolomit-Klasten bis 1 mm Größe
	–	10,30	m	Dolomitstein, stark sandig, hart, Intraklasten bis cm-Größe, schichtparallele Calcitfuge, ca. 1 mm stark
	–	10,75	m	Dolomitstein, tonig, stark sandig, weniger hart als zuvor, Intraklasten bis cm-Größe
	–	11,00	m	Tonstein, dolomitisch, sandig, graugrün
	–	11,10	m	**Probe EKB 1/9**: Dolomitmergelstein, hellgrau-graugrün, erdfeucht, brüchig
	–	11,40	m	Dolomitmergelstein, oben schwach sandig (nach unten abnehmend), graugrün, hart, grobstückig zerbohrt

Bezeichnung/Projekt: EKB 1 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.3 a**

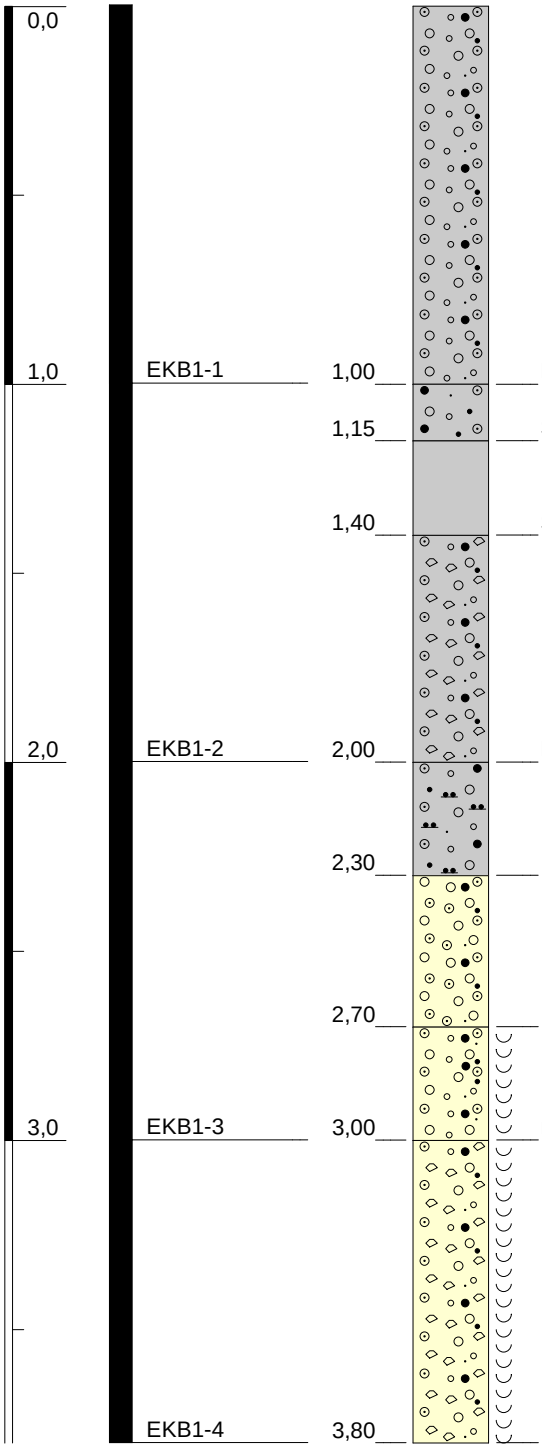
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	12,85	m	Kernverlust
–	13,20	m	Tonstein, ? dolomitisch, hell graugrün
–	13,35	m	Dolomitmergelstein, graugrün, z.T. gelblich angewittert, grobstückig zerbohrt
–	13,50	m	Tonstein, ? dolomitisch, mürb; Schichtung horizontal; Kern außen aufgeweicht, auf Schichtflächen winzige Pyrit-Kriställchen
–	13,60	m	**Probe EKB 1/10**: Tonmergelstein, dolomitisch, feinsandig, glimmerführend, hellgrau, erdfeucht, mürbe, absandend; einzelne Schlufflagen, steif bis halbfest
–	15,00	m	Tonstein, ? dolomitisch, mürb; Schichtung horizontal; Kern außen aufgeweicht, härtere Lagen bei 13,65–13,70 m und 14,35–14,45 m; auf Schichtflächen winzige Pyrit-Kriställchen
–	15,10	m	**Probe EKB 1/11**: Dolomitstein, hellgraugrün, kantig-splittrig; schwarz-rötliche Anlauffarben der Klüftchen
–	15,20	m	Dolomitstein, tonig, hellgrau, grau gefleckt, auf Trennflächen grünliche Beläge
–	15,40	m	Dolomitmergelstein, ockergelb, mürb
–	15,50	m	**Probe EKB 1/12**: Dolomitstein, tonig, graugelb-hellgelb, von Fe/Mn-Dendriten durchzogen, erdfeucht, mürbe bis brüchig
–	15,90	m	Dolomitmergelstein, ockergelb, mürb
–	17,10	m	Hohlraum [lt. Bohrmeister ca. 1 m^3 Spülungsverlust; Wasserstand auf 2,50 m gefallen]
–	17,40	m	Dolomitstein, dicht, hellbeigebraun bis hell bräunlichgrau, klüftig, hart; Schichtung ca. 25–30°; bis 17,20 m mit steiler Grenzfläch e gegen Dolomitmergelstein, ockergelb, versetzt, Klüfte mit graubraunem Calcit verheilt, einzelne Calcit-Drusen
–	17,50	m	**Probe EKB 1/13**: Dolomitstein, braungelb, erdfeucht, brüchig-splittrig, von Mn-Dendriten durchzogen
–	17,80	m	Dolomitstein, dicht, hellbeigebraun bis hell bräunlichgrau, klüftig, hart; Schichtung ca. 25–30°; ockergelb, versetzt, Klüfte mit gr aubraunem Calcit verheilt, einzelne Calcit-Drusen

Erkundungsbohrung 1

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

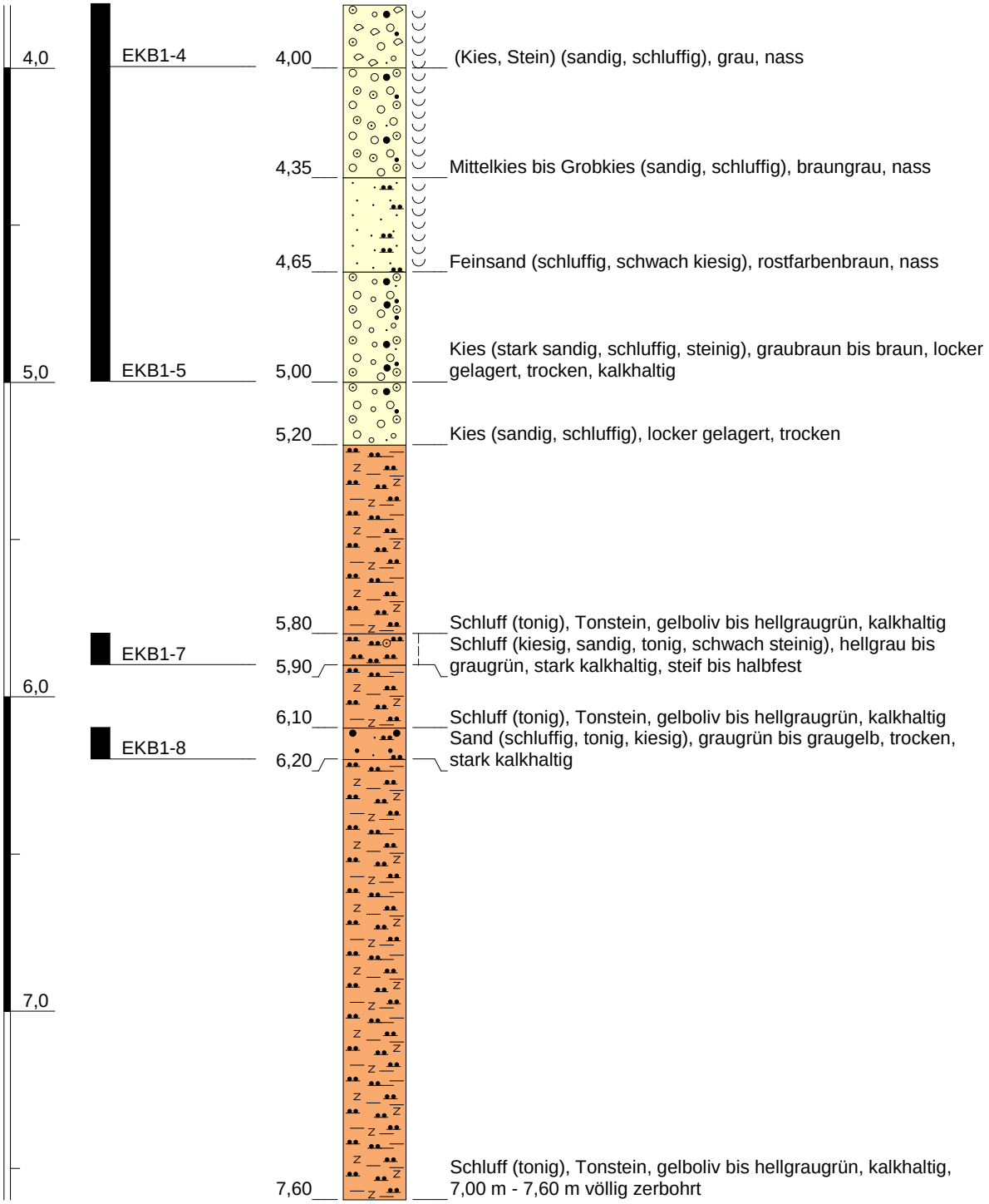
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 1**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.3 b	Endtiefe:	17,80

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 1

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

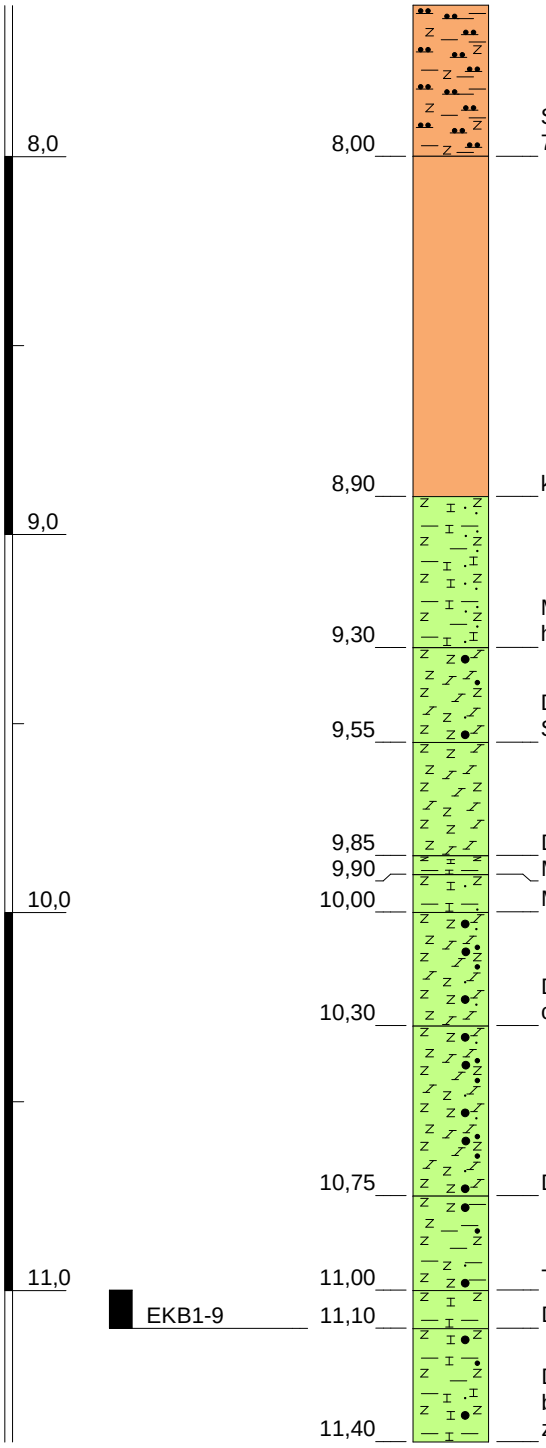
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 1**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.3 b	Endtiefe:	17,80

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 1

m u. GOK (ca. 286 m NN)



8,00	8,0	Schluff (tonig), Tonstein, gelboliv bis hellgraugrün, kalkhaltig, 7,00 m - 7,60 m völlig zerbohrt
8,90		keine Angabe, Kernverlust
9,0		
9,30		Mergelstein (dolomitisch, stark feinsandig bis stark mittelsandig), hellgelbgrün, stückig zerbohrt
9,55		Dolomitstein (sandig), gelbbraun, Schichtfallen: 25-30°
9,85		Dolomitstein, hellgrau, mikritisch, gelblichgrau verwittert
9,90		Mergelstein (dolomitisch), grüngrau
10,00	10,0	Mergelstein (dolomitisch, feinsandig bis mittelsandig)
10,30		Dolomitstein (stark sandig), schwer zu bohren, Intraklasten bis cm-Größe, schichtparallele Calcitfuge (1 mm stark)
10,75		Dolomitstein (tonig, stark sandig), Intraklasten bis cm-Größe
11,00	11,0	Tonstein (dolomitisch, sandig), graugrün
11,10	EKB1-9	Dolomitmergelstein, hellgrau bis graugrün
11,40		Dolomitmergelstein (schwach sandig), graugrün, schwer zu bohren, Sandgehalt nach unten abnehmend, grobstückig zerbohrt

Höhenmaßstab: 1:20

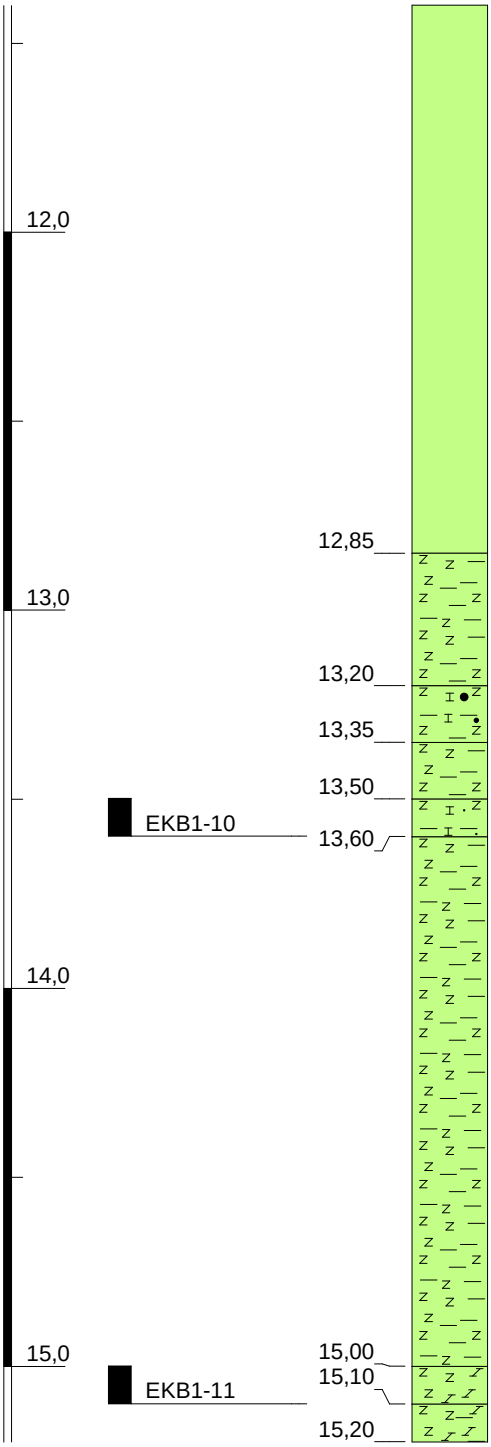
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 1**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.3 b	Endtiefe:	17,80

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 1

m u. GOK (ca. 286 m NN)



12,85	keine Angabe, Kernverlust
13,20	Tonstein (dolomitisch), hellgraugrün
13,35	Dolomitmergelstein (schwach sandig), graugrün bis gelb, grobstückig zerbohrt
13,50	Tonstein (dolomitisch), mürb
13,60	Tonmergelstein (dolomitisch, feinsandig), hellgrau, mürb, steif bis halbfest
15,00	Tonstein (dolomitisch), mürb, Schichtung horizontal, winzige Pyrit-Kriställchen - von 13,65m bis 13,70m Lage von Tonstein, schwer zu bohren - von 14,35m bis 14,45m Lage von Tonstein, schwer zu bohren
15,10	Dolomitstein, hellgraugrün
15,20	Dolomitstein (tonig), hellgrau, grau gefleckt, auf Trennflächen grünliche Beläge

Höhenmaßstab: 1:20

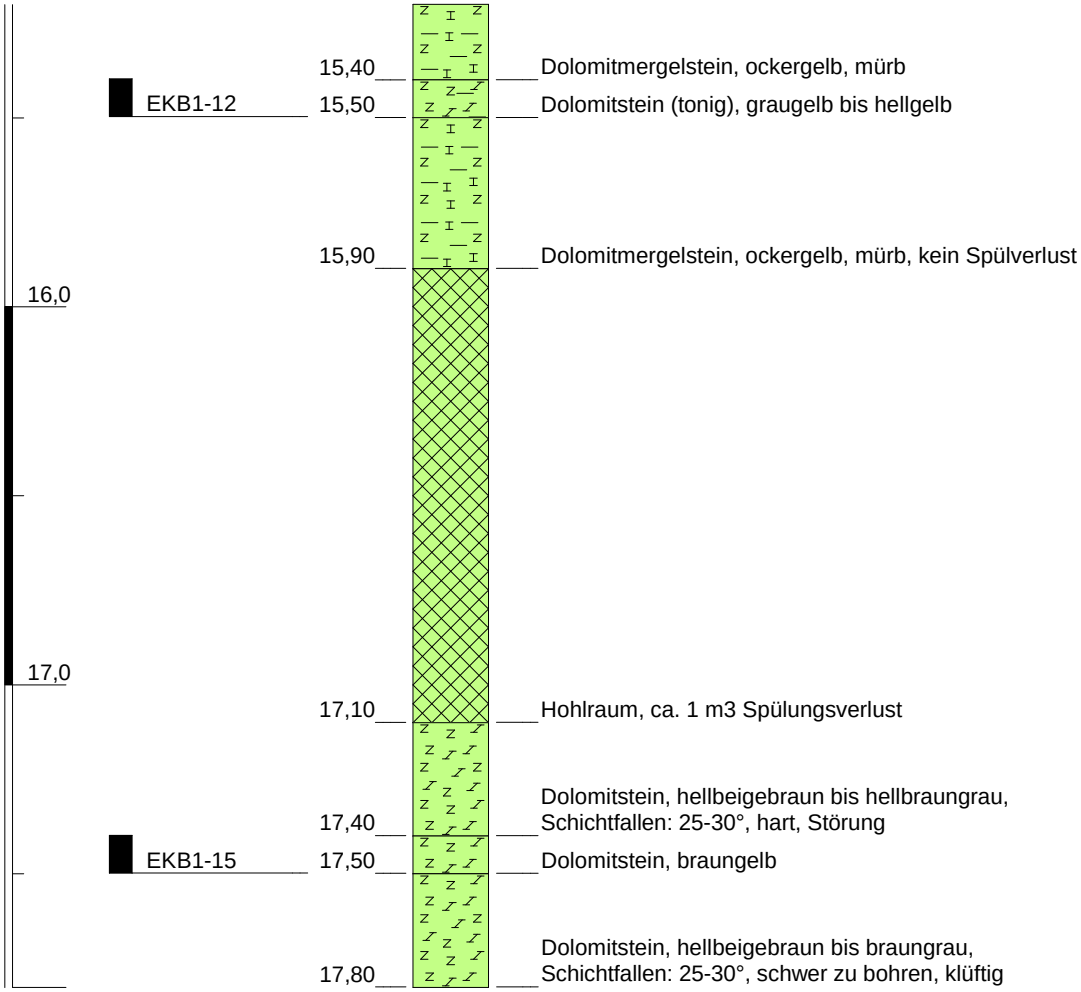
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 1**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009	Anlage 5.3 b	Endtiefe: 17,80

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 1

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 1**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.3 b	Endtiefe:	17,80

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 1

0 m
1 m
2 m
3 m

1 m
2 m
3 m
4 m

4 m
5 m
6 m
7 m

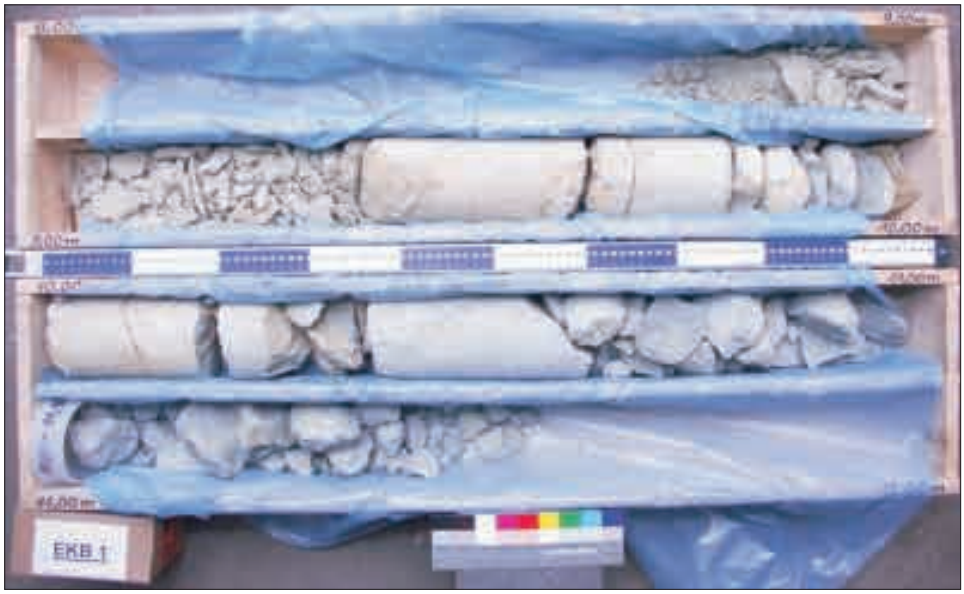
5 m
6 m
7 m
8 m

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 1

8 m
9 m
10 m
11 m



9 m
10 m
11 m
12 m

12 m
13 m
14 m
15 m

13 m
14 m
15 m
16 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 1

16 m

17 m

17 m

18 m

INGENIEUR GRUPPE GEOTECHNIK
Ingenieurgruppe Geotechnik GbR
Lindenbergstr. 12
79199 Kirchzarten
Tel.: (0 76 61) 93 91 - 0
Fax: (0 76 61) 93 91 - 75

Zeichnerische Darstellung von Kernbohrungen nach DIN 4023

Anlage 2

Projekt-Nr.: 07295/B-F

Datum: 03.11.09

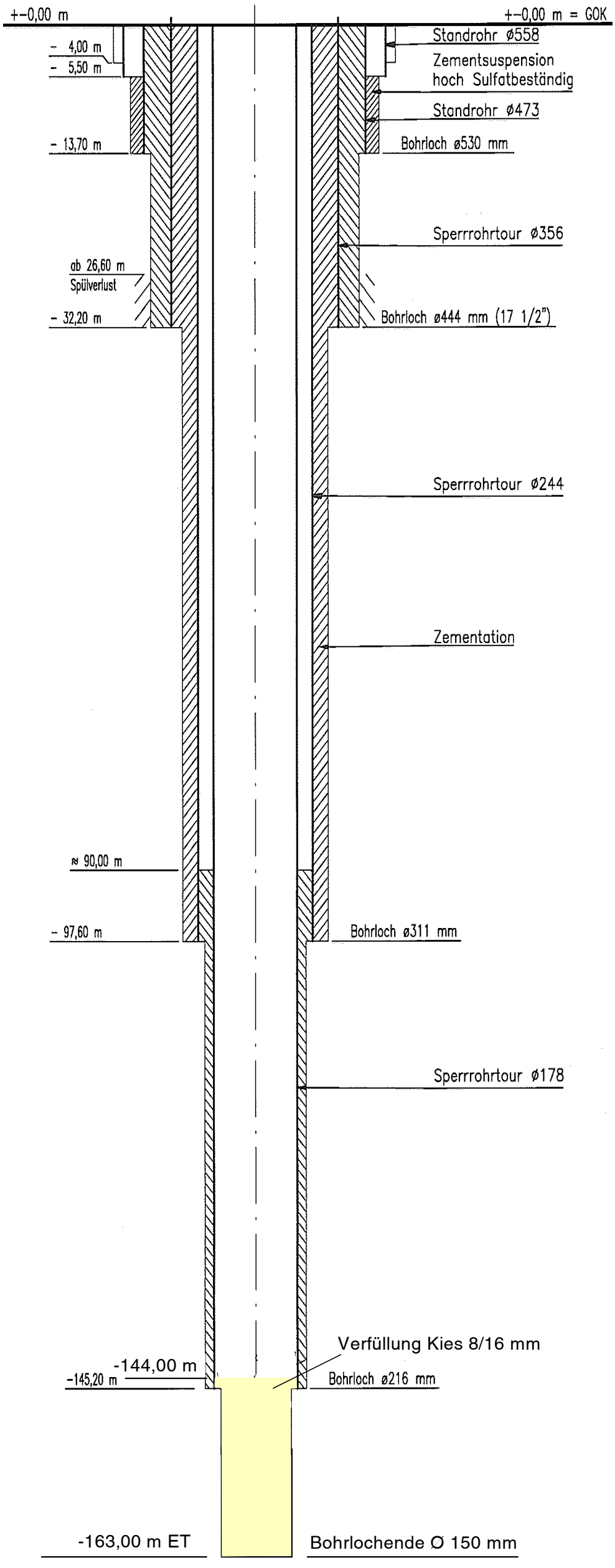
Projekt: Erkundungsbohrung 2
Quellhebungen
Staufen i. Br.

Maßstab: M_H: 1 : 500

Art: -

Datei: 07295-EKB2-neu

Ausbauplan EKB 2



Aktenzeichen: 94-4763//10-563
Anlage: 5.5

Regierungspräsidium Freiburg
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

B O H R P R O F I L

Bezeichnung:	EKB 2	**TK 25 Nr.:**	8112	**Archiv-Nr.:**	289
Projekt:	Hebungsschaden Staufen	**Blatt:**	Staufen		
Lage:	[redacted] Flst. [redacted]	**Koordinaten** (nach Einmessung):			
		R: [redacted]		**H:** [redacted]	
Gemeinde:	Staufen	**Höhen** (nach Einmessung):			
Teilort:		**Ansatzpunkt:**	ca. 286		m ü. NN
Kreis:	Breisgau-Hochschwarzwald	**Messpunkt:**			m ü. NN
Geol. Aufnahme:	21.10.2009	**Ruhewasserspiegel:**			m u. A.
Bearbeiter/in:	[redacted]				m ü. NN
Bohrfirma:	Anger's Söhne				m ü. NN
Bohrzeit:	26.03.2009 - 21.10.2009				m ü. NN
Bohrverfahren (m u. A./Ø mm)**:**		**Endteufe:**	163,00		m u. A.

Filterstrecken (m u. A./Ø mm)**:** siehe Ausbauzeichnung der Fa. Anger´s Söhne / Ingenieurgruppe Geotechnik, Anl. 5.5

Abdichtungen (m u. A.)**:** siehe Ausbauzeichnung der Fa. Anger´s Söhne / Ingenieurgruppe Geotechnik, Anl. 5.5

Bemerkungen:
- Beschreibung von 31,35 – 32,15 m nach Kernfotos
- Durchteufen der Ringraumverfüllung der EWS 5 von 117,5 m bis 118,10 m
- Die angegebenen Rechts- und Hochwerte sowie die Höhe des Ansatzpunktes geben den Stand vom 23. September 2009 wieder. Auf Grund der Hebungsvorgänge unterliegen sie mit Stand des Jahres 2009/2010 einer laufenden Veränderung.
- Bedingt durch das starke Schichteinfallen sind sämtliche Mächtigkeiten im Festgestein nur scheinbare Mächtigkeiten.

Kurzprofil (mit stratigr. Deutung):

0	–	4,00	m	Anthropogene Aufschüttung (yA)
	–	4,50	m	Neumagen-Schotter (gg)
	–	6,00	m	Fließerde (fl)
	–	19,60	m	Schilfsandstein-Formation (km2)

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 142,84 m Gipskeuper-Formation (km1)

- 32,00 m Graue Estherienschichten (GES)
- 47,40 m Untere Bunte Estherienschichten (UBE)
- 85,50 m Mittlerer Gipshorizont (MGH)
- 94,70 m Weinsberg-Horizont (WEH)
- 110,32 m Dunkelrote Mergel (DRM), wahrscheinlich gestört
- 117,50 m Bochingen-Horizont (BH) + Entringen-Sulfat (ENS)
- 118,10 m alterierter Zementstein und PEHD-Rohre der EWS 5
- 119,70 m Bochingen-Horizont (BH)
- 142,84 m Grundgipsschichten (GI)

ca. – 154,80 m Lettenkeuper-Formation (ku)

- 143,65 m Grenzdolomit (Gd)
- 144,40 m Grüne Mergel (GRM)
- 145,35 m Böhringen-Sulfat, ausgelaugt (BGi)
- 148,55 m Linguladolomit (Ld)
- 149,55 m Anoplophoraschichten (AP)
- 152,20 m Sandige Pflanzenschiefer (SPS)
- 153,20 m Albertibank (Ab)
- 153,55 m Estherienton (ES)
- 154,80 m Basisschichten (B)

– 163,00 m Obere Hauptmuschelkalk-Formation (mo2)

Trigonodusdolomit (mo2D)

- 155,75 m Hangenddolomit (HAD)
- 163,00 m Trigonodusdolomit 1-2 (TD1-2)

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

Teufe (m u. A.)**:** Gesteinsart (Haupt-, Nebengemengeteile usw.), Farbe, Gefüge Verwitterungsgrad, Konsistenz, Fossilinhalt, Klüftung u. a.

0	–	2,00	m	Vorschachtung (kein Kern)
	–	3,00	m	**Probe EKB 2/1**: Fein- bis Grobkies, stark sandig, schwach schluffig, graubraun, nass, kalkhaltig, gut gerundet, Einzelblock (Arkose) mit ca. 10 cm Ø, Auffüllung
	–	4,00	m	**Probe EKB 2/2**: Fein- bis Grobkies, stark sandig, schwach schluffig, graubraun, nass, stark kalkhaltig, Einzelgerölle gut gerundet aus Kalkstein, Auffüllung
	–	4,50	m	**Probe EKB 2/3**: Kies, steinig, sandig, schluffig, kalkhaltig, graubraun-hellbraun, Schwarzwaldschotter (kantengerundete Gneise), (Kernfoto: 4,10–4,50 m: Grobschotter, kantengerundet, keine Matrix, braungrau)
	–	4,85	m	Schluff, tonig, sandig, mit vereinzelten, z.T. lagig angereicherten Geröllen (Fein- bis Mittelkies) und Schilfsandstein-Bröckchen, rötlichbraun, z.T. rotbraun-schlierig, halbfest
	–	4,90	m	**Probe EKB 2/4**: Schluff (TA), stark sandig, tonig, schwach kiesig, rotbraun-braun, halbfest-fest, erdfeucht, brecciiert (Tonstückchen); rostfarbene Sandstein-Einschaltung
	–	5,75	m	Schluff, tonig, sandig, mit vereinzelten, z.T. lagig angereicherten Geröllen (Fein- bis Mittelkies) und Schilfsandstein-Bröckchen, rötlichbraun, z.T. rotbraun-schlierig, fest
	–	5,80	m	**Probe EKB 2/5**: Schluff (TM), tonig, sandig, hellrotbraun, rotbraune Schlieren, halbfest-fest, erdfeucht, verwitterte T/U-Steine des Schilfsandstein
	–	6,00	m	Schluff, tonig, sandig, mit vereinzelten, z.T. lagig angereicherten Geröllen (Fein- bis Mittelkies) und Schilfsandstein-Bröckchen, rötlichbraun, z.T. rotbraun-schlierig, fest
	–	6,50	m	Schluffstein, feinsandig, unten mit dünner Feinsandsteinlage, rotbraun, rot-schlierig, fest
	–	6,85	m	Feinsandstein, dünnbankig, grau, mürb; Schichtfallen: 30° (geschätzt)
	–	6,90	m	**Probe EKB 2/7**: Feinsandstein, hellgrau und dunkelgrau laminiert, geflasert, mit dunklen, tonigen Linsen, glimmerführend, dünnplattig, mäßig hart, Schrägschichtung, glaukonitisch?
	–	7,20	m	Feinsandstein, dünnbankig, grau, mürb; Schichtfallen: 30° (geschätzt)
	–	7,30	m	**Probe EKB 2/8**: Feinsandstein, laminiert, Tonlinsen, grau-dunkelgrau, glimmerführend, erdfeucht, stückig bis kleinstückig,
	–	7,65	m	Feinsandstein, dünnbankig, grau, mürb; Schichtfallen: 30° (geschätzt)
	–	8,30	m	Tonstein, schluffig, grau, hart (V2–V0); Schichtfallen: 40° (geschätzt)
	–	8,40	m	**Probe EKB 2/9**: Tonstein, feinsandig, glimmerführend, sandflaserig, grau bis dunkelgrau, erdfeucht, stückig bis großstückig
	–	9,25	m	Tonstein, schluffig, grau, hart (V2–V0); Schichtfallen: 40° (geschätzt)
	–	9,30	m	**Probe EKB 2/10**: Tonstein, schwach feinsandig, glimmerführend, dunkelgrau bis schwarzgrau, erdfeucht, stückig
	–	10,20	m	Tonstein, feinsandig, grau, mürb u. fest-hart
	–	10,25	m	**Probe EKB 2/11**: Tonstein, feinsandig, glimmerführend, dunkelgrau-grauschwarz, erdfeucht, stückig bis kleinstückig
	–	10,50	m	Tonstein, feinsandig, grau, mürb u. fest-hart

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	10,95	m	Feinsandstein, tonig, grau, hart; Schichtfallen: 60–70° (geschätzt)
–	11,05	m	Tonstein, feinsandig, mit mm-dicken Sandlagen, grau, rostbraune Schichtflächen, schwach verfestigt, mürb
–	11,45	m	Tonstein, feinsandig, mit dünnen Feinsandsteinlagen, grau, hart; Schichtfallen: 50–60° (geschätzt)
–	11,50	m	**Probe EKB 2/12**: Ton-/Schluffstein, stark feinsandig, sandflaserig, dunkelgrau-hellgrau laminiert, erdfeucht, stückig, Harnische, ockerfarben angelaufen
–	11,65	m	Feinsandstein, stark tonig, grau; Schichtfallen: 50° (geschätzt)
–	12,05	m	Feinsandstein, rostbraun, klüftig, zerbohrt, z.T. mürb bis hart-mürb; etwas Spülverlust, von 11,7–12,05 m Gestänge etwas durchgesackt
–	12,10	m	**Probe EKB 2/13**: Mittelsandstein, feinsandig, schwach schluffig, rostbraun mit schwarzen Laminae, erdfeucht, stückig, absandend, mürb
–	12,70	m	Feinsandstein, rostbraun, klüftig, zerbohrt, z.T. mürb bis hart-mürb
–	12,90	m	Feinsandstein, tonig, grau; Schichtfallen: 30–40° (geschätzt)
–	13,00	m	**Probe EKB 2/14**: Feinsandstein, mittelsandig, mit merklichem Tongehalt, hellgrau laminiert, einzelne kohlige Flitter, erdfeucht, stückig bis kleinstückig, kantig berechend
–	13,20	m	Feinsandstein, tonig, grau, hart; Schichtfallen: 30–40° (geschätzt)
–	13,90	m	Tonstein, mit dünnen Feinsandstein-Lagen, grau, hart
–	13,95	m	**Probe EKB 2/15**: Ton-/Schluffstein, feinsandig, glimmerführend, dunkelgrau laminiert, erdfeucht, stückig-großstückig, mürb
–	14,00	m	Tonstein, mit dünnen Feinsandstein-Lagen, grau, hart
–	14,20	m	Schluffstein, tonig, feinsandig, laminiert durch 1–2 mm starke Sandlagen, grau; etwas zerbohrt, braune Flecken
–	14,25	m	**Probe EKB 2/16**: Fein- bis Mittelsandstein, Tonlinsen/Tontapeten, schräggeschichtet, hellgrau-dunkelgrau, an der Basis rotbraun, glimmerführend, erdfeucht, großstückig, schwach absandend, mäßig hart
–	14,50	m	Feinsandstein, Flaserschichtung, Tonhäute auf Rippellagen nach oben auf etwa 1 mm Stärke zunehmend, grau
–	14,90	m	Intraklast-Breccie aus Schluffstein-Bröckchen von 1–4 cm Größe in Sandmatrix, grau; Kern von 14,65–14,9 m braun verlehmt
–	14,95	m	**Probe EKB 2/17**: Wechsellagerung Schluffstein und Feinsandstein, tonig, laminiert, glimmerführend, grau-dunkelgrau, erdfeucht bis feucht, großstückig, schwach absandend, mäßig hart
–	15,35	m	Intraklast-Konglomerat aus Tonstein- und Schluffstein-Geröllen bis ca. 6 cm, überwiegend gut gerundet, in Sandmatrix, mit einzelnen Sandstein-Brocken, grau
–	15,45	m	Intraklast-Breccie aus kantigen, laminierten Sandstein-Brocken bis 15 cm, in Ton- und Sandmatrix auf Erosionsfläche, grau
–	15,60	m	Mittel- bis Feinsandstein, dünnschichtig, mit Kohleflittern durchsetzt, grau
–	15,80	m	Mittel- bis Feinsandstein, wenig Kohleflitter; grau
–	16,20	m	Mittel- bis Feinsandstein, dünnschichtig mit wechselndem Anteil an Kohleflittern und kohligen Tonstückchen bis 5 mm, grau; bei 16,0 m braun verlehmt
–	16,70	m	Mittel- bis Feinsandstein, tonig, mit linsiger Rippelschichtung, grau; teilweise zu Brocken zerbohrt, bei 16,6 m braun verlehmt

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	16,90	m	Mittel- bis Feinsandstein, flachlinsige Rippelschichtung, grau; festere Bank
–	17,00	m	Mittel- bis Feinsandstein, tonig im Wechsel mit Schluffstein, tonig, sandig, in Dünnschichten zu 1–4 cm, oben mehr Sandstein, grau
–	17,05	m	**Probe EKB 2/18**: Fein- bis Mittelsandstein, grau bis dunkelgrau, glimmerführend, dunkle Tonlinsen, schwarze Tontapeten; erdfeucht, stückig bis kleinstückig, schwach absandend, mäßig hart
–	17,40	m	Mittel- bis Feinsandstein, tonig im Wechsel mit Schluffstein, tonig, sandig, in Dünnschichten zu 1–4 cm
–	17,55	m	Feinsandstein, linsige Flaserschichtung, grau
–	17,60	m	**Probe EKB 2/19**: Schluffstein, feinsandig, tonig, glimmerführend, sandflaserig, dunkelgrau, laminiert, erdfeucht, stückig, mürb-kantenbrüchig
–	18,00	m	Sandstein-Schluffstein-Wechsellagerung, einzelne Lagen 1–4 mm dick, unten in Flaserschichtung übergehend, grau; von brecciösen Klüften durchsetzt, in der Mitte ca. 5 cm hohe Stauchfalte
–	19,00	m	Sandstein-Schluffstein-Wechsellagerung, einzelne Lagen 1–6 mm dick, einzelne Lagen mit flachen Rippeln, sonst wenig Abwechslung, grau
–	19,05	m	**Probe EKB 2/20**: Fein- bis Mittelsandstein, schluffig, glimmerführend, mit schwarzer Tontapete inkl. Pyrit-Kristallen, dunkelgrau und hellgrau laminiert, erdfeucht, kalkhaltig an Klüftchen, großstückig
–	19,60	m	Sandstein-Schluffstein-Wechsellagerung, einzelne Lagen 1–6 mm dick, einzelne Lagen mit flachen Rippeln, sonst wenig Abwechslung, grau; bei 19,2–19,4 m saiger stehende, verzweigte Scherkluft mit dextralem Riedel, etwa 3–5 mm geöffnet und mit Calcit verheilt
–	19,90	m	Tonstein, dolomitisch, schwach schluffig, undeutlich geschichtet, teilweise polygonale Absonderung, sehr kleine glänzende Schmierflächen (pedogen), grau
–	19,95	m	**Probe EKB 2/21**: Ton-/Schluffstein, feinsandig, schwarzgrau, erdfeucht, stark zerbohrt (steif-halbfest)
–	20,10	m	Dolomitstein, mikrosparitisch, knollig, mit Tonstein- bis Dolomitmergel-Flasern zwischen den Knollen, grau
–	20,20	m	Tonstein, dunkelgrau, durchsetzt mit Flasern und Linsen aus Dolomitstein, hell grünlichgrau
–	20,25	m	**Probe EKB 2/22**: Dolomitstein, stark tonig, schwarzgrau, erdfeucht bis feucht, kleinstückig, stark zerbohrt
–	20,40	m	Tonstein, dunkelgrau
–	20,50	m	Dolomitstein, feinbrecciös, grau, mit vertikaler Kluft, calcitverheilt (bis 1,5 cm breit)
–	20,75	m	Dolomitstein, feinbrecciös, grau, mit tonig-schluffigen Zwischenlagen; zerbohrt
–	20,85	m	Tonstein, dolomitisch, grau bis grünlichgrau
–	20,90	m	**Probe EKB 2/23**: Tonmergelstein, feinsandig, dolomitisch, hellgrau, erdfeucht bis feucht, stark zerbohrt (halbfest-fest)
–	21,00	m	Dolomitstein, tonig, feinbrecciös, grau, mit Tonstein-Zwischenlagen
–	21,10	m	Tonstein, dolomitisch, grünlichgrau
–	21,20	m	Dolomitstein, tonig, dunkelgrau
–	21,25	m	**Probe EKB 2/24**: Dolomitmergelstein, schwach feinsandig, hellgrau, erdfeucht, stückig-kleinstückig, polygonal-bröckelig, scherbig-kantig brechend, mürb
–	21,80	m	Tonstein, grau

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	21,85	m	**Probe EKB 2/25** aus Kernfanghülse: Tonstein, schwach feinsandig, kalkhaltig, trocken
–	22,05	m	Tonstein, grau, untere 5 cm dunkelgrau
–	22,35	m	Dolomitmergelstein, grau, ab 22,2 m mit Einlagerungen von dolomitischen Tonstein-Lagen bis 3 cm und einzelnen harten Dolomitstein-Linsen bis 2 cm
–	22,40	m	Tonstein, dunkelgrau
–	22,60	m	GAR, grünlichgrau bis dunkelgrau mit Tonstein-Lagen
–	22,70	m	Dolomitstein, tonig bis Dolomitmergelstein, hellgrau
–	22,90	m	Tonstein, dunkelgrau; Schichtfallen: 30–40° (geschätzt)
–	22,95	m	**Probe EKB 2/27**: Ton-/Schluffstein, grau bis grünlichgrau, erdfeucht, stückig bis kleinstückig, polygonal-bröckelig, mürb-brüchig
–	23,10	m	Tonstein, dolomitisch, grau
–	23,25	m	GAR, grau bis dunkelgrau
–	23,45	m	Dolomitstein, tonig, grünlichgrau, an 75°-Störung versetzt gegen: Tonstein, dunkelgrau, zahlreiche Trennflächen parallel zur Störung; ab 23,35 m GAR, tonig, dunkelgrau keilförmig eingeschaltet
–	23,55	m	Tonstein, dunkelgrau; Schichtfallen: 30–40° (geschätzt)
–	23,63	m	Kalkstein, dolomitisch, zellig-porös, weiß/grau marmoriert
–	23,75	m	Tonstein, schwarz, auf Schichtflächen feiner Kristallbesatz
–	23,80	m	**Probe EKB 2/26**: Schluff, stark tonig, sandig, schwarz, erdfeucht, halbfest-fest, "fetter Ton"; Fein- bis Mittelsandstein, tonig, schluffig, graugrün, erdfeucht
–	24,00	m	Tonstein, schwarz, mit GAR-Schlieren und – Lagen durchsetzt
–	24,05	m	**Probe EKB 2/28**: Ton-/Schluffstein, schwach feinsandig, dunkelgrau laminiert, erdfeucht-trocken, halbfest-fest, großstückig
–	24,36	m	GAR, dunkelgrau mit Tonstein-Einschaltungen
–	24,39	m	Tonstein, braunrot
–	24,50	m	GAR, dunkelgrau mit Tonstein-Einschaltungen
–	24,60	m	GAR, kalkig, hellgrau, an der Basis weiß
–	24,70	m	GAR, dunkelgrau, zerbohrt
–	24,80	m	Dolomitstein, hell rötlichbeige, schwach porös; stückig zerbohrt
–	24,90	m	Tonstein, mit dünnen GAR-Lagen, rotbraun, mit einzelnen graugrünen Schlieren
–	25,00	m	Tonstein, dunkelgrau, mit dünnen weißen GAR-Calcit-Lagen
–	25,06	m	**Probe EKB 2/29**: Schluff, stark tonig, stark sandig, schwach kiesig, brecciös, dolomitisch, rotbraun u. beigegrün, halbfest, erdfeucht (GAR mit Tonsteinbröckchen)
–	25,12	m	GAR-Schluff, kalkig, rosa
–	25,16	m	Dolomitstein, kalkig, hell grünlichgrau, stark zellig-porös, mit hellgelben Calcit-Kristallen ausgekleidet
–	25,30	m	Dolomitstein, kalkig, hell grünlichgrau und rötlichgrau marmoriert, leicht zellig-porös
–	25,35	m	Tonstein, mit dünnen GAR-Lagen, rotbraun, mit einzelnen graugrünen Schlieren
–	25,45	m	Tonstein, dunkelgrau, mit GAR-Calcit, weiß bis hell bräunlichgrau

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	25,55	m	- Kernverlust -
–	25,76	m	Tonstein, dunkelgrau, mit dünnen weißen GAR-Calcit-Lagen
–	25,95	m	Tonstein, mit dünnen GAR-Lagen, rotbraun, mit einzelnen graugrünen Schlieren
–	26,00	m	**Probe EKB 2/30**: TM: Sand, stark schluffig, schwach tonig, Karbonatknöllchen (Durchmesser: 1 mm), rotbraun u. beigegrün marmoriert, halbfest, erdfeucht, GAR
–	26,10	m	Tonstein, dunkelgrau, 26,03–26,07 m durchsetzt mit sehr viel GAR-Calcit, hellgrau, stark porös,
–	26,22	m	GAR, weiß bis hellgrau, mit braunen Schlieren
–	26,40	m	Tonmergelstein, schwach dolomitisch, obere 2 cm hellgrau, darunter hellrot, Vertikalkluft mit rotem Tonstein, mäßig plastifiziert, belegt
–	27,05	m	- Kernverlust – [nach Bohrmeisterangabe vermutlich rote Letten]
–	27,10	m	**Probe EKB 2/31**: TM: Sand, stark schluffig, schwach tonig, sehr schwach kiesig, Dolomitknöllchen (1 mm Ø), rotbraun und dunkelgrau, erdfeucht, halbfest, GAR
–	27,14	m	Tonstein, rot
–	27,30	m	GAR, stark kalkig, dunkelgrau bis schwarz, mit hellgrauen Lagen und Schlieren
–	28,60	m	- Kernverlust -
–	28,65	m	**Probe EKB 2/32**: Ton-/Schluffstein, dunkelgrau, durchzogen mit Marienglasblättchen, wolkigem, rosa Gips, Fasergipsklüfte; erdfeucht, polygonal-bröckelig; Gips 16 % (**Oberer Gipsspiegel**)
–	29,35	m	Tonstein, schwarzgrau, durchsetzt mit Gips, knollig, flasrig, hellrosa, zahlreiche Fasergips-Risse bis 1 cm Stärke
–	29,40	m	**Probe EKB 2/33**: Wechsellagerung: Gipsstein, hellgrau und Tonstein, dunkelgrau, kalkhaltig, erdfeucht, mit rosafarbenen, wolkig verteilten Gipsknötchen (7 mm Durchmesser); Fasergips, weiß, 5 mm; Gips 74 %
–	29,60	m	Tonstein, grau, Gips, knollig, weißgrau; zerbohrt
–	29,80	m	Dolomitstein, mikritisch bis mikrosparitisch, grau; darin 4–5 mm starke Kluftfüllung aus Fasergips, teilweise zu Alabastergips rekristallisiert, weiß
–	30,00	m	Ton-Dolomit-Gips-Gestein, brecciös und leicht gefaltet, schwarzgrau; Tektonit?
–	30,10	m	Gipsstein, knollig, weißgrau, mit Tonstein, dolomitisch, grau; teilweise zerbohrt
–	30,20	m	Dolomitmergelstein, mikritisch, grau, mit ca. 10 % Gipsstein in kleinen Knollen um 1–2 cm, weißgrau
–	30,50	m	Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau, mit ca. 50 % Gipsstein in Knollen bis ca. 10 cm, weißgrau
–	30,55	m	**Probe EKB 2/35**: Tonmergelstein, dolomitisch, grau, erdfeucht, polygonal-bröckelig, mit rosafarbenen Gipsknollen (Durchmesser: 1 cm), Fasergips, Marienglas; Gips 17 %
–	30,80	m	Dolomitmergelstein, mikritisch, grau, oben 5–10 % Gipsstein in kleinen Knollen bis 2 cm; bei 30,8–30,9 m Kluftzone, etwa 40° einfallend entgegen der Fallrichtung der Schichten, mit 2 Generationen von Gipsausfüllung: 1. 3–6 mm starker Fasergips mit gebogenen Kristallen, teilweise zu Alabastergips rekristallisiert; 2. Marienglas als 1–2 mm starke Scheibe, C-Achsen deutlich orientiert, abtauchen um etwa 50° dextral gegen die Flächenfallrichtung gedreht
–	30,90	m	Dolomitmergelstein, mikritisch, grau

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	31,05	m	Tonstein, dolomitisch, grau, mit bis 2 cm mächtiger Gipsknollenlage, weißgrau
–	31,10	m	**Probe EKB 2/36**: Tonmergelstein, dolomitisch, gipshaltig, grau-graugrünlich, feucht, homogen, polygonal-bröckelig, mäßig hart-kantenbrüchig, Fasergips/ Marienglas, Harnische; Gips 3 %
–	31,20	m	Tonstein, dolomitisch, schwarzgrau, mit ca. 5 % Gipsstein in kleinen Knollen, weißgrau, und viel Fasergips
–	31,35	m	Tonstein, dolomitisch, grau, mit ca. 40 % Gipsstein in Knollenlagen, weißgrau, und Fasergips
–	31,60	m	Gipsstein, knollig, weiß und Tonstein, dolomitisch, grau (ca. 20 %)
–	31,70	m	Tonstein, dolomitisch, grau, Fasergips auf Klüften und Schichtfugen (ca. 5 %)
–	31,85	m	Tonstein, dolomitisch, grau, mit ca. 30 % Gipsstein in Knollen, weißgrau, und Fasergips
–	32,00	m	Gipsstein, knollig, weiß und Tonstein, dolomitisch, grau (ca. 10 %)
–	32,25	m	Tonstein, schluffig, dolomitisch, rotbraun, polygonal brechend, 31,05–31,20 m Gipsstein in Knollen bis 6 cm, weißgrau und rot, und etwas Fasergips auf Klüften (bis 1 cm stark)
–	32,30	m	**Probe EKB 2/37**: Tonmergelstein, dunkelrotbraun und graugrün, trocken, großstückig, mäßig-hart; mit rosa Wolkengips, weißem Fasergips, Harnische; Gips 23 %
–	32,50	m	Tonstein, dolomitisch, bis 32,45 m rotbraun, darunter bräunlichgrau bis grau, hart; Schichtneigung ca. 40°
–	32,58	m	Gipsstein, zartrosa, mit wenigen Tonsteinflasern
–	32,62	m	Tonstein, dolomitisch, grau mit einzelnen gipsgefüllten Schichtfugen bis 0,5 cm
–	32,68	m	Gipsstein, zartrosa, mit wenigen Tonsteinflasern, Schichtstärke 2–5 cm
–	32,89	m	Tonmergelstein, rotbraun, hart, mit Gips und Calcit auf steilstehender Schichtfuge (1 cm stark)
–	33,10	m	Tonstein, dolomitisch, grau, mit Knollen aus Gips und Calcit
–	33,15	m	**Probe EKB 2/38**: Ton-/Schluffstein, dolomitisch, dunkelrotbraun, mit rotbraunen Gipssteinlagen, stückig, brüchig-splittrig; Gips 19 %
–	33,35	m	Tonstein, grau mit wenig Gips, hellrosa und ? Gipsauslaugungs-Schluff, hellgrau; stark zerbohrt (Probengewinn ca. 10 %)
–	33,70	m	Tonmergelstein, bis 33,50 m grau, darunter rotbraun, Schichtfugen mit Gips und Calcit; überwiegend zerbohrt, einzelne Kernscheiben bis 2 cm Stärke
–	33,80	m	Tonstein, dolomitisch, bis 33,75 m rotbraun, darunter grünlichgrau, Gips und Calcit auf Schichtfugen (0,2–0,4 cm); eine Fasergips-Kluft
–	34,00	m	Gipsstein, durchsetzt mit Calcit, weiß bis hellrosa, ab 33,90 m mit Tonsteinlagen und –flasern
–	34,05	m	**Probe EKB 2/39**: Tonstein, dunkelrotbraun bis dunkelgrau, erdfeucht, splittrig, brüchig; Wolkengips, grau; Fasergipslagen; Gips 39 %
–	34,20	m	Gipsstein, durchsetzt mit Calcit, weiß bis hellrosa, mit Tonsteinlagen und –flasern, brecciös, stark geklüftet, verheilt mit Gips und Calcit
–	34,25	m	Tonmergelstein, rotbraun, an der Basis 2 cm Fasergips und Calcit mit grauen Tonstein-Einlagerungen; Schichtneigung ca. 40°; bis 2 cm starke Kluftfüllungen aus Gips und Calcit

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	34,72	m	Tonstein, schwach dolomitisch, rotbraun und grau marmoriert, bis 34,45 m steilstehende verheilte Kluft; 34,32–34,36 m einzelne Knollen aus Gips u. Calcit, an der Basis 1–2 cm Gips u. Calcit auf Schichtfugen; 34,53–34,62 m zerbohrt
–	34,78	m	Tonmergelstein, schwach dolomitisch, rotbraun und grau marmoriert, mit Gips u. Calcit, hellrosa, zerbohrt (cuttings 0,5–1 cm)
–	34,93	m	Ton und Schluff, düster rotbraun, weich bis steif, mit etwas GAR, kalkig, weiß
–	35,18	m	Dolomitstein, tonig, bis 35,00 m rotbraun/grau marmoriert, darunter grau, mit einzelnen Schichtfugen und Klüften, verheilt mit Gips u. wenig Calcit (0,5–1 cm stark)
–	35,45	m	Gipsstein mit Calcit, mit einzelnen Tonsteinflasern, dadurch knolliges Aussehen, besonders ab 35,35 m
–	35,75	m	Tonstein, dolomitisch, dunkel rotbraun, steilstehende, gipsverheilte Klüfte (bis 1,5 cm); entlang mehrerer Querklüfte (diese ebenfalls gipsverheilt) zerschert
–	35,80	m	**Probe EKB 2/40**: Tonstein, dunkelrotbraun-graugrün; weißrötlicher Wolkengips, erdfeucht, fest, brüchig, Klüfte mit Fasergips; Gips 17 %
–	36,50	m	Tonstein, schwach dolomitisch, dunkelgrau, stark durchsetzt mit Gips-Schnüren und –Knollenlagen, weiß bis blassrosa; an der Basis 2–5 cm starke knollige Gipslage; bei 36,15 gipsverheilte Kluft (bis 1,5 cm)
–	36,95	m	Tonstein, dolomitisch, grau, zwischen 36,63 und 36,80 m einzelne Gipsknollen (0,5–3 cm Ø), 36,75–36,85 und 36,93–36,93 m steilstehende Kluft, verheilt mit Gips, 0,5 cm stark; einzelne, gipsverheilte 45°-Klüfte (0,1–0,3 cm)
–	37,00	m	**Probe EKB 2/41**: Tonmergelstein, dolomitisch, dunkelgrau und hellgrau laminiert, erdfeucht bis trocken, fest, kantenbrüchig, großstückig, Fasergipslagen, Harnische; Gips 3 %
–	37,35	m	Tonstein, dolomitisch, bräunlichgrau, einzelne Schichtfugen mit Gips verheilt (0,1–0,5 cm)
–	37,90	m	Tonstein, rotbraun, Kern auf ganzer Länge von Vertikalkluft, verheilt mit Fasergips (0,5–0, 8 cm stark) durchzogen (Gipskluft setzt sich in der nächsten Probe fort)
–	38,00	m	**Probe EKB 2/42**: Tonstein, dolomitisch, dunkelrotbraun, mit grüngrauen, 2–3 cm großen Reduktionshöfen, großstückig, trocken, Fasergipse, Harnische; Gips 6 %
–	38,12	m	wie von 37,35 bis 37,90 m
–	38,30	m	Tonstein, dunkelgrau, von zahlreichen steil stehenden Klüften durchzogen, gefüllt mit toniger Rissbreccie, vertikale Gipskluft wie zuvor
–	38,55	m	Tonstein, schwarzgrau, hart, einzelne Fasergips-Klüfte, auf Schichtfugen vereinzelt Gips u. Calcit; Vertikalkluft setzt sich fort bis 38,45 m, Schichtneigung 40°
–	39,00	m	Gipsstein mit Calcit in Knollen (bis 10 cm) mit Tonstein, dunkelrotbraun und dunkelgrau, hart, bis 38,90 m überwiegend Gipsstein, darunter Tonstein vorherrschend
–	39,05	m	**Probe EKB 2/43**: Tonstein, dolomitisch, dunkelrotbraun und graugrün, trocken, stückig, mäßig hart, brüchig, Harnische, versch. Fasergipslagen bis 1 cm; Gips 9 %
–	39,50	m	Tonstein, dolomitisch, dunkelrotbraun, fein hellgrün marmoriert, hart, Fasergips-Kluft (0,8 cm) von 39,10–39,25 m; Vollkern
–	39,70	m	Tonstein, dolomitisch, grau, sonst wie zuvor, von 39,58 bis 39,66 m feine Kluft (1 mm), gipsverheilt, bis 39,60 m massig, darunter geschichtet

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	40,00	m	Gipsstein mit Calcit, rosa, massig, mit einzelnen dünnen Tonflasern, ab 39,95 m knollig-brecciös
–	40,10	m	**Probe EKB 2/44**: Gipsstein, wolkig, knollig, rötlich weiß; Tonstein, dunkelgrau, trocken-erdfeucht, Harnische, Fasergipslagen bis 0,5 cm; Gips 62 %
–	40,15	m	Gipsstein wie von 39,70 bis 40,00 m
–	40,29	m	Tonstein, schwach plastifiziert, grau, durchzogen von vielen Gips-Schnüren und –klüften
–	40,60	m	Gipsstein mit etwas Calcit, blassrosa, mit einzelnen dünnen Tonflasern, untere 5 cm kleinknollig
–	40,65	m	**Probe EKB 2/45**: Tonstein, dunkelgrau, erdfeucht, brüchig, polygonal zerfallend; mit rosa Gipsknollen (2–5 cm), Fasergipslagen; Gips 43 %
–	41,00	m	Tonstein, mittelgrau, brecciös, mit Gips auf Schichtfugen, einzelne Gipsknollen, blassrosa, bei 40,73 m mehrere mm Ton, hellgrau auf Kluft- bzw. Schichtfuge, 40,77–40,84 m vertikale, gipsverheilte Kluft
–	41,05	m	**Probe EKB 2/46**: Tonstein, dunkelgrau und dunkelrotbraun, stückig, erdfeucht; Gipsknollen, rötlichweiß (bis 5 cm), Fasergipslagen; Gips 39 %
–	41,45	m	Gipsstein, blassrosa, wolkig - knollig, mit brecciösen Tonstein-Einlagerungen, dunkelgrau, rotstichig, brecciös [41,05–41,15 m]
–	41,85	m	Tonstein, brecciös, hart, kompakt, Vollkern, rotbraun/grau marmoriert, 41,66–41,73 m Fasergipskluft
–	42,00	m	Tonstein, grau, z. T. dunkelrotbraun marmoriert, bis 42,00 m Fasergips-verheilte Vertikal-Kluft (0,5 cm), z. T. mit Calcit
–	42,10	m	**Probe EKB 2/47**: Tonstein, kalkig, dunkelgrau, einzelne rotbraune Schlieren, trocken, großstückig, mäßig hart – hart; Fasergipslagen, weiß/rosafarben; Gips 25 %
–	42,70	m	Tonstein, grau, z. T. dunkelrotbraun marmoriert, 42,42–42,45 m 3 cm Gipslage, bei 42,60 m Kreuzung von 1–2 cm Gips auf Schichtfuge und GipsKluft [→ Foto]
–	43,05	m	Gipsstein und Calcit, blassrosa
–	43,25	m	Gipsstein, weiß, stark durchsetzt mit feinen Tonflasern, dunkelgrau
–	43,35	m	**Probe EKB 2/48**: Tonstein, dunkelgrau, erdfeucht, polygonal-bröckelig, brecciiert, großstückig; Gipsknollen, rosa, (2–6 cm), Fasergipslagen; Gips 31 %
–	43,55	m	Tonstein, dunkelgrau, z. T. rotstichig, mit Gips, rosa in Knollen und Schnüren, Schichtneigung 40°
–	43,90	m	Tonstein, brecciert, mit Gips verheilt (0,1–0,4 cm), von 43,45–43,90 m steil stehende, gipsverheilte Kluft
–	44,00	m	**Probe EKB 2/49**: Gipsstein, wolkig-knollig, rötlich-weiß, leicht fasrig, wenig weißer Fasergips; in Zwickeln: Tonstein, dunkelgrau; erdfeucht-trocken, Harnische, Gips 94 %
–	44,05	m	**Probe EKB 2/50**: Gipsstein, wolkig-knollig, rötlich weiß, weißer Fasergips; in Zwickeln: Tonstein, dunkelgrau; erdfeucht-trocken, stückig; Gips 65 %
–	44,27	m	Gipsstein, knauerig, blassrosa mit grauen Tonflasern, Kluftschar (gipsverheilt)
–	44,90	m	Tonstein, grau, 44,40–44,75 m rotbraun, bei 44,64 m 2 cm Schichtfuge mit Gips, mit Gips verheilte Klüfte, ab 44,70 m zahlreiche wolkige Gipsknauern, rosa, Schichtneigung 40°
–	45,00	m	**Probe EKB 2/51**: Gipsstein, wolkig-knollig, rötlich weiß, weißer Fasergips 5 %; in Zwickeln: Tonstein, dunkelgrau; erdfeucht-trocken, großstückig; Gips 70 %

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 45,25 m Gipsstein, blassrosa, mit Tonstein-Flasern, kleine steilstehende Kluft, gipsverheilt

– 45,35 m Tonstein, brecciös, grau/rotbraun marmoriert, einzelne steilstehende Gipsklüfte und Schichtfugen

– 45,90 m Tonstein, dolomitisch, rotbraun, massig, 45,50–45,65 m zwei große Gipsknollen, blassrosa, gipsverheilte, steilstehende Klüfte (0,1–0,5 cm)

– 46,00 m Tonstein, brecciös, rotbraun, einzelne Gipslagen u. Gips-Klüfte

– 46,05 m **Probe EKB 2/52**: Tonstein, dunkelgrau-rotbraun, mäßig hart, stückig, Harnische, erdfeucht, rosa Gipsknollen (6 x 3 cm), Fasergips weiß, Gips 15 %

– 46,30 m Tonstein, brecciös, grau, einzelne Gipslagen u. Gips-Klüfte

– 46,65 m Gipsstein, massig, schwach tonflaserig, weiß bis hellrosa

– 46,75 m Tonstein, mürb, Fasergips- u. Calcit-Schichtfugen (bis 1 cm)

– 47,00 m Tonstein, brecciös, grau, bei 46,85 m Fasergips-Schichtfuge (40°), 46,85–46,90 m steilstehende Gipskluft, an der Basis 4 cm Gipsknolle

– 47,35 m Dolomitstein, hart, hellgrau, an der Basis rötlich marmoriert, massig, 47,00–47,30 m steile bis vertikale, gipsverheilte Kluft; weitere gipsverheilte Haarklüfte [Engelhofen-Platte]

– 47,40 m **Probe EKB 2/53**: Dolomitmergelstein, hellgrau-rotbraun, mäßig hart, stückig, trocken, rosa Gipsknolle, Fasergips weiß; Gips 7 %; [Engelhofen-Platte]

– 47,50 m Tonstein, rotbraun, graugrün marmoriert, mürb, plastifiziert, an steiler Kluft abgesetzt gegen:

– 47,80 m Gipsstein mit Calcit, massig, tonflaserig

– 48,00 m Tonstein, rot/grün marmoriert, brecciös, gipsverheilt, mit wolkigen Gipssteinknauern, z. T. mit Calcit

– 48,10 m **Probe EKB 2/54**: Gipsstein, hellgrau-rosa; mit Tonstein, rotbraun-dunkelgrau; trocken, mäßig hart-brüchig, stückig, Harnische, Fasergips weiß; Gips 71 %

– 48,20 m Tonstein, rot/grün marmoriert, brecciös, gipsverheilt, mit wolkigen Gipsknauern, z. T. mit Calcit

– 48,80 m Gipsstein, knollig, Knollen an der Basis 0,5 cm, nach oben auf 10 cm zunehmend, stark tonflaserig

– 49,00 m Tonstein, dunkelgrau, von gipsverheilten Schichtfugen (1–2 cm) durchzogen, Gipsknollen, rosa

– 49,05 m **Probe EKB 2/55**: Gipsstein, wolkig, knollig, weißlich-grau, mit dunklen Tonlinsen in Zwickeln, erdfeucht-trocken, dunkelrote Gipsknolle; Gips 90 %

– 49,20 m Gipsstein, knollig, tonflaserig (schwächer als von 48,20 bis 48,80 m), rosa

– 50,00 m Gipsstein, tonflaserig, kleinknollig, ab 49,80 m massig mit einzelnen Tonflasern, weiß bis blassrosa, 49,21–49,24 m 3 Fasergipslagen (je 1–1,5 cm), bei 49,45 m 2 cm Fasergips, bei 49,65 m 1–1,5 cm Fasergips, bei 49,87 m 0,4 cm Fasergips

– 50,05 m **Probe EKB 2/56**: Gipsstein, wolkig, knollig, weißlich-grau, mit dunklen Tonlinsen, trocken, stückig, Harnische; Gips 94 %

– 50,30 m Gipsstein, tonflaserig, kleinknollig, massig mit einzelnen Tonflasern, weiß bis blassrosa, bei 50,20 m 0,5 cm Fasergips [Vollkern]

– 50,50 m Gipsstein mit Calcit, stark tonig, grau, bis 50,35 m mit blassrosa Gipsknollen, großstückig zerbohrt

– 50,90 m Gipsstein mit Calcit, massig, weißgrau

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 51,00 m **Probe EKB 2/57**: Gipsstein, grauweißlich, knotig, perlartig; mit Tonstein, dunkelgrau; großstückig, trocken, weißer Fasergips; Gips 81 %

– 51,50 m Tonstein, mittelgrau, mürb mit Gipsflasern, Fasergips auf Klüften und Schichtfugen; Bohr-Ø: 101 mm (für Triaxial-Versuch)

– 51,65 m **Probe EKB 2/58**: Tonstein, dolomitisch u. Gipsstein; zerbohrt, weich, gebohrt mit 101 mm für Triaxzelle; Gips 19 %

– 51,80 m Tonstein, mittelgrau, mürb mit Gipsflasern, Fasergips auf Klüften und Schichtfugen; Bohr-Ø: 101 mm (für Triaxial-Versuch)

– 51,90 m **Probe EKB 2/59**: Gipsknolle, bassanitisch, dolomitisch, außen weißlich porös, innen hart, grau, trocken, einzelne Tonflasern, dunkelgrau; Gips 79 %

– 52,00 m Gipsstein, hellgrau mit 1–3 mm starken, radialfaserigen Gipskrusten, weiß und Tonstein, schwarz-grau, zu flachen Linsen zerbohrt ?

– 52,65 m Tonstein, kalkig, mittelgrau, breiig zerbohrt

– 52,75 m **Probe EKB 2/60**: Gipsstein, grauweißlich, knotig, perlartig; Tonsteinflasern dunkelgrau, großstückig, trocken; weißer Fasergips; Gips 71 %

– 52,95 m Gipsstein mit Calcit, massig, weiß

– 53,10 m Gipsstein, knollig, tonflaserig, weiß, vereinzelt Fasergips auf Schichtfugen

– 53,50 m Gipsstein, knollig, stark tonflaserig, blassrosa, vereinzelt Fasergips auf Schichtfugen (bei 53,30–53,40 m 1 cm)

– 53,60 m Gipsstein, knollig, tonflaserig, weiß

– 53,70 m **Probe EKB 2/61**: Gipsstein, knollig, weißlich-rosa, mit Tonstein, dolomitisch, flaserig; trocken, Fasergips, weiß; Gips 80 %

– 54,05 m Gipsstein mit Calcit, massig, weiß bis hellrosa, Fasergips-verheilte Kluft

– 54,10 m **Probe EKB 2/62**: Gipsstein, grau mit Tonstein, dunkelgrau, trocken-erdfeucht, mäßig hart-brüchig, stückig; Gipsknollen, weißlich-rot, Fasergips weiß; Gips 70 %

– 54,15 m Tonstein, z. T. plastifiziert, dunkelgrau bis schwarzgrau, weich, mit Fasergips

– 54,60 m Gipsstein mit Calcit, knollig, tonflaserig, weiß

– 54,90 m Gipsstein mit Calcit, flaserig, weiß

– 55,00 m Gipsstein mit Calcit, kleinknollig, lagig, weiß; Schichtfallen ca. 40°

– 55,05 m **Probe EKB 2/64**: Gipsstein, knollig-wolkig, grauweiß mit Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau, wellig-laminiert; Fasergipslagen schichtparallel, trocken, stückig; Gips 75 %

– 55,20 m Gipsstein, flaserig, weiß

– 55,30 m Tonstein, geschichtet, dunkelgrau bis schwarzgrau, mit einzelnen Gipssteinlagen, blassrosa, bis 2 cm Dicke, einzelne Gipsknollen, Fasergips auf Schichtfugen

– 55,35 m **Probe EKB 2/63**: Gipsstein, außen weißlich, innen grau mit Tonstein, dunkelgrau, trocken-erdfeucht, stückig, Harnische; Gips 63 %

– 55,45 m Tonstein, geschichtet, dunkelgrau bis schwarzgrau, mit einzelnen Gipssteinlagen, blassrosa, bis 2 cm Dicke, einzelne Gipsknollen, Fasergips auf Schichtfugen

– 55,72 m Gipsstein mit Calcit, kleinknollig, weiß, tonflaserig, mit zerscherten, brecciierten Tonschlieren; Fasergips (bis 3 mm) auf Schichtfugen

– 55,98 m Tonstein, dunkelgrau bis schwarzgrau, mit Gipssteinlagen u. –knollen, blassrosa

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen

Anl. 5.6 a
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 56,15 m Gipsstein, knollig-knauerig, schwach kalkig, weiß bis hellgrau, mit unregelmäßigen, z.T. flaserigen Tonsteinlagen, schwarzgrau

– 56,20 m Gipsstein, lagig, weiß bis hellgrau, mit 2–3 mm starken Tonsteinlagen, schwarzgrau

– 56,25 m **Probe EKB 2/65**: Wechsellagerung: Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau und Gipsstein, hellgrau; spätiger Gips; „slumping-Strukturen“, trocken, stückig; Gips 33 %

– 56,50 m Gipsstein, massig, mit zwei, bis 0,5 cm dicken Tonstein-Lagen, dunkelgrau bei 56,38 m und 56,43 m; Schichtflächen mit Harnischstriemung; Schichtfallen ca. 40°; [Tonstein-Anteil: ca. 5 %]

– 56,65 m Tonstein, schwarzgrau, z.T. schwach plastifiziert, mit Fasergipslagen bis 0,5 cm, einzelne gipsverheilte Klüfte; [Tonstein-Anteil: ca. 70 %]

– 56,70 m Gipsstein, feinwellig geschichtet, oben mit einzelnen dünnen Tonsteinlagen, nach unten in Tonhäute übergehend; [Tonstein-Anteil: ca. 10 %]

– 56,80 m **Probe EKB 2/66**: Tonstein, dunkelgrau; Gipsknolle, rosa, Fasergipslagen, erdfeucht, stückig, stark aufgelockert, bröckelig-mürb; Gips 24 %

– 56,90 m Gipsstein, feinwellig geschichtet, oben mit einzelnen dünnen Tonsteinlagen, nach unten in Tonhäute übergehend; [Tonstein-Anteil: ca. 10 %]

– 57,00 m Gipsstein, wolkig-knauerig, weiß, z.T. leichter Stich ins Rosa, mit feinen Tonstein-Flasern, schwarz; [Tonstein-Anteil: ca. 5 %]

– 57,10 m **Probe EKB 2/67**: Gipsstein, wolkig (Maschendraht-Gefüge), knollig, trocken, mit Tonstein, dunkelgrau, in Zwickeln, großstückig; Kern leicht deformiert; Gips 95 %

– 57,45 m Gipsstein, wolkig-knauerig, weiß, z.T. leichter Stich ins Rosa, mit feinen Tonstein-Flasern, schwarz; [Tonstein-Anteil: ca. 5 %]

– 57,80 m Tonstein, kalkig, schwarzgrau, hart, einzelne gipsverheilte Klüfte, Gipsknollen bis 7 cm Länge, mit radialstrahligen Gipssäumen(2–3 mm); ab 57,55 m feinknolliger, tonflaseriger Gips in großen Nestern [Tonstein-Anteil ca. 70 %]

– 57,90 m Gipsstein, feinwellig geschichtet mit Tonstein-Lagen bis 3 cm; in Tonstein-Lagen einzelne, dünne gipsverheilte Klüfte; Schichtneigung ca. 40°

– 58,00 m **Sonderprobe** – (entnommen durch Ing.-Büro, Herr Breder)

– 58,05 m **Probe EKB 2/68**: Wechsellagerung: Gipsstein, grau, knollig, wolkig und Tonstein, dunkelgrau, erdfeucht, Harnische; Gips 69 %

– 58,95 m Gipsstein, feinwellig geschichtet mit Tonstein-Lagen bis 3 cm; in Tonstein-Lagen einzelne, dünne gipsverheilte Klüfte; 58,60–58,70 m stark wellige Schichtung; Schichtneigung ca. 40°[Tonstein-Anteil : ca. 25 %]

– 59,00 m **Probe EKB 2/69**: Gipsstein, knollig-knotig, grauweiß-hellgrau, erdfeucht, stückig; Gips 76 %

– 59,80 m Gipsstein, feinwellig geschichtet, mit Tonstein-Lagen bis 3 cm; in Tonstein-Lagen einzelne, dünne gipsverheilte Klüfte; 59,00–59,20 m, 59,35–59,50 m und 59,60–59,85 m entherolithisch verfaltet [Tonstein-Anteil: ca. 25 %]

– 59,85 m **Probe EKB 2/70**: Gipsstein, hellgrau mit einzelnen dolomitischen Tonlagen in mm-Bereich, stückig, trocken; Gips 83 %

– 60,00 m Tonstein, schwarzgrau, leicht plastifiziert, mit z.T. knolligen Lagen von Gipsstein, weiß bis 5 mm Dicke [Tonstein-Anteil: ca. 60 %)

– 60,05 m **Probe EKB 2/71**: Gipsstein, wolkig-knollig, wellig, grau-grauweiß, Fasergipslagen schichtparallel; Tonstein in Schmitzen; trocken, großstückig, mäßig hart, Gips 83 %

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen

Anl. 5.6 a
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	60,40	m	Gipsstein, weiß, bis 40,15 m körnig, mit Tonsteinlagen, grau, Vollkern, Schichtneigung 40°
–	60,90	m	Tonstein, grau, mit einzelnen hellgrauen Dolomit-Knollen bis 1 x 2 cm, brecciiert; gipsverheilte Schichtfugen u. Klüfte
–	61,05	m	**Probe EKB 2/72**: Tonstein mit Gipsknollen (4 cm), hellgrau; Fasergipslage, trocken, großstückig; Gips 38 %
–	61,15	m	Tonstein, grau, mit unregelmäßigen Gipslagen
–	61,45	m	Tonstein, grau, durchsetzt mit feinen Gipsknötchen, einzelne, z.T. knollige Gipslagen, ab 61,35 m steilstehende Kluft, Fasergips-verheilt (1 cm)
–	61,50	m	Gipsstein, fein tonflaserig, hellgrau
–	61,55	m	**Probe EKB 2/73**: Gipsstein, anhydrithaltig, hellgrau, knotig, Fasergipslagen, Ton-/Schluffgehalt fein verteilt, trocken, stückig; Gips 70 %, Anhydrit 6 % **(Oberer Anhydritspiegel**)
–	61,95	m	Tonstein, mittelgrau, mit dunkelgrauen Linsen und Flasern, durchsetzt mit feinen Gipsknötchen, einzelne, z.T. knollige Gipssteinlagen, einzelne gipsverheilte Schichtfugen bis 0,8 cm
–	62,00	m	**Probe EKB 2/74**: Gipsstein, anhydrithaltig, hellgrau, mit Knötchen; schichtparallele Fasergipslagen; trocken, stückig, Gipskristalle spiegeln auf, Tonstein in Zwickeln; Gips 70 %, Anhydrit 6 %
–	62,75	m	**Sonderprobe: Triax-Probe (doorstopper-Versuch) -**
–	62,90	m	Tonstein, dunkelgrau, mit Gips/Anhydrit-Lagen u. –schnüren
–	62,95	m	Tonstein, dunkelgrau, einzelne gipsverheilte Schichtfugen, eine steilstehende, gipsverheilte Kluft (2 cm); Harnischflächen
–	63,00	m	**Probe EKB 2/75**: Tonstein, hellgrau, trocken, stückig; Fasergipslagen; Gips 41 % bis 65,65 m; Kern-Ø: 101 mm
–	63,35	m	Tonmergelstein, mittelgrau, mit zahlreichen mm-großen Gips/Anhydrit-Knötchen, einzelne gipsverheilte Schichtfugen bis 0,6 cm
–	63,50	m	Gipsstein, knollig-wolkig, weiß, mit dünnen schwarzen Tonflasern
–	63,55	m	Tonstein, schwarz
–	63,65	m	**Probe EKB 2/76**: Gipsstein, stark anhydrithaltig, hellgrau, an den Rändern jeweils ca. 2 cm dicke schwarzer Tonstein, trocken; Gips 53 %, Anhydrit 15 %
–	64,20	m	Gips-/Anhydritstein, tonig, hellgrau, gipsverheilte Schichtfugen, an der Basis Fasergips-verheilte Schichtfuge (0,7 cm), Schichtneigung 40°; 63,70–63,95 m gipsverheilte Vertikalkluft
–	64,30	m	**Probe EKB 2/77**: Wechsellagerung: Gips-/Anhydritstein, grau und Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau; jeweils 0,2–1 cm, trocken, Fasergips; Gips 36 %, Anhydrit 16 %
–	64,60	m	Störungszone, durch 2–3 cm Gips verheilt; Tonstein, schwarz mit massenhaft mm-großen Anhydrit-Knötchen, versetzt gegen Anhydritstein, tonig, grau
–	64,90	m	Gips-/Anhydritstein, grau, tonig, einzelne mit Fasergips verheilte Schichtfugen
–	65,00	m	**Probe EKB 2/78**: Gipsstein, stark anhydrithaltig, hell- bis dunkelgrau, einzelne Knötchen, weiß; Fasergips, trocken; Gips 64 %, Anhydrit 13 %
–	65,65	m	Gips-/Anhydritstein, grau, tonig, einzelne Fasergips-verheilte Schichtfugen
–	65,75	m	Gips-/Anhydritstein, tonflaserig, grau
–	65,90	m	Gips-/Anhydritstein, tonig, mittelgrau, mit mm-großen Anhydrit-Knötchen

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	66,00	m	**Probe EKB 2/79**: Wechsellagerung: Anhydritstein, stark gipshaltig, grau und Tonstein, dunkelgrau; jeweils 0,2–0,5 cm, erdfeucht, Fasergips; Gips 12 %, Anhydrit 54 %
–	66,20	m	Gips-/Anhydritstein, tonig, mittelgrau, mit mm-großen Anhydrit-Knötchen
–	66,30	m	Tonstein, schwarz, obere 5 cm mit knollig-wolkigem Gips/Anhydrit, untere 5 cm mit einzelnen Fasergips-verheilten Schichtfugen
–	66,65	m	Feinschichtige Wechsellagerung von Gips-/Anhydritstein, grau und Tonstein, dunkelgrau
–	66,90	m	Tonstein, feinpolyedrisch zerfallend, zahlreiche Harnischflächen, einzelne Schichtfugen mit hellrosa Fasergips
–	66,95	m	**Probe EKB 2/80**: Tonstein, grauschwarz; Anhydritstein, dunkelgrau, trocken, zerbrochen in Stücke mit Durchmesser ca. 1 cm, Gips 1 %, Anhydrit 25 %
–	67,05	m	**Probe EKB 2/81**: Tonstein, dunkelgrau bis schwarz mit Anhydritstein, dunkelgrau, erdfeucht, zerbrochen in Stücke bis ca. 0,2–5 cm; Gips 1 %, Anhydrit 23 %
–	67,40	m	Tonstein, dunkelgrau, feinpolyedrisch zerfallend, zahlreiche Harnischflächen, einzelne Schichtfugen mit hellrosa Fasergips
–	67,65	m	Gips-/Anhydritstein, tonig, mittelgrau, durch mm-große weiße Sulfatknötchen und dunkelgraue Tonstein-Bröckchen gefleckt
–	67,70	m	**Probe EKB 2/82**: Tonstein, dunkelgrau, mit 2–3 cm mächtiger Lage dicht gespickt mit mm-großen Anhydrit-Knötchen; dünne Fasergipslagen auf Schichtfugen, stark zerbrochen, mit Gips verheilt; Schichtneigung 40°; Gips 3 %, Anhydrit 30 %
–	67,95	m	Gips-/Anhydritstein, tonig, mittelgrau, durch mm-große weiße Sulfatknötchen und dunkelgraue Tonstein-Bröckchen gefleckt
–	68,05	m	**Probe EKB 2/83**: Anhydritstein, grau, weißliche Knötchen bis 1 mm; Tonstein, dunkelgrau, Faseranhydrit, Anhydrit 51 %
–	68,28	m	Gips-/Anhydritstein, tonig, mittelgrau, bis 68,04 m durch cm-große, darunter durch mm-große, weiße Sulfatknötchen und dunkelgraue Tonstein-Bröckchen gefleckt
–	68,31	m	Tonstein, dunkelgrau, vermutlich aufgequollen, 1 cm Fasergips-Lage, wellig, z.T. gezackt
–	68,72	m	Gips-/Anhydritstein, tonig, mittelgrau, durch mm-große, weiße Sulfatknötchen und dunkelgraue Tonstein-Bröckchen gefleckt
–	68,75	m	Tonstein, dunkelgrau, vermutlich aufgequollen, 1 cm Fasergips-Lage, wellig, z.T. gezackt
–	69,35	m	Wechsellagerung von Anhydritstein, grau und Tonsteinlagen (2–4 cm mächtig), feine gipsverheilte Schichtfugen
–	69,45	m	**Probe EKB 2/84**: Wechsellagerung Tonstein, dunkelgrau und Gips/Anhydritstein, grau, 0,5–1 cm, erdfeucht, Fasergips; Gips 13 %, Anhydrit 10 %
–	69,50	m	Wechsellagerung von Anhydritstein, grau und Tonsteinlagen (2–4 cm mächtig), feine gipsverheilte Schichtfugen
–	70,00	m	Wechsellagerung von feingeschichtetem Anhydritstein, grau und einzelnen Tonsteinlagen, dunkelgrau (1–3 cm), bei 69,60 m: 1 cm Fasergips, gezackt
–	70,40	m	Anhydritstein, tonig, brecciös, mit mm-großen Sulfat- und Tonstein-Knötchen, einzelne, gipsverheilte Schichtfugen und steil stehende Klüfte; Schichtneigung 40°

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	70,44	m	Feinschichtige Wechsellagerung von Tonstein, dunkelgrau und Gips-/Anhydritstein, hellgrau
–	70,55	m	Anhydritstein, tonig, grau, mit mm-großen, weißen Anhydrit-Knötchen, z.T. wellig geschichtet
–	70,65	m	Tonstein, stark anhydritisch, mit mm-großen, weißen Anhydrit-Knötchen, schichtungslos
–	70,72	m	Anhydritstein, leicht wellig feingeschichtet, grau, an der Basis Fasergips-verheilte Schichtfuge (0,5 cm)
–	70,95	m	Anhydrit, tonflaserig, an 45°-Störung (?) abgesetzt gegen Anhydritstein, massig, grau
–	71,00	m	Tonstein, dunkelgrau mit Anhydritsteinlagen und einzelnen Fasergips-verheilten Schichtfugen
–	71,28	m	Anhydritstein, tonflaserig, obere 10 cm stark, darunter leicht enterolithisch verfaltet, 71,00–71,07 m Anhydrit-verheilte (?) Kluft
–	71,52	m	feinschichtige Wechsellagerung von Anhydritstein, grau und Tonstein, dunkelgrau, einzelne Lagen leicht enterolithisch verfaltet; Kern z.T. an Tonfugen aufgequollen
–	71,60	m	Tonstein, dunkelgrau, mit feinschichtigen Anhydritsteinlagen, einzelne Fasergips-verheilte Schichtfugen bis 1 cm
–	71,75	m	**Probe EKB 2/85**: Wechsellagerung Tonstein, dunkelgrau und Gips/Anhydritstein, grau, 0,2–1 cm, erdfeucht, Fasergips; Gips 24 %, Anhydrit 10 %
–	71,77	m	Anhydritstein, weiß; Schichtneigung 40°
–	72,25	m	Wechsellagerung von tonigem Anhydritstein, mittelgrau, mit mm-großen, weißen Anhydrit-Knötchen und Tonstein-Lagen mit dünnen Anhydritstein-Zwischenlagen
–	72,75	m	Anhydritstein, nach unten zunehmend tonig, überwiegend feinflaserig, mit mm-großen weißen Anhydrit-Knötchen
–	72,80	m	**Probe EKB 2/86**: Gipsstein, anhydritführend, hellgrau; Tonstein, dunkelgrau, erdfeucht, zerbrochen, Fasergips; Gips 76 %, Anhydrit 5 %
–	73,45	m	Anhydritstein, überwiegend feinflaserig, mit mm-großen weißen Anhydrit-Knötchen, bei 73,17 m gipsverheilte Schichtfuge (0,5 cm)
–	73,50	m	Tonstein, kleinpolyedrisch zerfallend, einzelne gipsverheilte Schichtfugen und Klüfte bis 0,5 cm; zahlreiche kleine Harnische
–	73,65	m	**Probe EKB 2/87**: Tonstein und Gips/Anhydritstein, von Gips wirr durchzogen und zerbrochen, überwiegend zu Bröckchen zerfallen (Quellung), erdfeucht; Gips 10 %, Anhydrit 7 %
–	74,00	m	Tonstein, kleinpolyedrisch zerfallend, einzelne gipsverheilte Schichtfugen und Klüfte bis 0,5 cm; zahlreiche kleine Harnische
–	74,15	m	Anhydritstein, tonflaserig, enterolithisch verfaltet; an der Basis 2 cm Anhydritstein, massig
–	74,52	m	Anhydritstein, tonig, mit mm-großen weißen Anhydrit-Knötchen, lagig bis feinflaserig, 74,27–74,30 m wellig feinlaminiert; Schichtneigung ca. 40°
–	74,60	m	Tonstein, dunkelgrau, zerbrochen, gipsverheilt
–	74,70	m	**Probe EKB 2/88**: Gips/Anhydritstein und Tonstein, von Gips wirr durchzogen und zerbrochen, teilweise zu Bröckchen zerfallen (Quellung), erdfeucht, Gips 33 %, Anhydrit 22 %
–	75,00	m	Tonstein, dunkelgrau, bis 74,90 m stark zerbrochen (brecciiert), gipsverheilt

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen

Anl. 5.6 a
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	75,15	m	Tonstein, dunkelgrau, lagenweise (bis 2 cm mächtig) durchsetzt mit mm-großen Anhydrit-Knötchen; bei 75,05 m 0,5 cm Fasergips, wellig bis gezackt; [Kern infolge Quellung nach 10 min. in Kernkiste verspannt, nach 36 h nicht mehr entnehmbar]
–	75,25	m	**Probe EKB 2/89**: Tonstein und Anhydritstein, stark gipshaltig, trocken, fest, mit schichtgebundenen weißen kleinen Knötchen; Gips 5 %, Anhydrit 25 %
–	75,40	m	Tonstein, dunkelgrau, lagenweise (bis 2 cm mächtig) durchsetzt mit mm-großen Anhydrit-Knötchen
–	75,50	m	Tonstein, schwarzgrau, polyedrisch zerfallen (zerbohrt ?), einzelne, dünne Fasergips-Klüfte, etwas Fasergips, rosa (5 mm stark)
–	76,00	m	**Sonderprobe: Triaxialversuch**
–	76,10	m	Tonstein, schwarzgrau, einzelne, dünne Fasergips-Klüfte, kleine, glänzende Harnisch-Flächen
–	76,20	m	Tonstein, dunkelgrau, mit einzelnen, z.T. knollig-wolkigen Anhydritsteinlagen bis 3 cm; einzelne Klüfte (60°) mit Fasergips; Schi chtneigung ca. 40°
–	76,30	m	**Probe EKB 2/91**: Tonstein, dunkelgrau, von einer Gips/Anhydritkluft durchzogen, in Teilbereichen zerbrochen wiederverheilt; Gips 6 %, Anhydrit 5 %
–	76,60	m	Tonstein, dunkelgrau, polyedrisch zerfallen (zerbohrt ?), ab 76,55 m mehrere knollig-wolkige Anhydritsteinlagen bis 2 cm; mm-starke Gips-Beläge auf Klüften und Schichtflächen
–	76,70	m	**Probe EKB 2/92**: Gips/Anhydritstein und Tonstein, dunkelgrau, von 4 cm dicker Gipskluft durchzogen, in Teilbereichen zerbrochen und wiederverheilt; Gips 33 %, Anhydrit 14 %, (3 Dünnschliffe)
–	76,80	m	**Probe EKB 2/93**: Anhydrit-/Gipsstein und Tonstein, 2 cm Gipskluft, von 0,5–2 mm großen weißlichen Knötchen durchzogen, in Teilbereichen zerbrochen und wiederverheilt; Gips 22 %, Anhydrit 28 %
–	77,00	m	Anhydritstein, geschichtet, feinbrecciös, mit dunkelgrauen Tonstein-Klasten (bis mehrere cm groß), einzelne gipsverheilte Klüfte bis 5 mm
–	77,15	m	**Sonderprobe**: Quellversuch
–	77,27	m	Wechsellagerung aus Anhydritstein, grau und Tonstein, dunkelgrau; Schicht-dicken im mm- bis 1 cm-Bereich
–	77,38	m	Anhydritstein, tonig, unregelmäßig geschichtet, kleinknollig, im unteren Abschnitt Knollen bis 2 cm Ø
–	77,50	m	Tonstein, dunkelgrau, einzelne Anhydritsteinlagen bis 5 mm, gipsverheilte Klüfte (mm-stark), kleine Harnische
–	77,65	m	**Probe EKB 2/94**: Tonstein, dunkelgrau bis schwarz, stark anhydritisch, Ton-quellung auf 1 cm starken Tonschichtung, Gipsumwandlung?; Gips 2 %, Anhydrit 10 %
–	77,68	m	Tonstein, dunkelgrau, in der Mitte 1–1,5 cm Faseranhydrit, rosa, einzelne gips-verheilte Klüfte
–	77,85	m	**Sonderprobe**: Quellversuch
–	78,20	m	Tonstein, dunkelgrau, mit feinen massig dichten und feinknolligen Anhydrit-steinlagen; steilstehende Gipsklüfte, weiß und rosa; von 78,12 m bis 78,15 m Ton, grau, weich (vermutlich Bohrschmand)
–	78,30	m	**Probe EKB 2/95**: Anhydritstein, stark gipshaltig, grau, laminiert; Tonstein, grau; Schichtneigung 30–40°; Gips 6 %, Anhydrit 47 %
–	78,48	m	Anhydritstein, tonig, massig, dunkelgrau

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen

Anl. 5.6 a
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	78,80	m	Wechsellagerung aus Anhydritstein (Schichtdicke meist 1–2 cm, vereinzelt bis 4 cm) und Tonstein, grau; bei 78,52 m 1 cm Anhydritstein, massig, dicht, darunter Anhydrit in feinen Knötchen, bei 78,58 m 1 cm Anhydritstein, hellrot
–	78,95	m	**Probe EKB 2/96**: Tonstein, schwarzgrau mit rotbraunen Schlieren, erdfeucht-trocken, bröckelig, stückig, einzelne Gips-/Anhydritsteinlagen, Marienglas, Fasergips, Gips 9 %, Anhydrit 7 %
–	79,20	m	Tonstein, dunkelgrau, oben rot marmoriert, bei 79,02 m 1 cm Gips-/Anhydritstein, weiß auf einer Schichtfuge
–	79,32	m	Tonstein, brecciiert, dunkelgrau, rot marmoriert, vertikale gipsverheilte Klüfte
–	79,63	m	Anhydritstein, hellgrau, feinbrecciös, mit mm-großen Tonstein-Klasten, dunkelgrau
–	79,80	m	Anhydritstein, schlierig-flaserig geschichtet, im feinschichtigen Wechsel mit Tonstein, dunkelgrau; bei 79,75 steilstehende Kluft mit hellrotem Anhydritstein (2–3 mm)
–	79,95	m	**Probe EKB 2/97**: Tonstein, schwarzgrau mit rotbraunen Schlieren, erdfeucht-trocken, bröckelig, stückig, einzelne Gips-/Anhydritsteinlagen, Marienglas, Fasergips; Gips 9 %, Anhydrit 7 %
–	80,15	m	Tonstein, dunkelgrau, Fasergips-verheilte Klüfte (bis 5 mm)
–	80,25	m	Tonstein, dunkelgrau, mit schichtparallel angeordneten Gipsflasern
–	80,40	m	Tonstein, grau, feucht, mit blassrosa Gipsflasern
–	80,53	m	Gipsstein, geschichtet, blassrosa
–	80,67	m	Tonstein, grau, feucht, mit weißen Gipsflasern
–	80,80	m	Tonstein, dunkelgrau, polyedrisch zerfallend; Gipstapeten auf Trennflächen
–	80,95	m	**Sonderprobe**: Quellversuch
–	81,05	m	**Probe EKB 2/98**: Tonstein, dunkelgrau, trocken, stückig, bröckelig, mit Anhydritknötchen, Faseranhydrit, Harnische; Anhydrit 23 %
–	81,20	m	Tonstein, dunkelgrau, polyedrisch zerfallend; weiße Gipsknollen bis 1 cm Ø
–	81,35	m	Tonstein, grau und dunkel rotbraun, feucht, polyedrisch zerfallend, einzelne Gipsschnüre und – knauern, weiß
–	81,50	m	**Probe EKB 2/99**: Tonstein, dunkelgrau mit rotbraunen Schlieren, erdfeucht-feucht, bröckelig bis fest, Fasergips/-anhydritlagen; Gips 3 %, Anhydrit 13 %
–	81,65	m	Tonstein, dunkelgrau, polyedrisch zerfallend; mit feinen Anhydritknötchen
–	81,75	m	Gipsstein, wolkig-knauerig, mit einzelnen dunkelgrauen Tonsteinflasern
–	81,80	m	Anhydritstein in kleinen Knötchen, tonig, hellgrau, eine gipsverheilte Kluft (2 mm)
–	82,15	m	**Probe ?:** Kein Platzhalter in Kernkiste
–	82,65	m	Tonstein mit Anhydritstein, kleinknollig, bei 82,18 m, 82,48 m und 82,61 m gipsverheilte Schichtfugen und –klüfte, unregelmäßig verteilt gipsverheilte Haarrisse; 82,62–82,65 m Gips, blassrosa; zahlreiche Harnische
–	82,90	m	Tonstein, dunkelgrau, mit Anhydritsteinlagen
–	83,00	m	**Probe EKB 2/100**: Tonstein, dunkelgrau, mit Sulfatknöllchen/linsen, erdfeucht, stückig, Harnische, Fasergipslagen (1,5 cm) scheinen frisch; Gips 23 %, Anhydrit 24 %
–	83,15	m	Tonstein, dunkelgrau, mit Anhydritsteinlagen; 83,00–83,15 m steil stehende gipsverheilte Kluft (bis 1,5 cm)

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen

Anl. 5.6 a
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	83,20	m	**Probe EKB 2/101**: Anhydritstein, hellgrau-weißgrau, wolkig, mit Tonsteinlinsen, trocken-erdfeucht, stückig, sehr homogen, hart; Anhydrit 76 %
–	83,50	m	Anhydritstein, grau, nach unten zunehmend tonig, undeutlich wellig geschichtet; Schichtneigung ca. 30°
–	83,60	m	**Probe EKB 2/102**: Tonstein, dunkelgrau, mit Sulfatknötchen, gelblich-grünliche Fasergipslagen bis 1 cm erdfeucht, bröckelig-stückig; Gips 8 %, Anhydrit 14 %
–	83,75	m	**Sonderprobe:** Quellversuch
–	83,90	m	**Probe EKB 2/103**: Tonstein, graugrün-grauviolett, weißrötliche Sulfatknollen bis 1 cm, mit feinem Fasergips durchzogen, erdfeucht, mürbe-bröckelig, stückig; Gips 2 %, Anhydrit 10 %
–	84,00	m	Tonstein, grau mit Gips, zerbohrt; Kerngewinn <5 %
–	84,10	m	Tonstein, grünlichgrau und dunkel rotbraun, einzelne Gipslagen und –flasern bis 4 mm; steil stehende gipsverheilte Klüfte (bis 1,5 mm)
–	84,20	m	**Probe EKB 2/104**: Tonstein, dunkelgrau, mürbe bis mäßig hart, stückig, trocken, Anhydritknollen, weißlich, wolkig, bis 2 cm, dünne Fasergipslagen, Harnische; Gips 2 %, Anhydrit 10 %
–	84,30	m	Tonstein, grünlichgrau und dunkelrotbraun, feucht; Gipstapeten auf Trennflächen
–	84,50	m	**Sonderprobe:** Quellversuch
–	84,65	m	Tonstein, dunkelgrau, mit Anhydritsteinlagen bis 2 cm, z.T. feinwellig geschichtet, untere 5 cm brecciiert, mit Gipstapeten wieder verheilt; bei 84,52 m 0,5 cm gipsverheilte Schichtfuge, bei 84,55 m bis 4 mm Gips, weiß, Schichtung in spitzem Winkel durchschlagend
–	84,90	m	**Sonderprobe:** Quellversuch
–	85,50	m	Wechsellagerung aus Tonstein, dunkelgrau und Anhydritstein, grau (in Lagen bis 2 cm), z.T. feinwellig geschichtet, Schichtneigung auf ca. 15° abnehmend; an Kleinstörungen zerbrochen und wieder verheilt
–	86,85	m	Tonstein, dunkelgrau, geschichtet, polyedrisch zerfallend, feucht, Schichtneigung ca. 15°; ab 85,90 m steil stehende Klüfte, mit Gips, rosa und weiß verheilt, meist um 3 mm, bei 86,30 m bis 2 cm stark
–	88,45	m	Vollbohrstrecke: Tonstein, dunkelgrau, dünne blassrosa Gipsstückchen
–	88,70	m	Tonstein, dunkelgrau, mit dünnen, unregelmäßig welligen Anhydritsteinlagen, hell-grau; dünne steil stehende gipsverheilte Klüfte, Schichtneigung ca. 10°
–	88,80	m	**Probe EKB 2/108**: Tonstein, dunkelgrau und hellgrau laminiert, trocken, stückig, mit lagenweise Gips-/Anhydrit-Knötchen, mäßig hart, bröckelig zerfallend; Gips 4 %, Anhydrit 20 %
–	88,85	m	Tonstein, dunkelgrau, mit dünnen, unregelmäßig welligen Anhydritsteinlagen, hellgrau; dünne steil stehende gipsverheilte Klüfte, Schichtneigung ca. 10°
–	88,90	m	**Probe EKB 2/109**: Tonstein, dunkelgrau, stellenweise glänzend feucht, kleinstückig, stark aufgelockert, Faseranhydrit; Anhydrit 11 %
–	89,35	m	Tonstein, dunkelgrau, Gipstapeten auf Trennflächen; 89,05 – 89,15 m steil stehende Kluft, mit blassrosa Gips verheilt; Kern platzt entlang Schichtfugen auf
–	89,39	m	Anhydritstein, tonig, mittelgrau, oben feingeschichtet, unten leicht feinwellig
–	89,60	m	Tonstein, dunkelgrau, Gipstapeten auf Trennflächen; Kern platzt entlang Schichtfugen auf
–	91,50	m	Vollbohrstrecke: Tonstein, dunkelgrau, dünne blassrosa Gipsstückchen

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	92,00	m	**Probe EKB 2/110**: Cuttings: Tonstein, dunkelgrau; Gips, grauweiß, rötliche Gips/Anhydrit-Fasern; Gips 1 %, Anhydrit 17 %
–	93,00	m	**Probe EKB 2/111**: Cuttings: Tonstein, dunkelgrau; Dolomitstein, braungrau; Anhydritstein, grauweiß, weißliche Gips-Fasern; Gips 1 %, Anhydrit 24 %
–	94,00	m	**Probe EKB 2/112**: Cuttings: Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau; Anhydritstein, grauweiß, rötlicher Faseranhydrit; Gips 1 %, Anhydrit 27 %
–	94,70	m	Cuttings: Tonstein, dunkelgrau und graubraun; Anhydritstein, grauweiß, rötlicher Faseranhydrit
–	95,00	m	**Probe EKB 2/113**: Cuttings: Tonstein, dolomitisch, grüngrau und rotbraun, Anhydritstein, weißlich; Anhydrit 20 %
–	96,00	m	**Probe EKB 2/114**: Cuttings: Tonstein, graugrün und dunkelrotbraun; Anhydritstein, grauweiß; Gips 1 %, Anhydrit 17 %
–	97,00	m	**Probe EKB 2/115**: Cuttings: Tonstein, dunkelgrau und dunkelrotbraun; Anhydritstein, grauweiß; Gips 1 %, Anhydrit 19 %
–	97,80	m	**Probe EKB 2/116**: Cuttings: Tonstein, dunkelgrau und rotbraun; Gips 1 %, Anhydrit 14 %
–	98,00	m	Anhydritstein, feinkristallin, leicht vergipst (durch Bohrvorgang?), grau, in 3–8 cm großen Knollen, ca. 60–70 % des Kernstücks, in den Zwischenräumen Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun
–	98,05	m	**Probe EKB 2/117**: Anhydritstein, grauweiß, knollenförmig, kompakt; mit Tonsteinflasern, rotbraun; trocken, großstückig; Anhydrit 95 %
–	98,20	m	Anhydritstein, feinkristallin, leicht vergipst (durch Bohrvorgang?), grau, in 3–8 cm großen Knollen, ca. 60–70 % des Kernstücks, in den Zwischenräumen Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun
–	98,40	m	Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun, ungeschichtet, mit ca. 20–30 % lagenweise angereicherten Anhydritknollen 0,1–3 cm
–	98,60	m	Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun, ungeschichtet
–	98,80	m	Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun, ungeschichtet, mit ca. 40 % Anhydritknollen 0,5–4 cm, vertikale winkelige Kluft mit Fasergips
–	99,00	m	Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun, ungeschichtet, durch unebene Harnischflächen, um 30° in verschiedene Richtungen einfallend (pedogene Harnische), in polygonale Stücke zerfallend
–	99,05	m	**Probe EKB 2/118**: Dolomitmergelstein, rotbraun, graugrün gefleckt, feine Gipsklüftchen, bröckelig zerfallen, mäßig hart; Gips 1 %, Anhydrit 2 %
–	99,20	m	Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun, ungeschichtet, durch unebene Harnischflächen, um 30° in verschiedene Richtungen einfallend (pedogene Harnische), in polygonale Stücke zerfallend, bei 99,05–99,20 m Kluftfüllung aus Fasergips, Klufteinfallen ca. 60–70°
–	99,35	m	Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun und graubraun, von Tonstein-gefüllten Rissen durchsetzt, dadurch brecciös erscheinend, kantige Fragmente 0,5–1 cm groß (pedogene Rissbreccie unter Paläoboden), mit 5–10 % Anhydrit in Knollen bis 1 cm Größe und Fasergips
–	99,50	m	Tonstein-Anhydritstein-Wechsellagerung, in Schichten von 1–1,5 cm, Einfallen ca. 40°, Tonstein-Anteil dolomitisch, schluffig, ro tbraun, Anhydritstein-Anteil feinkristallin, tonig, grau
–	99,80	m	Anhydritstein, feinkristallin, grau, an Klüften und Kernwand leicht vergipst, dünnschichtig, etwas tonig und dolomitisch, Einfallen ca. 40°

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 100,00 m Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun, ungeschichtet, durch unebene Harnischflächen um 30° (pedogene Harnische) in polygonale Stücke zerfallend, einzelne, 1 cm mächtige Anhydritlage in der Mitte

– 100,05 m **Probe EKB 2/119**: Tonstein, dolomitisch, rotbraun, mit lagig/wolkig verteiltem Gips/Anhydrit, grau und rötlichweiß, trocken bis erdfeucht, dünne Fasergipslagen; Gips 4 %, Anhydrit 16 %

– 100,10 m Tonstein-Anhydritstein-Wechsellagerung, in Schichten von 0,5–1 cm, Einfallen ca. 40°, Tonstein-Anteil dolomitisch, schluffig, rotbraun, Anhydritstein-Anteil feinkristallin, tonig, grau

– 100,75 m Anhydritstein, feinkristallin, grau, an Klüften und Kernwand leicht vergipst, dünnschichtig, mit nach oben zunehmenden Tonsteinhäuten auf den Schichtflächen, Einfallen ca. 40°, Mächtigkeit der Sulfatlagen von unten 2–3 cm nach oben auf 1–2 cm abnehmend

– 101,00 m Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun, geschichtet in Lagen von 1–3 cm, intern ungeschichtet, im Wechsel mit Lagen von Anhydrit, leicht vergipst, von 0,3–2 cm (ca. 20–30 %), Sulfatlagen teilweise körnig anmutend (GAR?, Gipsknoten), Einfallen ca. 40°, Fasergips auf Klüften unterschiedlicher Orientierung

– 101,10 m **Probe EKB 2/120**: Tonstein, dunkelgrau, mit Anhydritknötchen und Gipsporphyroblasten; Anhydritstein, hellgrau; mäßig hart, großstückig, trocken bis erdfeucht, weißer Fasergips; Gips 6 %, Anhydrit 24 %

– 101,30 m Tonstein, dolomitisch, schluffig, rotbraun, geschichtet in Lagen von 1–3 cm, intern ungeschichtet, im Wechsel mit Lagen von Anhydrit, z.T. vergipst von 0,3–2 cm (ca. 20–30 %), Sulfatlagen teilweise körnig anmutend (GAR?, Sulfatknoten?), Einfallen ca. 40°, Fasergips auf Klüften unterschiedlicher Orientierung

Kern abgedreht (horizontale braune Lehmbestege durch zermahlenen Tonstein): bei 98,3 m, 98,85 m, 98,93 m, 99,2 m, 101,75 m, 101,8 m

– 102,00 m Tonstein, dolomitisch, schluffig, rötlich grau, geschichtet in Lagen von 1–3 cm durch ca. 0,5 cm mächtige Lagen von Dolomitmergelstein, schluffig, Schichtung ca. 40° einfallend, verteilt über die Abfolge Anhydritknoten, wenige mm groß, Klüfte mit bis 5 mm starken Fasergipsfüllungen, bei 101,55 m schichtparalleler Fasergipsgang ca. 5–8 mm

– 102,05 m **Probe EKB 2/121**: Tonstein, dunkelgrau mit Anhydritsteinlagen, hellgrau; trocken, stückig, mäßig hart, weißer Fasergips; Gips 3 %, Anhydrit 20 %

– 102,30 m Anhydrit, oberflächlich z.T. vergipst, dolomitisch, grau

– 102,50 m Tonstein, grau, bräunlich, bröckelig zerfallend, etwas Fasergips

– 102,65 m Dolomitstein, mikritisch, grau

– 102,80 m Tonstein, dolomitisch, grau, im Wechsel mit Anhydrit, grau, in Lagen von ca. 1 cm

– 103,00 m Tonstein, dolomitisch, rotbraun, blockig zerfallend, mit pedogenen Harnischen

– 103,05 m **Probe EKB 2/122**: Tonstein, dunkelrotbraun, graugrün gefleckt, trocken, kleinstückig-bröckelig, mäßig hart, Fasergips- und Anhydritlagen; Gips 7 %, Anhydrit 9 %

– 103,3 m Tonstein, dolomitisch, rotbraun, blockig zerfallend, mit pedogenen Harnischen, etwas Fasergips

– 103,50 m Tonstein, dolomitisch, rotbraun, oben mit Lagen von Anhydrit zu 1–2 cm, einzelne Anhydritknollen bis 2 cm

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 103,80 m Anhydrit, grau, dünnschichtig zu 0,5–2 cm, mit tonigen Zwischenlagen, einzelne Lagen mit cm-großen Mikrobenmatten-Falten

– 104,00 m Tonstein, dolomitisch, rotbraun, mit Anhydritknollen bis 4 cm, rot

– 104,05 m **Probe EKB 2/123**: Tonstein, dunkelrotbraun und graugrün mit Anhydritknollen, grauweiß, trocken, stückig; Anhydrit 35 %

– 104,85 m Wechsellagerung von Tonstein, dolomitisch, rotbraun, mit 50–60 % Anhydrit, in unregelmäßigen Lagen zu 1–3 cm

– 106,00 m **Probe EKB 2/124**: Cuttings: Tonstein, rotbraun und dunkelgrau, Anhydritstein; Anhydrit 23 %

– 107,00 m **Probe EKB 2/125**: Cuttings: Tonstein, dunkelrotbraun und dunkelgrau; Anhydritstein, hellgrau; Anhydrit 37 %

– 108,00 m **Probe EKB 2/126**: Cuttings: Tonstein, dunkelrotbraun und dunkelgrau; Anhydritstein, hellgrau; Anhydrit 27 %

– 109,00 m **Probe EKB 2/127**: Cuttings: Anhydritstein, hellgrau; Tonstein, dunkelrotbraun und dunkelgrau; Anhydrit 47 %

– 110,00 m **Probe EKB 2/128**: Cuttings: Tonstein, rotbraun und dunkelgrau; Anhydritstein, hellgrau; Anhydrit 42 %

– 110,10 m Tonstein, dolomitisch, grüngrau, unten feinschichtig mit Tonstein-gefüllten Schrumpfrissen, mit ca. 20 % Anhydrit in kleinen Knollen von 2–4 cm, grau,

– 110,32 m Tonstein, dolomitisch, grüngrau, mit Tonstein-gefüllten Schrumpfrissen, mit ca. 40 % Anhydrit in kleinen Knollen und Knoten, Basis mit ca. 1–2 cm Relief in knollig verfalteten Anhydrit eingeknetet

– 110,36 m **Probe EKB 2/129**: Wechsellagerung Tonstein, dunkelgrau und Anhydritstein, hellgrau; trocken, Lagen bis 1 cm, dünnplattig, großstückig, mäßig hart; Faseranhydrit; Anhydrit 39 %

– 110,60 m Wechsellagerung von ca. 50 % Anhydrit in Lagen von 0,5–1 cm Mächtigkeit, und Tonstein, dolomitisch, grüngrau, laminiert, Einfallen ca. 40°

– 110,70 m Tonstein, rotbraun, ungeschichtet, mit glänzenden Gleitflächen (fossile pedogene Harnische), Tonstein-gefüllte Schrumpfrisse

– 111,20 m Anhydritstein, leicht vergipst, grau, feinschichtig durch dolomitische und tonige Anhydritlaminae

– 111,40 m Tonstein, grüngrau, mit ca. 20 % Anhydrit in dünnen Lagen und kleinen Knollen, von unten nach oben zunehmender Sulfatgesteinsanteil

– 111,45 m **Probe EKB 2/130**: Tonstein, dunkelgrau; Anhydritstein, hellgrau; Faser-anhydrit; trocken, stückig, mäßig hart; Anhydrit 29 %

– 112,00 m Meißelstrecke: Tonstein und Anhydrit, grau

– 113,00 m **Probe EKB 2/131**: Cuttings: Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau und dunkel rotbraun; Anhydritstein, hellgrau; Faseranhydritlagen; Anhydrit 17 %

– 113,87 m **Probe EKB 2/132**: Cuttings: Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau und dunkel rotbraun; Anhydritstein, hellgrau; Faseranhydritlagen; Anhydrit 19 %

– 114,00 m Dolomitmergelstein, grüngrau, undeutlich geschichtet durch schluffige Laminae, schräg einfallende Absonderungsflächen

– 114,05 m **Probe EKB 2/133**: Tonmergelstein, dolomitisch, dunkelgrau; trocken, mäßig hart, großstückig, kompakt; Sulfat n.b.

– 114,30 m Dolomitmergelstein, grüngrau, undeutlich geschichtet durch schluffige Laminae, schräg einfallende Absonderungsflächen

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 115,00 m Anhydritstein, grau, dünnschichtig, Schichtoberflächen zeigen Pseudomorphosen nach Gipskristallrasen

– 115,09 m **Probe EKB 2/134**: Anhydritstein, hellgrau ("kristallin"), mit Tonflasern, dunkelgrau; trocken, kompakt, großstückig; Anhydrit 86 %

– 115,40 m Anhydritstein, grau, dünnschichtig, Schichtoberflächen zeigen Pseudomorphosen nach Gipskristallrasen, bei 115,25 Tonsteinlage von ca. 0,3–0,5 cm

– 115,60 m Dolomitmergelstein, grau bis dunkelgrau, wolkig-flaserige Wechsel im Dolomitgehalt, schichtparallele Drucklösungssäume

– 115,90 m Anhydritstein, grau, in Schichten um 3–5 cm, Schichtoberflächen zeigen Pseudomorphosen nach Gipskristallrasen, bei 115,73 Rippelmarken (0,3 x 2 cm) im Anhydrit, bei 115,62 Tonsteinlage von ca. 1 cm

– 115,98 m Mergelstein, dolomitisch, rötlichgrau, polygonal splitternd, ungeschichtet

– 116,05 m Dolomitstein, mikritisch, grau, mit bis 4 cm großen Knollen von Anhydritstein, grau, und unten mit ca. 10 % Anhydritknoten von 1–3 mm Größe

– 116,10 m **Probe EKB 2/135**: Tonmergelstein, dolomitisch, graugrün, Fasergipslagen, trocken, stückig, mäßig-hart; Gips 3 %, Anhydrit 3 %

– 116,40 m Wechsellagerung von Tonstein, dolomitisch, feinschichtig, grüngrau, und ca. 30 % Anhydrit, teilweise vergipst, grau, in Lagen von ca. 0,3–0,8 cm; bei 116,2 ein 3–4 cm starker schichtparalleler Fasergipsgang mit Resten von Anhydrit

– 116,80 m Wechsellagerung von ca. 40 % Anhydrit und 20 % Fasergips, grau, in Lagen von ca. 0,3–1 cm Mächtigkeit, und Tonstein, dolomitisch, feinschichtig, grüngrau; annähernd schichtparallele Fasergipsgänge bis 0,5 cm, bei 116,8 ein 2 cm starker schichtparalleler Fasergipsgang; Einfallen ca. 40°

– 117,00 m Mergelstein, dolomitisch, grüngrau, dünnschichtig in Schichten um 1–2 cm, ca. 10 % lagenweise angereicherte, z.T. vergipste Anhydritknollen bis 3 mm

– 117,05 m **Probe EKB 2/136:** Tonstein, schwarz; mit Gips/Anhydritkluft, trocken, hart, geringer Dolomitgehalt; Gips 7 %, Anhydrit 11 %

– 117,50 m Mergelstein, dolomitisch, grüngrau, dünnschichtig wie oben, durchsetzt von ca. 80° einfallenden Bruchspalten, mit bis 2 cm starken Fasergipsgängen verfüllt

– 118,00 m Ringraumverfüllung mit 4 Schlauchstücken, obere Bohrlochwand zerbohrt, untere Bohrlochwand etwa 60° einfallend, unter stei lem Winkel zur Schichtung (**EWS 5**)

– 118,05 m **Probe EKB 2/137**: Anhydritstein, gipsführend; Tonstein, dolomitisch; trocken, hart; Gips 2 %, Anhydrit 70 %; **Probe EKB 2/138**: Verpressmaterial der EWS 5, gelblich weiß, mürb, bröckelig, rundlich-keilförmig

– 118,10 m Anhydrit und Gips, grau, knollig, ca. 80 %, mit Zwischenlagen von Mergelstein, dolomitisch, grüngrau bis Dolomitstein, mergelig, auf Schichtfläche etwas Kupferkies; Verpressmaterial der EWS 5 wie zuvor, bis 118,10 m auskeilend

– 118,20 m Anhydrit, z.T. vergipst, grau, knollig, ca. 80–90 %, mit Zwischenlagen von Mergelstein, dolomitisch, grüngrau; einzelne Fasergipslagen bis 0,5 cm

– 118,40 m Mergelstein, dolomitisch, grüngrau, mit ca. 20 % Anhydrit in Knollen bis 4 cm, lagig angeordnet; Einfallen ca. 40°; einzelne Faser gipslagen bis 2 mm

– 118,70 m Mergelstein, dolomitisch, grüngrau, mit ca. 10 % Anhydrit in Lagen zu 2–5 mm, einzelne Fasergipslagen bis 2 mm

– 118,75 m **Probe EKB 2/139:** Tonstein, dunkelgrau mit Anhydrit- und Gipssteinlagen, hellgrau, trocken; Gips 9 %, Anhydrit 21 %

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 119,00 m Mergelstein, dolomitisch, graugrün, laminiert durch mm-starke Lagen von Mergelstein, dolomitisch, anhydritisch (ca. 30 % Anhydritkristalle), im Wechsel mit mit cm-starken Lagen von Dolomitmergelstein, grüngrau

– 119,35 m Dolomitmergelstein, grüngrau, im Wechsel mit Tonmergelstein, dolomitisch, grün: bei 119,3 schichtparalleler Fasergipsgang von 1,5 cm

– 119,70 m Anhydrit-Tonstein, dolomitisch (Mischgestein, Tonstein mit Anhydritkristallen durchsetzt), teilweise vergipst, feinschichtig zu 1–3 cm, ebene Schichtflächen ca. 35° einfallend

– 120,00 m Anhydritstein, schwach vergipst, tonig, grau, knollig und enterolithisch verfaltet, nach unten zunehmend lagig mit Tonmergelstein-Zwischenlagen, ca. 90 % Sulfat

– 120,10 m **Probe EKB 2/140:** Gips/Anhydrit, hellgrau mit dolomitischen Mergelsteinlagen, dunkelgrau, trocken, hart; Gips 18 %, Anhydrit 40 %

– 120,85 m Wechsellagerung von Anhydritstein, vergipst, tonig, in Lagen von 0,1–1 cm, und Tonmergelstein, dolomitisch, anhydritführend, 50–60 % Sulfat; Einfallen ca. 30–35 °, schichtparallele Fasergipsgänge ca. 10 %

– 121,00 m Anhydritstein, vergipst, tonig, grau, knollig-enterolithisch, ca. 90 % Sulfat

– 121,10 m **Probe EKB 2/141**: Gips/Anhydritstein, hellgrau mit dolomitischen Mergelsteinlagen, dunkelgrau, enterolithische Faltung; trocken, hart; Gips 22 %, Anhydrit 44 %

– 121,50 m Anhydritstein, vergipst, tonig, grau, feinschichtig in Lagen zu 0,5–1 cm, einzelne Lagen zeigen cm-große Mikrobenmatten-Falten, ca. 90 % Sulfat, davon 10 % Fasergips in schichtparallelen Gängen

– 122,00 m Wechsellagerung von Anhydritstein, vergipst, tonig, grau, in Lagen von 0,5–2 cm, max. 4 cm, mit Tonstein, dolomitisch, rotbraun, in Lagen zu 0,2–3 cm; mehrere schichtparallele Fasergipslagen bis 1,5 cm; Sulfat ca. 60 %

– 122,10 m **Probe EKB 2/142**: Gipsstein, stark anhydritführend, hellgrau; mit zwei blättrigen Tonsteinlagen, trocken, hart; Gips 49 %, Anhydrit 8 %

– 122,75 m Wechsellagerung von Anhydritstein, vergipst, tonig, grau, in Lagen von 0,5–2 cm, max. 4 cm, mit Tonstein, dolomitisch, rotbraun, in Lagen zu 0,2–3 cm, Sulfat ca. 60 %, davon 15–20 % Fasergips in schichtparallelen Gängen

– 123,00 m Wechsellagerung von Tonstein, dolomitisch, graugrün und rotbraun, in Lagen zu 0,1–3 cm, rotbraune Lagen ca. 10 % und nach unten abnehmend, mit Anhydrit-Mergelstein, dolomitisch, grüngrau, Anhydrit in kleinen Knoten und Schlieren in Mergelstein-Matrix eingesprengt, ca. 50 % Sulfat, davon ca. 20 % Fasergips in schichtparallelen Gängen bis ca. 2 cm

– 123,10 m **Probe EKB 2/143**: Gipsstein, stark anhydritführend, hellgrau; mit dünnen Tonsteinlagen; Fasergipslagen; trocken, hart; Gips 53 %, Anhydrit 9 %

– 124,00 m Wechsellagerung von Tonstein, dolomitisch, graugrün und rotbraun, in Lagen zu 0,1–3 cm, rotbraune Lagen ca. 10 % und nach unten abnehmend, mit Anhydrit-Mergelstein, dolomitisch, grüngrau, Anhydrit in kleinen Knoten und Schlieren in Mergelstein-Matrix eingesprengt, ca. 50 % Sulfat, davon ca. 20 % Fasergips in schichtparallelen Gängen bis ca. 2 cm

– 124,10 m **Probe EKB 2/144**: Gipsstein, stark anhydritführend, hellgrau; mit dünnen Tonsteinlagen; Fasergipslagen; trocken, hart; Gips 53 %, Anhydrit 16 %

– 125,00 m Wechsellagerung von Tonstein, dolomitisch, graugrün und rotbraun, in Lagen zu 0,1–3 cm, rotbraune Lagen ca. 10 % und nach unten abnehmend, mit Anhydrit-Mergelstein, dolomitisch, grüngrau, Anhydrit in kleinen Knoten und Schlieren in Mergelstein-Matrix eingesprengt, ca. 50 % Sulfat, davon ca. 20 % Fasergips in schichtparallelen Gängen bis ca. 2 cm

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 125,10 m **Probe EKB 2/145**: Gipsstein, stark anhydritführend, hellgrau, mit dünnen Tonsteinlagen, trocken, hart; Fasergipslagen; Gips 50 %, Anhydrit 9 %

– 126,00 m Wechsellagerung von Tonstein, dolomitisch, graugrün und rotbraun, in Lagen zu 0,1–3 cm, rotbraune Lagen ca. 10 % und nach unten abnehmend, mit Anhydrit-Mergelstein, dolomitisch, grüngrau, Anhydrit in kleinen Knoten und Schlieren in Mergelstein-Matrix eingesprengt, ca. 50 % Sulfat, davon ca. 20 % Fasergips in schichtparallelen Gängen bis ca. 2 cm (**Unterer Anhydritspiegel**)

– 126,10 m **Probe EKB 2/146**: Gipsstein, hellgrau; mit dünnen Tonsteinlagen; Fasergipslagen; trocken, hart; Gips 70 %

– 126,30 m Wechsellagerung von Tonstein, dolomitisch, graugrün, in Lagen zu 0,1–3 cm, mit Anhydrit-Mergelstein, dolomitisch, grüngrau, Anhydrit in kleinen Knoten und Schlieren in Mergelstein-Matrix eingesprengt, ca. 50 % Sulfat, davon ca. 20 % Fasergips in schichtparallelen Gängen bis ca. 2 cm

– 126,5 m Dolomitstein, mikritisch, tonig, in 2–4 cm starken Lagen abwechselnd mit Mergelstein, grau, dolomitisch, in Lagen zu 0,2–1 cm, Gips in kleinen Knoten und als Fasergips, ca. 5 %

– 127,00 m Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, dünnschichtig durch 0,1–0,5 cm starke Dolomitmergelstein-Lagen alle 1–2 cm; ca. 80–90 % Gips

– 127,10 m **Probe EKB 2/147**: Gipsstein, hellgrau; trocken, hart; einzelne Fasergipslagen; Gips 94 %

– 128,00 m Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, dünnschichtig durch 0,1–0,5 cm starke Dolomitmergelstein-Lagen alle 1–2 cm; ca. 80–90 % Gips

– 128,10 m **Probe EKB 2/148**: Gipsstein, dolomitführend, hellgrau; trocken, hart, vertikale gipsverheilte Kluftschar, mittig mit Versatz (1 cm); Gips 89 %

– 128,15 m Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, dünnschichtig durch 0,1–0,5 cm starke Dolomitmergelstein-Lagen alle 1–2 cm; ca. 80–90 % Gips

– 128,50 m Dolomitstein, mikritisch, tonig, grau, dolomitgefüllte Trockenrisse, oben kleine Gipsknollen zu 1–2 cm, Sulfat ca. 2–3 %

– 128,75 m Dolomitstein, mikritisch, tonig, grau, dünnschichtig zu 0,5–1 cm, mit einzelnen Zwischenlagen von ca. 0,5 cm aus Gipsdolomitstein (Dolomitintraklasten <1 mm; Sulfatzement); schichtparallele Fasergipsgänge, Gips ca. 40 %

– 128,85 m Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, in Knollen bis 5 cm

– 129,00 m Dolomitmergelstein, grau, feinschichtig zu 1–2 cm, gipsführend in kleinen Knoten und Zwischenlagen aus Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, alle 3–4 cm Fasergipsgänge bis 2 cm in Schichtfugen und Klüften, Gips ca. 20 %

– 129,10 m **Probe EKB 2/149**: Gipsstein, hellgrau mit Tonsteinlagen, dunkelgrau, erdfeucht, hart; Gips 59 %

– 130,00 m Dolomitmergelstein, grau, feinschichtig zu 1–2 cm, gipsführend in kleinen Knoten und Zwischenlagen aus Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, alle 3–4 cm Fasergipsgänge bis 2 cm in Schichtfugen und Klüften, Gips ca. 20 %

– 130,10 m **Probe EKB 2/150**: Gipsstein, hellgrau, Tonstein, dunkelgrau, erdfeucht, hart; Gips 72 %

– 130,70 m Dolomitmergelstein, grau, feinschichtig zu 1–2 cm, gipsführend in kleinen Knoten und Zwischenlagen aus Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, alle 3–4 cm Fasergipsgänge bis 2 cm in Schichtfugen und Klüften, Gips ca. 20 %

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	131,00	m	Wechsellagerung von Dolomitmergelstein, grau, feinschichtig zu 1–2 cm, gipsführend, mit Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, in Lagen von 4–8 cm, z.T. mit kleinen Mikrobenmatten-Falten, Fasergipsgänge in Schichtfugen und Klüften, Gips ca. 40–60 %
–	131,10	m	**Probe EKB 2/151**: Wechsellagerung Gipsstein, hellgrau mit Tonstein, dunkelgrau, erdfeucht, hart, vertikale Fasergipslage; Gips 48 %
–	132,00	m	Wechsellagerung von Dolomitmergelstein, grau, feinschichtig zu 1–2 cm, gipsführend, mit Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, in Lagen von 4–8 cm, z.T. mit kleinen Mikrobenmatten-Falten, Fasergipsgänge in Schichtfugen und Klüften, Gips ca. 40–60 %
–	132,10	m	**Probe EKB 2/152**: Gipsstein, hellgrau mit Tonsteinlagen, dunkelgrau, trocken, hart, vertikale Fasergipslagen; Gips 78 %
–	132,50	m	Wechsellagerung von Dolomitmergelstein, grau, feinschichtig zu 1–2 cm, gipsführend, mit Gipsstein, dolomitisch, mittelkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, in Lagen von 4–8 cm, z.T. mit kleinen Mikrobenmatten-Falten, Fasergipsgänge in Schichtfugen und Klüften, Gips ca. 40–60 %
–	133,00	m	Wechsellagerung von Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, in Lagen von 1–8 cm, mit Dolomitmergelstein, grau, in Lagen zu 0,1–2 cm; Fasergips vorwiegend auf Schichtfugen, Gips ca. 70–80 %, Einfallen ca. 40°
–	133,10	m	**Probe EKB 2/153**: Gipsstein, hellgrau mit wenigen Tonsteinlagen, dunkelgrau, trocken, hart; Gips 86 %
–	134,00	m	Wechsellagerung von Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, in Lagen von 1–8 cm, mit Dolomitmergelstein, grau, in Lagen zu 0,1–2 cm; Fasergips vorwiegend auf Schichtfugen, Gips ca. 70–80 %, Einfallen ca. 40°
–	134,10	m	**Probe EKB 2/154**: Gipsstein, hellgrau, knotig, wenig Tonsteinlagen, dunkelgrau; trocken, hart, rauhe Schichtflächen (Dolomit?); Gips 87 %
–	135,00	m	Wechsellagerung von Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, in Lagen von 1–8 cm, mit Dolomitmergelstein, grau, in Lagen zu 0,1–2 cm; Fasergips vorwiegend auf Schichtfugen, Gips ca. 70–80 %, Einfallen ca. 40°
–	135,10	m	**Probe EKB 2/155**: Gipsstein, knotig, hellgrau, sehr wenig Tonstein, trocken, hart, enterolithische Faltung; Gips 95 %
–	135,50	m	Wechsellagerung von Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, in Lagen von 1–8 cm, mit Dolomitmergelstein, grau, in Lagen zu 0,1–2 cm; Fasergips vorwiegend auf Schichtfugen, Gips ca. 70–80 %, Einfallen ca. 40°
–	135,70	m	Dolomitstein, mikritisch, tonig, grau
–	136,00	m	Dolomitstein, mikritisch, tonig, braungrau und Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, dünnschichtig um 1 cm, ineinander verfaltet (Vergipsungsfalte), Schichtgrenze im Kern vertikal gestellt
–	136,05	m	**Probe EKB 2/156**: Gipsstein, hellgrau und grau im Wechsel, knotig, trocken, hart, vertikale Störung mit 3 mm Versatz; Gips 99 %
–	136,20	m	Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, geschichtet 1–2 cm, Fasergips auf Schichtfugen, ca. 80–90 % Gips, Einfallen ca. 40°
–	136,50	m	Gipsdolomitstein, arenitisch (?Ooide) mit Gipszement, in Schichten zu 2–4 cm, mit Zwischenlagen von Dolomitstein, mikritisch, bis 1 cm; auf Schichtfugen Fasergips, Gipsanteil ca. 30 %; Einfallen ca. 40°

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 137,00 m Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, geschichtet 1–2 cm, Fasergips auf Schichtfugen, ca. 80–90 % Gips, Einfallen ca. 40°

– 137,05 m **Probe EKB 2/157**: Gipsstein, hellgrau und grau im Wechsel, trocken, hart, mehrfach von Störungen durchzogen; Gips 94 %

– 137,10 m Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, geschichtet 1–2 cm, Fasergips auf Schichtfugen, ca. 80–90 % Gips, Einfallen ca. 40°

– 137,20 m Dolomitstein, mikritisch, tonig, grau, laminiert, stark von Fasergips durchsetzt, dadurch Gips ca. 40 %

– 137,70 m Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, geschichtet 1–3 cm, Fasergips auf Schichtfugen, ca. 80–90 % Gips

– 137,98 m Dolomitstein, mikritisch, tonig, grau, laminiert, mit 1 cm starker Gipslage, grobkörnig, grau bei 137,87; Gips 5–10 %

– 138,00 m Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau

– 138,05 m **Probe EKB 2/158**: Gipsstein, hellgrau und grau im Wechsel, trocken, hart, von Störungen durchzogen; Gips 92 %

– 138,90 m Dolomitstein, mikritisch, tonig, grau, laminiert, mit 1–4 cm starken Gipslagen, grobkörnig, bei 138,0 m, 138,25 m, 138,37 m, 138,46 m, 138,66 m, 138,73 m, Gipsknollen von 3–4 cm bei 138,55 m, Fasergips auf Schichtfugen und steil stehenden Brüchen, Gips ca. 20 %

– 139,00 m Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, feinschichtig zu 0,1–0,6 cm, Fasergips auf Schichtfugen, ca. 80–90 % Gips

– 139,05 m **Probe EKB 2/159**: Gipsstein, hellgrau und grau im Wechsel, trocken, hart; Gips 98 %

– 140,00 m Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, feinschichtig zu 0,1–0,6 cm, Fasergips auf Schichtfugen, ca. 80–90 % Gips

– 140,05 m **Probe EKB 2/160**: Gipsstein, hellgrau und grau im Wechsel, trocken, hart; Gips 94 %

– 141,00 m Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, feinschichtig zu 0,1–0,6 cm, Fasergips auf Schichtfugen, ca. 80–90 % Gips

– 141,05 m **Probe EKB 2/161**: Gipsstein, hellgrau und grau im Wechsel, eine einzelne Tonsteinlage, trocken, hart; Gips 96 %

– 141,20 m Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, mit kleinen Gipsporphyroblasten, feinschichtig zu 0,1–0,6 cm, Fasergips auf Schichtfugen, ca. 80–90 % Gips

– 141,66 m Wechsellagerung von Gipsstein, dolomitisch, mittel- bis grobkörnig kristallin, grau, in Lagen von 1–3 cm, mit Dolomitmergelstein, grau, in Lagen zu 0,5–2 cm; Fasergips vorwiegend auf Schichtfugen, Gips ca. 60 %, Einfallen ca. 40° (**Unterer Gipsspiegel**)

– 142,00 m Gipsauslaugungsschluff, tonig, z.T. kalkig, beige bis grau, nach unten zunehmend feinschichtig, lagenweise Dolomitstein-Bröckchen bis 2 cm Dicke

– 142,10 m **Probe EKB 2/162**: Ton(-stein), dunkelgrau, feucht, halbfest

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	142,20	m	Gipsauslaugungsresiduen mit dunkelgrauen tonigen Lagen und grauen und beigen GAR-Schlufflagen, geschichtet, vereinzelt Dolomitsteinbänkchen bis max. 2 cm
–	142,50	m	**Probe EKB 2/163**: Dolomitstein, dunkelgrau; Ton, grauschwarz; nass, zerfallen, weich; GAR
–	142,84	m	Gipsauslaugungsresiduen mit dunkelgrauen tonigen Lagen und grauen und beigen GAR-Schlufflagen, geschichtet, vereinzelt Dolomitsteinbänkchen bis max. 2 cm
–	143,00	m	Dolomitstein, z.T. tonig, oben 5 cm beige, darunter mittel- bis dunkelgrau, verwittert, uneben-wellige Schichtung, teilweise zerbohrt
–	143,05	m	**Probe EKB 2/164**: Kalksteinbreccie, dolomitisch, mit wenigen Tonsteinklasten, hellgraubraun, kavernös, erdfeucht, sehr hart, großstückig, (mit Flex aus Kern gesägt)
–	143,65	m	Dolomitstein, z.T. tonig, oben 5 cm beige, darunter mittel- bis dunkelgrau (ab 143,20 m nach unten zunehmend dunkler), verwittert, uneben-wellige Schichtung, teilweise zerbohrt; bei 143,10 m Calcit-Band (ehem. Gipslage)
–	143,95	m	Mergelstein, dolomitisch, mittel- bis dunkelgrau, feingeschichtet mit Dolomitstein-Lagen bzw. –bänken (bis max. 15 cm), geschichtet, Schichtneigung ca. 40°
–	144,00	m	Dolomitstein, grau
–	144,10	m	**Probe EKB 2/165**: Dolomitstein, tonig, mikritisch, hellgraubraun, trocken, kleinstückig
–	144,40	m	Dolomitstein, grau, 144,10–144,15 m Mergellage, dunkelgrau, feingeschichtet
–	145,00	m	Dolomitstein, grau, brecciös < 0,1 bis > 4 cm, teilweise zerbohrt
–	145,10	m	**Probe EKB 2/166**: Tonmergelstein, dolomitisch, dunkelgrau, stark zerbohrt (Sand u. Kies, stark schluffig, tonig), splittrig, erdfeucht
–	145,35	m	Dolomitstein, grau, brecciös < 0,1 bis > 4 cm, teilweise zerbohrt
–	145,75	m	Oberer Linguladolomit (Ldo): Dolomitstein, schmutzig graubraun, wellig feingeschichtet, z.T. feinlaminiert (? Algen-Lamination), absandend; Schichtneigung max. 10°
–	145,99	m	Dolomitstein, hellbraun, feingeschichtet, tonige Schichtfugen, schwarz, Einfallen ca. 40°
–	146,00	m	Dolomitstein, braungrau, angewittert, feingeschichtet
–	146,10	m	**Probe EKB 2/167**: Dolomitstein, kalkig, tonig, graubraun, schichtintern brecciiert, kavernös-zellig, erdfeucht, großstückig
–	146,25	m	Dolomitstein, stark kalkig, braungrau, angewittert, feingeschichtet
–	146,55	m	Kernverlust
–	146,70	m	Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau, geschichtet, Schichtflächen geglättet
–	146,75	m	Dolomitstein, mikritisch, grau, Schichtneigung ca. 30°
–	146,76	m	Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau
–	146,82	m	Unterer Linguladolomit (Ldu): Schalch-Bank (Pe): Dolomitstein, feinkörnig kristallin, grau, reich an Muschelschill (Schalen aufgelöst), Basis mit dünner Tonsteinfuge
–	147,00	m	Dolomitstein, mikritisch bis mikrosparitisch, grau, lagenweise beige, gebankt mit Tonsteinfugen, Bankstärke 5–25 cm, hart, bis 146,90 m mit einzelnen aufgelösten Schalen, kleine Calcitdrusen bis 1 cm (ehem. Gipsknöllchen)

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 147,10 m **Probe EKB 2/168**: Dolomitstein, tonig, mikritisch, grau, kavernös (Löcher bis 3 mm), mit Tontapeten, trocken, stückig

– 148,20 m Dolomitstein, mikritisch bis mikrosparitisch, grau, lagenweise beige, gebankt mit Tonsteinfugen, Bankstärke 5–25 cm, hart, kleine Calcitdrusen bis 1 cm (ehem. Gipsknöllchen); 147,25 – 148,00 m engständig geklüftet, z.T. zerbrochen

– 148,25 m **Probe EKB 2/169**: Dolomitstein, dunkelgrau, gering kavernös, mikritisch, trocken, kleinstückig; zuckerkörnige Minerale auf Klüftchen

– 148,55 m Dolomitstein, mikritisch bis mikrosparitisch, grau, lagenweise beige, gebankt mit Tonsteinfugen, Bankstärke 5–25 cm, hart, kleine Calcitdrusen bis 1 cm (ehem. Gipsknöllchen)

– 148,90 m Obere Graue Mergel (OGM):
Mergelstein, dolomitisch, dunkelgrau, Schichtflächen geglättet; 148,57–148,62 m Dolomitstein, bräunlichgrau

– 149,15 m Anoplophoradolomit (Ad):
Dolomitstein, mikritisch, hart, bräunlichgrau, mit leicht welligen Tonfugen bis 0,5 cm, 149,00–149,15 m mit grauen, mm-dicken Feinflasern (?), einzelne calcitverheilte Klüfte; Schichtneigung 40°

– 149,20 m **Probe EKB 2/170**: Dolomitstein, tonig, hellgrau, dicht, trocken, hart, stückig; Tontapeten, schwarzgrau, mit Harnischen

– 149,30 m Dolomitstein, mikritisch, hart, bräunlichgrau, mit leicht welligen Tonfugen bis 0,5 cm, 149,16–149,23 m Lage mit Schalenresten und Calcitdrusen, einzelne calcitverheilte Klüfte; Schichtneigung 40°

– 149,55 m Liegendton (LGT):
Tonstein, lagenweise feinsandig, dunkelgrau bis schwarz, geschichtet, mit feinen Pyrit-Bändern; 149,49–149,52 m Dolomitmergelstein-Lage

– 150,60 m Feinsandstein, schwach dolomitisch, mittelgrau, bis 149,90 m stark tonflaserig, mit kohligen Wurzelspuren, darunter bioturbat mit einzelnen tonigen Lagen u. Flasern; oben 1–2 cm Feinsandstein, dunkelgrau mit braunen Koprolithen bis 3 mm

– 150,75 m Feinsandstein, schwach bioturbat mit einzelnen Tonsteinlagen

– 150,80 m **Probe EKB 2/171**: Fein- bis Mittelsandstein, hellgrau bis grau, bioturbat, erdfeucht, stückig, hart; Tontapeten, schwarzgrau

– 150,85 m Feinsandstein, schwach bioturbat mit einzelnen Tonsteinlagen, übergehend in:

– 151,10 m Tonstein, stark sandflaserig, dunkelgrau, übergehend in:

– 151,25 m Tonstein, schwach sandflaserig, dunkelgrau, sehr schwach bioturbat

– 151,32 m Sandstein (Lage oder Linse), kompakt, bräunlichgrau, an der Unterseite Grabgänge

– 151,35 m Tonstein, dunkelgrau bis schwarz, vereinzelt dünne Sandflasern mit Pyrit, Schichtflächen geglättet

– 151,42 m **Probe EKB 2/172**: Schluffstein, feinsandig, glimmerführend, dunkelgrau, hart, trocken, stückig

– 152,15 m Tonstein, dunkelgrau bis schwarz, vereinzelt dünne Sandflasern mit Pyrit, Schichtflächen geglättet, bei 152,10 m kleines Markasit-Nest

– 152,20 m **Probe EKB 2/173**: Tonstein, dunkelgrau, mit Feinsandsteinlage, grau, hart, trocken, stückig; Gipsführung in Fiederklüftchen?; ca. 2 mm mächtige Pyritlage

– 152,35 m Tonstein, dunkelgrau bis schwarz, vereinzelt dünne Sandflasern mit Pyrit, Schichtflächen geglättet

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

	–	153,15	m	Dolomitstein, grau, braunstichig, undeutlich geschichtet, splittrig hart, z.T. calcitverheilte Klüfte, Schichtneigung 40°
	–	153,20	m	**Probe EKB 2/174**: Dolomitstein, grau; Tonsteintapete oben und unten, dunkelgrau, glimmerführend, stückig, trocken; Harnische
	–	153,55	m	Tonstein, dunkelgrau, mit Querplattung, einzelne Dolomitsteinlagen, zerbohrt; auf einzelnen Schichtflächen Fischschuppen, *Palaeestheria minuta*, Pyrit
				Untere Dolomite (UDO):
	–	153,80	m	Dolomitstein, sparitisch (ehem. Schillbank), graubraun, Schichtneigung 30–40°
	–	153,97	m	Dolomitstein, mikritisch, graubraun, bis 153,90 m mit großen Calcitdrusen
				Blaubank (Bk):
	–	154,05	m	Dolomitstein, mikritisch, graubraun, mit braunschwarzen Tonsteinlagen bis 8 mm
	–	154,40	m	Dolomitstein, gelbbraun bis bräunlichgrau, geschichtet, unten mit mm-dünnen, flaserigen grauen Laminae und Schlieren; übergehend in:
	–	154,60	m	Dolomitstein, schillführend (Schalen herausgelöst), fleckig gelbbraun bis grau
	–	154,72	m	Dolomitstein, grau, bei 154,69 m knauerige Fuge mit Tonfilm, dunkelgrau
				„Vitriolschiefer“
ca.	–	154,80	m	Dolomitstein, grau, mit knauerigen Tonfugen und einzelnen Tonsteinlagen bis 2 cm; zerbohrt
	–	155,23	m	Dolomitstein, hart, grau, ab 155,05 m gelblich gefleckt, Schalentrümmer-Textur, vereinzelt aufgelöste Schalenreste
	–	155,75	m	Dolomitstein, mikritisch, nach unten zunehmend sparitisch, bräunlichgrau, dünnbankig, geklüftet, brüchig, ab 155,40 m lagenweise Hornsteine, dunkelgrau bis weißlichgrau bis 5 cm Dicke, z.T. mit Schilltextur, einzelne, schwarze stylolithische Tonfugen (an der Basis ca. 1 cm dick, mit „Intraklasten“)
	–	156,25	m	Dolomitstein, feinkristallin, wellig feinlaminiert (Algenlaminit), weißlichgrau bis hellbeige; Schichtneigung 30–40°; 156,00–156,25 m z erbohrt
	–	156,30	m	**Probe EKB 2/175:** Dolomitstein, hellgrau, laminiert, kleinstückig bis stückig, erdfeucht; mit Hornsteinknolle bis 2 cm
	–	158,85	m	Dolomitstein, feinkristallin, wellig feinlaminiert (Algenlaminit), weißlichgrau bis hellbeige, 157,20 – 158,65 m hellgraue bis weißlichgraue Hornsteinlagen und –linsen bis 3 cm Dicke; 157,70 – 157,95 m kleine dunkelgraue Hornstein-Fetzen, wenige mm dick; Schichtneigung 30–40°; 156,30–157,0 0 m und 157,15–157,40 m zerbohrt
	–	159,00	m	Dolomitstein, mikrosparitisch bis sparitisch, gelbbraun
	–	159,15	m	**Probe EKB 2/176:** Dolomitstein, hellgraubraun, sparitisch, erdfeucht bis trocken, großstückig; 159,05–159,10 m Hornsteinknolle (5 x 10 cm), graubraun, zerbrochen und mit Calcit verheilt
	–	161,35	m	Dolomitstein, mikrosparitisch bis sparitisch, gelbbraun, 159,40–159,50 m mit feinen dunkelgrauen Schlieren und Flasern; 159,50–159,80 m leicht porös (Schalenreste), 160,30–160,34 m graubraune Lage mit Zinkblende und Calcitnestern, 160,40–160,45 m Hornsteinknolle, graubraun, 160,60–160,80 m Calcitdrusen bis 2 x 5 cm, dazwischen von 160,70 bis 160,72 m graue brecciöse Hornsteinlage
				Störungszone:
	–	161,95	m	Dolomitsteinbreccie, mit Kieselknollen bis 1,5 cm, schwach entfestigt, calcitisch verheilt, zahlreiche Calcitklüfte; 161,5–161,80 m zerbohrt
	–	162,00	m	**Probe EKB 2/177:** Dolomitstein, tonig, brecciiert, gelbbraun, zellig-kavernös, stückig, erdfeucht bis feucht; mit hellen Baryt/Calcit-Äderchen, Störungszone?

Bezeichnung/Projekt: EKB 2 / Hebungsschaden Staufen **Anl. 5.6 a**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

Störungszone:

– 162,45 m Dolomitsteinbreccie, mit Kieselknollen bis 1,5 cm, schwach entfestigt, calcitisch verheilt, zahlreiche Calcitklüfte; 161,5–161,80 m zerbohrt

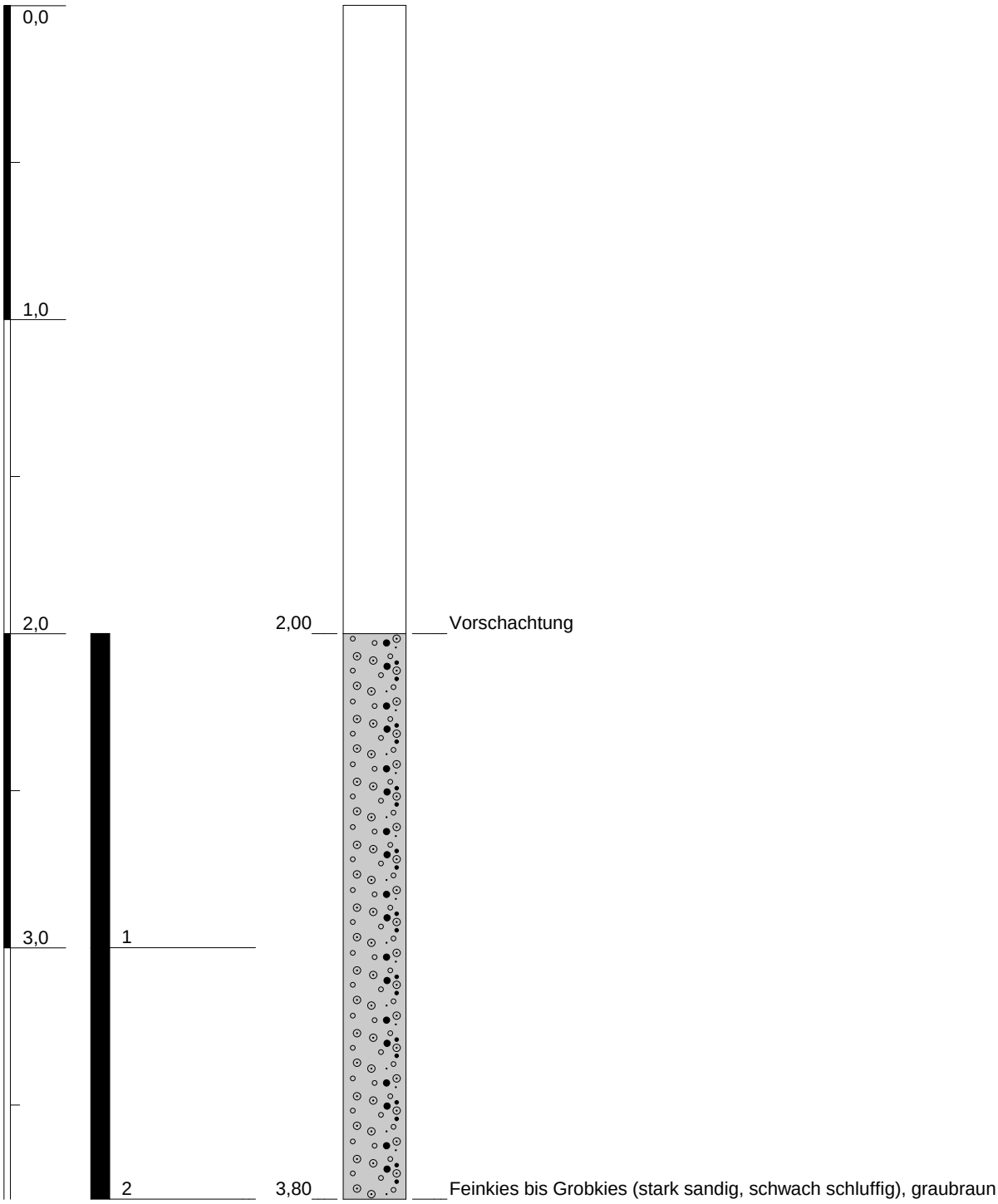
– 162,80 m Dolomitstein, gelbbraun, stark geklüftet, calcitisch verheilt, Kluftneigung 70–80°, Kluftabstand 3–5 cm

– 162,90 m Dolomitstein, mikrosparitisch, gelbbraun, grau gefleckt, bioturbat; einzelne Calcit-Klüfte

– 163,00 m **Probe EKB 2/178:** Dolomitstein, gelbbraun, leicht kavernös, erdfeucht bis feucht, großstückig; mit Baryt/Calcit-Äderchen durchzogen

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

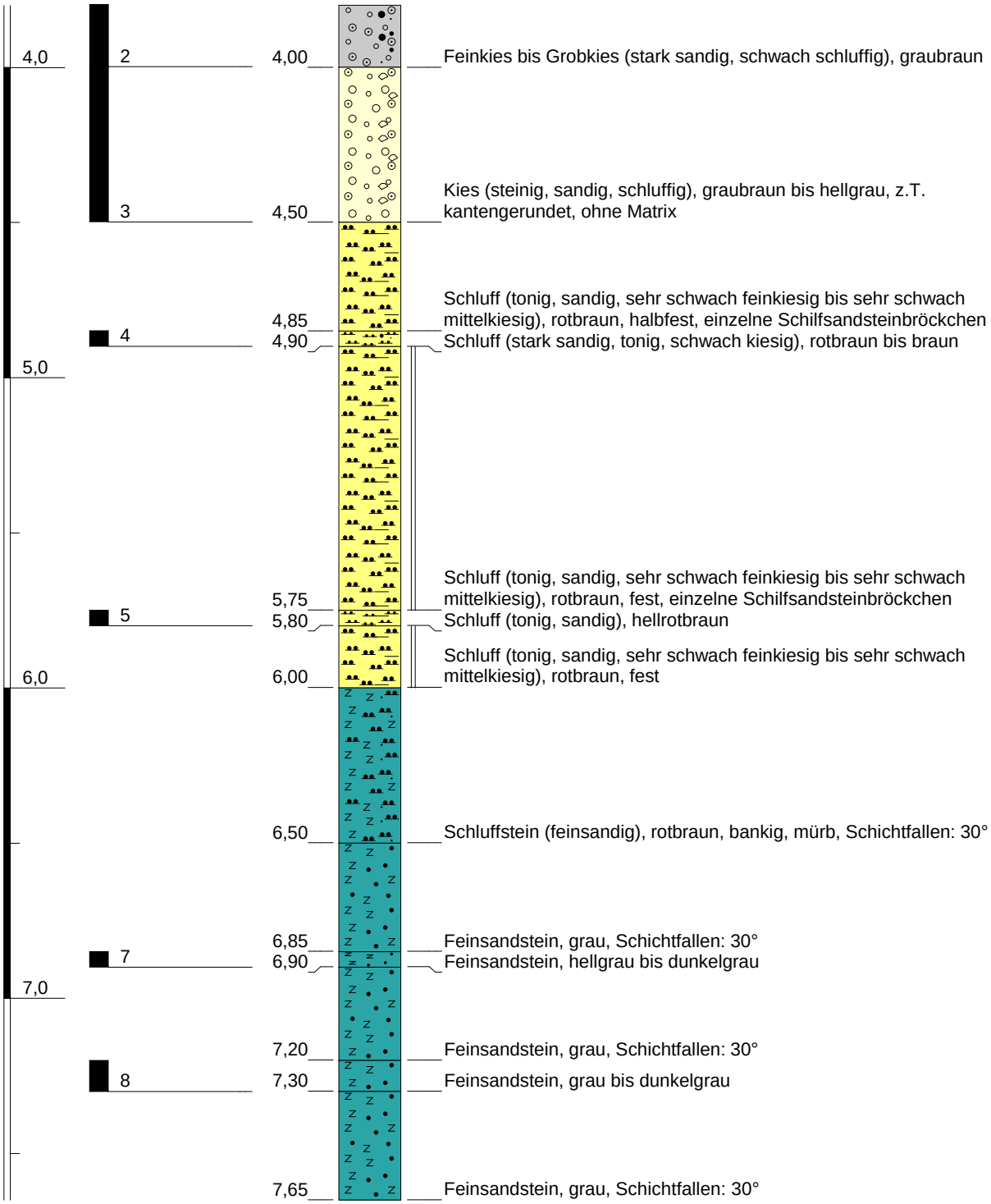
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 mNN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

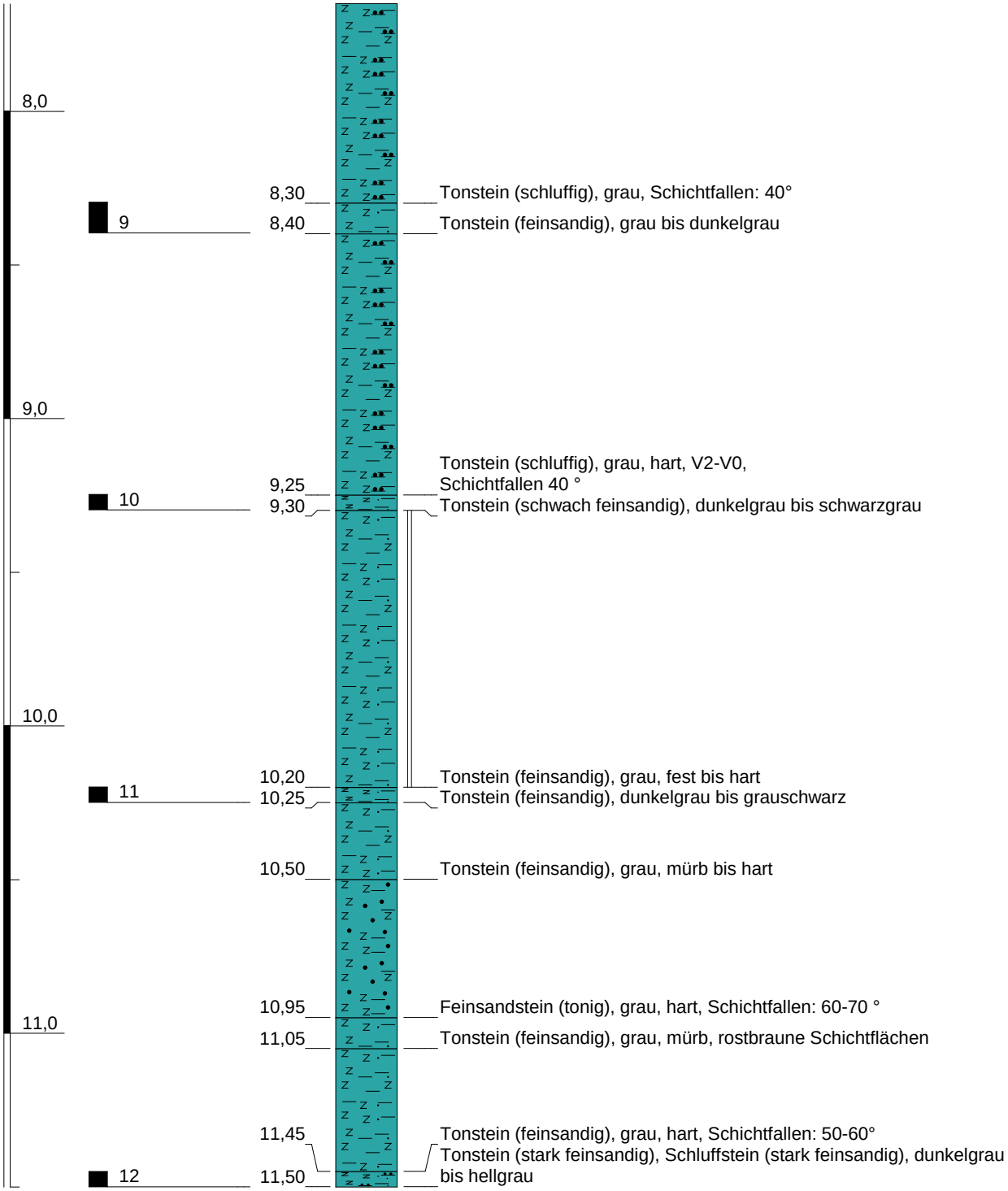
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

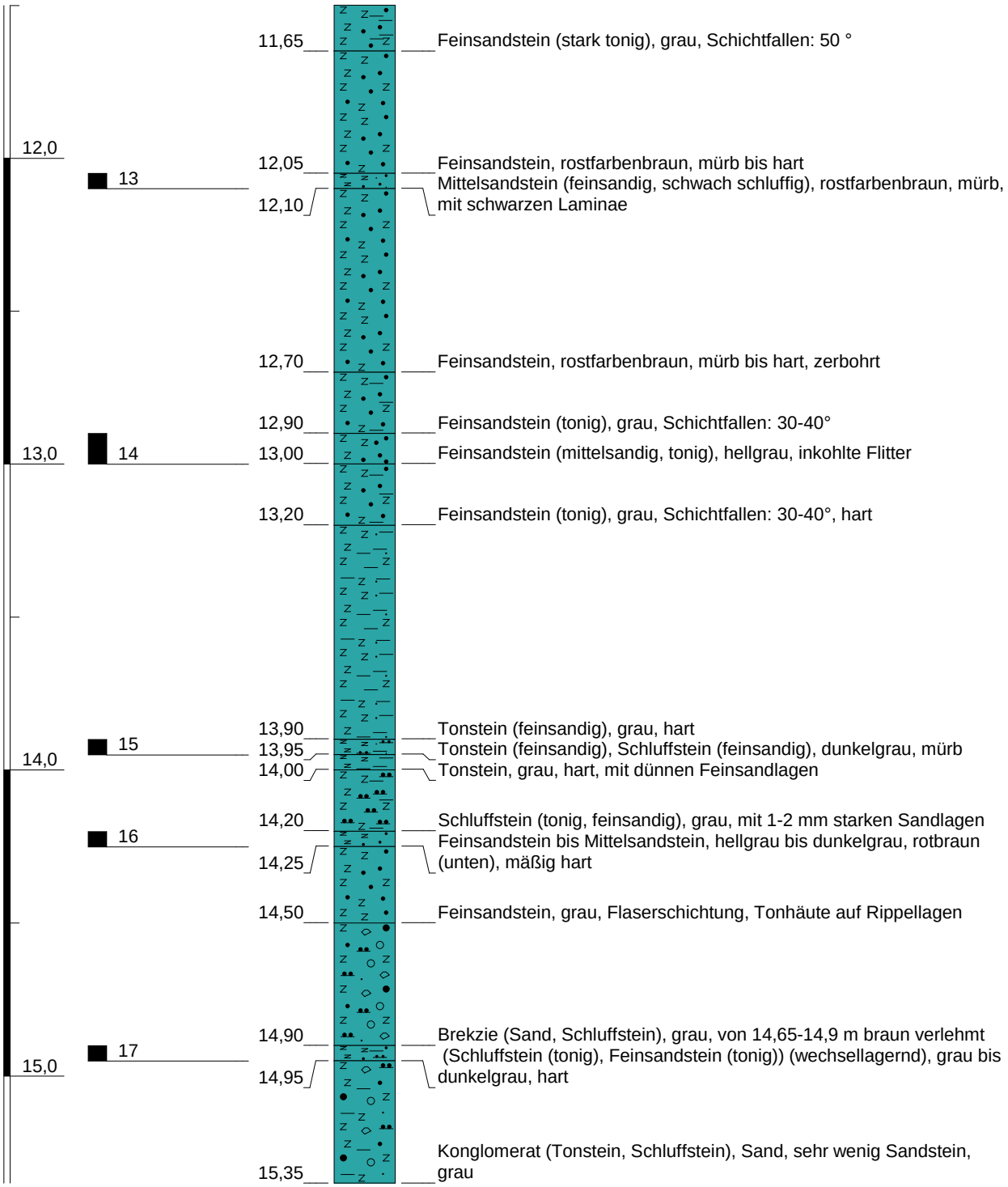
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 mNN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009	Anlage 5.6 b	Endtiefe: 163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)

15,45		Brekzie (Sand, Ton, Sandstein), grau
15,60		Mittelsandstein bis Feinsandstein (feingeschichtet), grau, mit Kohleflittern durchsetzt
15,80		Mittelsandstein bis Feinsandstein, grau, wenig Kohleflitter
16,20		Mittelsandstein bis Feinsandstein (feingeschichtet), grau, dünnplattig, mit wechselndem Anteil an Kohleflittern und tonigen Tonstückchen bis 5 mm
16,70		Mittelsandstein (tonig) bis Feinsandstein (tonig), grau, teilweise zu Brocken zerbohrt, flachlinsige Rippelschichtung
16,90		Mittelsandstein bis Feinsandstein, grau, fest, flachlinsige Rippelschichtung
17,00		(Mittelsandstein (tonig) bis Feinsandstein (tonig), Schluffstein (tonig, sandig)) (wechsellagernd), grau
17,05		Feinsandstein bis Mittelsandstein, grau bis dunkelgrau, mäßig hart
17,40		(Mittelsandstein (tonig) bis Feinsandstein (tonig), Schluffstein (tonig, sandig)) (wechsellagernd), grau
17,55		Feinsandstein, grau, linsige Flaserschichtung
17,60		Schluffstein (feinsandig, tonig), dunkelgrau, mürb
18,00		(Sandstein, Schluffstein) (wechsellagernd), grau, Lagen 1-4 mm dick
19,00		(Sandstein, Schluffstein) (wechsellagernd), grau

Höhenmaßstab: 1:20

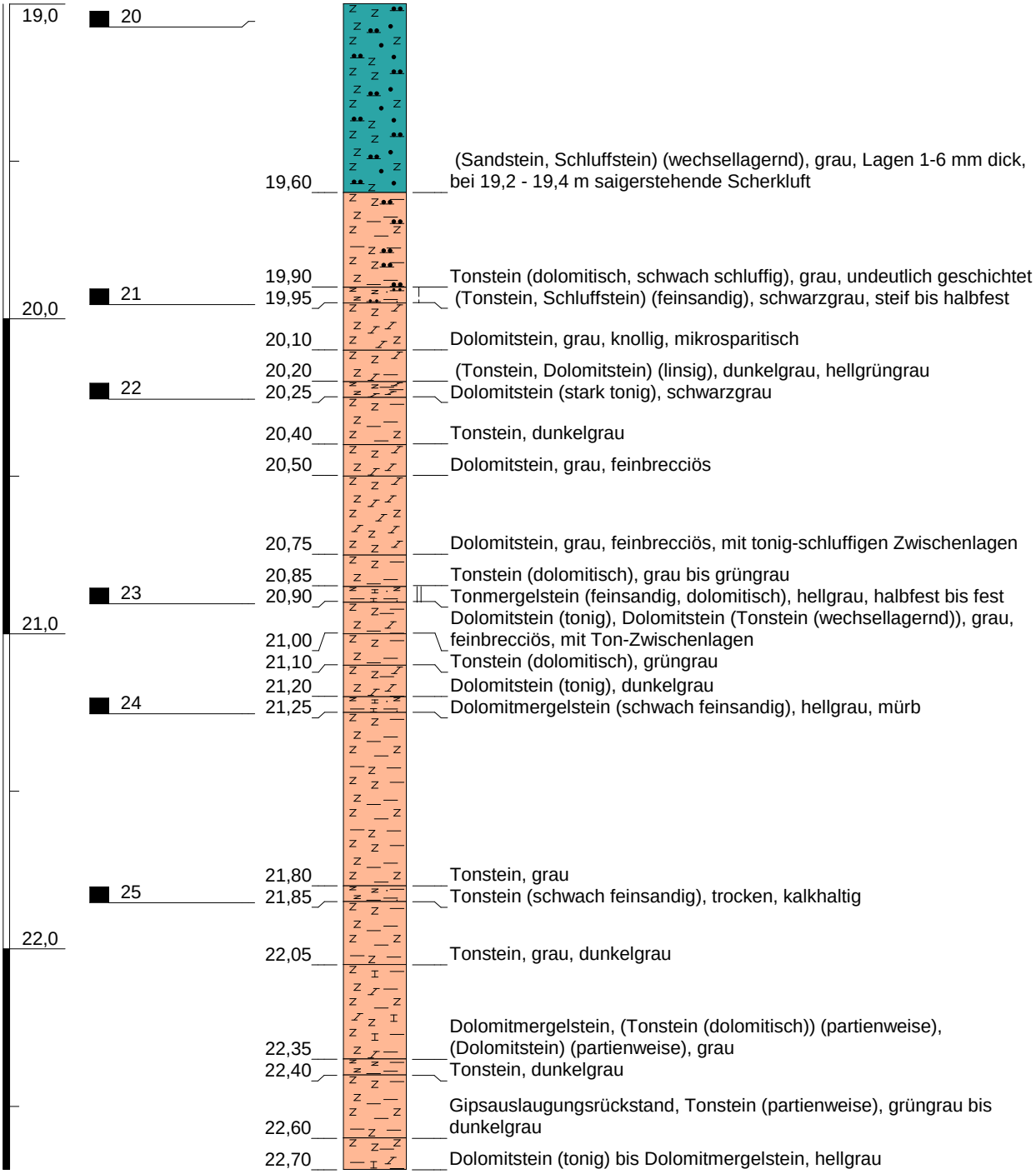
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 mNN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

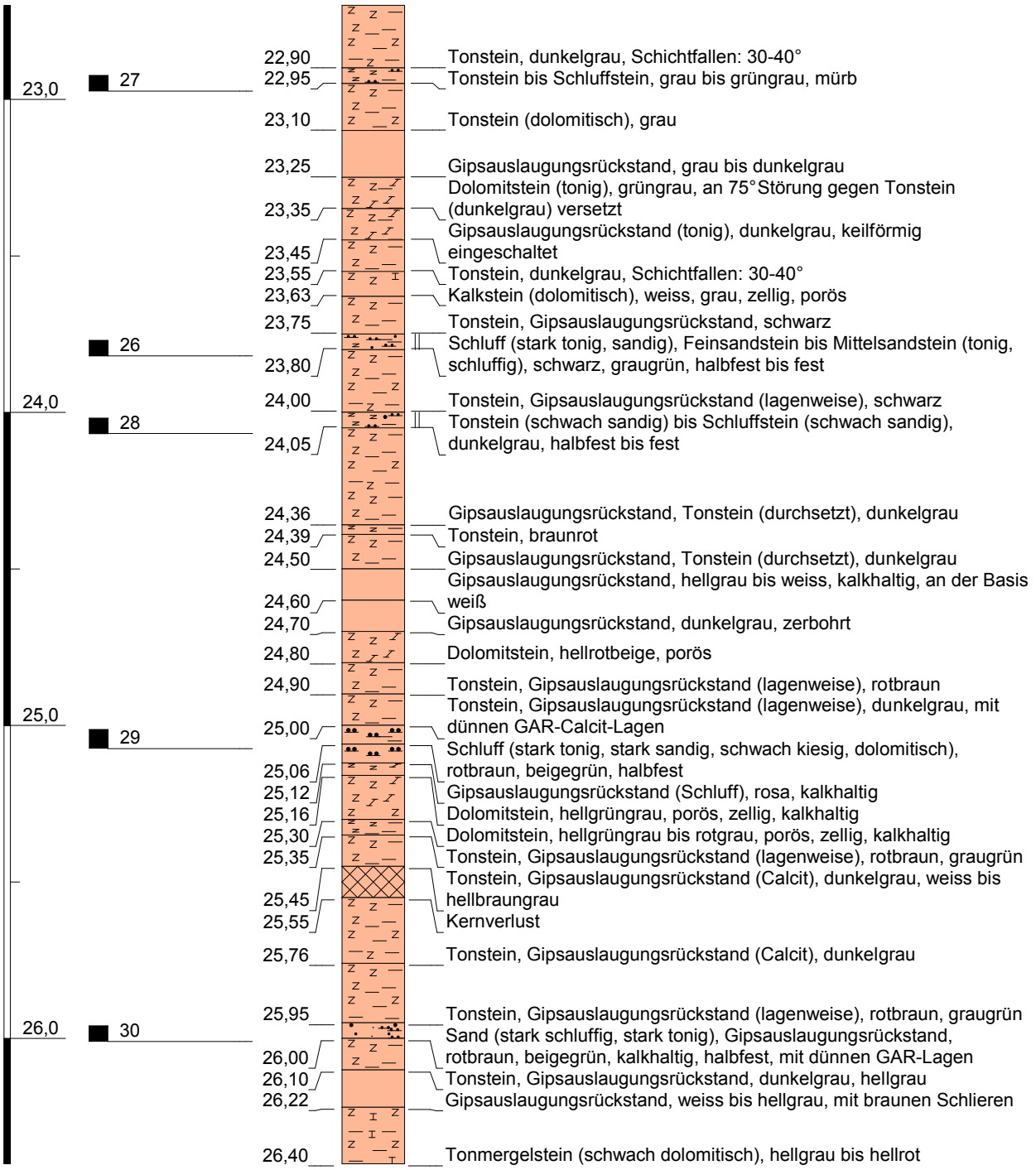
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 mNN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

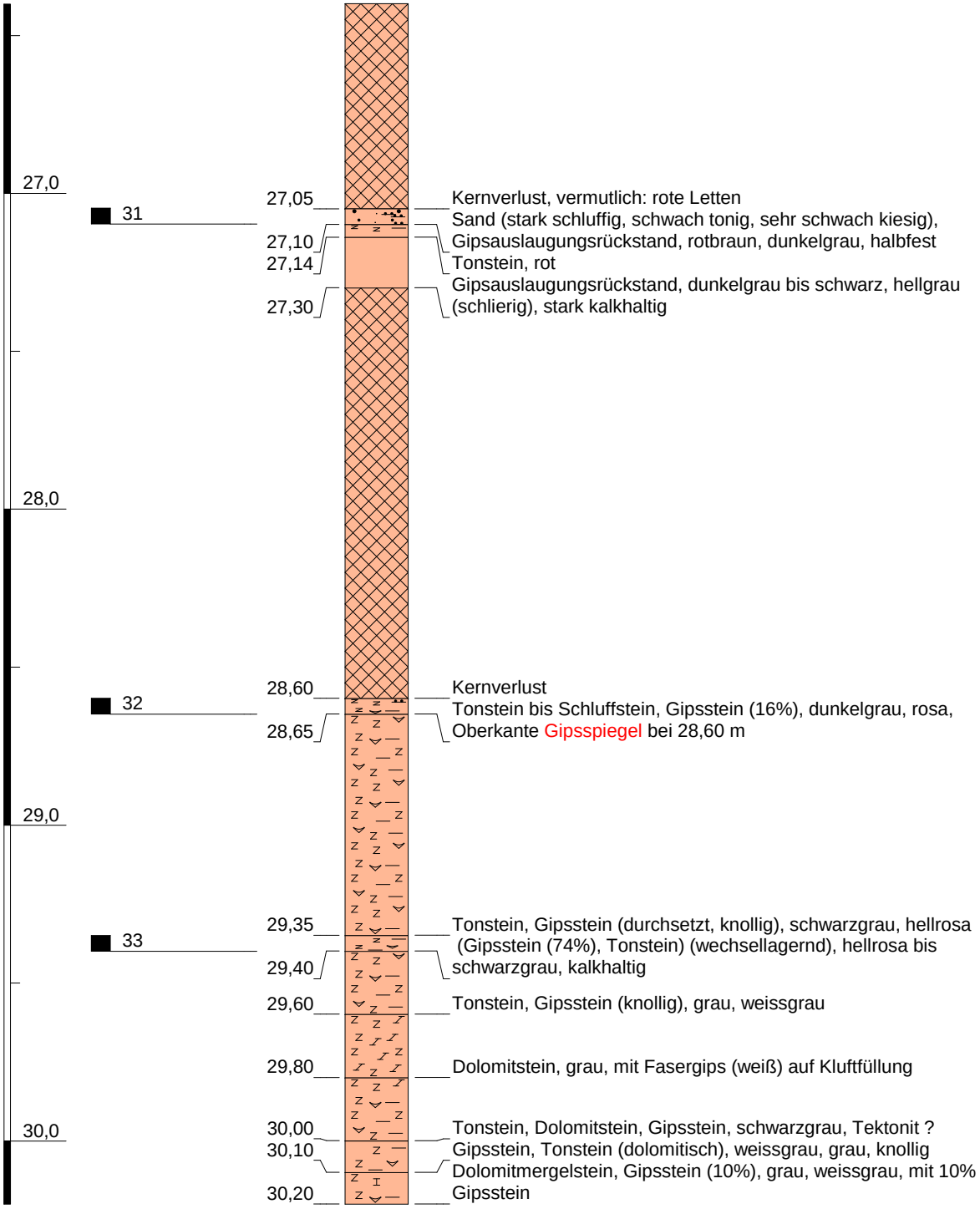
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 mNN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

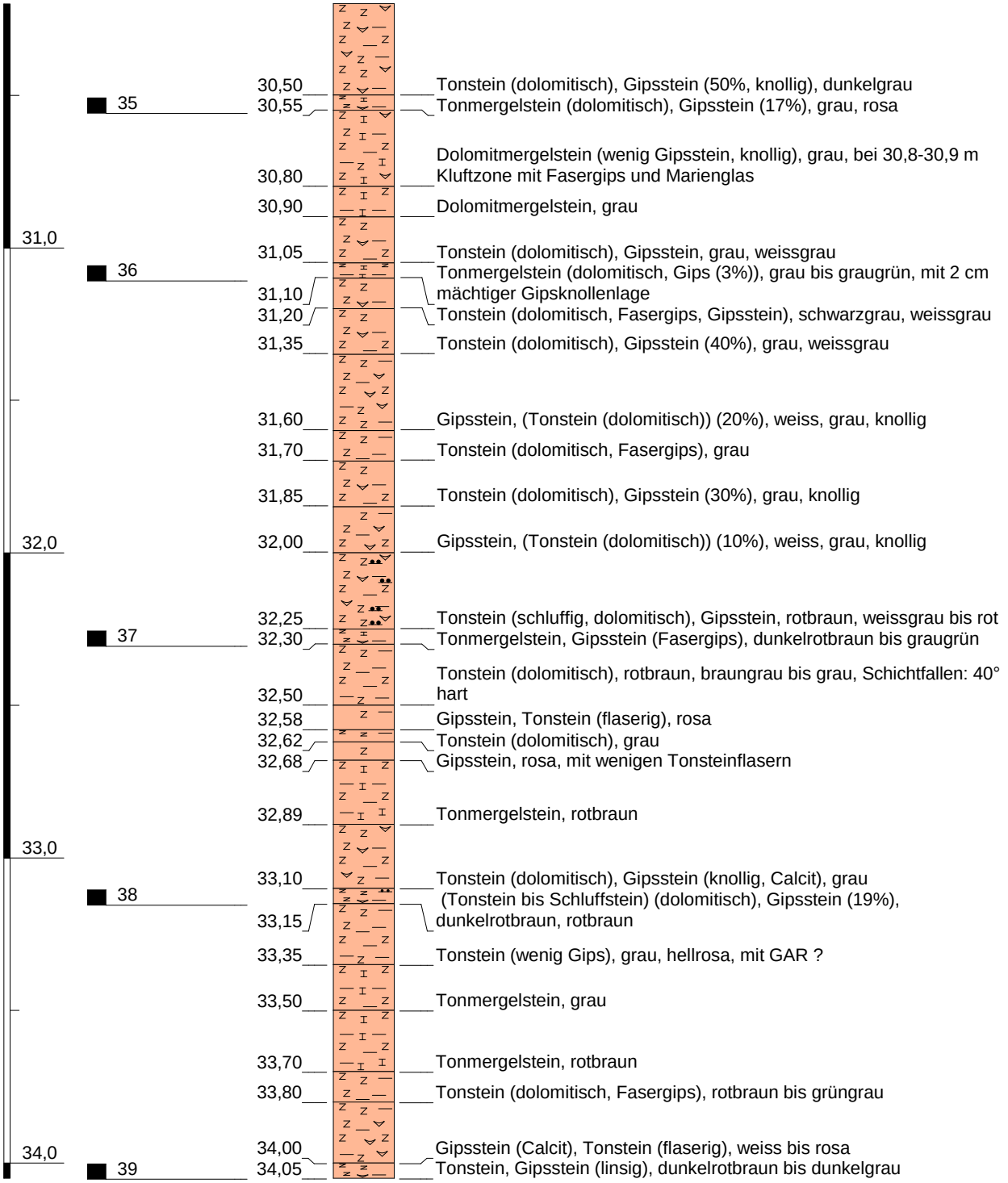
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

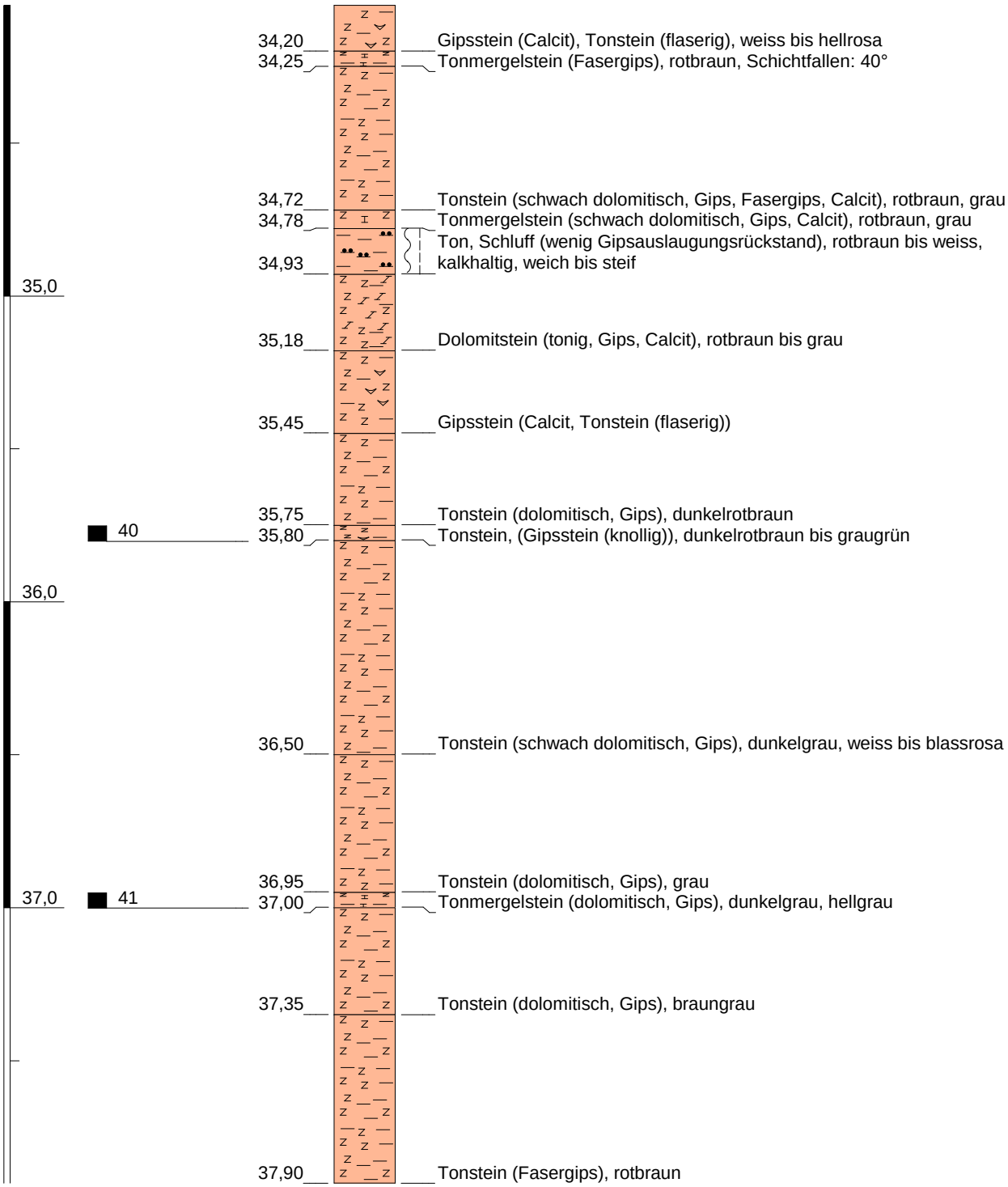
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

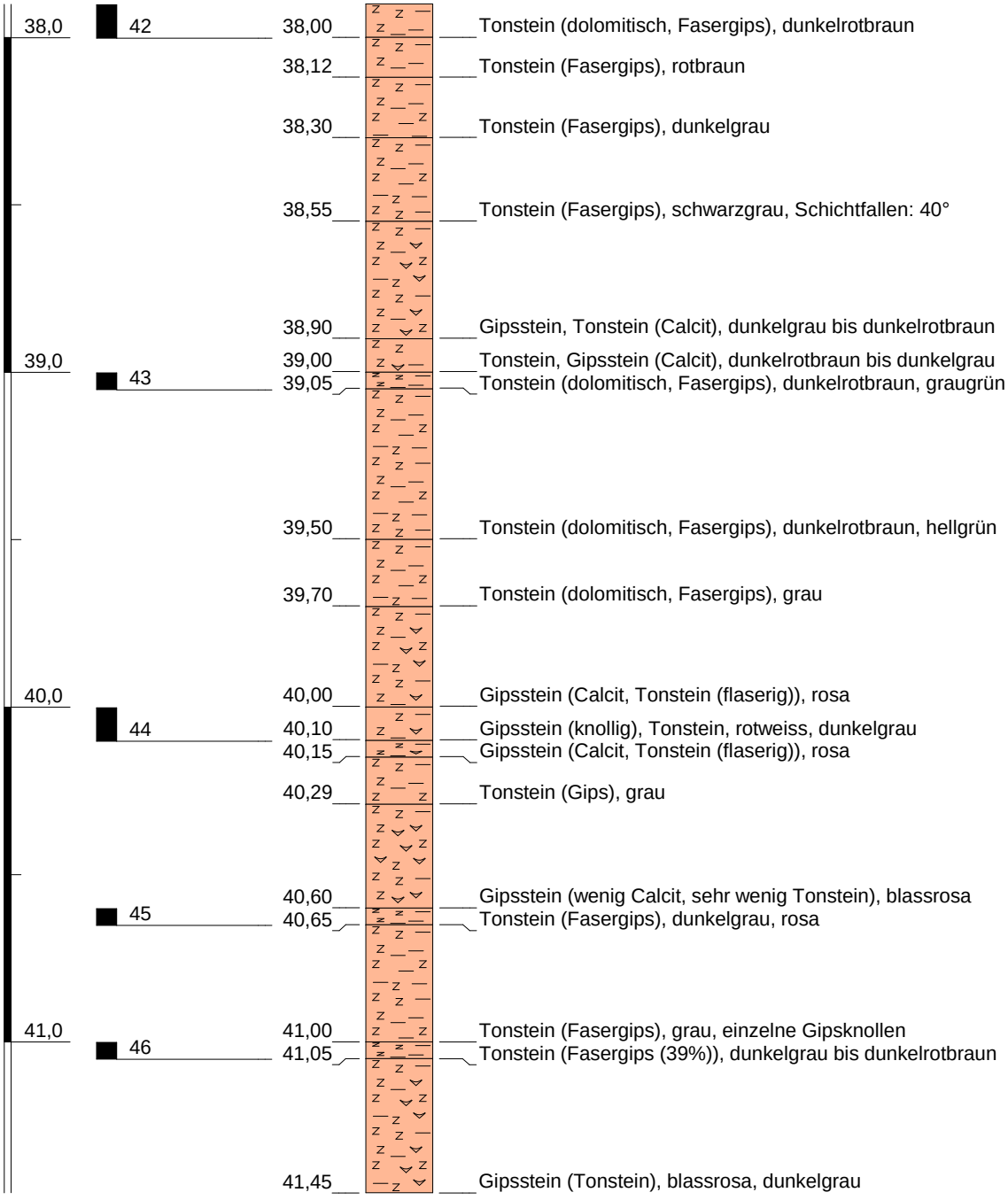
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

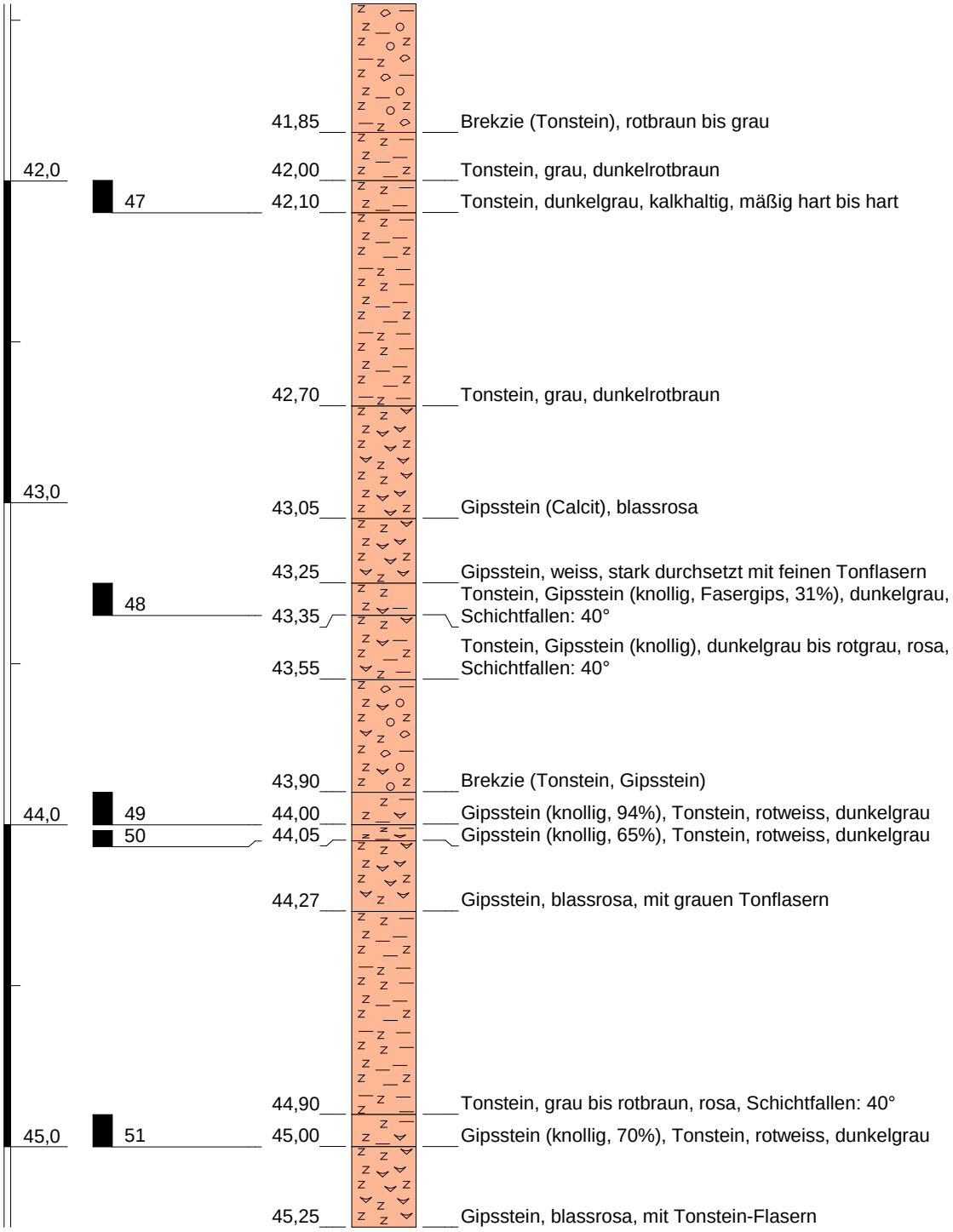
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

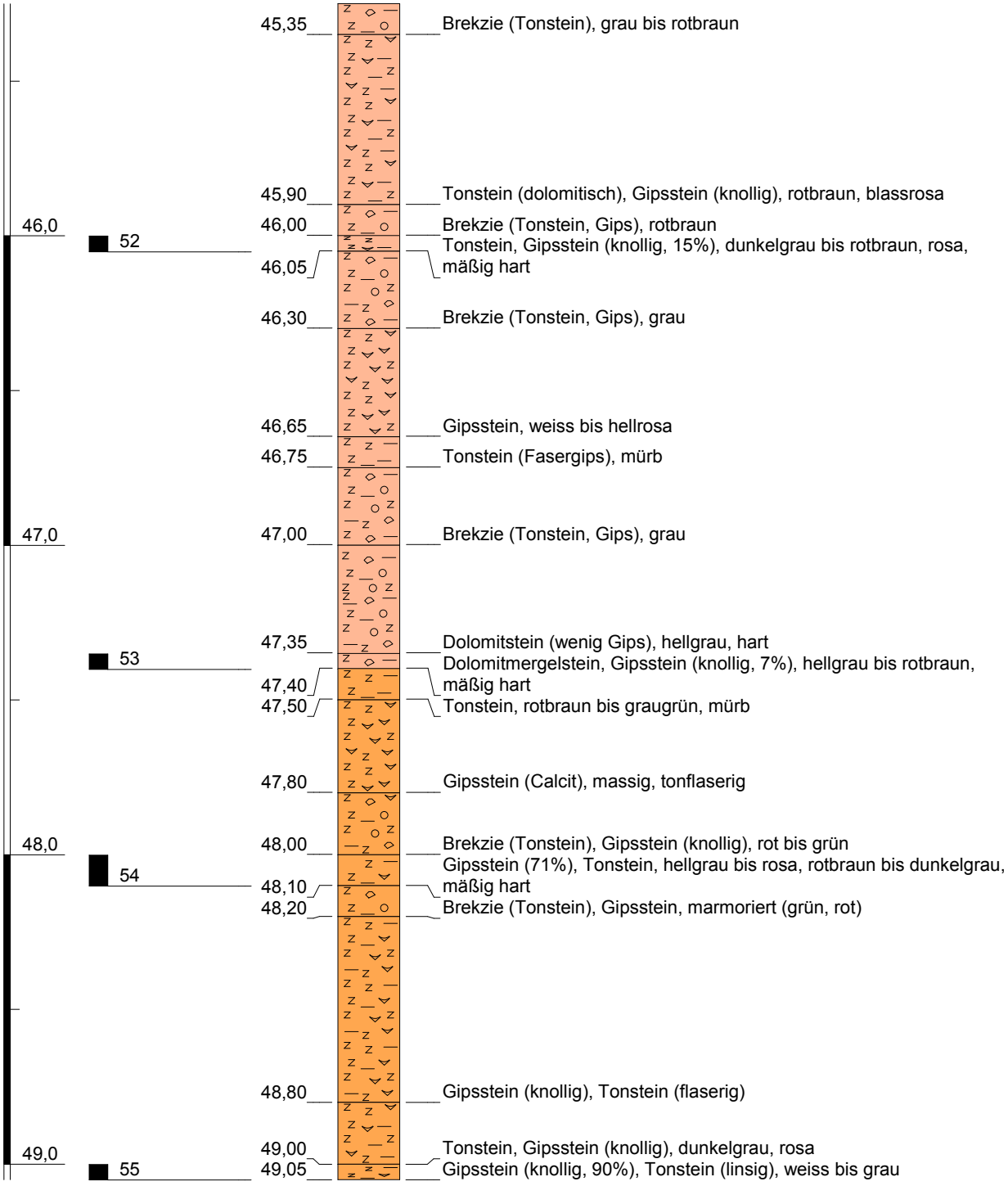
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

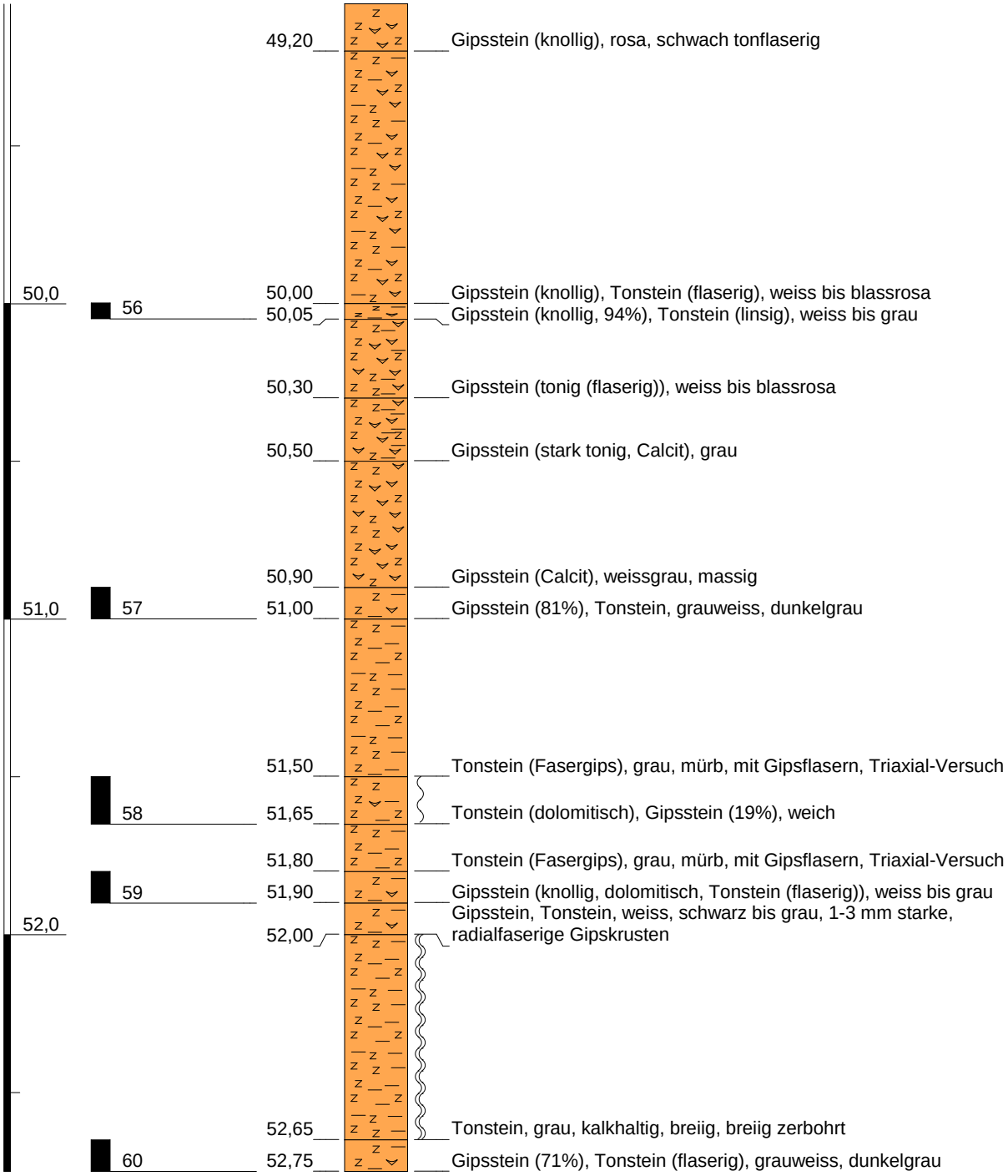
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

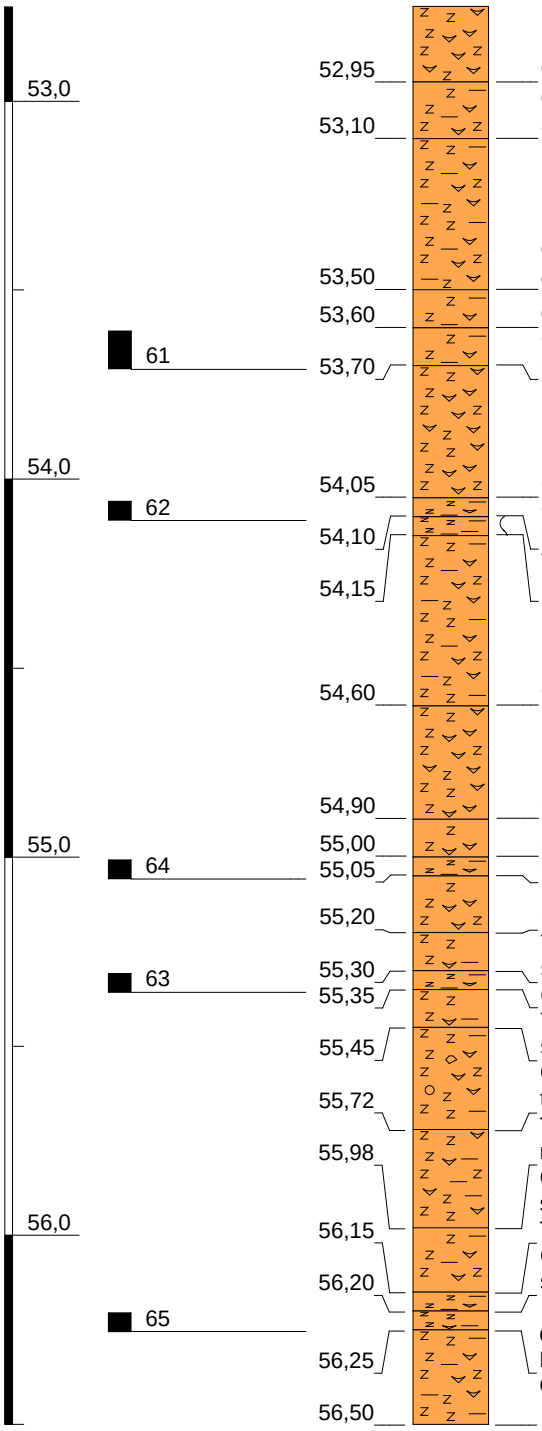
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

m u. GOK ca. 286 m NN)

Erkundungsbohrung 2



52,95	Gipsstein (Calcit), weiss, massig
53,10	Gipsstein (knollig), Tonstein (flaserig), weiss, vereinzelt Fasergips auf Schichtfugen
53,50	Gipsstein (knollig), Tonstein (flaserig), blassrosa, vereinzelt Fasergips auf Schichtfugen
53,60	Gipsstein (knollig), Tonstein (flaserig), weiss
53,70	Gipsstein (knollig, 80%), Tonstein (dolomitisch, flaserig), weiss bis rosa
54,05	Gipsstein (Calcit, Fasergips), weiss bis hellrosa, massig
54,10	Gipsstein (knollig, Fasergips, 70%), Tonstein, grau, dunkelgrau, mäßig hart
54,15	Tonstein (Fasergips), dunkelgrau bis schwarzgrau, weich, mit Fasergips
54,60	Gipsstein (knollig, Calcit), Tonstein (flaserig), weiss, knollig, tonflasrig
54,90	Gipsstein (flaserig, Calcit), weiss
55,00	Gipsstein (knollig, Calcit), weiss, Schichtfallen: 40°
55,05	Gipsstein (knollig, 75%), Tonstein (dolomitisch), grauweiss, dunkelgrau
55,20	Gipsstein (flaserig), weiss
55,30	Tonstein (geschichtet), Gipsstein (knollig, Fasergips), dunkelgrau bis schwarzgrau, blassrosa
55,35	Gipsstein (63%), Tonstein, weiss bis grau, dunkelgrau
55,45	Tonstein (geschichtet), Gipsstein (knollig, Fasergips), dunkelgrau bis schwarzgrau, blassrosa, mit einzelnen Gipslagen
55,72	Gipsstein (knollig, Calcit), Tonstein (flaserig, Brekzie), weiss, tonflaserig, Tonschlieren
55,98	Tonstein, Gipsstein (knollig), dunkelgrau bis schwarzgrau, blassrosa, mit Gipslagen
56,15	Gipsstein (knollig), Tonstein (flaserig), weiss bis hellgrau, schwarzgrau, knollig bis knaurig, schwach kalkhaltig, mit Tonsteinlagen
56,20	Gipsstein (lagenweise), Tonstein (lagenweise), weiss bis hellgrau, schwarzgrau
56,25	(Tonstein (dolomitisch), Gipsstein (33%)) (wechsellagernd), dunkelgrau, hellgrau, mit 2-3 mm starken Tonsteinlagen (56,20-56,25: Probe)
56,50	Gipsstein, Tonstein (lagenweise, 5%), massig, Schichtfallen: 40°

Höhenmaßstab: 1:20

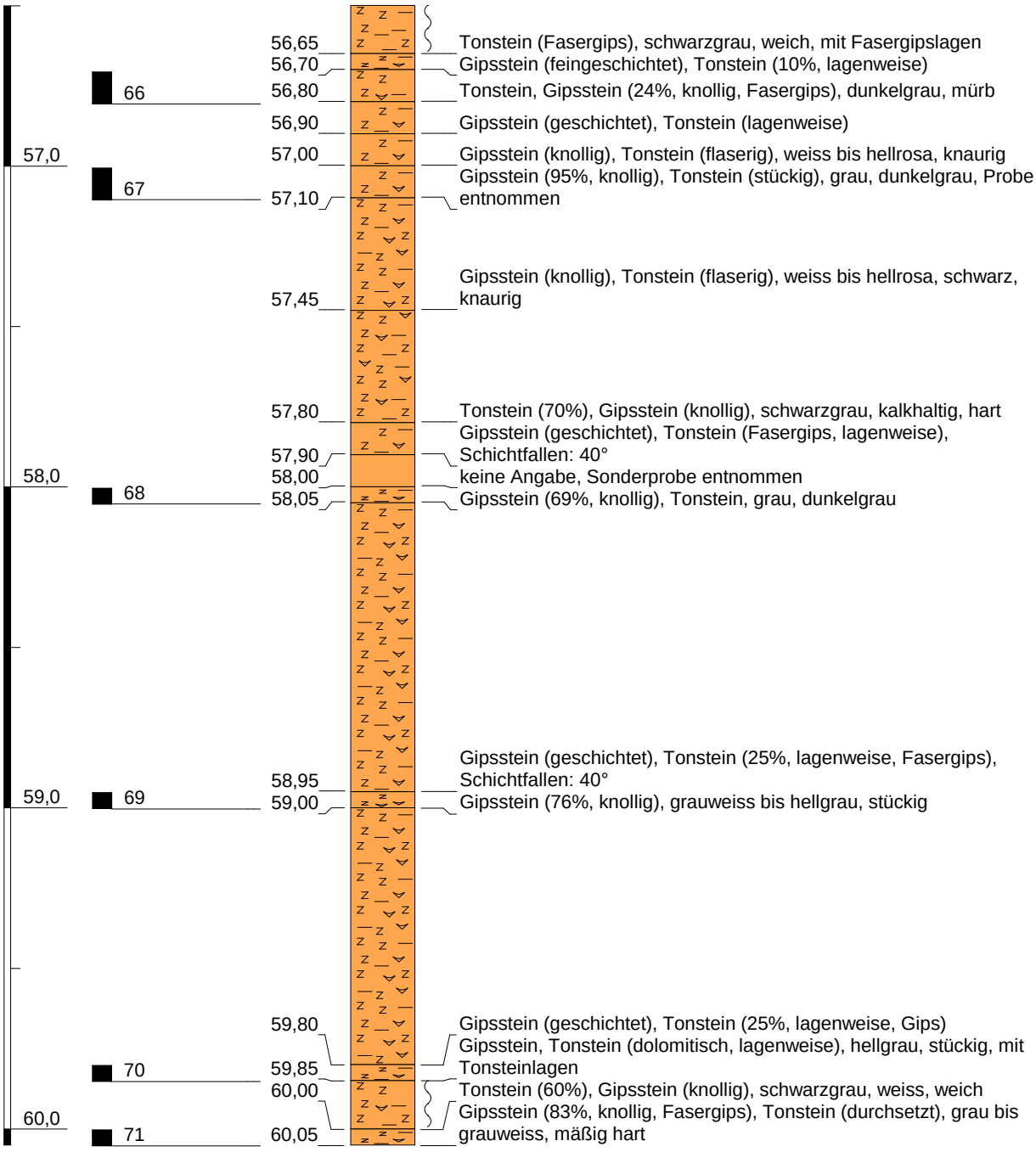
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

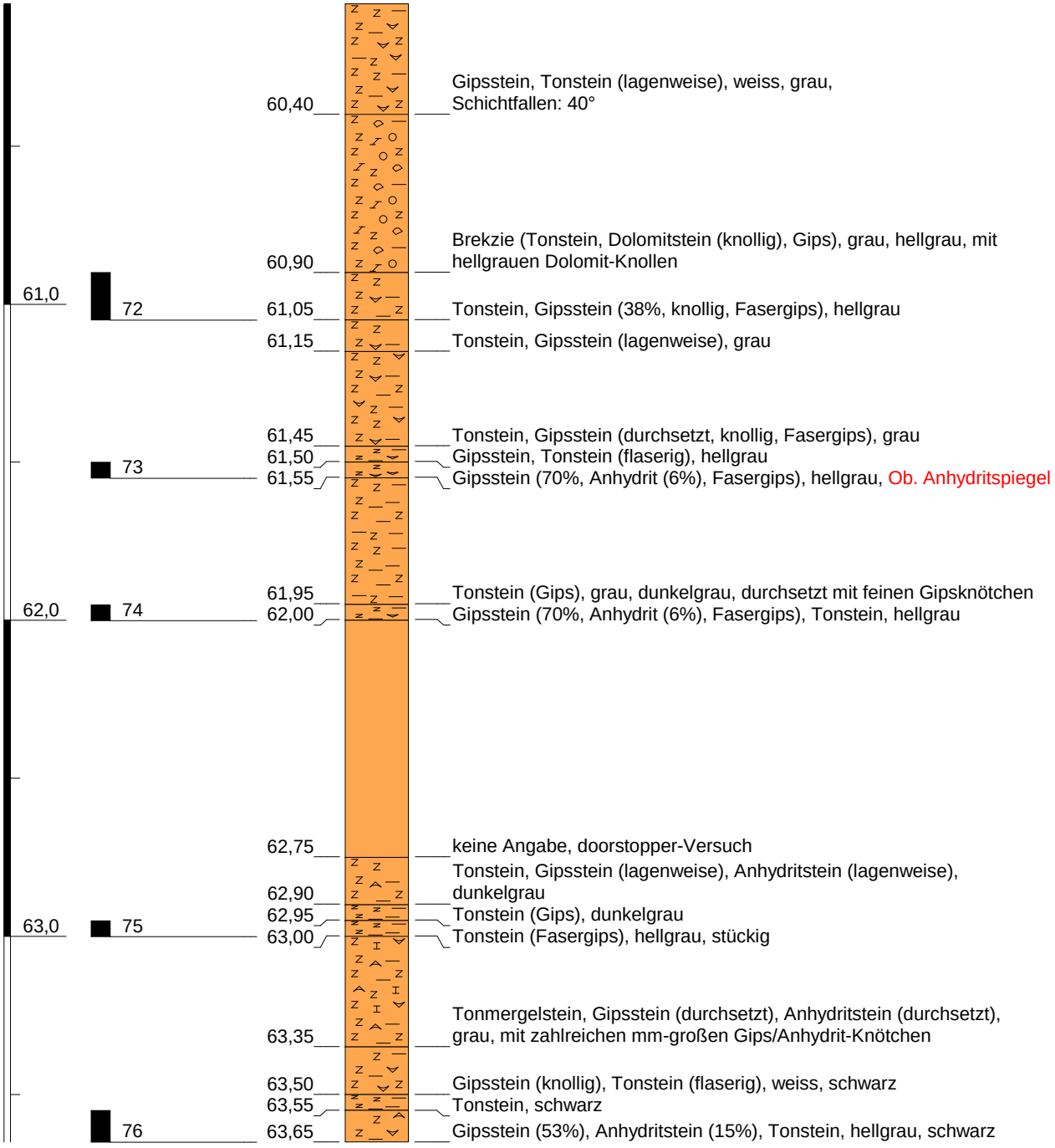
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

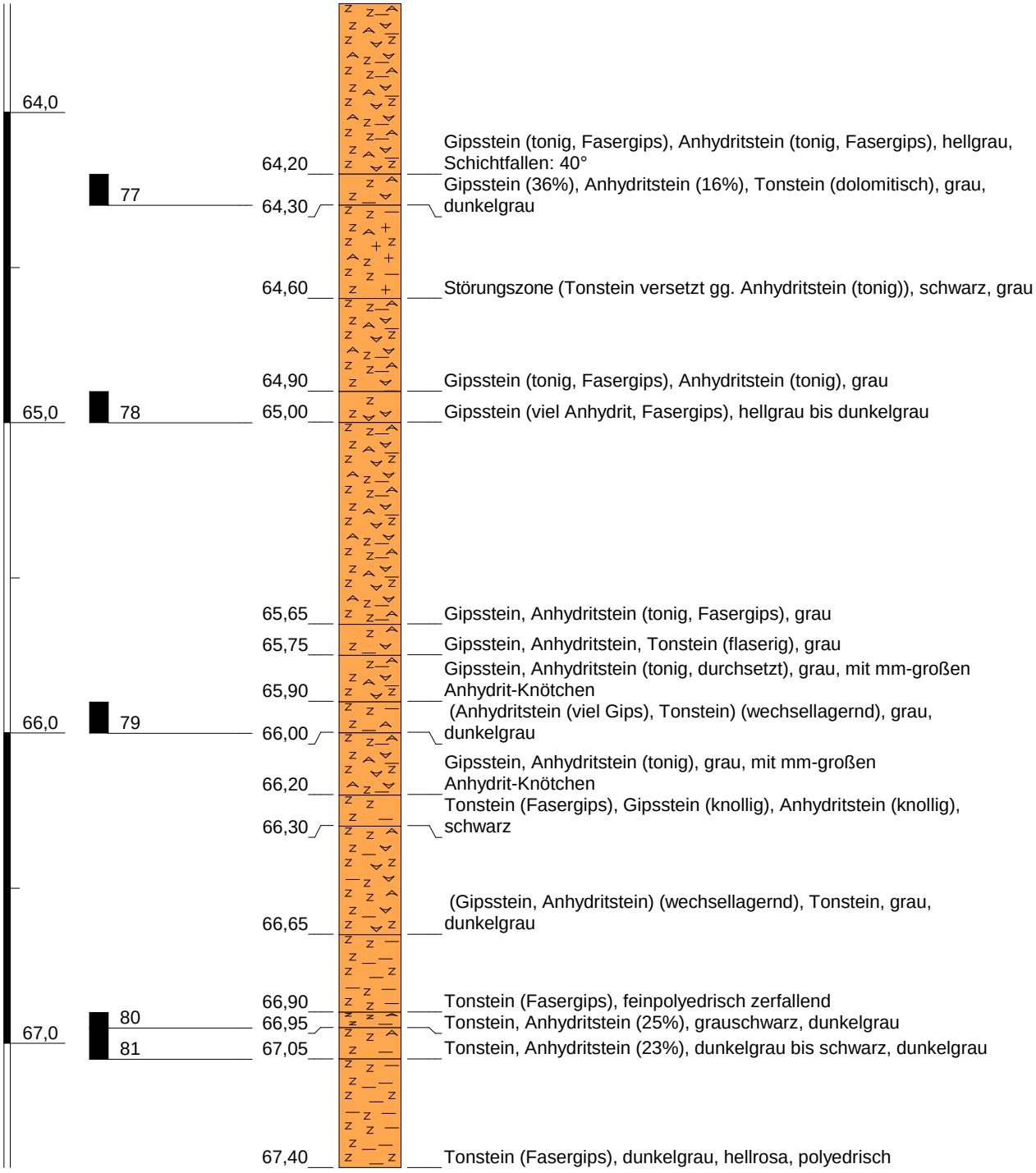
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

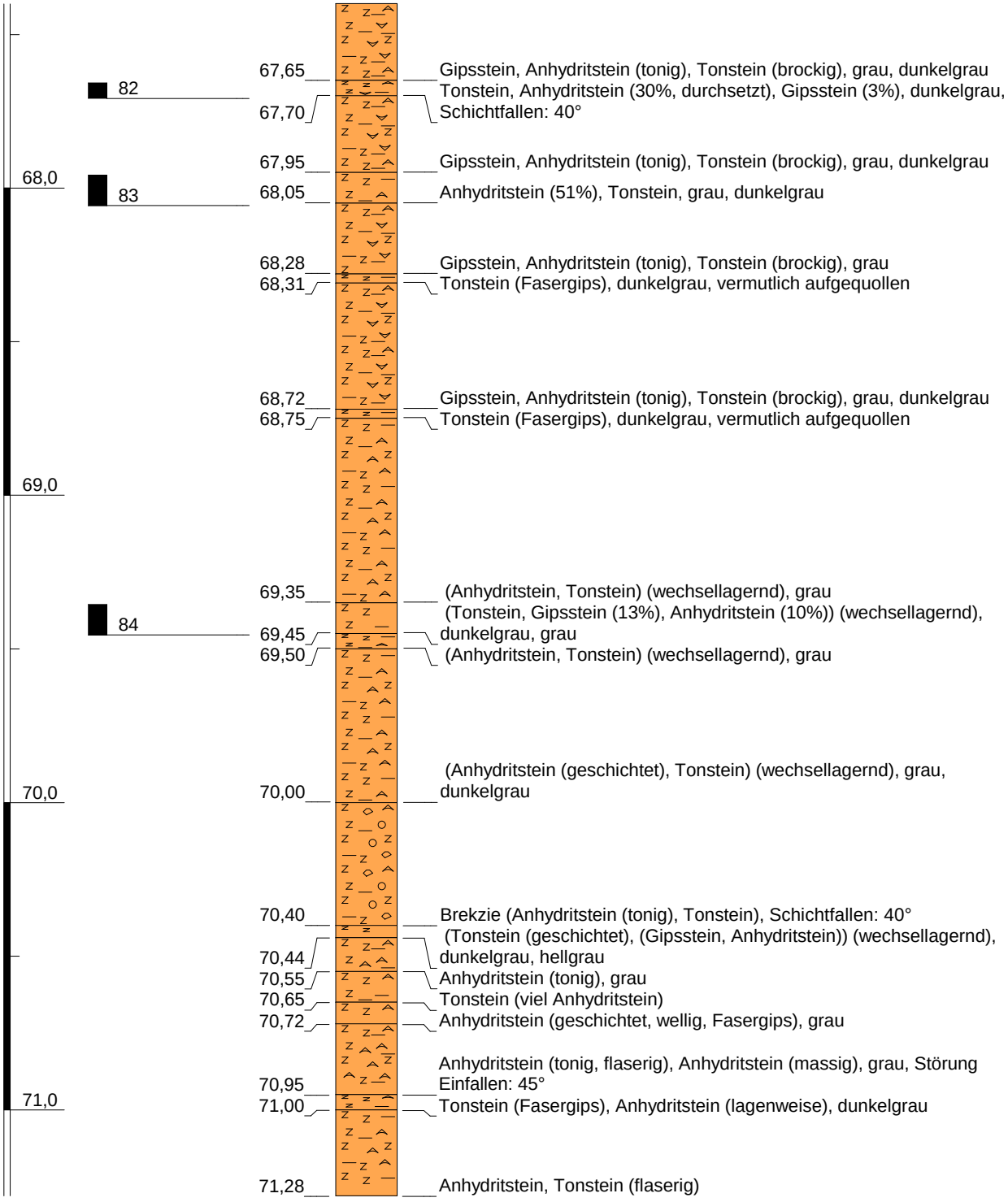
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009	Anlage 5.6 b	Endtiefe: 163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

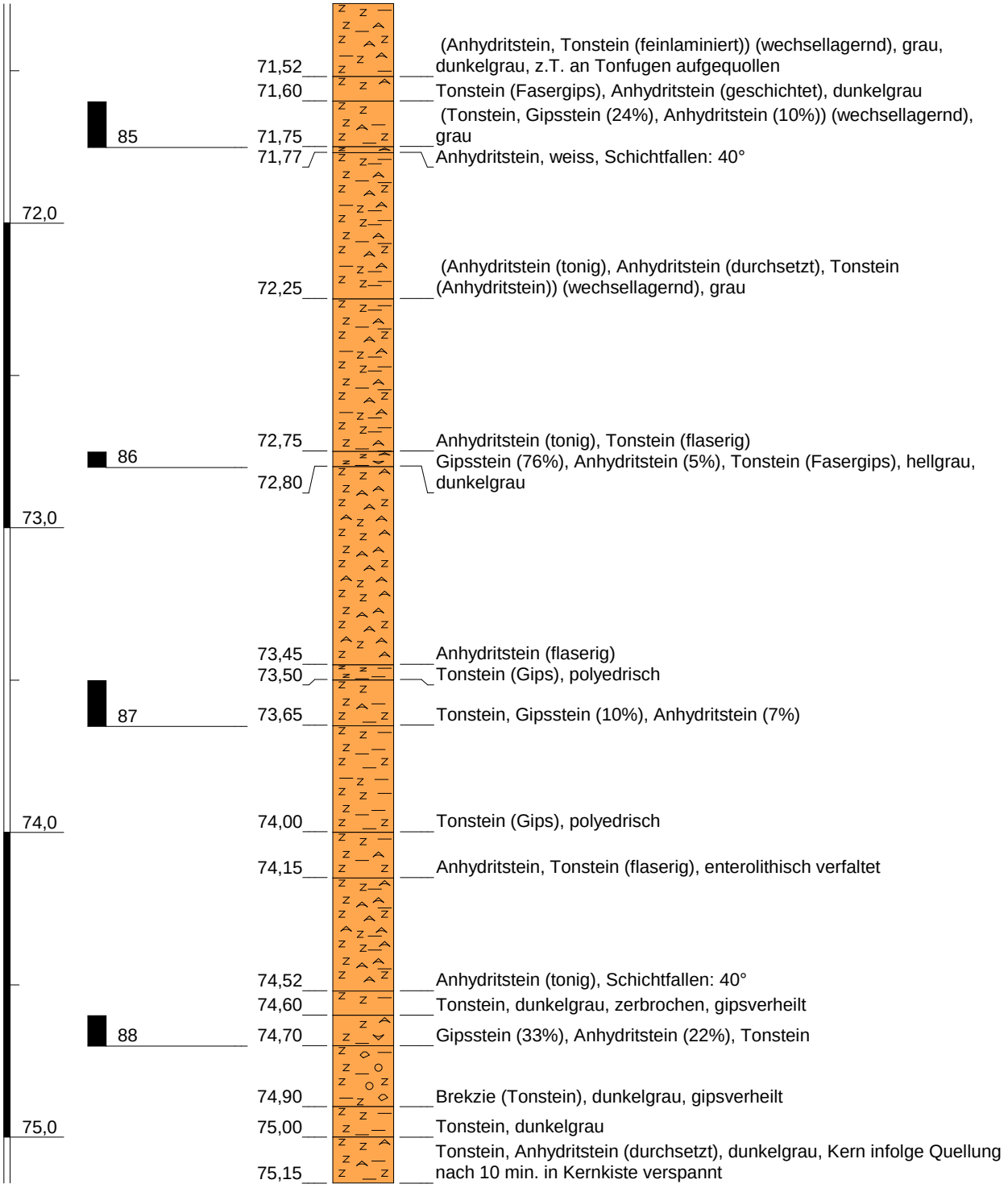
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

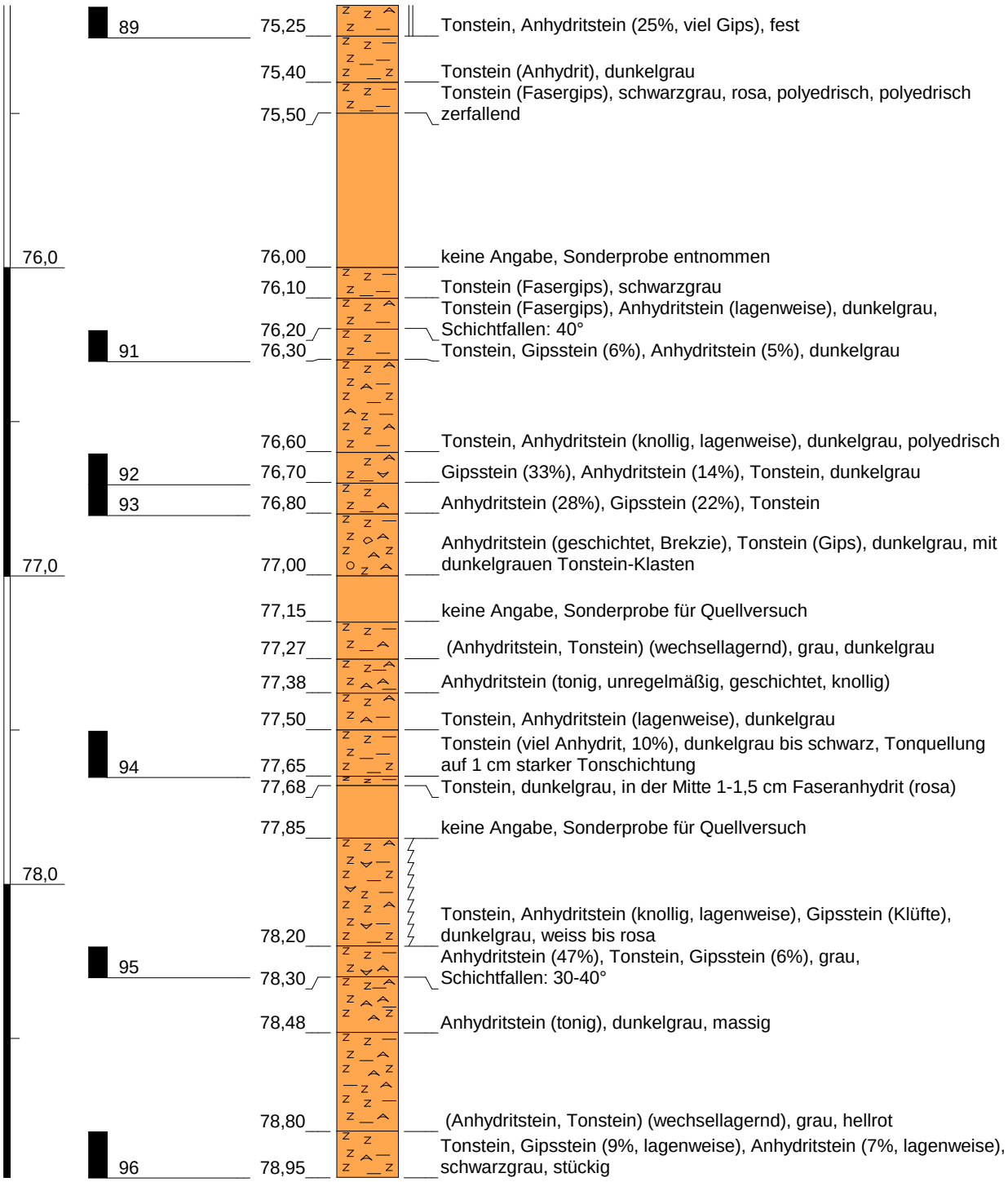
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009	Anlage 5.6 b	Endtiefe: 163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

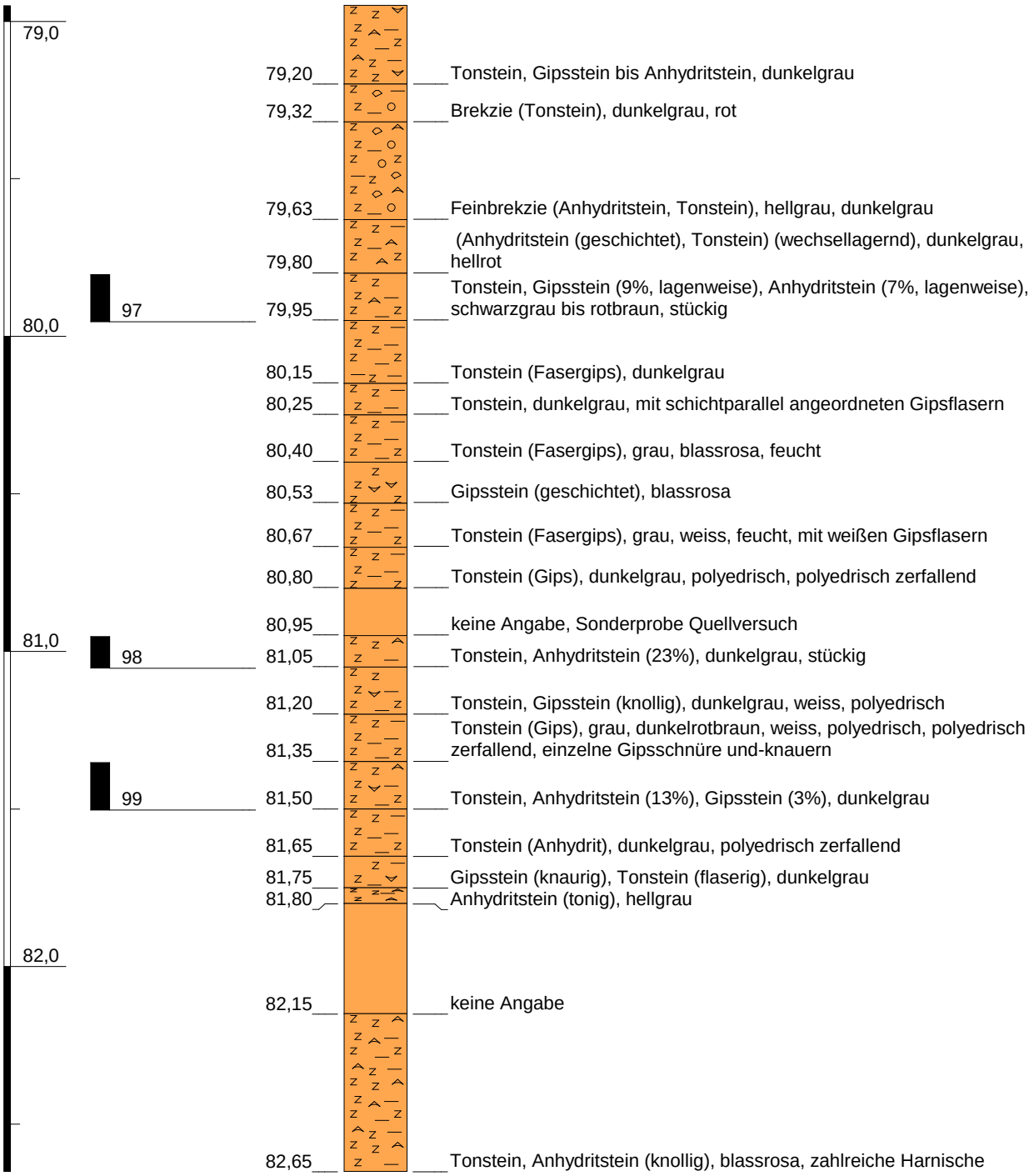
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

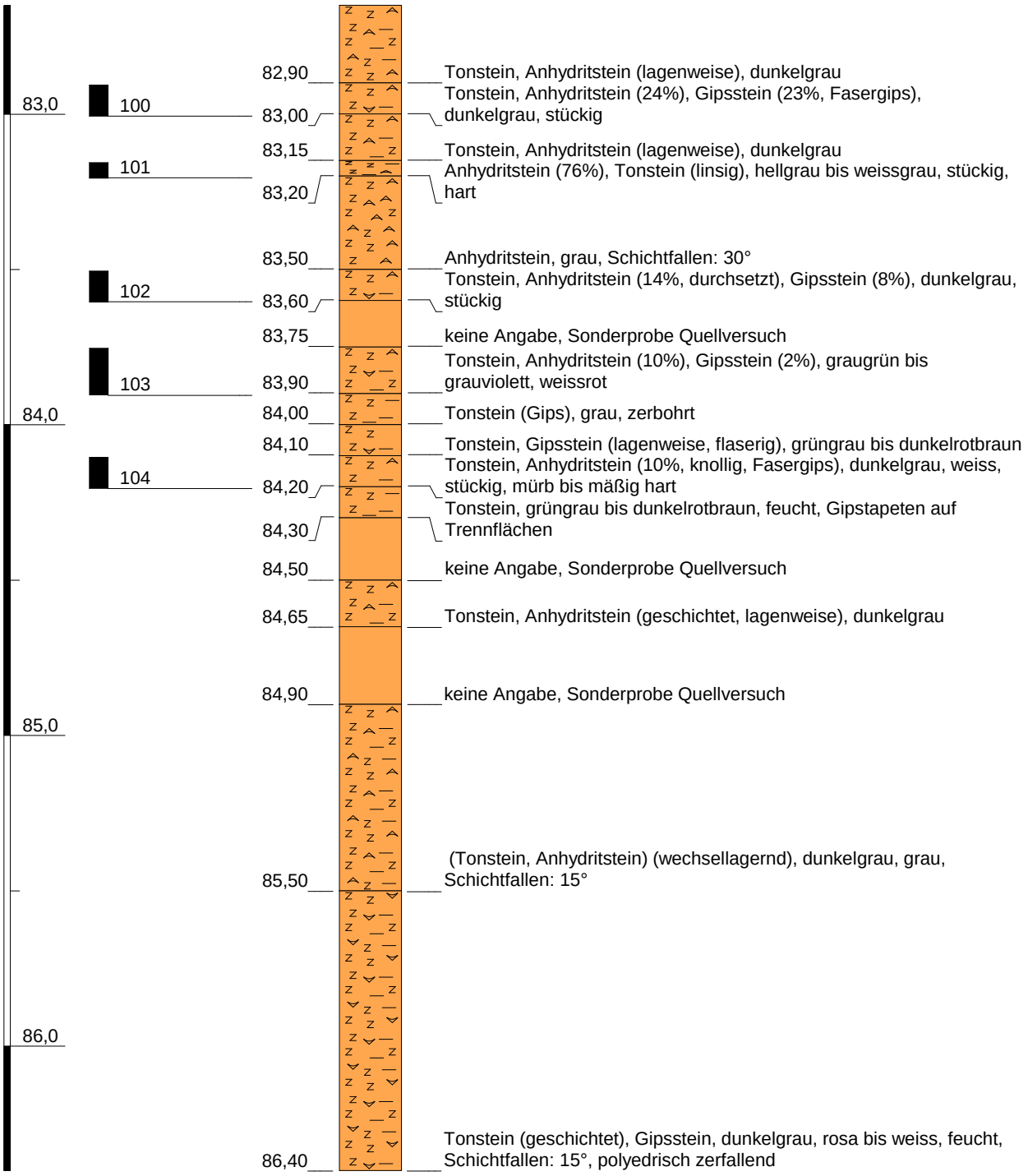
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

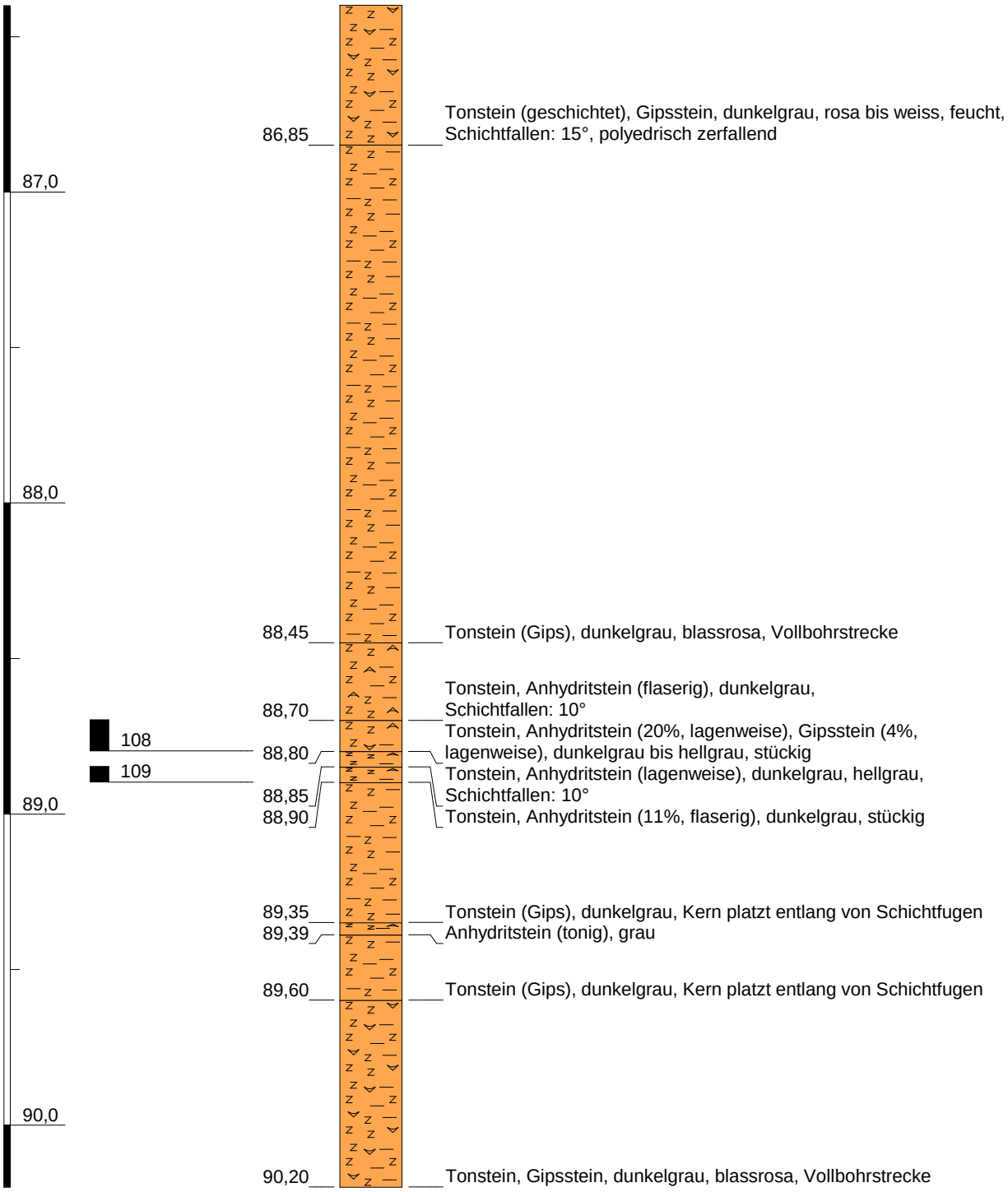
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 mNN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

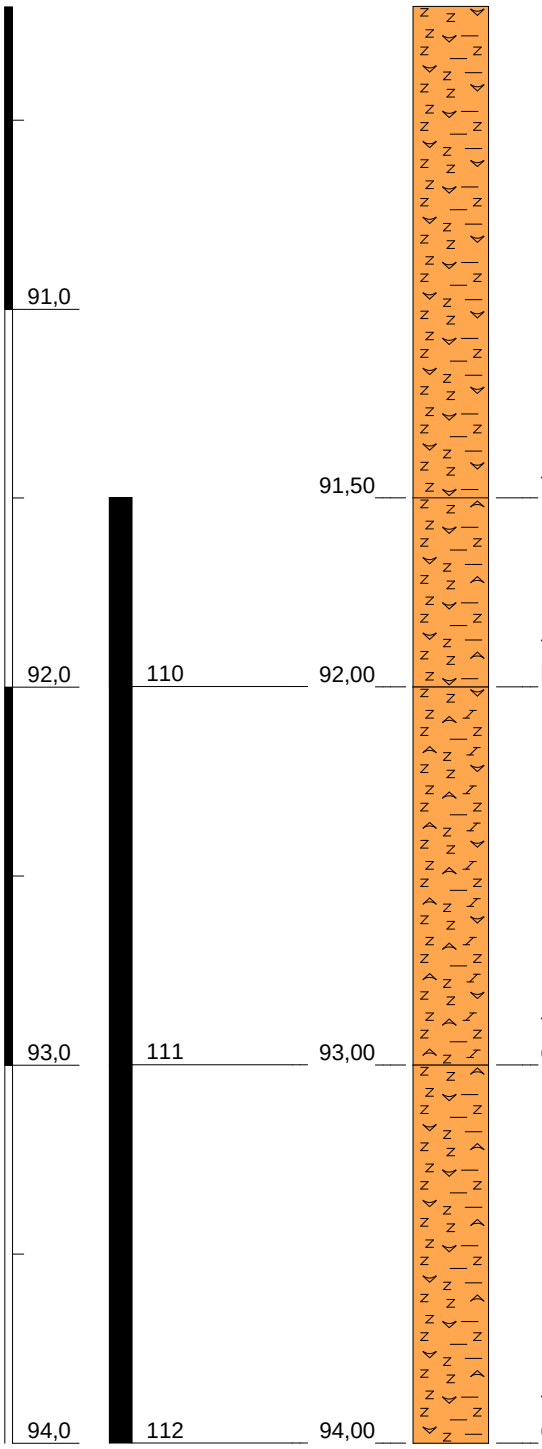
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



91,50		Tonstein, Gipsstein, dunkelgrau, blassrosa, Vollbohrstrecke
92,00		Tonstein, Anhydritstein (17%), Gipsstein (1%), dunkelgrau, grauweiss bis rot, Cuttings
93,00		Tonstein, Dolomitstein, Anhydritstein (24%), Gipsstein (1%), dunkelgrau, braungrau, grauweiss, Cuttings
94,00		Tonstein (dolomitisch), Anhydritstein (27%), Gipsstein (1%), dunkelgrau, grauweiss, Cuttings

Höhenmaßstab: 1:20

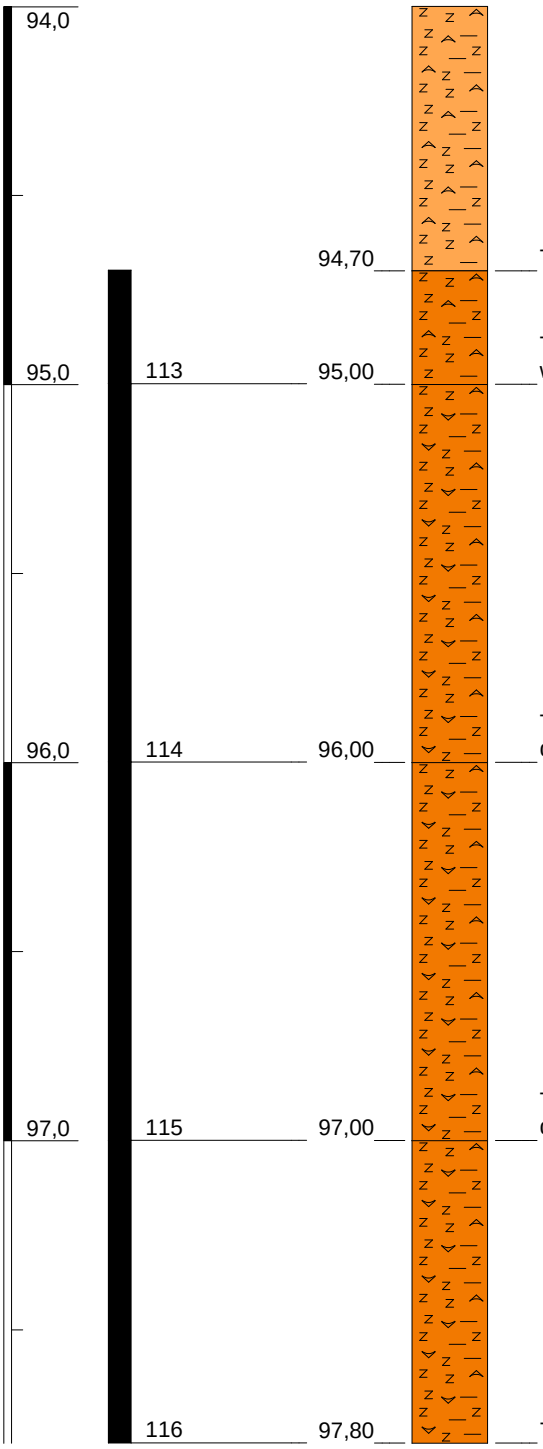
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 mNN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



94,70		Tonstein, Anhydritstein, dunkelgrau bis graubraun, grauweiss
95,00		Tonstein (dolomitisch), Anhydritstein (20%), grüngrau bis rotbraun, weiss, Cuttings
96,00		Tonstein, Anhydritstein (17%), Gipsstein (1%), graugrün bis dunkelrotbraun, grauweiss, Cuttings
97,00		Tonstein, Anhydritstein (19%), Gipsstein (1%), dunkelgrau bis dunkelrotbraun, grauweiss, Cuttings
97,80		Tonstein, Anhydritstein (14%), Gipsstein (1%), dunkelgrau bis rotbraun

Höhenmaßstab: 1:20

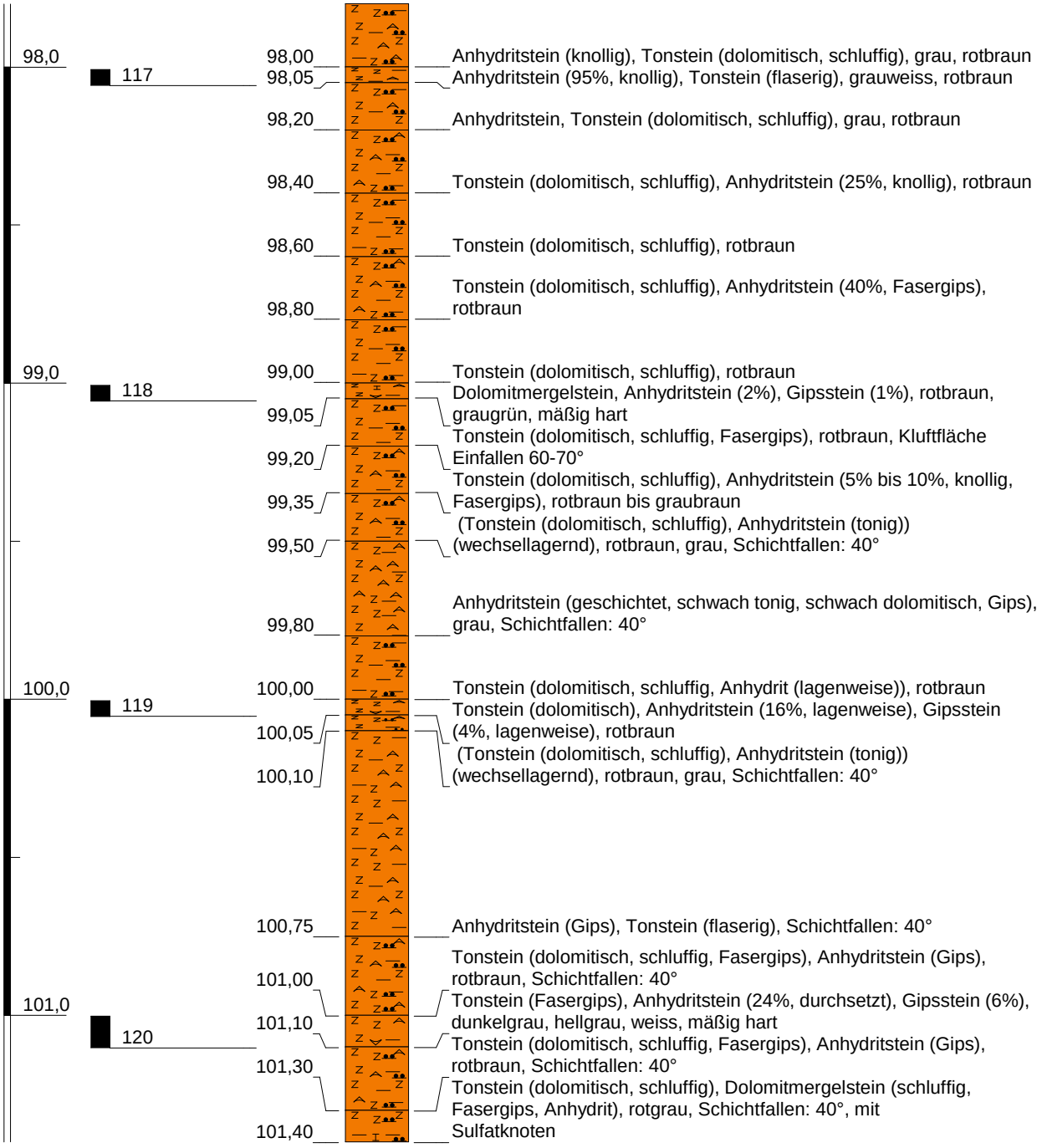
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

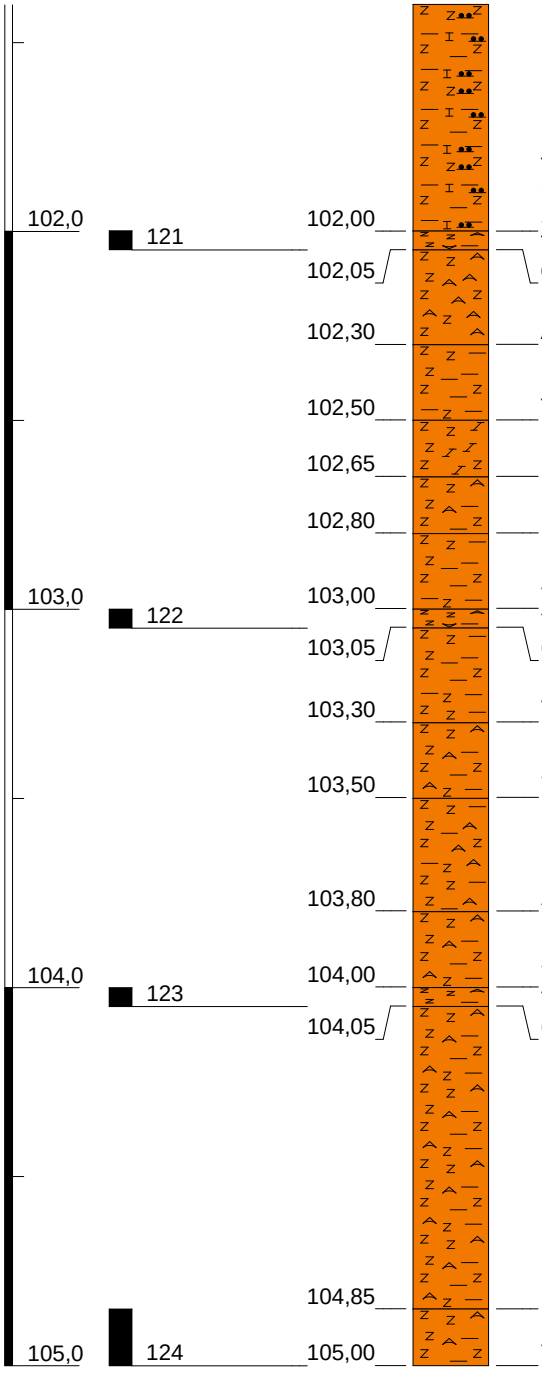
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 mNN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



102,0	121	102,00	Tonstein (dolomitisch, schluffig), Dolomitmergelstein (schluffig, Fasergips, Anhydrit), rotgrau, Schichtfallen: 40°, mit Sulfatknoten
		102,05	Tonstein (Fasergips), Anhydritstein (20%, lagenweise), Gipsstein (3%), dunkelgrau, hellgrau, weiss, stückig, mäßig hart
		102,30	Anhydritstein (dolomitisch, Gips), grau
		102,50	Tonstein (Fasergips), grau, braun
		102,65	Dolomitstein, grau, mikritisch
		102,80	(Tonstein (dolomitisch), Anhydritstein) (wechsellagernd), grau
103,0	122	103,00	Tonstein (dolomitisch), rotbraun
		103,05	Tonstein (Fasergips), Anhydritstein (9%, lagenweise), Gipsstein (7%), dunkelrotbraun, graugrün, stückig, mäßig hart
		103,30	Tonstein (dolomitisch, Fasergips), rotbraun
		103,50	Tonstein (dolomitisch), Anhydritstein (lagenweise, knollig), rotbraun
		103,80	Anhydritstein, Tonstein (lagenweise), grau
104,0	123	104,00	Tonstein (dolomitisch), Anhydritstein (knollig), rotbraun, rot
		104,05	Tonstein, Anhydritstein (35%, knollig), dunkelrotbraun bis graugrün, grauweiss, stückig
		104,85	(Tonstein (dolomitisch), Anhydritstein) (wechsellagernd)
105,0	124	105,00	Tonstein, Anhydritstein (23%), rotbraun bis dunkelgrau

Höhenmaßstab: 1:20

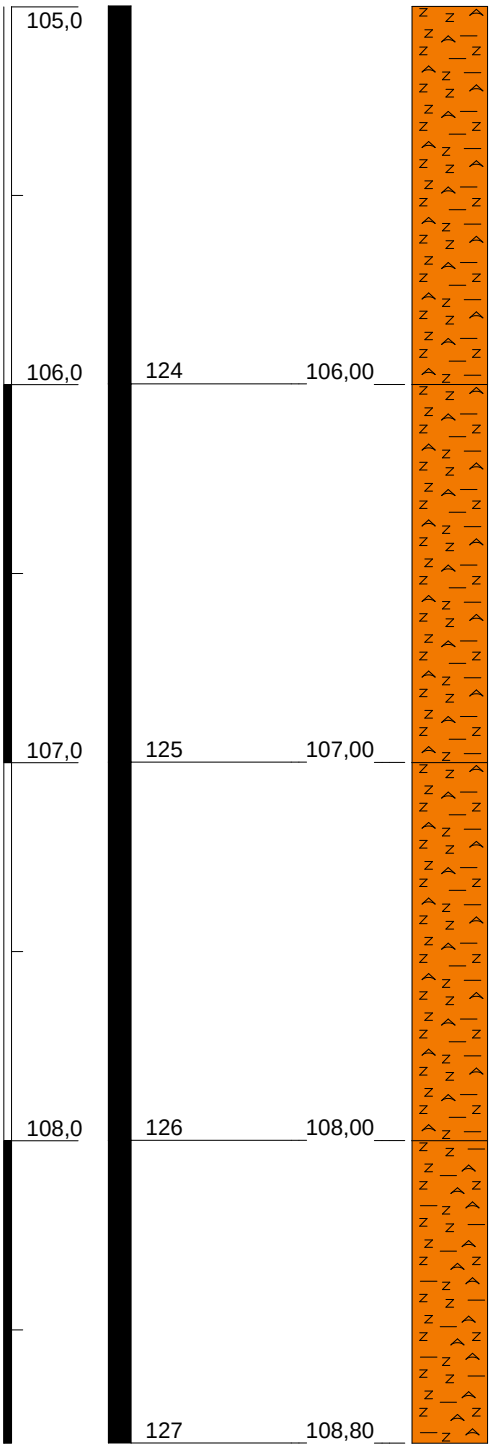
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**			
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**			
Auftraggeber:	Stadt Staufen		Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau		Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]		Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009	Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



124	106,00		Tonstein, Anhydritstein (23%), rotbraun bis dunkelgrau
125	107,00		Tonstein, Anhydritstein (37%), dunkelrotbraun bis dunkelgrau, hellgrau
126	108,00		Tonstein, Anhydritstein (27%), dunkelrotbraun bis dunkelgrau, hellgrau
127	108,80		Anhydritstein (47%), Tonstein, hellgrau, dunkelrotbraun

Höhenmaßstab: 1:20

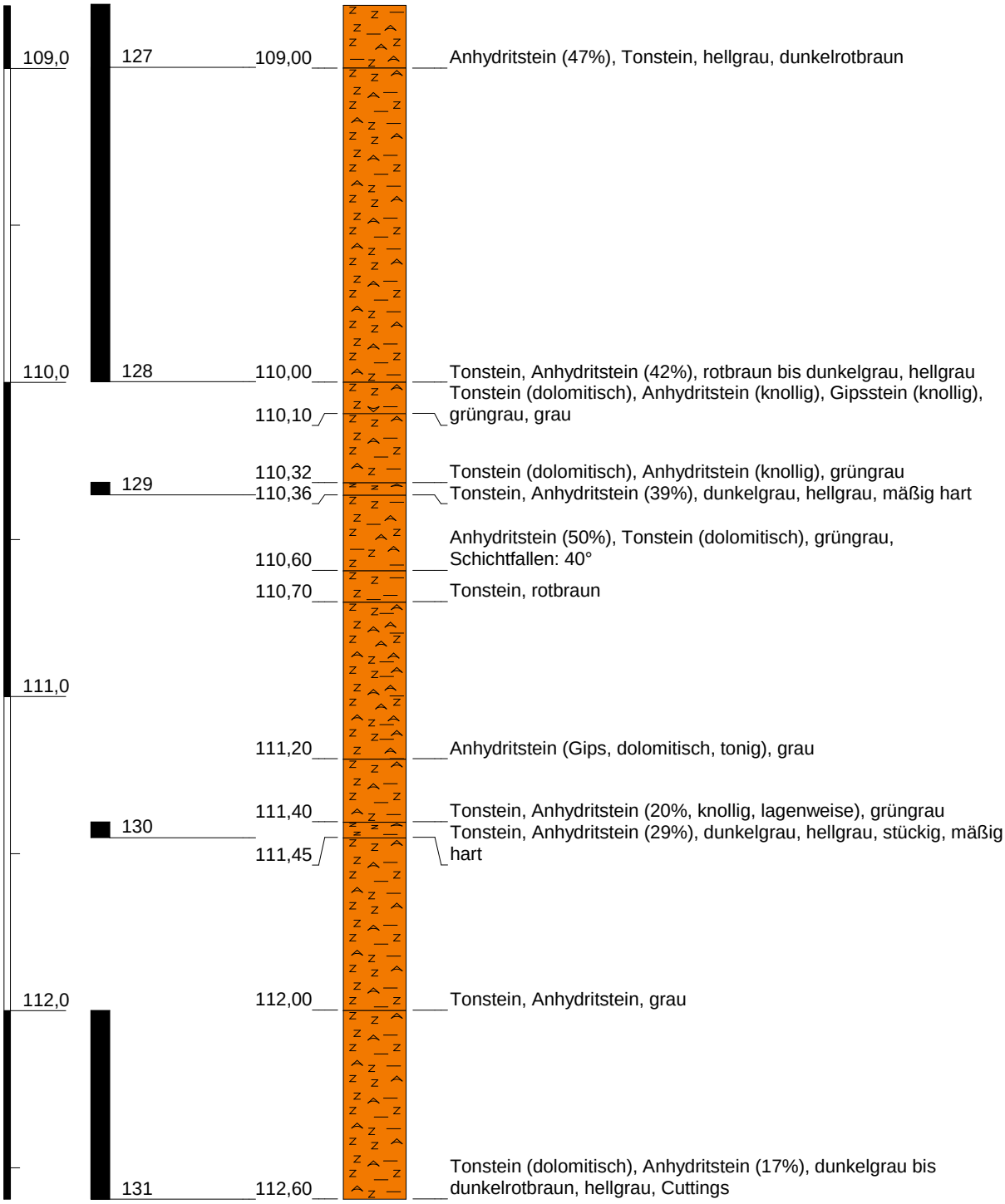
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

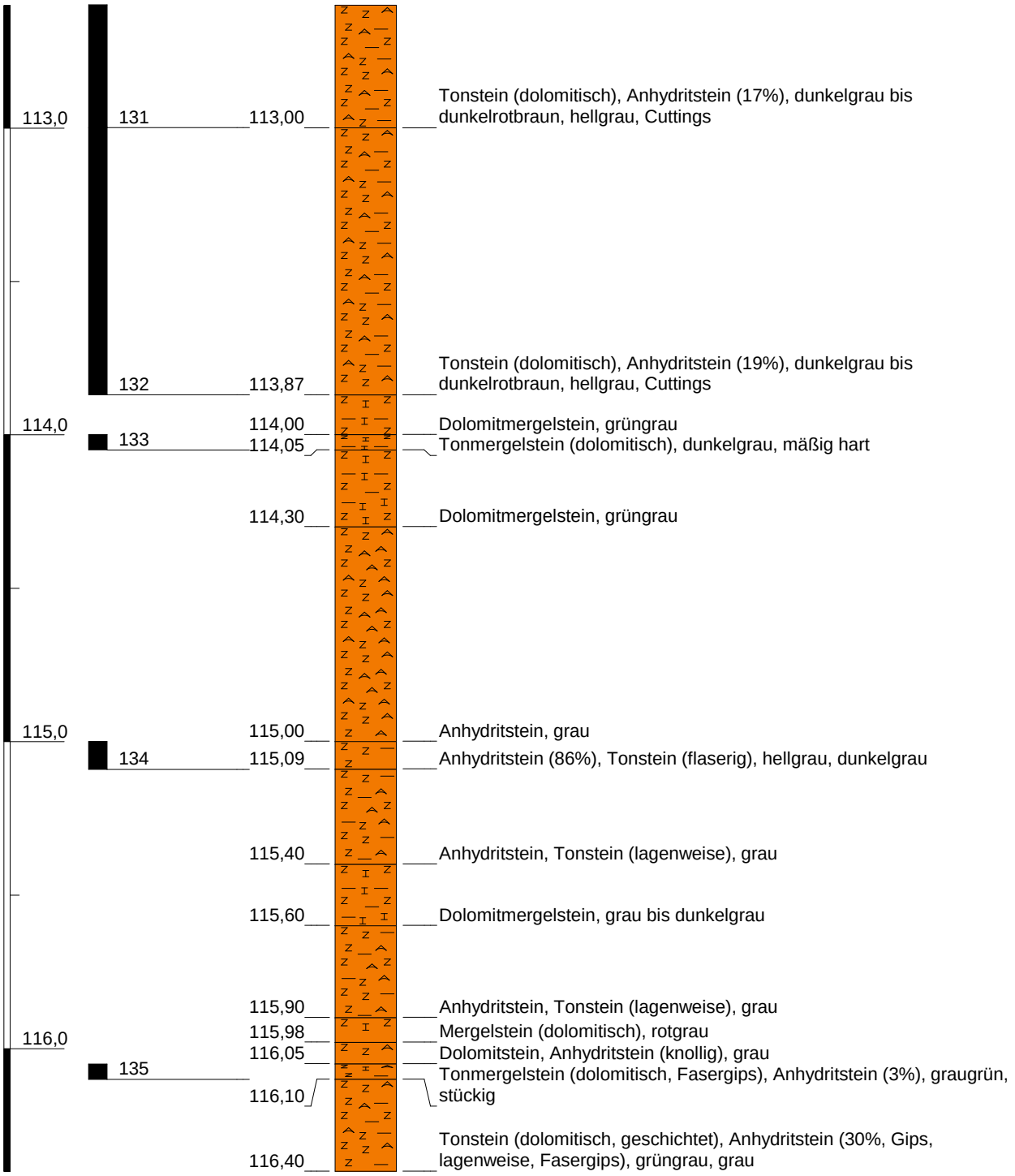
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 mNN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

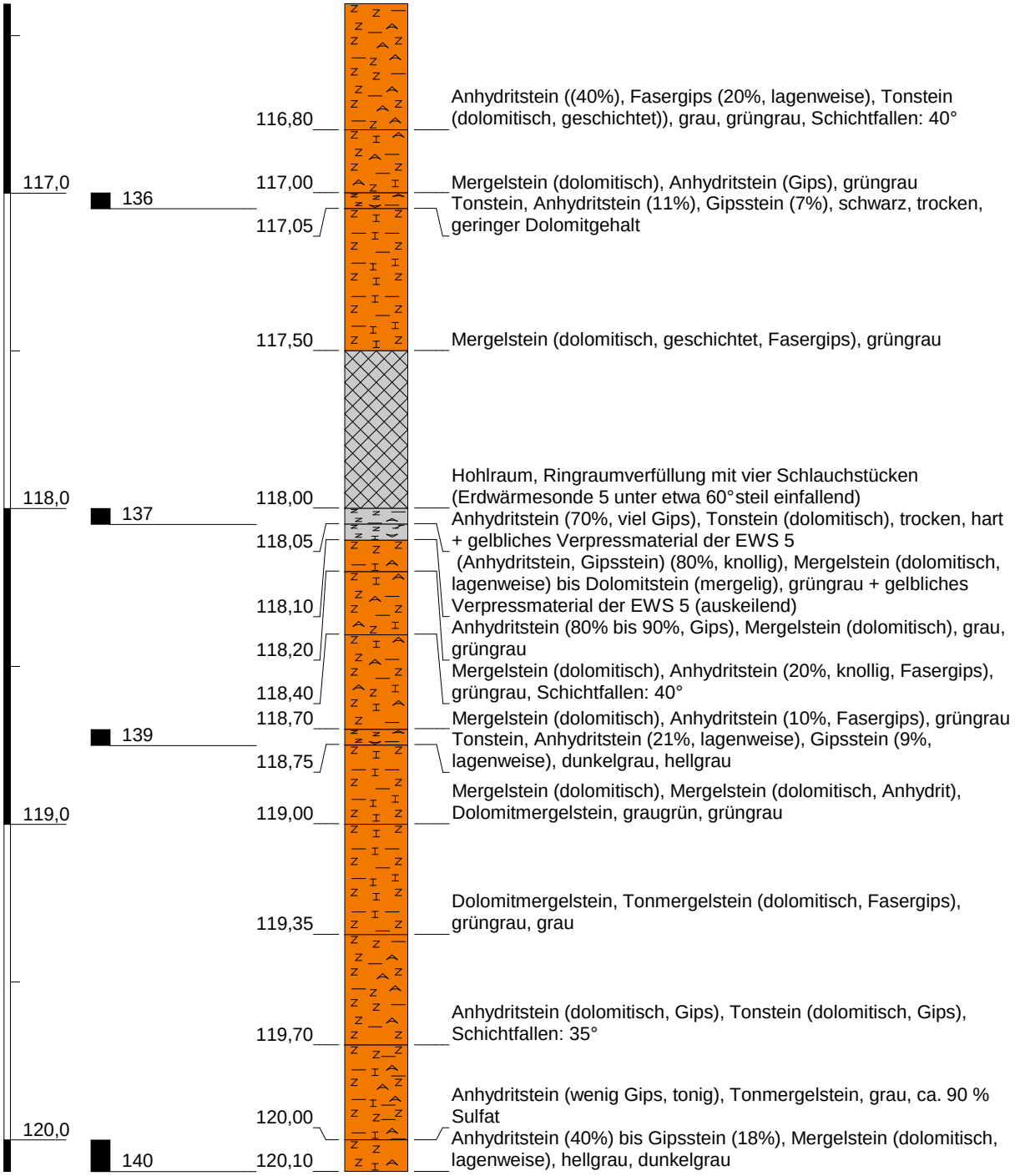
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

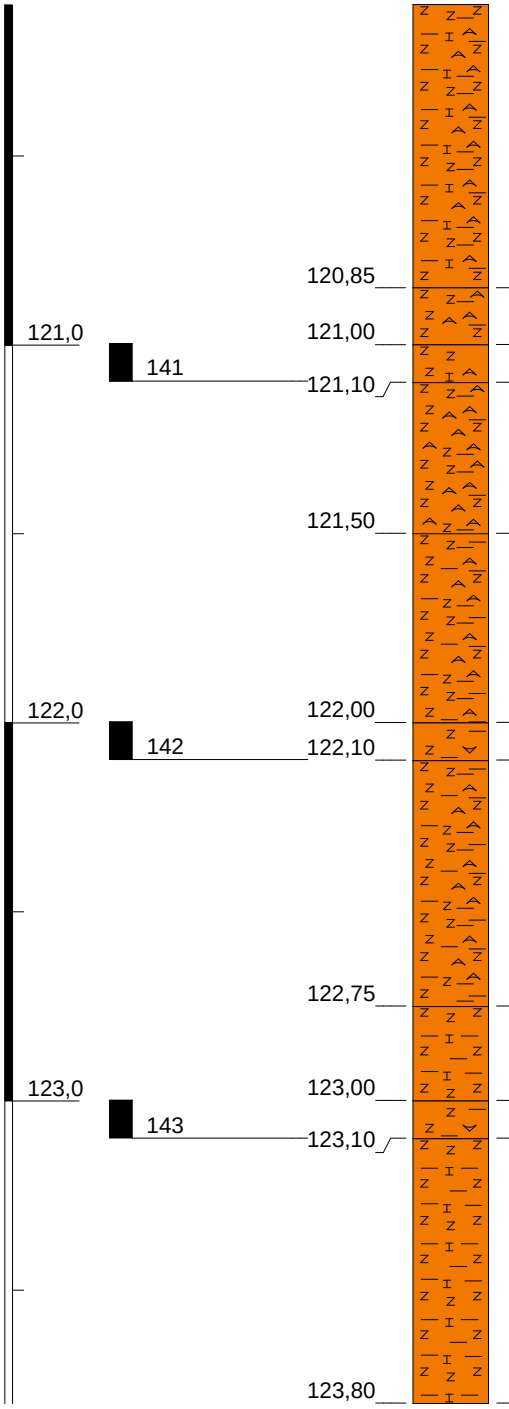
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



120,85			Anhydritstein (Gips, tonig), Tonmergelstein (dolomitisch, Anhydrit) (wechsellagernd), Schichtfallen: 30-35°
121,0	121,00		Anhydritstein (Gips, tonig), grau
	141	121,10	Anhydritstein (44%) bis Gipsstein (22%), Mergelstein (dolomitisch), hellgrau, dunkelgrau
		121,50	Anhydritstein (Gips, tonig), grau, ca. 90 % Sulfat
122,0	122,00		Anhydritstein (60%, Gips, tonig), Tonstein (dolomitisch), grau, rotbraun
	142	122,10	Gipsstein (49%, viel Anhydrit (8%)), Tonstein (lagenweise)
		122,75	Anhydritstein (Gips, Fasergips, tonig), Tonstein (dolomitisch), grau, rotbraun, ca. 60 % Sulfat
123,0	123,00		Tonstein (dolomitisch), Mergelstein (Anhydrit, dolomitisch, Fasergips), graugrün bis rotbraun, grüngrau, ca. 50 % Sulfat
	143	123,10	Gipsstein (53%, viel Anhydrit (9%)), Tonstein (lagenweise, Fasergips), hellgrau
		123,80	Tonstein (dolomitisch), Mergelstein (dolomitisch, Fasergips), graugrün bis rotbraun, grüngrau

Höhenmaßstab: 1:20

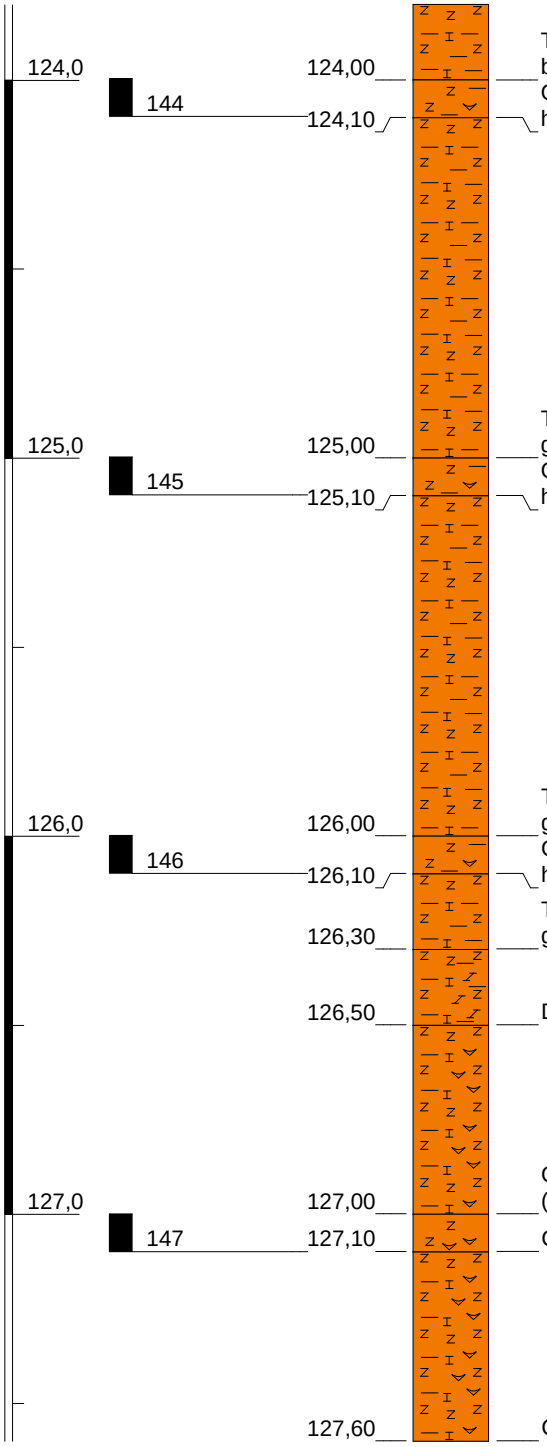
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



124,00	Tonstein (dolomitisch), Mergelstein (dolomitisch, Fasergips), graugrün bis rotbraun, grüngrau
124,10	Gipsstein (53%, Anhydrit (16%)), Tonstein (lagenweise, Fasergips), hellgrau
125,00	Tonstein (dolomitisch), Mergelstein (Anhydrit, dolomitisch, Fasergips), graugrün bis rotbraun, ca. 50 % Sulfat
125,10	Gipsstein (50%, viel Anhydrit (9%)), Tonstein (flaserig, Fasergips), hellgrau
126,00	Tonstein (dolomitisch), Mergelstein (viel Anhydrit, dolomitisch), graugrün bis rotbraun, grüngrau, ca. 50 % Sulfat
126,10	Gipsstein (70%), Tonstein (geschichtet, lagenweise, Fasergips), hellgrau, Unterer Anhydritspiegel bei 126,00 m
126,30	Tonstein (dolomitisch), Mergelstein (viel Anhydrit, dolomitisch), graugrün, grüngrau
126,50	Dolomitstein (tonig, Gips), Mergelstein (dolomitisch, Fasergips), grau
127,00	Gipsstein (80% bis 90%, dolomitisch), Dolomitmergelstein (lagenweise), grau
127,10	Gipsstein (94%, Fasergips), hellgrau
127,60	Gipsstein (80% bis 90%, dolomitisch), Dolomitmergelstein, grau

Höhenmaßstab: 1:20

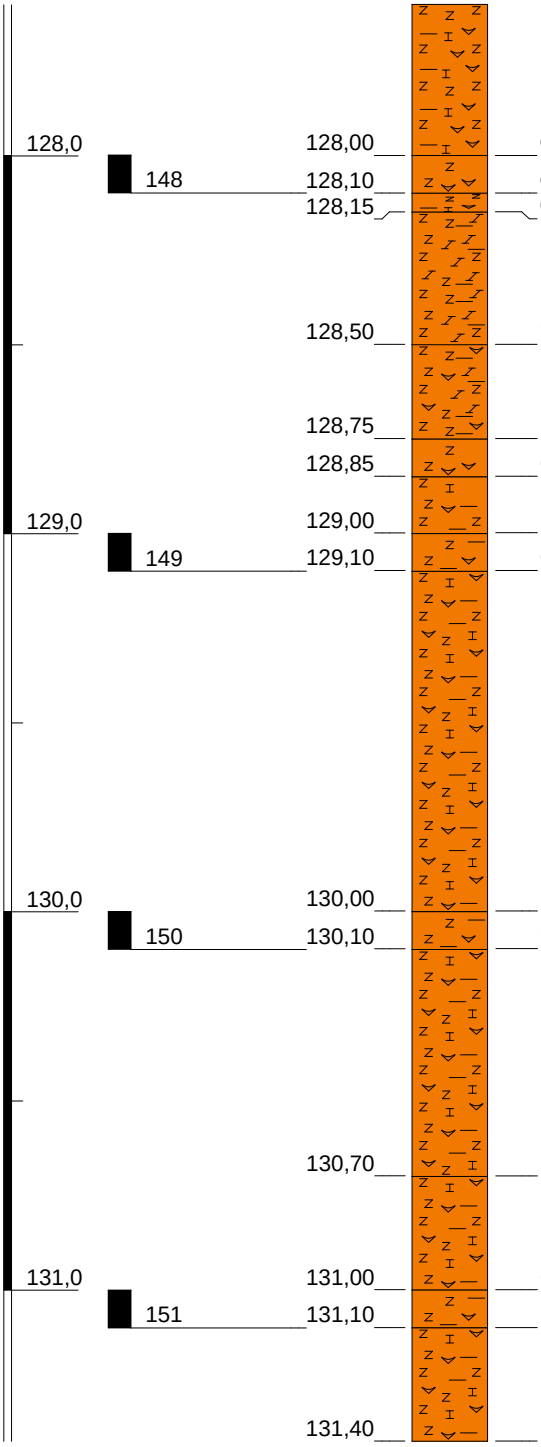
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



128,0		128,00	Gipsstein (80% bis 90%, dolomitisch), Dolomitmergelstein, grau
	148	128,10	Gipsstein (89%, dolomitisch), hellgrau
		128,15	Gipsstein (dolomitisch), Dolomitmergelstein, grau, ca. 80-90 % Gips
		128,50	Dolomitstein (tonig, Gips), grau, Gips ca. 2-3 %
		128,75	Dolomitstein (tonig), Gipsstein (40%, dolomitisch, Fasergips), grau
		128,85	Gipsstein (dolomitisch, knollig), grau
129,0		129,00	Dolomitmergelstein, Gipsstein (dolomitisch, knollig, Fasergips), grau
	149	129,10	Gipsstein (59%), Tonstein (lagenweise), hellgrau, dunkelgrau
130,0		130,00	Dolomitmergelstein, Gipsstein (dolomitisch, knollig, Fasergips), grau
	150	130,10	Gipsstein (72%), Tonstein, hellgrau, dunkelgrau
		130,70	Dolomitmergelstein, Gipsstein (20%, dolomitisch, knollig, Fasergips)
131,0		131,00	Dolomitmergelstein (geschichtet), Gipsstein (40% bis 60%, dolomitisch, Fasergips), grau
	151	131,10	(Gipsstein (48%), Tonstein) (wechsellagernd), hellgrau, dunkelgrau
		131,40	Dolomitmergelstein (Gips), Gipsstein (40% bis 60%, dolomitisch, Fasergips), grau

Höhenmaßstab: 1:20

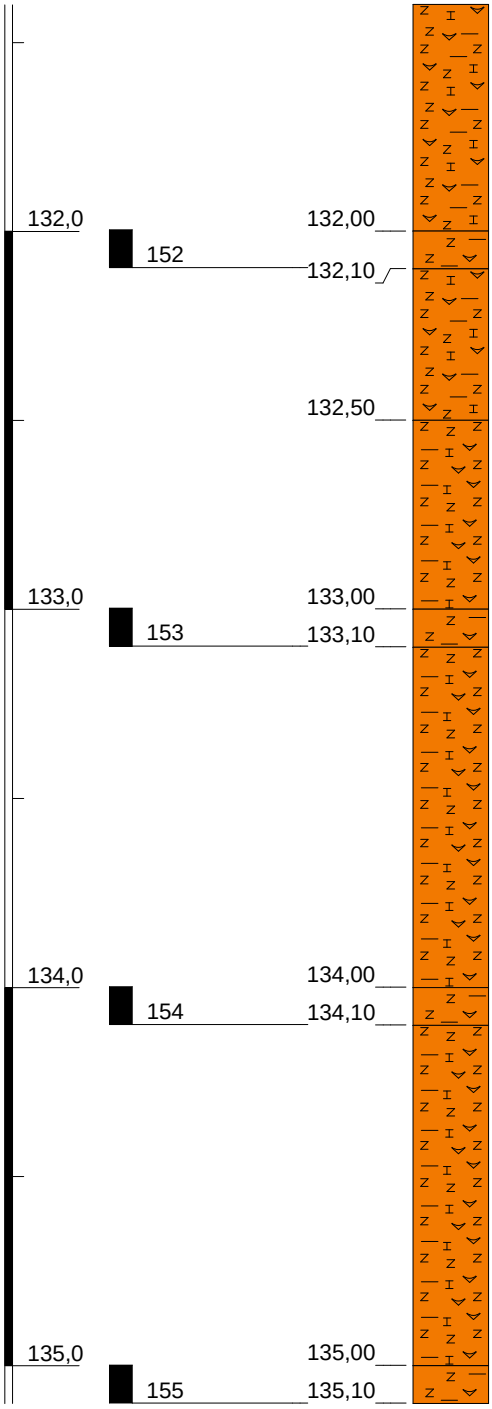
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**			
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**			
Auftraggeber:	Stadt Staufen		Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau		Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]		Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009	Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



132,0		132,00	Dolomitmergelstein (Gips), Gipsstein (40% bis 60%, dolomitisch, Fasergips), grau
	152	132,10	Gipsstein (78%), Tonstein (lagenweise, Fasergips), hellgrau, dunkelgrau
		132,50	Dolomitmergelstein, Gipsstein (40% bis 60%, dolomitisch, Fasergips), grau
133,0		133,00	Gipsstein (70% bis 80%, dolomitisch, Fasergips), Dolomitmergelstein, grau, Schichtfallen: 40°
	153	133,10	Gipsstein (86%), Tonstein (wenig lagenweise), hellgrau, dunkelgrau
134,0		134,00	Gipsstein (70% bis 80%, dolomitisch), Dolomitmergelstein (Fasergips), grau, Schichtfallen: 40°
	154	134,10	Gipsstein (87%), Tonstein (wenig lagenweise), hellgrau, dunkelgrau
135,0		135,00	Gipsstein (70% bis 80%, dolomitisch), Dolomitmergelstein, grau, Schichtfallen: 40°
	155	135,10	Gipsstein (95%, knollig), Tonstein (sehr wenig lagenweise), hellgrau

Höhenmaßstab: 1:20

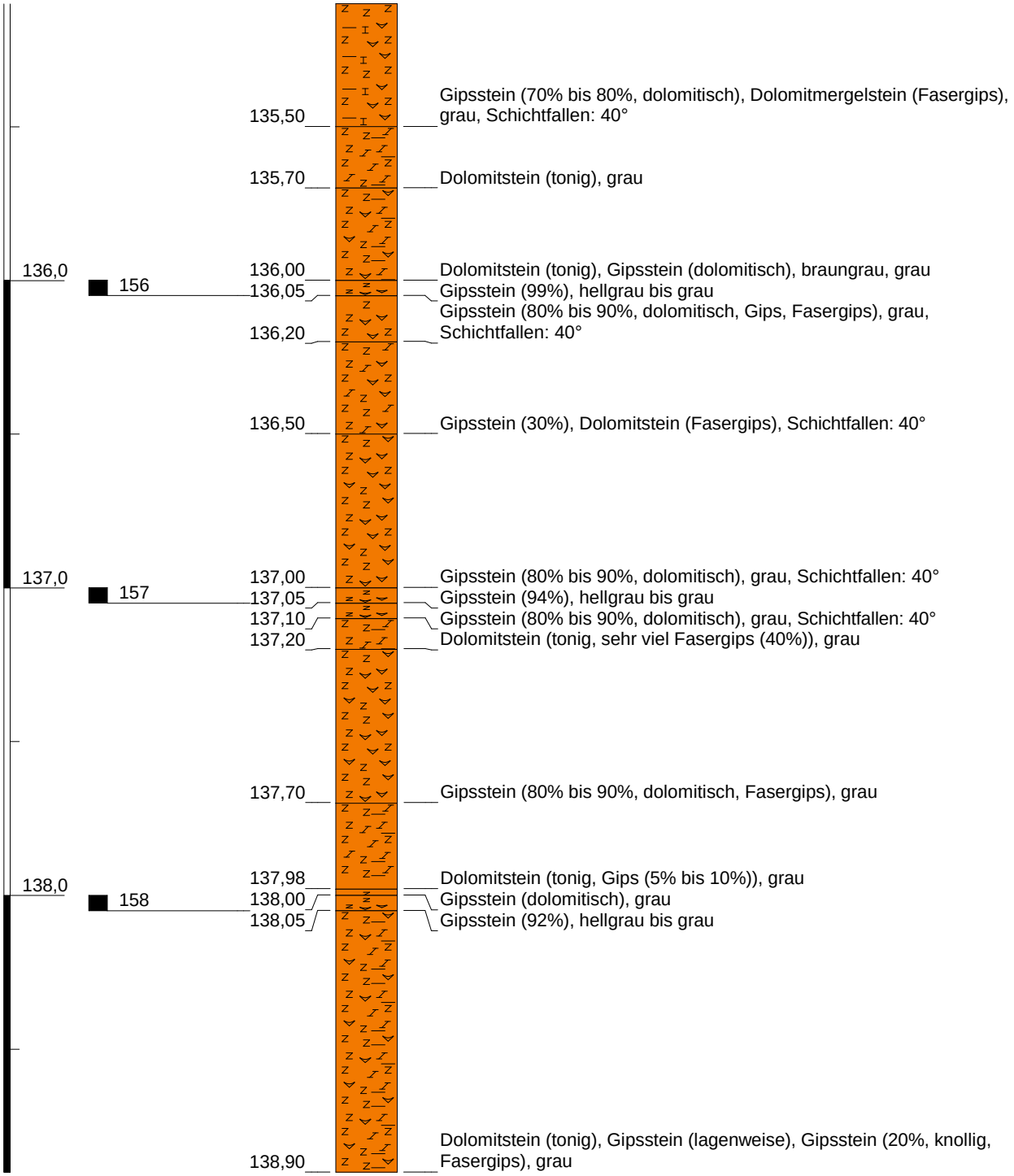
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009	Anlage 5.6 b	Endtiefe: 163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

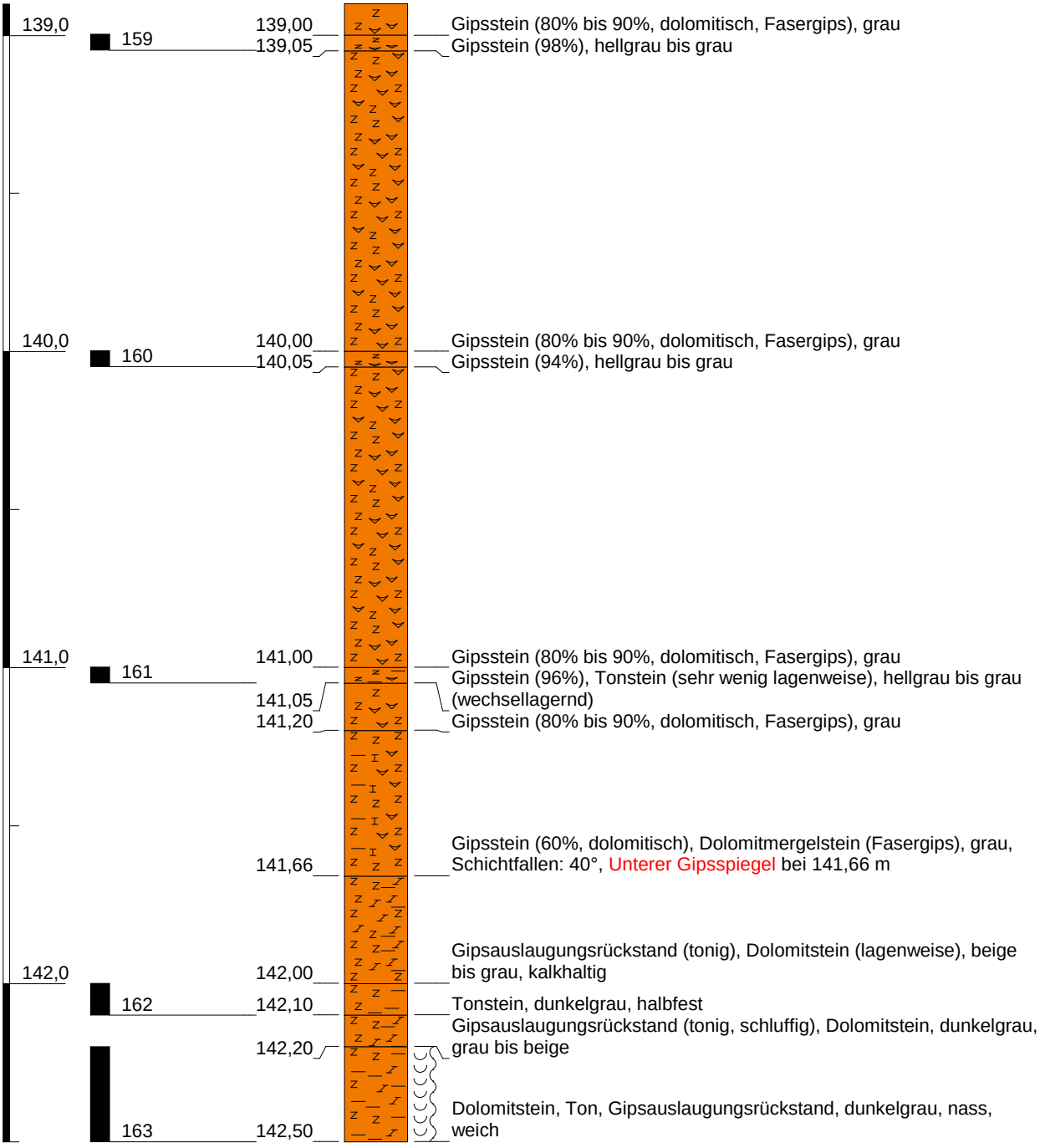
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

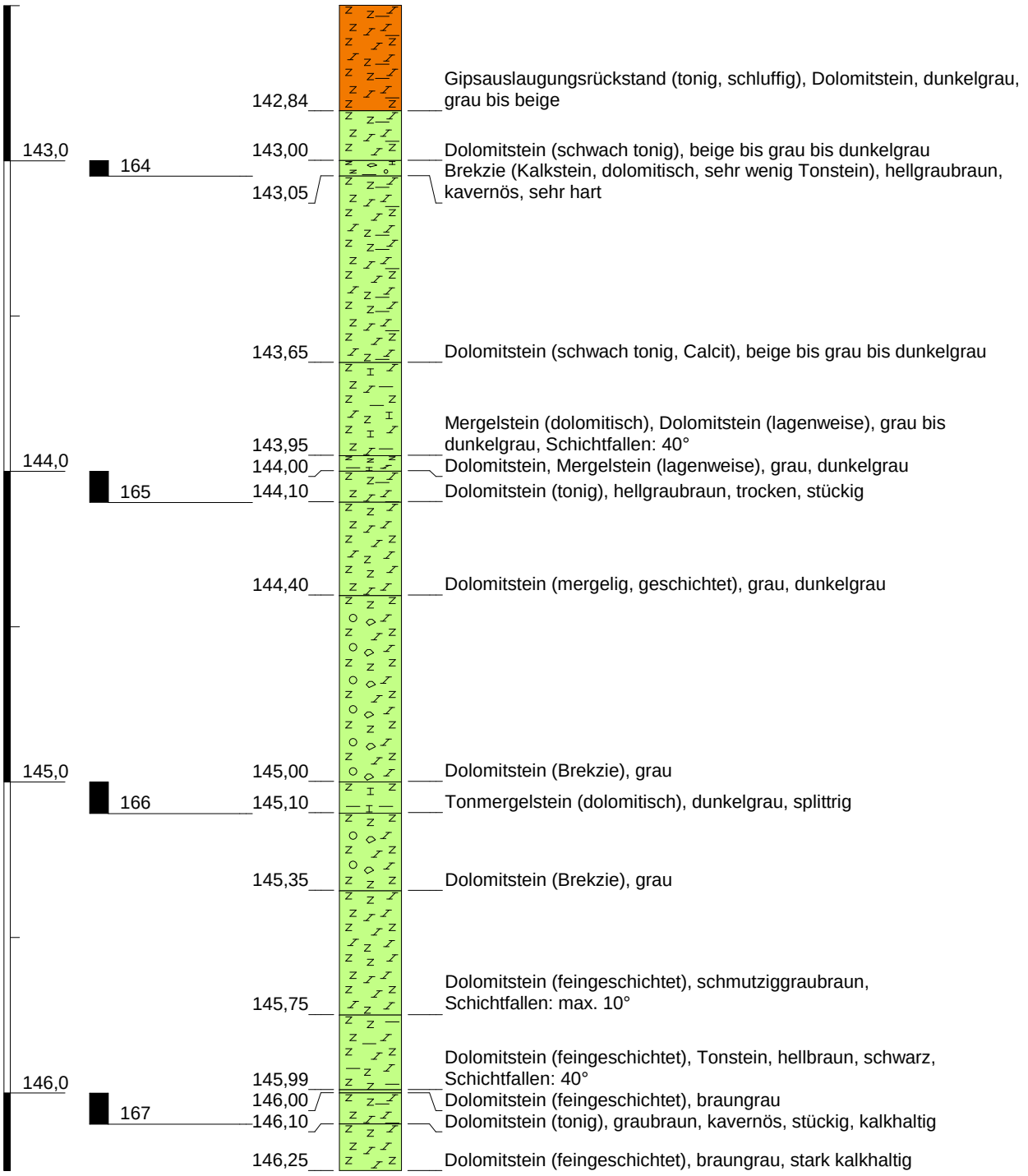
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

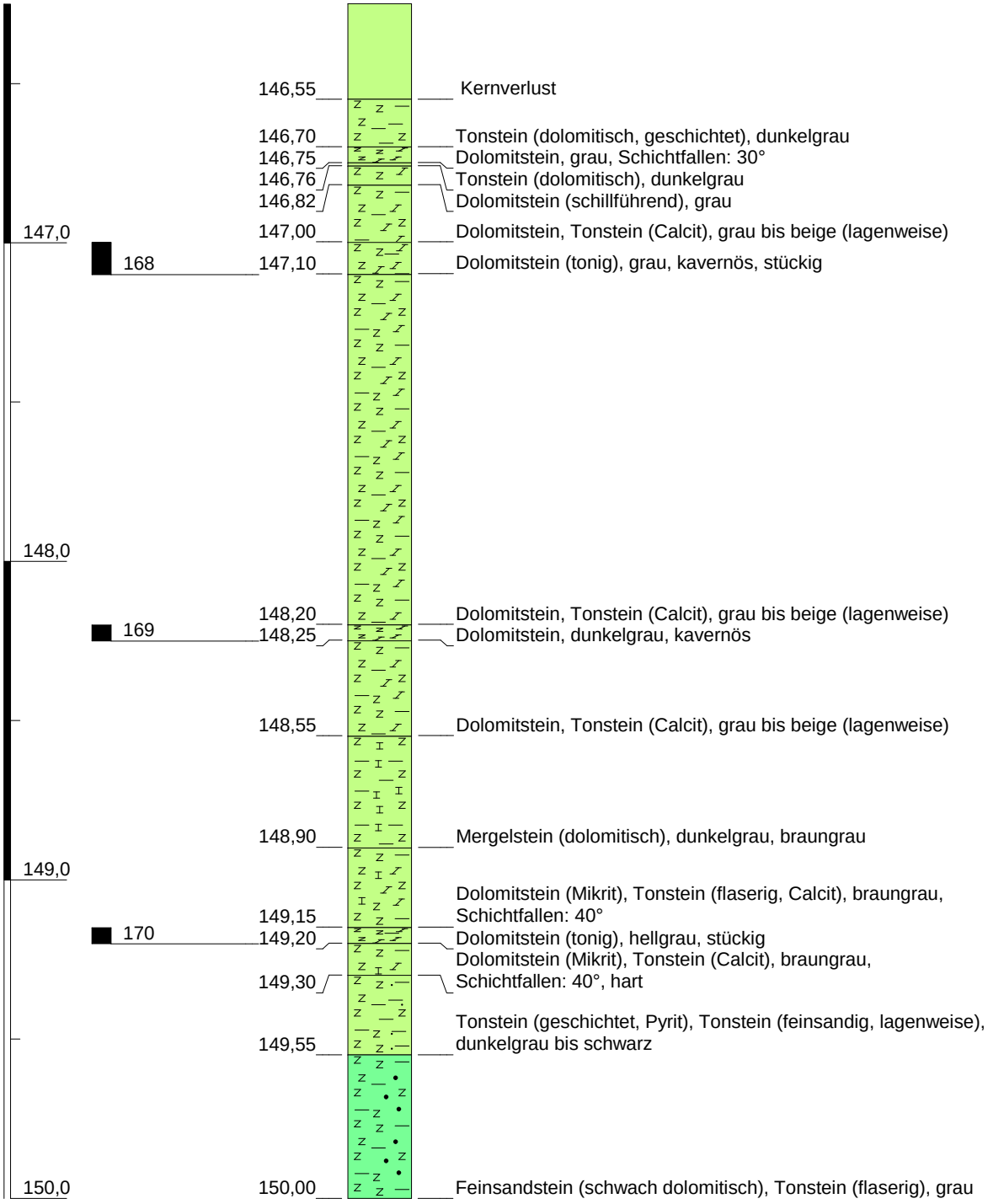
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

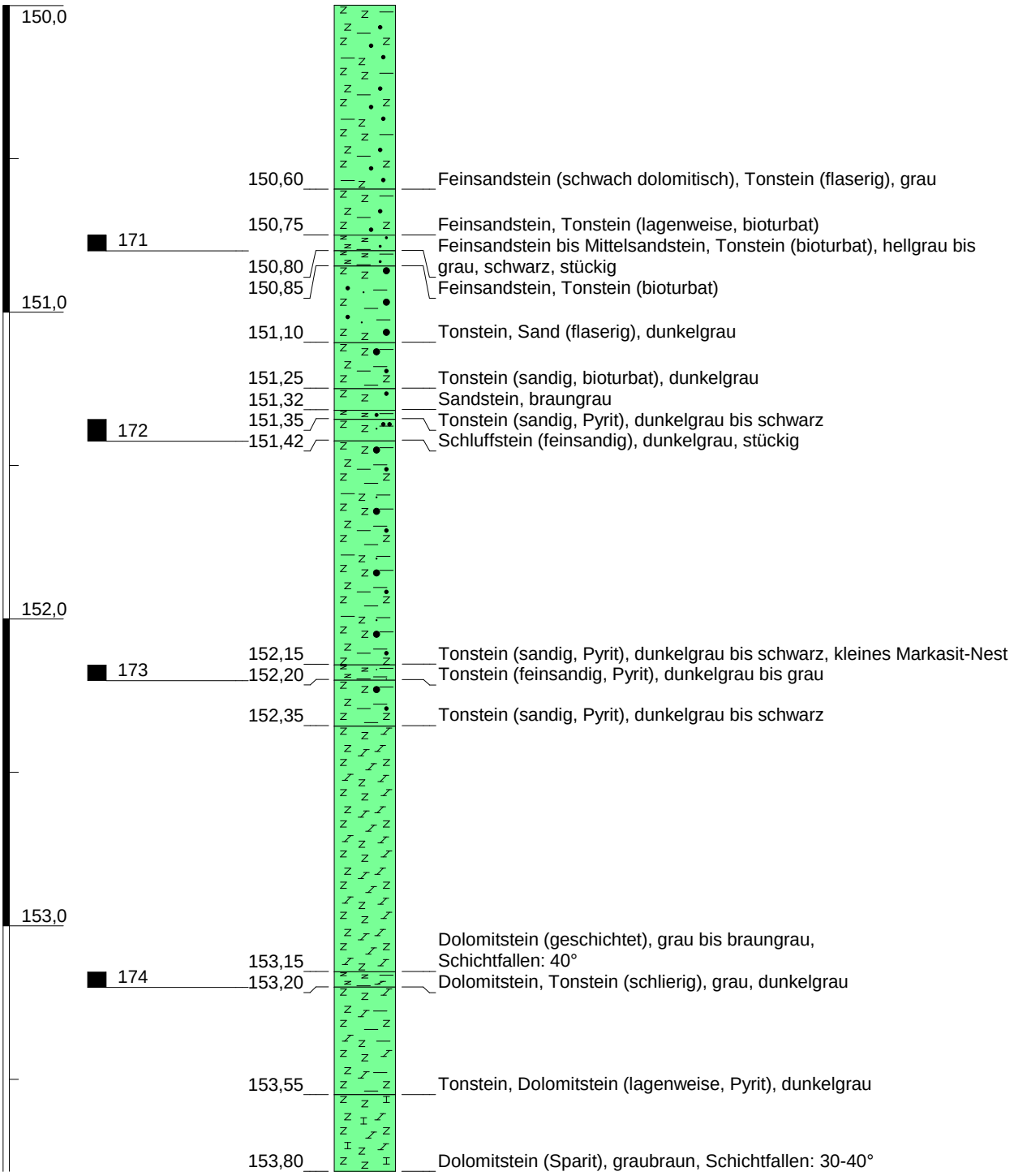
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

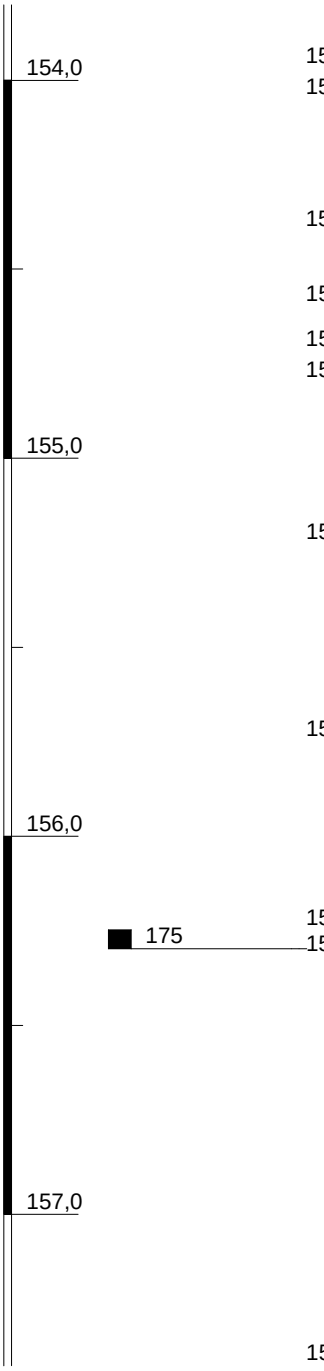
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



153,97	Dolomitstein (Mikrit, Calcit), graubraun
154,05	Dolomitstein (Mikrit), Tonstein (lagenweise), graubraun, braunschwarz
154,40	Dolomitstein (geschichtet), gelbbraun bis braungrau
154,60	Dolomitstein (schillführend), gelbbraun bis grau
154,72	Dolomitstein, Tonstein, grau, dunkelgrau
154,80	Dolomitstein, Tonstein, Ton, grau
155,23	Dolomitstein, grau, gelbgrau
155,75	Dolomitstein (Mikrit, tonig, Hornstein), braungrau
156,25	Dolomitstein (feinkristallin), weissgrau bis hellbeige, Schichtfallen: 30-40°
156,30	Dolomitstein (Hornstein), hellgrau, stückig
157,40	Dolomitstein (feinkristallin, Hornstein, Calcit, Sphalerit), weissgrau bis hellbeige

Höhenmaßstab: 1:20

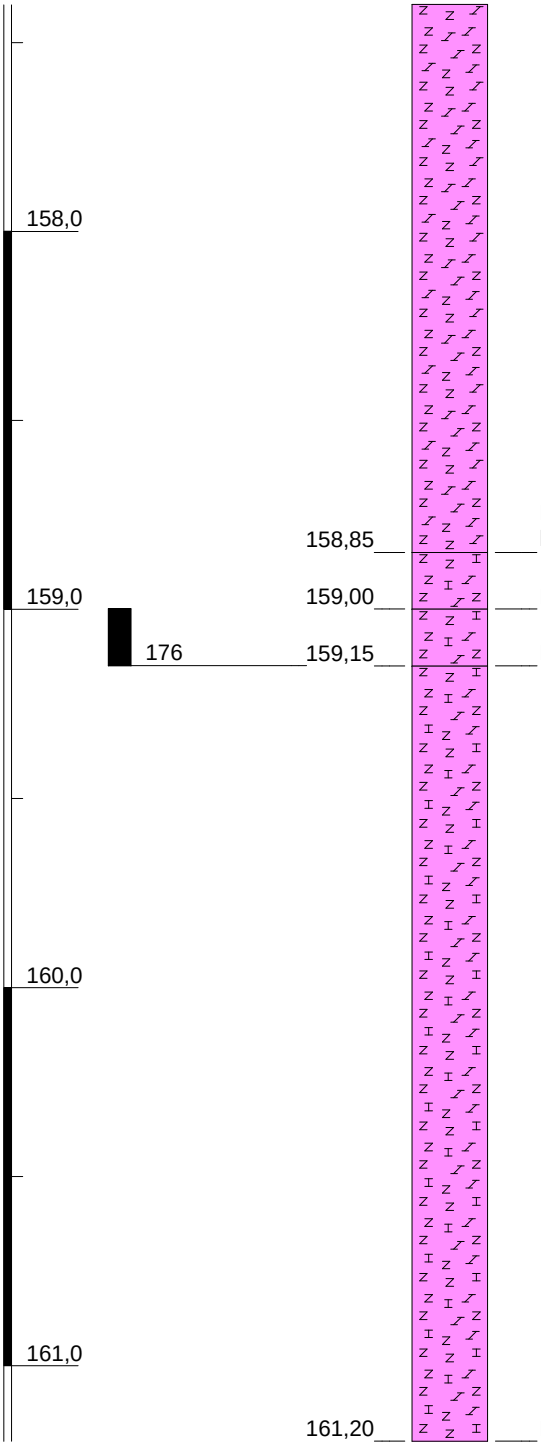
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009	Anlage 5.6 b	Endtiefe: 163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



158,85		Dolomitstein (feinkristallin, Hornstein, Calcit, Sphalerit), weissgrau bis hellbeige
159,00		Dolomitstein (Sparit), gelbbraun
159,15		Dolomitstein (Sparit, Hornstein, Calcit), hellgraubraun
161,20		Dolomitstein (Sparit, Calcit, Hornstein, Sphalerit)

Höhenmaßstab: 1:20

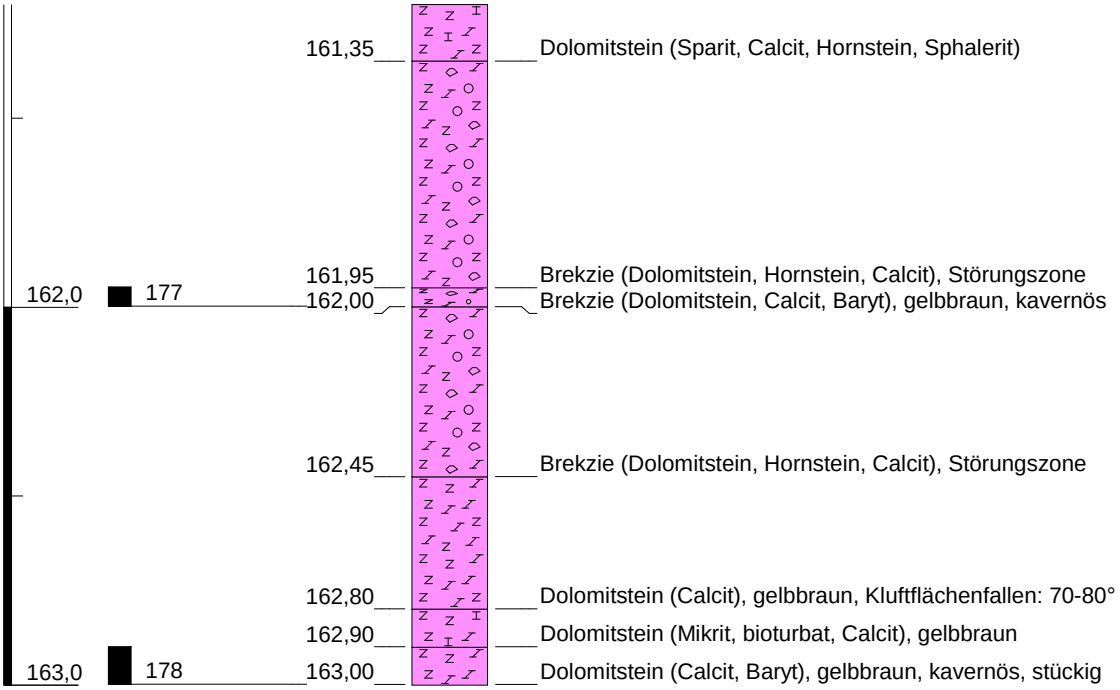
Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**			
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**			
Auftraggeber:	Stadt Staufen		Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau		Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]		Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009	Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Erkundungsbohrung 2

m u. GOK (ca. 286 m NN)



Höhenmaßstab: 1:20

Aktenzeichen: 94-4763//10-563

Projekt:	**Hebungserkundung Staufen**		
Bohrung:	**Erkundungsbohrung 2**		
Auftraggeber:	Stadt Staufen	Rechtswert:	[redacted]
Bohrfirma:	H. Anger's Söhne Hessisch-Lichtenau	Hochwert:	[redacted]
Bearbeiter:	[redacted]	Ansatzhöhe:	ca. 286 m NN
Datum:	04.12.2009 Anlage 5.6 b	Endtiefe:	163,00

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Zeichenerklärung

Anthropogene Aufschüttung (yA)

Neumagen-Schotter (gg)

Fließerde (fl)

Schilfsandstein-Formation (km2)

Oberer Gipskeuper (km1o)

Mittlerer Gipskeuper (km1m)

Unterer Gipskeuper (km1u)

Oberer Lettenkeuper (ku2)

Unterer Lettenkeuper (ku1)

Trigonodusdolomit (mo2D)

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763//10-563
Anlage: 5.6 b

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

0-2 m Verschachtung, kein Kerngewinn

2 m
3 m
4 m
5 m

3 m
4 m
5 m
6 m

6 m
7 m
8 m
9 m

7 m
8 m
9 m
10 m

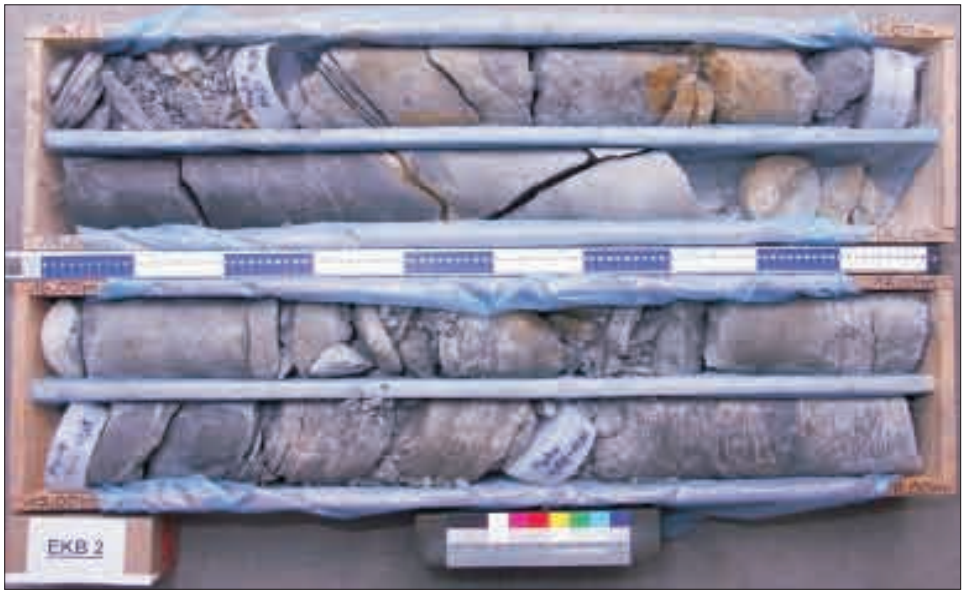
INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

10 m
11 m
12 m
13 m

11 m
12 m
13 m
14 m

14 m
15 m
16 m
17 m

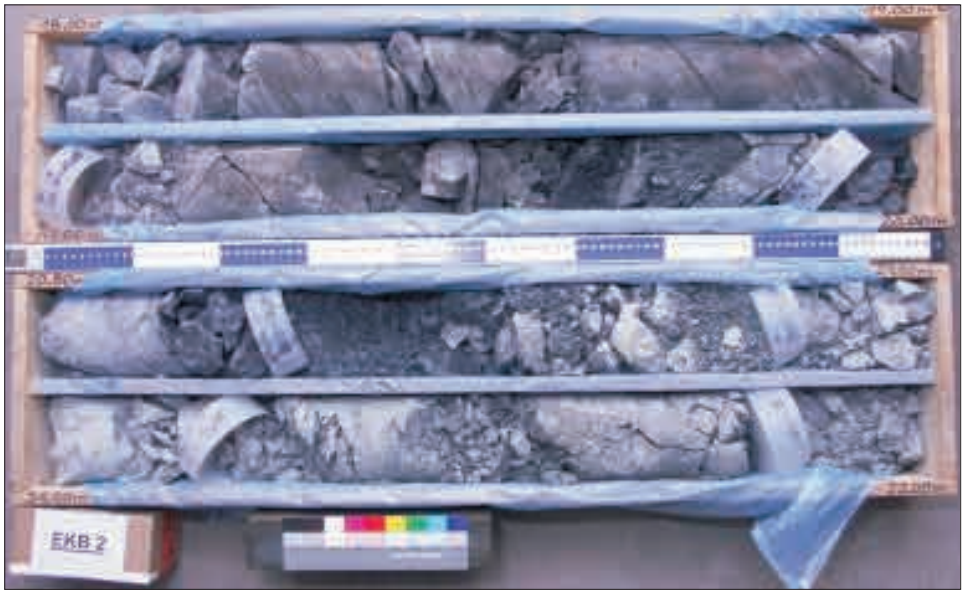


15 m
16 m
17 m
18 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

18 m – 19 m



19 m – 20 m

20 m – 21 m

21 m – 22 m

22 m – 23 m

23 m – 24 m

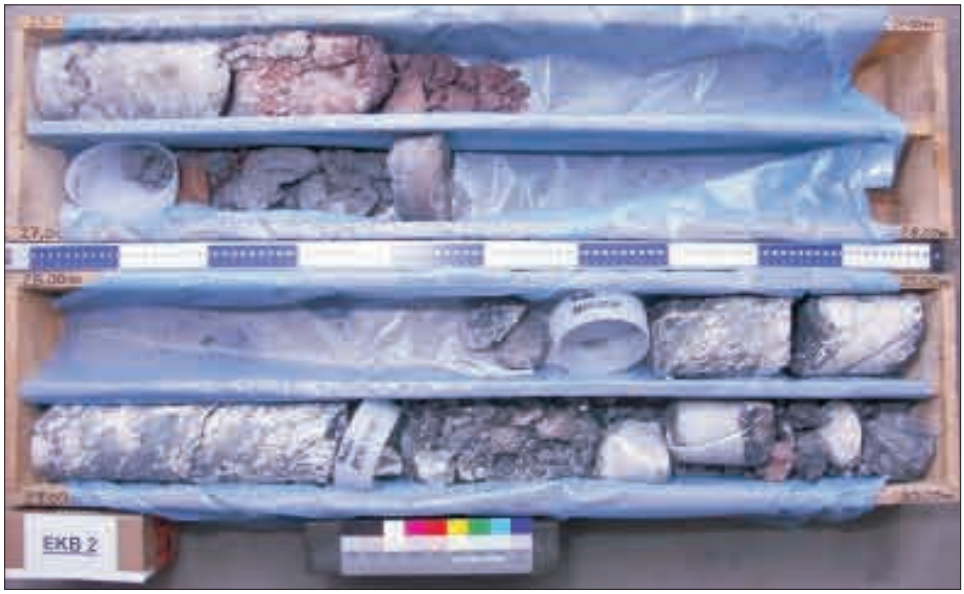
24 m – 25 m

25 m – 26 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

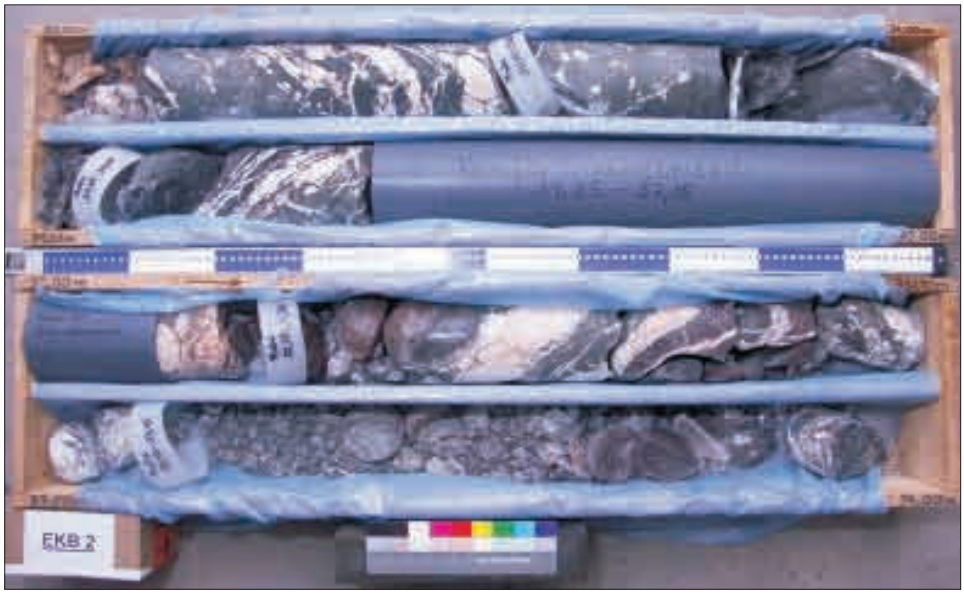
Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

26 m 27 m 28 m 29 m



27 m 28 m 29 m 30 m

30 m 31 m 32 m 33 m



31 m 32 m 33 m 34 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

34 m

35 m

36 m

37 m

35 m

36 m

37 m

38 m

38 m

39 m

40 m

41 m

39 m

40 m

41 m

42 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

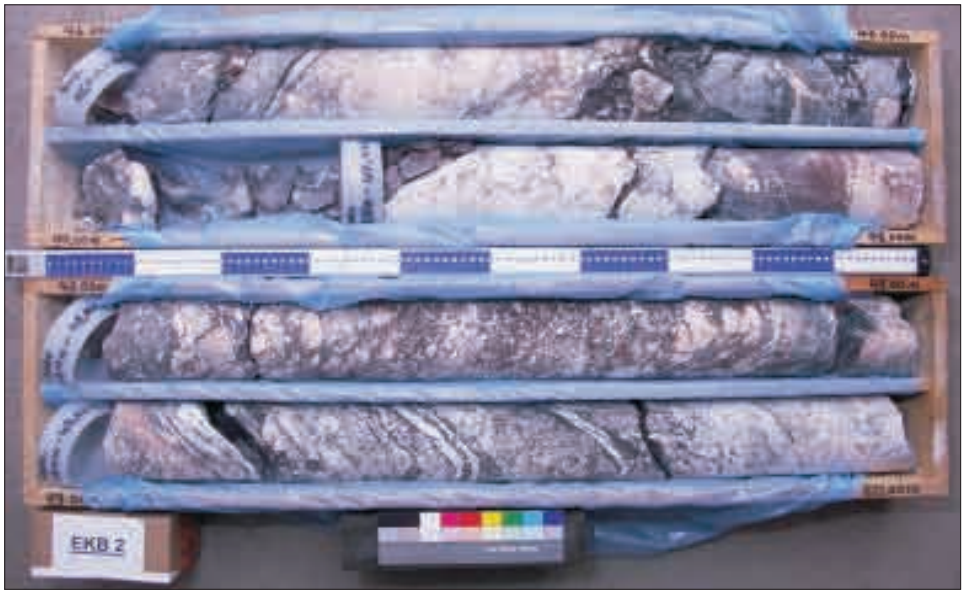
42 m 43 m

43 m 44 m

44 m 45 m

45 m 46 m

46 m 47 m



47 m 48 m

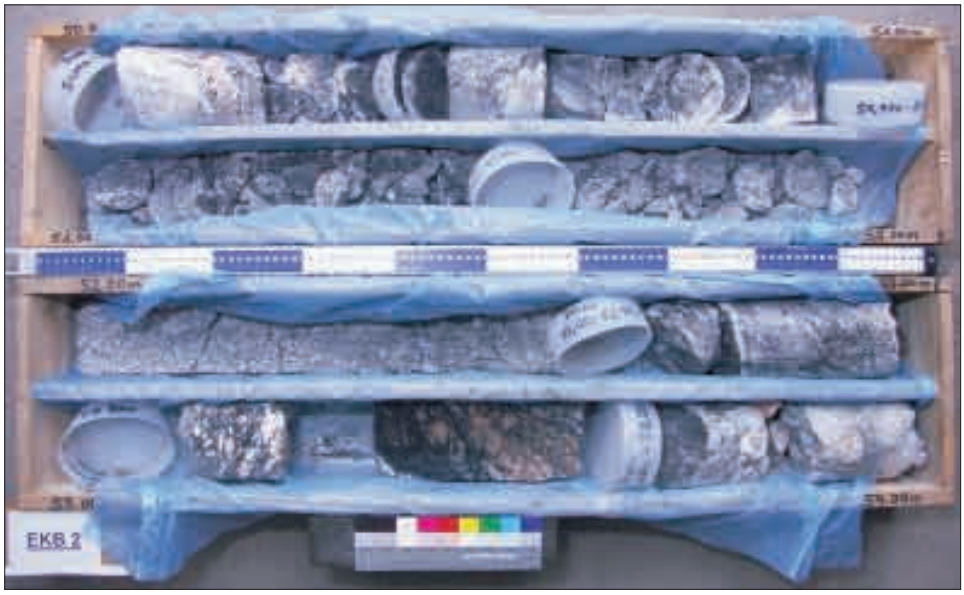
48 m 49 m

49 m 50 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

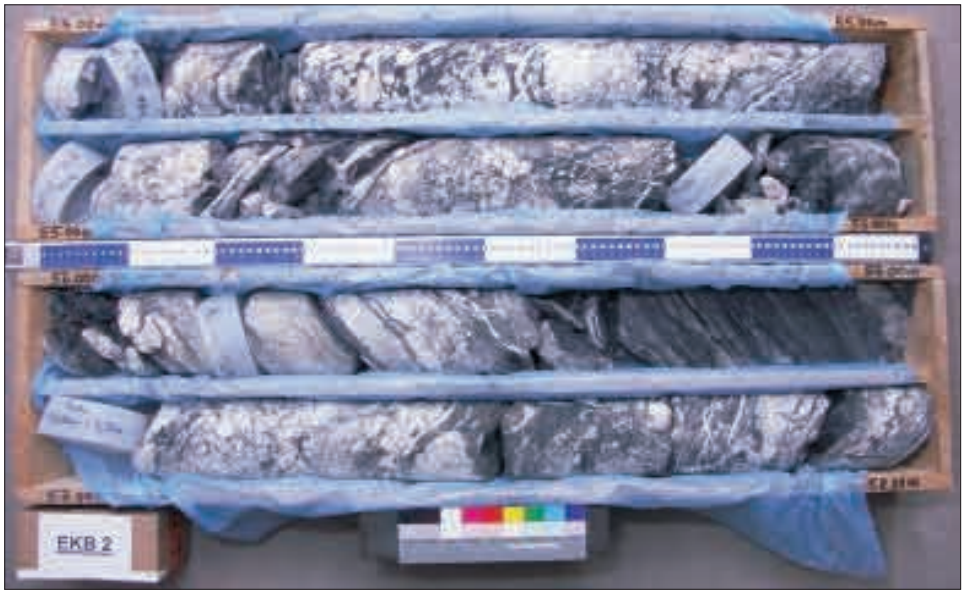
Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

50 m
51 m
52 m
53 m



51 m
52 m
53 m
54 m

54 m
55 m
56 m
57 m

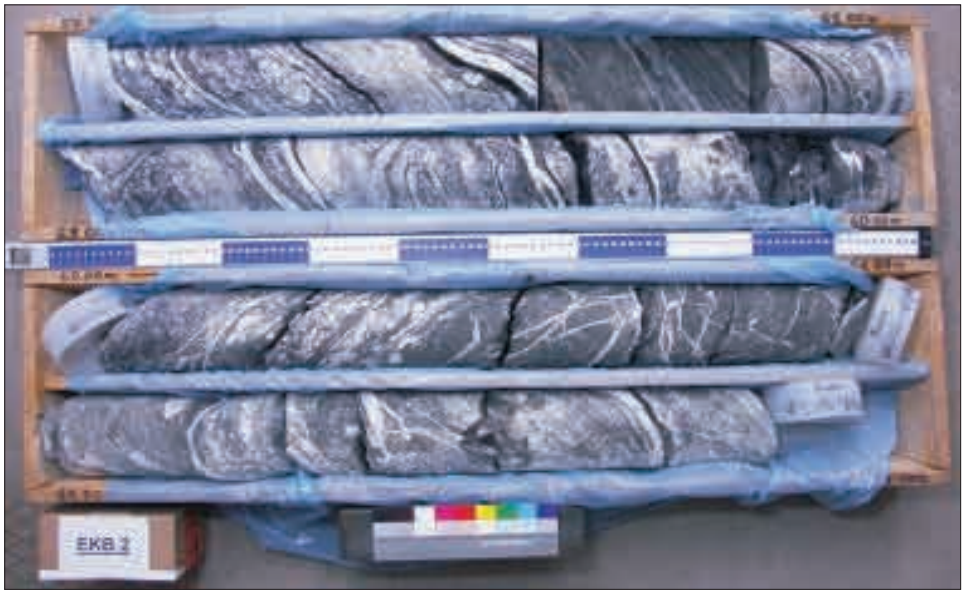


55 m
56 m
57 m
58 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

58 m 59 m



59 m 60 m

60 m 61 m

61 m 62 m

62 m 63 m

63 m 64 m

64 m 65 m

65 m 66 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

66 m
67 m
68 m
69 m

67 m
68 m
69 m
70 m

70 m
71 m
72 m
73 m

71 m
72 m
73 m
74 m

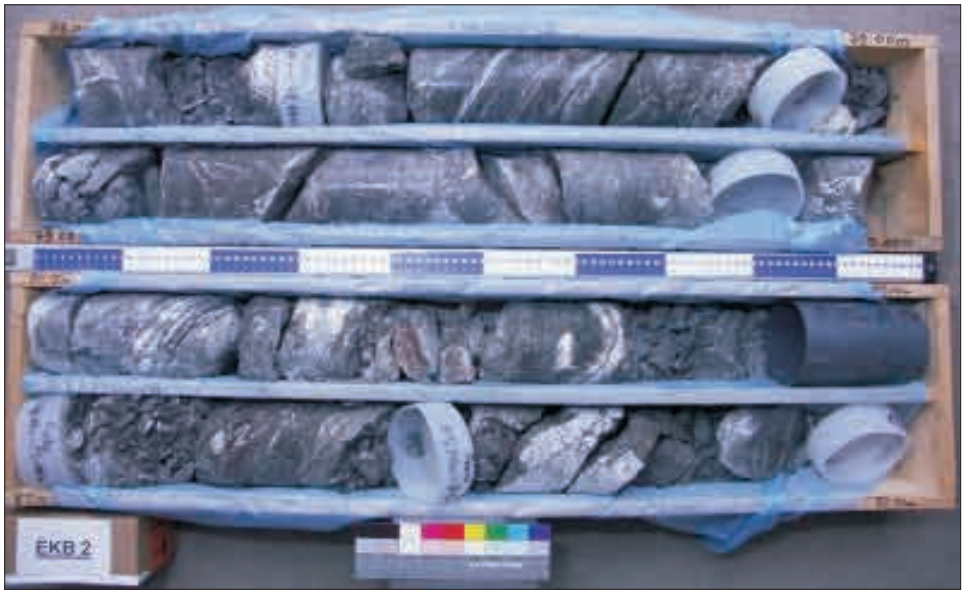
INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

74 m
75 m
76 m
77 m

75 m
76 m
77 m
78 m

78 m
79 m
80 m
81 m



79 m
80 m
81 m
82 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

82 m
83 m
84 m
85 m

83 m
84 m
85 m
86 m

86 m
87 m
88 m
89 m

87 m
88 m
89 m
90 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

zwischen 89,6-97,8 m Vollbohrung, kein Kerngewinn

90 m

91 m

91 m

92 m

96 m

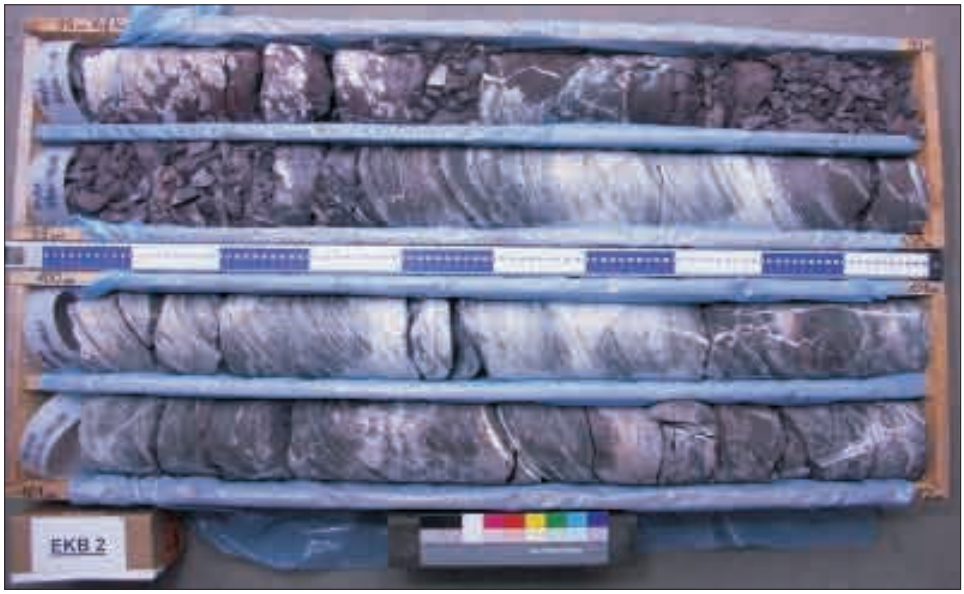
97 m

97 m

98 m

98 m

99 m



99 m

100 m

100 m

101 m

101 m

102 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

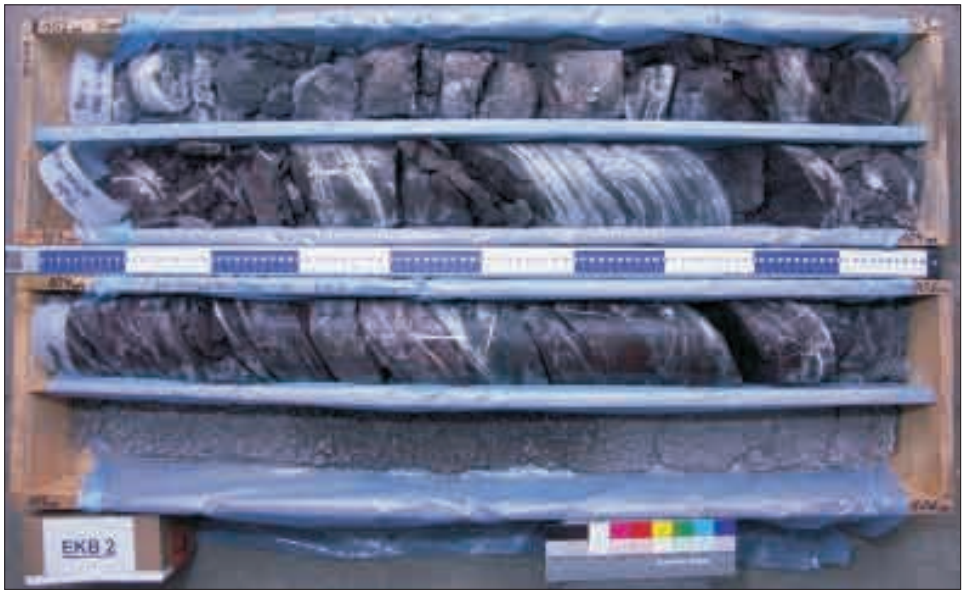
Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

102 m

103 m

104 m

105 m



103 m

104 m

105 m

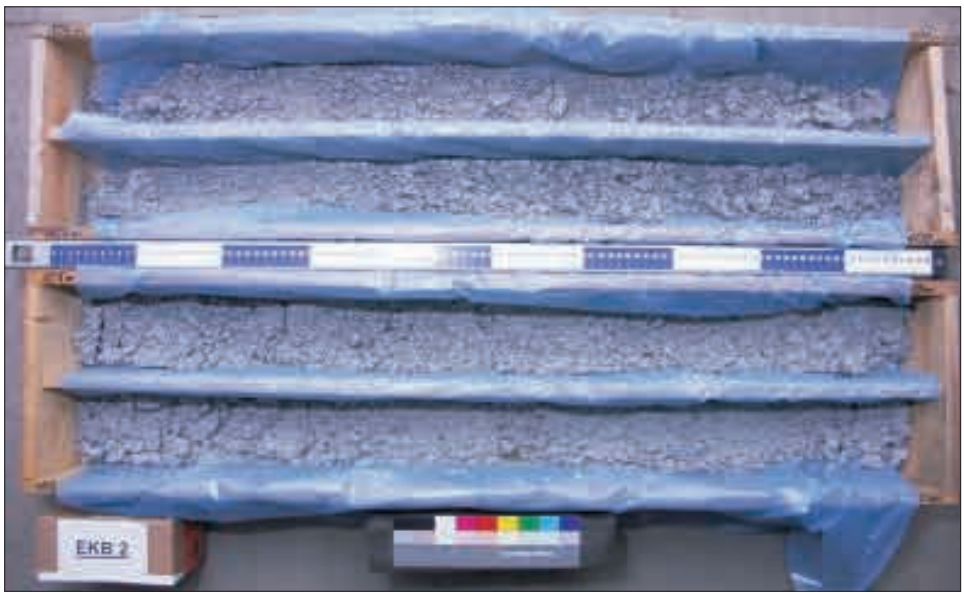
106 m

106 m

107 m

108 m

109 m



107 m

108 m

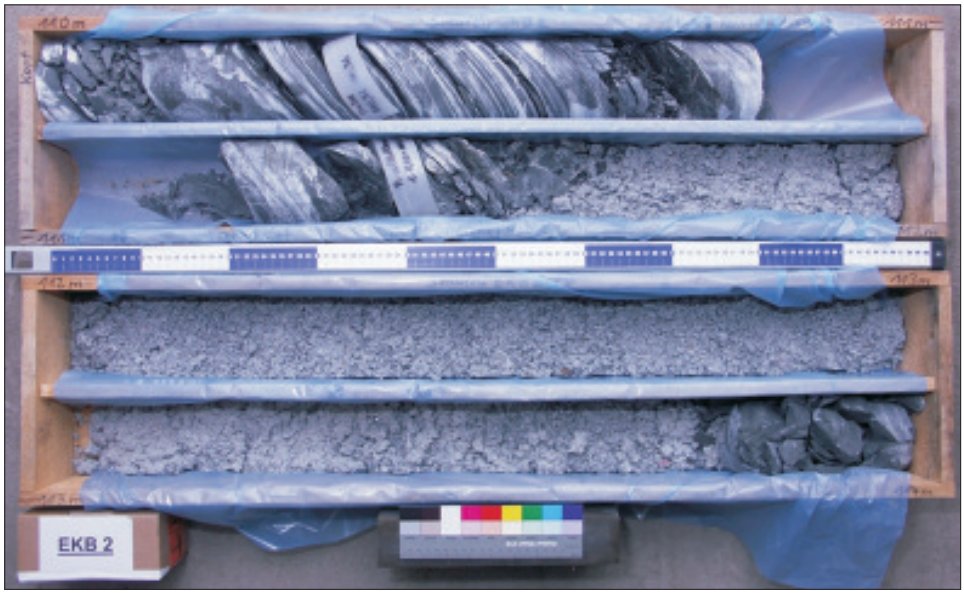
109 m

110 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

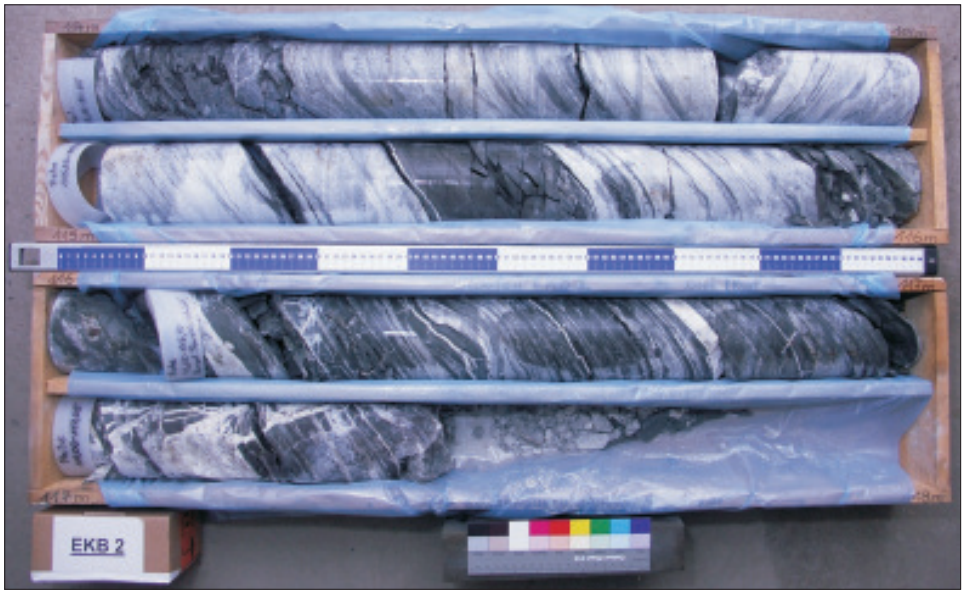
Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

110 m
111 m
112 m
113 m



111 m
112 m
113 m
114 m

114 m
115 m
116 m
117 m



115 m
116 m
117 m
118 m

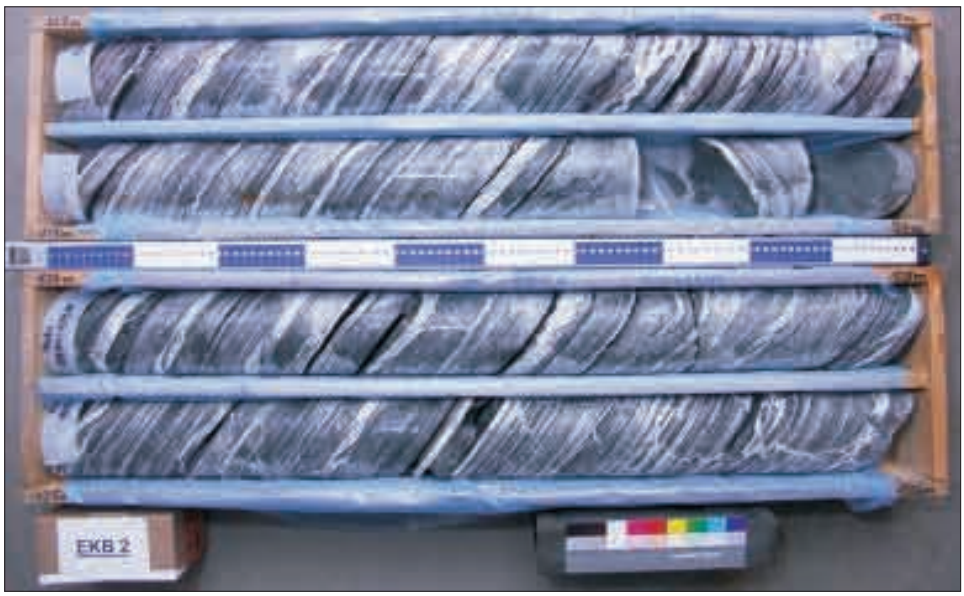
INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

118 m
119 m
120 m
121 m

119 m
120 m
121 m
122 m

122 m
123 m
124 m
125 m

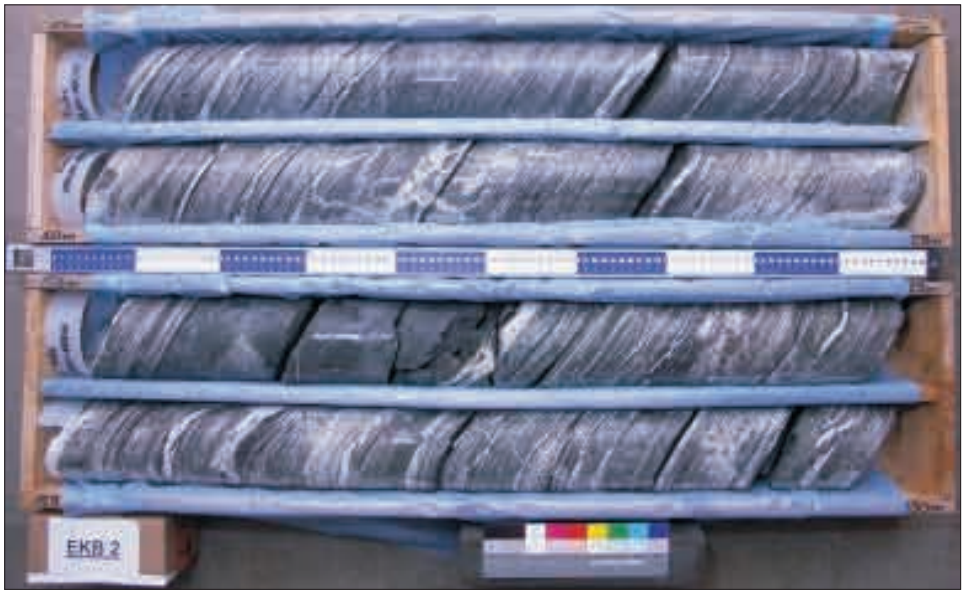


123 m
124 m
125 m
126 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

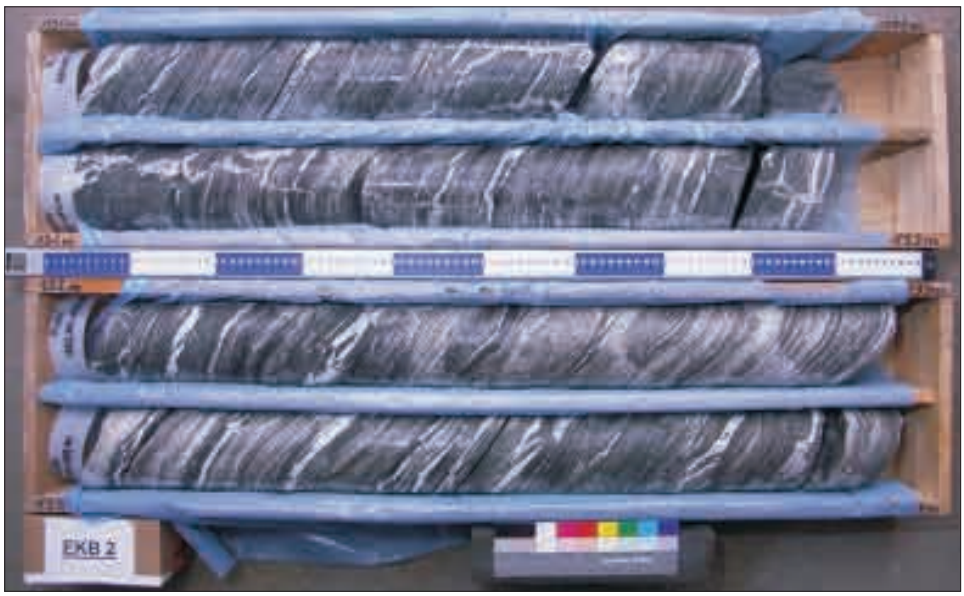
Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

126 m
127 m
128 m
129 m



127 m
128 m
129 m
130 m

130 m
131 m
132 m
133 m



131 m
132 m
133 m
134 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

134 m

135 m

136 m

137 m

135 m

136 m

137 m

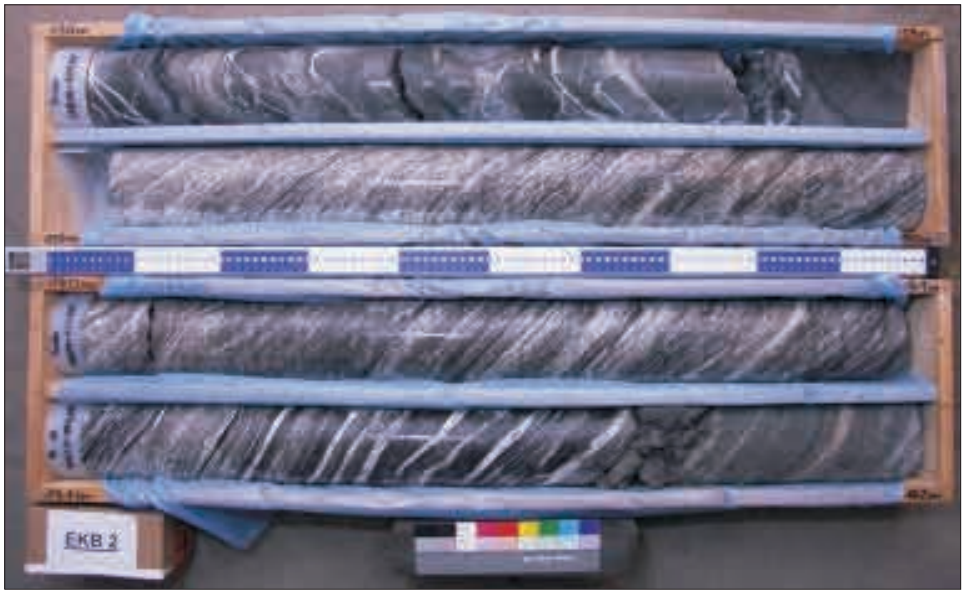
138 m

138 m

139 m

140 m

141 m



139 m

140 m

141 m

142 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

142 m

143 m

144 m

145 m

143 m

144 m

145 m

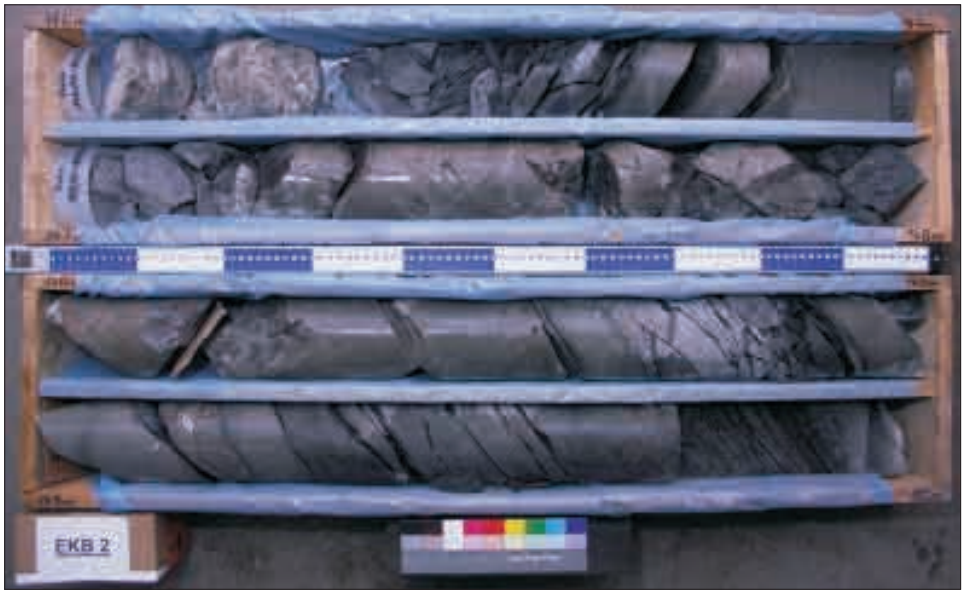
146 m

146 m

147 m

148 m

149 m



147 m

148 m

149 m

150 m

INGENIEUR
GRUPPE
GEOTECHNIK

Hebungen im Stadtgebiet von Staufen, Erkundungsbohrung 2

150 m

151 m

152 m

151 m

152 m

153 m

153 m

154 m

155 m

154 m

155 m

156 m

G | I | F
GIF GmbH
Am Reutgraben 9
D-76275 Ettlingen
Tel.: 07243 / 59 83 7
Fax : 07243 / 59 83 97
E-mail: mail@gif-ettlingen.de
Geotechnisches Ingenieurbüro
Prof. Fecker und Partner GmbH

Messprogramm
ETIBS® - Optischer Bohrlochscanner

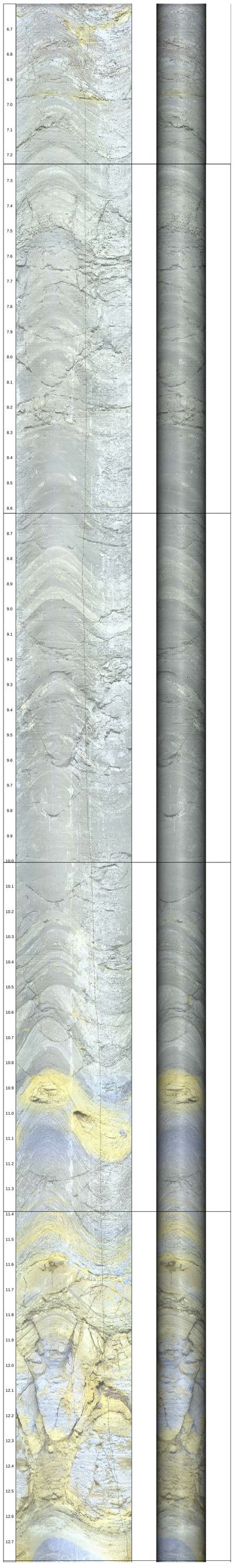
Erkundungsobjekt
Staufen

Auftraggeber: Fa. Anger
Bohrung: EKB 2
Ort: Staufen
Auftragsnummer: e-2830

Koordinaten:
Rechtswert:
Hochwert:
Messbezugspunkt: GOK
Höhe ü. NN:

Messdatum :	31.03.2009	Bohrlochdurchmesser :	146 mm
Bohrteufe :	13.20 m	Richtung der Bohrung :	vertikal
Messintervall :	6.60 m - 12.78 m (6.18 m)	Quelldatei :	BK 2_15
Verrohrung bis :	6.60 m	Messingenieur :	[redacted]
Wasserstand :	0.03 m	Bearbeiter :	[redacted]

Bemerkungen:



G | I | F
GIF GmbH
Am Reutgraben 9
D-76275 Ettlingen
Tel.: 07243 / 59 83 7
Fax : 07243 / 59 83 97
E-mail: mail@gif-ettlingen.de
Geotechnisches Ingenieurbüro
Prof. Fecker und Partner GmbH

Messprogramm
ABF Akustisches Bohrlochfernsehen

Erkundungsobjekt
Staufen

Auftraggeber: Fa. Anger
Bohrung: EKB 2
Ort: Staufen
Auftragsnummer: e-2830

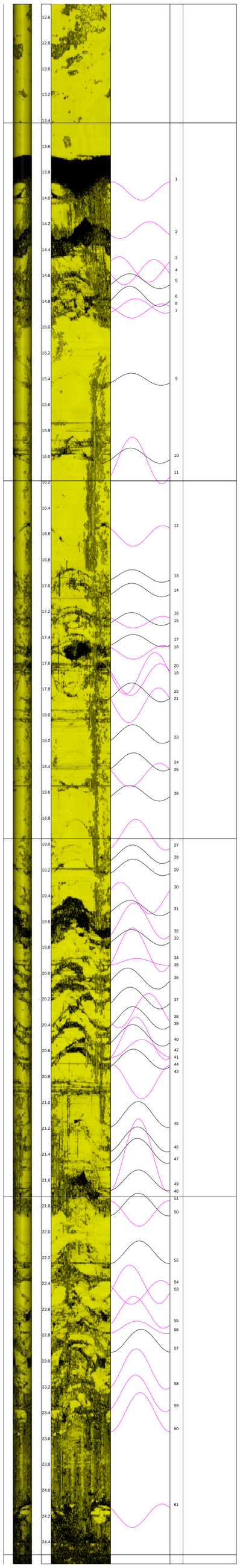
Koordinaten:
Rechtswert:
Hochwert:
Messbezugspunkt: GOK
Höhe ü. NN:

Messdatum :	21.04.2009	Bohrlochdurchmesser :	146 mm
Bohrteufe :	24.60 m	Richtung der Bohrung :	vertikal
Messintervall :	12.50 m - 24.57 m (12.07 m)	Quelldatei :	BK 2_abf
Verrohrung bis :	10.46 m	Messingenieur :	[redacted]
Wasserstand :	1.90 m	Bearbeiter :	[redacted]

Bemerkungen:

Trennflächen : schwarz - Schichtung / Schieferung
magenta - Klüfte

Pseudokern N	[m]	Bohrlochabwicklung N O S W N	Trennflächenabwicklung N O S W N	Nr.	Bemerkung



G | I | F
GIF GmbH
Am Reutgraben 9
D-76275 Ettlingen
Tel.: 07243 / 59 83 7
Fax : 07243 / 59 83 97
E-mail: mail@gif-ettlingen.de
Geotechnisches Ingenieurbüro
Prof. Fecker und Partner GmbH

Messprogramm
ABF Akustisches Bohrlochfernsehen

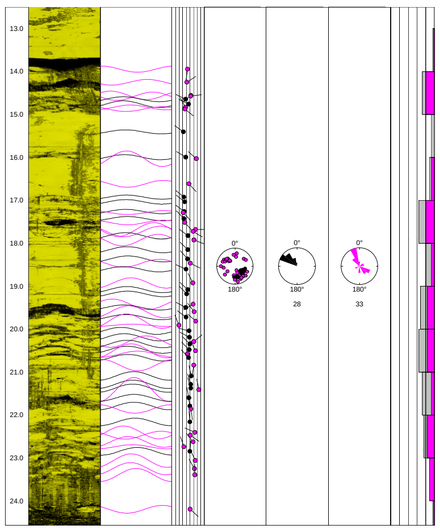
Erkundungsobjekt
Staufen

Auftraggeber: Fa. Anger
Bohrung: EKB 2
Ort: Staufen
Auftragsnummer: e-2830

Koordinaten:
Rechtswert:
Hochwert:
Messbezugspunkt: GOK
Höhe ü. NN:

Messdatum :	21.04.2009	Bohrlochdurchmesser :	146 mm
Bohrteufe :	24.60 m	Richtung der Bohrung :	vertikal
Messintervall :	12.50 m - 24.57 m (12.07 m)	Quelldatei :	BK 2_abf_ba
Verrohrung bis :	10.46 m	Messingenieur :	[redacted]
Wasserstand :	1.90 m	Bearbeiter :	[redacted]

Tiefenskala [m]	Bohrlochabwicklung N O S W N	Bezugsystem : Untere Halbkugel: Trennflächen - abwicklung (schwarz : Schichtung, Schieferung; magenta: Klüfte)	Fall - richtung / Fall - winkel 0 90	Polpunktdiagramm (Polarprojektion; flächentreu)	Richtungsrosendiagramm der Fallrichtung auf den Bohrlochabschnitt bezogen, Klassengröße : 20°: Klassengrenze (Kreisradius) :18% / Anzahl : schwarz	Klassengrenze (Kreisradius) :13% / Anzahl : magenta	Trennflächen pro lfdm (magenta: alle Klüfte; grau : alle Trennfl.) 25 0



G | I | F
GIF GmbH
Am Reutgraben 9
D-76275 Ettlingen
Tel.: 07243 / 59 83 7
Fax : 07243 / 59 83 97
E-mail: mail@gif-ettlingen.de
Geotechnisches Ingenieurbüro
Prof. Fecker und Partner GmbH

Messprogramm
ETIBS® - Optischer Bohrlochscanner

Erkundungsobjekt
Staufen

Auftraggeber: Fa. Anger
Bohrung: EKB 2
Ort: Staufen
Auftragsnummer: e-2830

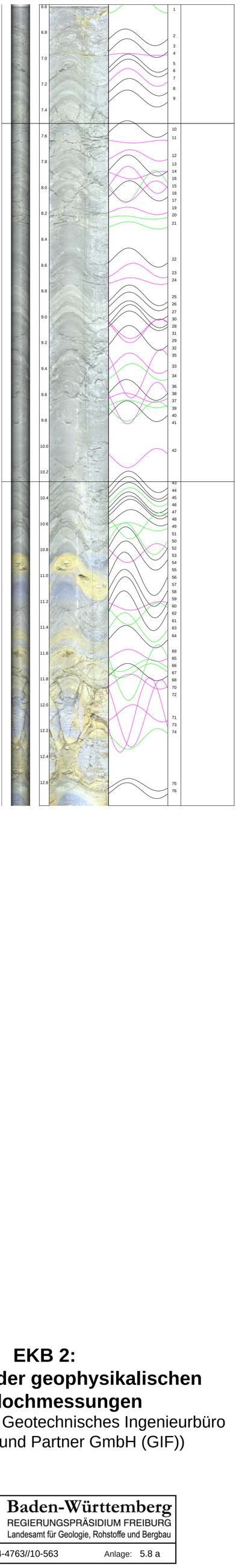
Koordinaten:
Rechtswert:
Hochwert:
Messbezugspunkt: GOK
Höhe ü. NN:

Messdatum :	31.03.2009	Bohrlochdurchmesser :	146 mm
Bohrteufe :	13.20 m	Richtung der Bohrung :	vertikal
Messintervall :	6.60 m - 12.78 m (6.18 m)	Quelldatei :	BK 2
Verrohrung bis :	6.60 m	Messingenieur :	[redacted]
Wasserstand :	0.03 m	Bearbeiter :	[redacted]

Bemerkungen:

Trennflächen : schwarz - Schichtung / Schieferung
blau - Schrägschichtung
magenta - Klüfte
grün - Klüfte nur z. T. erkennbar

Pseudokern N	[m]	Bohrlochabwicklung N O S W N	Trennflächenabwicklung N O S W N	Nr.	Bemerkung



G | I | F
GIF GmbH
Am Reutgraben 9
D-76275 Ettlingen
Tel.: 07243 / 59 83 7
Fax : 07243 / 59 83 97
E-mail: mail@gif-ettlingen.de
Geotechnisches Ingenieurbüro
Prof. Fecker und Partner GmbH

Messprogramm
ETIBS® - Optischer Bohrlochscanner

Erkundungsobjekt
Staufen

Teufenmaßstab: 1 : 50

Auftraggeber: Fa. Anger
Bohrung: EKB 2
Ort: Staufen
Auftragsnummer: e-2830

Koordinaten:
Rechtswert:
Hochwert:
Messbezugspunkt: GOK
Höhe ü. NN:

Messdatum :	31.03.2009	Bohrlochdurchmesser :	146 mm
Bohrteufe :	13.20 m	Richtung der Bohrung :	vertikal
Messintervall :	6.60 m - 12.78 m (6.18 m)	Quelldatei :	BK 2_ba
Verrohrung bis :	6.60 m	Messingenieur :	[redacted]
Wasserstand :	0.03 m	Bearbeiter :	[redacted]

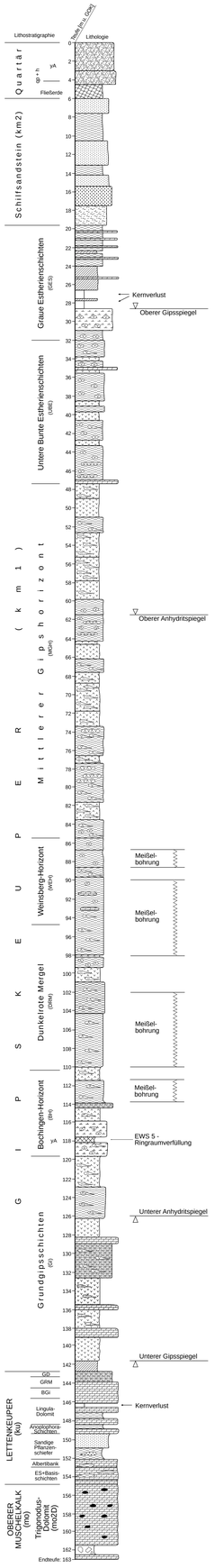
Tiefenskala [m]	Bohrlochabwicklung N O S W N	Bezugsystem : Untere Halbkugel: Trennflächen - abwicklung (schwarz : Schichtung, Schieferung; blau : Schräg-schichtung; magenta : Klüfte; grün : Klüfte nur z. T. erkennbar)	Fall - richtung / Fall - winkel 0 90	Polpunktdiagramm (Polarprojektion; winkeltreu)	Richtungsrosendiagramm der Fallrichtung auf den Bohrlochabschnitt bezogen, Klassengröße : 20°: Klassengrenze (Kreisradius) :31% / Anzahl : schwarz / blau	Klassengrenze (Kreisradius) : 7% / Anzahl : magenta / grün	Trennflächen pro lfdm (magenta: alle Klüfte; grau : alle Trennfl.) 25 0

EKB 2:
Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen
(ausgeführt durch Geotechnisches Ingenieurbüro Prof. Fecker und Partner GmbH (GIF))

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

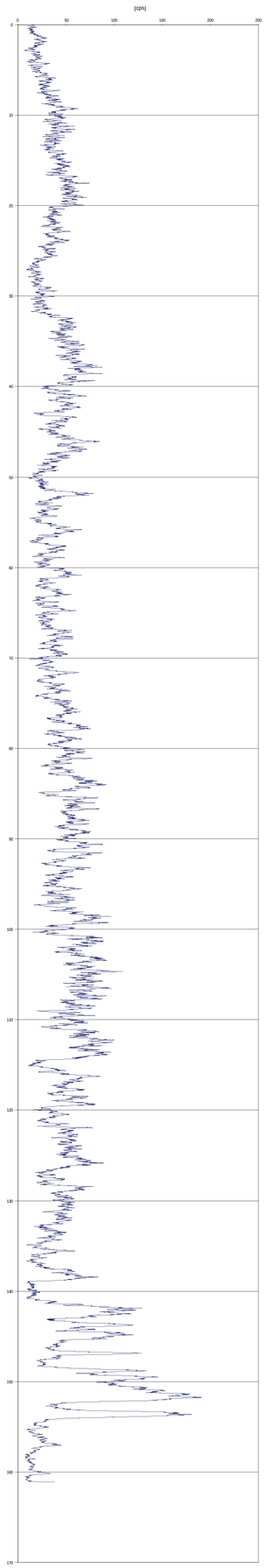
Aktenzeichen: 94-4763//10-563 Anlage: 5.8 a

Bohrprofil

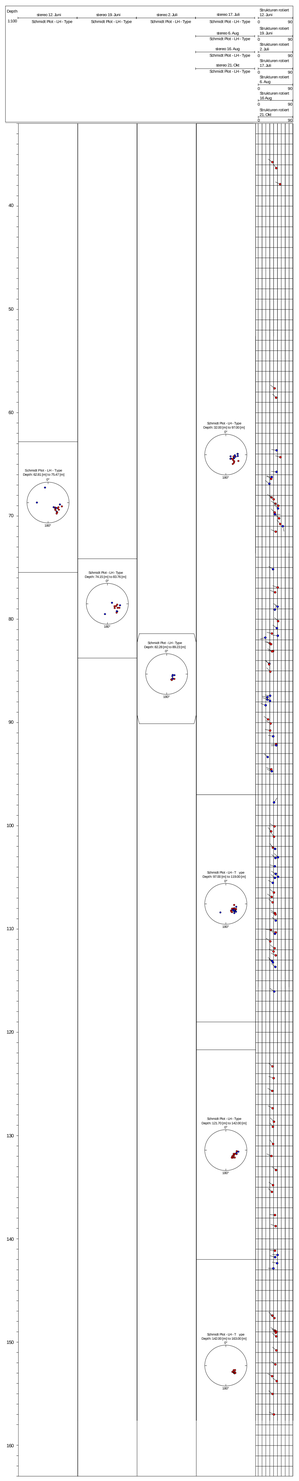


Legende siehe Anl. 5.13

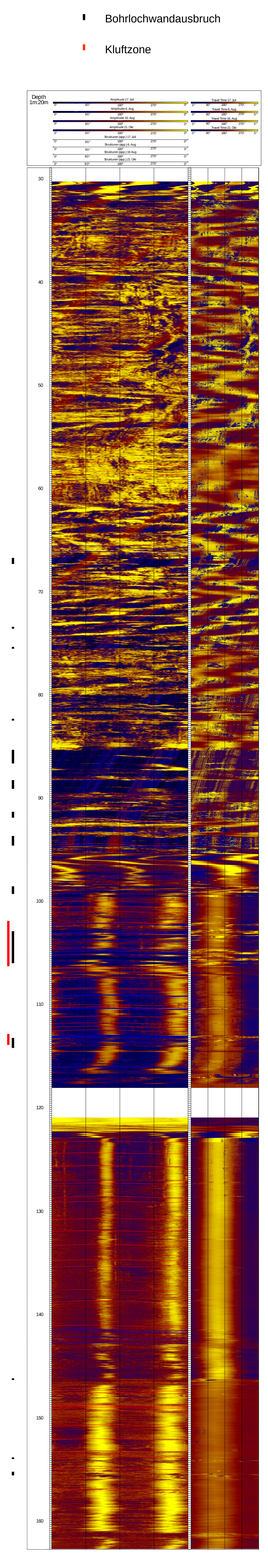
Natürliche Gammastrahlung



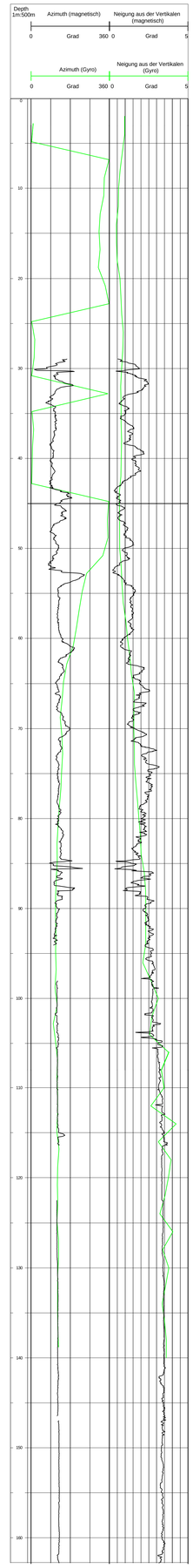
Strukturen



Akustischer Bohrlochscanner



Messung des Verlaufs der Bohrung

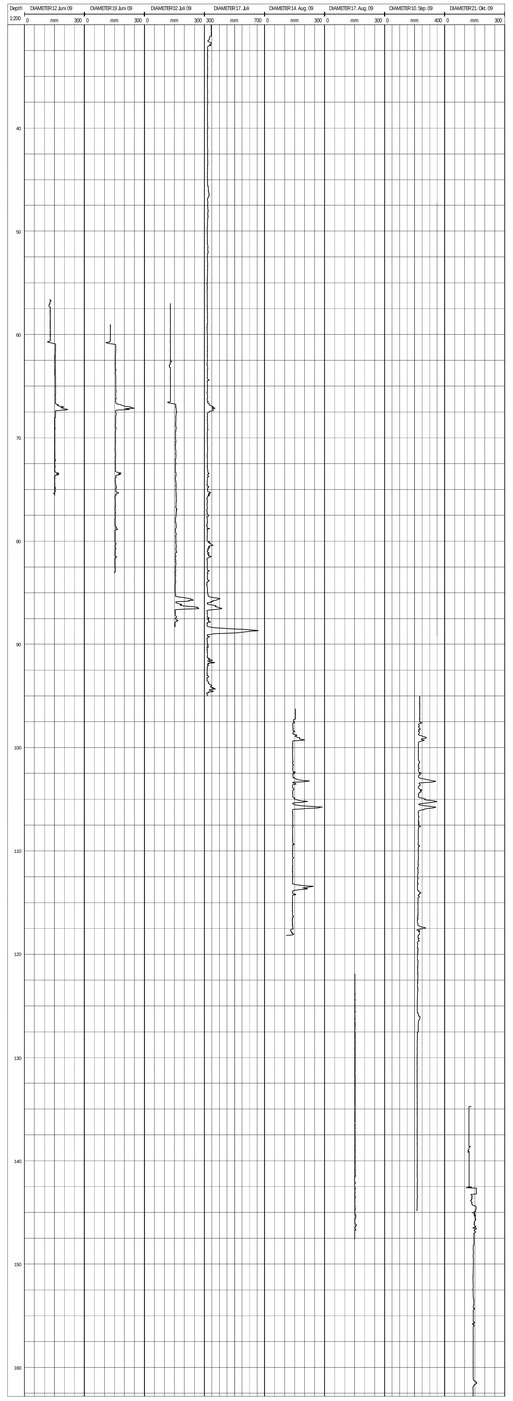


EKB 2:
Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen
(ausgeführt durch Fa. terratec, Heitersheim)

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763/10-563 Anlage: 5.8 b

Kaliber - Log



Labor-Nr. Hydroisotop		201599	201600	201601	201602	206810	202300		202299		203308	203309	203310	207932	208265	208427	208727	208928	208929	208266	204985	204986
Bezeichnung		EKB 1	EKB 1	EKB 1	EKB 1	EKB 1	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	EKB 2	Trinkwasser (Staufen)	BBR Neu Fa. Schladerer	Lbr. Innenhof Fa. Schladerer
Geologische Einheit		Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Schilfsand-stein (km2)	Schilfsand-stein (km2)	Schilfsand-stein (km2)	Schilfsand-stein (km2)	Gipskarst (km1)	Gipskarst (km1)	Gipskarst (km1)	Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Unterkeuper (ku)	Muschelkalk (mo2)	Muschelkalk (mo2)	Quartär	Quartär	Quartär
Entnahmedatum		13.03.2009	13.03.2009	14.03.2009	14.03.2009	28.07.2009	31.03.2009	31.03.2009	31.03.2009	31.03.2009	23.04.2009	23.04.2009	23.04.2009	28.09.2009	09.10.2009	14.10.2009	17.10.2009	23.10.2009	25.10.2009	09.10.2009	23.06.2009	23.06.2009
Uhrzeit		15:40	17:15	12:30	14:45	08:45	15:00	16:05	18:00	19:15	11:15	13:10	18:00	15:15	10:15	15:15	11:00	09:30	17:00	12:00	09:00	12:30
Endteufe	m u. GOK	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	14,00	14,00	14,00	14,00	28,00	28,00	28,00	153	153	153	153	163	163			
Tiefe Pumpe	m u. GOK	14	14	14	14	15	13,20	13,20	13,20	13,20	16,00	16,00	16,00	100	100	132	132	150	150		16,00	7,00
erfasster Abschnitt	m u. GOK	Sperrrohr-20	Sperrrohr-20	Sperrrohr-20	Sperrrohr-20	Sperrrohr-20	2-14	2-14	2-14	2-14	14-28	14-28	14-28	145-153	145-153	145-153	145-153	152-163	152-163			
Förderstrom	l/sec	1,00	1,00	1,00	2,30	2,30	0,20	0,20	0,20	0,40	3,00	3,00	4,30	0,55	0,60	0,89	1,00	0,47	0,47			
Betriebswasserspiegel	m u. ROK																					
Probenahme durch		Hydroisotop	Hydroisotop	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	LGRB	Hydroisotop	LGRB	LGRB	LGRB
Probenbehälter																						
50 mL PE	Anzahl	1	1	1	1	1			1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100 mL Brauglas	Anzahl		2	2																		
100 mL Brauglas + HNO3	Anzahl		1	1																		
0,5 L PE	Anzahl													2	1					1		
0,5 L Glas	Anzahl	1	1	1																		
1 L PE	Anzahl				1	1	1		1		1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
1 L Glas	Anzahl		1	1																		
Dosen	Anzahl		2	2		2			2			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
0,5 L Glas + NaOH (C13)	Anzahl		1	1					1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5 L PE + NaOH + BaCl2 (C14)	Anzahl		1	1					1				1	2	1	2	2	1	1	1		
Aufzeichnungen Hydroisotop																						
Temperatur	°C	14,3	14,3																16,1			
spez. el. Leitfähigkeit (25°C) vor Ort	µS/cm	1133	1255																715			
spez. el. Leitfähigkeit (25°C) Labor	µS/cm	1150	1330	1470	1380	1370	105	1870	2380	1860	2810	2770	2750	1321	1217	1204	1206	714	717	318	315	458
pH-Wert (tgem) vor Ort		7,20	7,14																7,19			
gelöster Sauerstoffgehalt	mg/l	1,01	0,21																0			
Sk-Wert (pH 4,3) vor Ort	mmol/l	3,9	4,3																6,5			
Bk-Wert (pH 8,2) vor Ort	mmol/l	0,7	0,98																1,01			
Trichlorfluormethan (F11), max. 6	pmol/l		0,4 ± 0,1	0,2 ± 0,1					0,46 ± 0,05			0,05 ± 0,05	0,06 ± 0,05		0,03 ± 0,05		0,05 ± 0,05	0,04 ± 0,05	0,02 ± 0,05	12,0 ± 3,0	10 ± 1	5,4 ± 0,6
Dichlordifluormethan (F12), max. 3	pmol/l		0,34 ± 0,05	0,4 ± 0,05					0,21 ± 0,05			0,08 ± 0,05	0,05 ± 0,05		0,03 ± 0,05		0,06 ± 0,05	0,04 ± 0,05	0,01 ± 0,05	4,8 ± 0,3	4,9 ± 0,5	3,4 ± 0,4
1,1,2-Trichlortrifluorethan (F113), max.0,6	pmol/l		0,29 ± 0,05	0,8 ± 0,1					0,04 ± 0,05			0,013 ± 0,05	< 0,01		0,01 ± 0,05		0,01 ± 0,05	0,01 ± 0,05	< 0,01	0,49 ± 0,05	30 ± 6	16 ± 3
Schwefelhexafluorid (SF6), max. 3	fmol/l		2,8 ± 0,3	2,7 ± 0,3					0,3 ± 0,1			0,4± 0,1	0,1 ± 0,1		0,1 ± 0,1		0,1 ± 0,1	< 0,1	< 0,1	2,3 ± 0,3	2,8 ± 0,3	2,6 ± 0,3
Sauerstoff-18 (*18O)	‰		-9,28	-9,24					-9,01		-9,62	-9,61	-9,54	-9,48	-9,17	-9,16	-9,19	-9,24	-9,09	-9,35	-9,04	-8,72
Deuterium (*2H)	‰		-65,7	-65,8					-63,7		-68,7	-68,2	-65,1	-68,0	-63,3	-63,0	-63,4	-64,1	-62,7	-64,2		
Deuterium-Exzess	‰		8,5	8,2					8,4		8,3	8,7	11,2	7,8	10,1	10,3	10,1	9,8	10,0	10,6		
Tritium (*3H) rot = Schnellmessung	TU		5,5 ± 0,7	5,0 ± 0,6					0,8 ± 0,5		0,9 ± 0,4	< 0,6	< 0,6	**< 0,7**	< 0,6	< 0,6	< 0,6	**< 0,6**	**< 0,6**	8,4 ± 0,9		
Kohlenstoff-13 (*13C-DIC)	‰		-13,52	-13,82					-13,60				-14,10		-11,95		-11,02	-9,09	-9,00	-13,27		
Kohlenstoff-14 (*14C-DIC)	%-modern			54,6 ± 2,5					43,2 ± 2,1				40,6 ± 2		18,1 ± 1,7		18,7 ± 1,7	9,7 ± 1,5	10,4 ± 1,6			

LGRB-Proben_Id		69312	69313	69314	69315	71374	71041	71042	71043	71044	71045	71046	72276	72432	72549	72569	72675	72676		71095	71094
TK25		8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112	8112
Arnum		287	287	287	287	287	289	289	289	289	289	289	289	289	289	289	289	289		15	280
Chemie		Süßwasser	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	Ca SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	Ca SO4 2- Typ Mineralwasser	Ca SO4 2- Typ Mineralwasser	Ca SO4 2- Typ Mineralwasser	Ca SO4 2- Typ Mineralwasser	Ca SO4 2- Typ Mineralwasser	Ca SO4 2- Typ Mineralwasser	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	Ca Mg SO4 2- HCO3 - Typ Mineralwasser	Süßwasser	Süßwasser	Süßwasser	Süßwasser	Süßwasser
Probenahmedatum		13.03.09	13.03.09	14.03.09	14.03.09	28.07.09	31.03.09	31.03.09	31.03.09	23.04.09	23.04.09	23.04.09	28.09.09	09.10.09	14.10.09	17.10.09	23.10.09	25.10.09	09.10.09	23.06.09	23.06.09
Uhrzeit		15:50	17:00	12:30	14:45	8:45	16:05	18:00	19:15	11:15	13:15	18:00	15:15	10:15	15:15	11:00	9:30	17:00	10:15	9:00	12:30
T Wasser (°C)	°C	14,3	14,1	14,1	14,0	14,6	12,7	13,3	13,0	13,1	13,0	13,0	16,4	15,6	15,9	15,4	15,8	16,1	15,5	13,0	15,7
elLF(25°C) (µS/cm)	µS/cm	1150	1330	1470	1380	1370	1870	2370	1860	2810	2770	2750	1330	1230	1260	1210	714	717	322	315	458
pH Gel		7,19	7,15	7,11	7,14	7,07	6,93	6,88	7,07		6,91	6,85	7,04	7,03	7,03	7,05	7,08	7,19	7,84	6,65	6,92
O2 gel (mg/l)	mg/l	2,9	0,8	<0,5	<0,5	0,6	2,5	0,7		<0,5	<0,5	<0,1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	10,5	4,4	7,9
Eh (mV)	mV	426	230	183	240	365	363	304	348	175	175	147	79	55	-66	174	135	123	276	510	502
KS4.3 (mmol(eq)/l)	mmol/l	3,90	4,30	4,65	4,80	4,40	4,65	5,80	4,40	7,28	6,80	5,90	5,85	5,50	5,40	5,45	6,50	6,50	2,30	2,45	3,45
KB8.2 (mmol(eq)/l)	mmol/l	0,70	0,70	0,90	0,70	0,80	1,10	1,30	1,10	0,60	0,60	1,20	1,10	0,80	0,80	0,80	0,50	1,10	0,25	0,50	0,45
CO2 frei (mg/l)	mg/l	31,0	31,0	40,0	31,0	35,0	48,0	57,0	48,0	26,0	26,0	53,0	48,0	35,0	35,0	35,0	22,0	48,0	11,0	22,0	20,0
TR qual		stark tontrüb	tontrüb	leicht tontrüb	stark tontrüb	leicht tontrüb	tontrüb	klar	leicht tontrüb	stark tontrüb grau	stark tontrüb grau	leicht trüb	klar	klar	klar	klar	klar	klar		klar	klar
Färbung		farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos		farblos	farblos
Geruch		geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos	geruchlos	nach HS	nach HS	nach HS	nach HS	geruchlos	mineralisch		geruchlos	geruchlos
SAK254 (m-1)	1/m	1,60	1,60	2,10	2,00	1,10	0,88	0,64	1,10				1,60	0,80	0,62	0,70	<0,20	<0,20	0,50	1,30	1,70
SAK436 (m-1)	1/m	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20				<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Dichte (g/cm3)		0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9999	1,0004	0,9998	1,0015	1,0011	1,0008	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9987	0,9987	0,9985	0,9985	0,9985
Ca (mg/l)	mg/l	175	187	212	202	235	402	533	390	610	618	622	218	206	206	206	92,4	92,3	51,5	48,3	60,1
Mg (mg/l)	mg/l	31,3	34,6	36,1	35,3	34,5	44,9	60,2	44,8	50,5	53,1	57,0	41,0	42,1	41,7	42,7	39,7	39,9	4,5	5,7	9,9
Na (mg/l)	mg/l	20,1	22,2	25,2	27,2	20,6	14,9	19,1	14,4	90,3	60,2	21,4	9,6	6,1	5,9	5,7	3,9	3,6	7,2	8,9	19,5
K (mg/l)	mg/l	31,3	38,2	43,0	41,6	22,9	4,2	5,1	3,9	6,2	7,8	4,4	38,8	9,7	8,2	6,5	2,7	2,3	1,2	1,8	4,5
HCO3 - (mg/l)	mg/l	238	262	284	293	268	284	354	268	444	415	360	357	336	329	333	397	397	140	150	210
Cl - (mg/l)	mg/l	16,0	20,2	20,6	19,9	15,2	10,8	17,0	13,1	8,5	8,5	7,8	3,9	3,2	3,6	3,6	2,9	2,8	13,6	13,1	19,9
SO4 2- (mg/l)	mg/l	417	453	509	482	549	954	1260	929	1530	1500	1480	481	434	431	428	76,3	75,7	15,3	17,9	28,0
NO3 - (mg/l)		1,8	0,8	0,9	0,7	0,4	2,8	0,7	2,5	1,1	0,9	0,8	0,6	<0,126	<0,126	<0,126	<0,126	<0,126	16,9	6,6	11,2
IBF (%)	%	0,88	0,14	0,72	0,29	0,03	0,40	0,95	0,06	1,83	1,06	0,64	0,50	0,17	0,09	0,38	0,04	0,00	0,20	0,31	0,02
TDS (mg/l)		952	1039	1153	1124	1169	1738	2271	1687	2764	2686	2574	1167	1053	1041	1041	628	627	265	269	380
GH (mmol(eq)/l)	mmol(eq)/l	11,9	12,7	14,1	13,1	15,0	24,3	31,8	23,6	35,0	36,0	36,2	14,6	14,3	14,3	14,3	8,0	8,0	2,9	2,9	3,9
HS - (µg/l)	µg/l												60	60	20	40	< 20		0,02		
NH4 + (mg/l)	mg/l	0,80	0,60	1,20	1,20	1,00	0,40	0,20	0,30			0,60	0,50	0,30	0,20	0,15	0,20	<0,05	<0,05	0,05	0,05
Fe (mg/l)	mg/l	0,192	0,073	0,127	0,043	0,019	0,216	0,640	0,518	3,152	1,422	0,172	2,080	1,332	0,775	0,831	0,150	0,059	0,028	0,008	0,013
Mn (mg/l)	mg/l	1,477	1,775	1,840	2,049	1,704	0,744	0,924	0,768	0,046	0,042	0,042	0,027	0,019	0,015	0,016	0,056	0,065	0,001	0,000	0,001
Sr (µg/l)	µg/l	3509	3544	4174	4325	4880	9068	11570	8704	14350	15030	16400	13300	12860	11800	12520	2008	2502	0,217	218	270
Ba (µg/l)	µg/l	155	142	131	172	133	41,2	29,6	33,1	39,5	27,5	16,5	19,6	16,4	15,1	16,0	54,7	63,9	79,1	297	474
Li (µg/l)	µg/l	33,3	31,4	26,6	28,8	31,2	43,9	57,0	46,4	70,4	68,4	78,3	28,5	26,4	24,0	27,4	26,2	32,7	4,6	9,3	6,3
NO2 - (mg/l)		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,03	0,02	0,012	0,012			<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,02	0,03
PO4 3- (mg/l)	mg/l	0,095	0,051	0,069	0,129	0,081	<0,012	<0,012	<0,012			0,026	<0,015	<0,014	<0,014	<0,014	<0,009	<0,009	0,112	0,064	0,150
SiO2 (mg/l)	mg/l	14,2	14,0	14,1	14,2	15,3	14,0	15,1	14,3	14,9	14,9	14,4	11,1	10,6	10,7	10,7	9,3	9,7	14,2	12,2	12,0
F - (µg/l)	µg/l	440	420	420	450	380	330	330	280	740	660	600	300	280	280	280	210	210	0,21	520	500
Ag (µg/l)	µg/l	<0,009	0,033	0,015	0,011	0,016	<0,009	<0,009		0,084	0,186		<0,009	<0,009	<0,009	0,021	0,017	0,022	0,014		
Al (µg/l)	µg/l	262	20,83	4,3	18,8	13,2	2,6	1,6	4,1	9168	2645	164	69,3	6,1	3,8	2,7	1,8	<0,071	12,7	2,2	3,0
As (µg/l)	µg/l	7,8	12,3	7,3	7,5	2,8	0,78	0,72		3,4	3,1	2,3	1,7	1,2	1,2	1,6	4,6	5,0	1,578		
B (µg/l)	µg/l	87,1	83,1	82,8	90,8	70,6	87,5	109	78,3	130	126	153	70,1	66,7	61,7	67,1	28,4	34,3	12,5	16,6	30,0
Be (µg/l)	µg/l	<0,014	<0,014	<0,014	<0,014	0,018	<0,014	<0,014		0,378	0,147		0,024	0,019	0,014	0,026	0,029	0,036	<0,014		
Bi (µg/l)	µg/l	0,060	0,036	0,033	0,015	0,030	0,039	0,027		0,054	0,045		0,009	0,015	0,004	0,011	0,018	0,012	0,028		
Br (µg/l)	µg/l									< 88		< 88									
Br - (µg/l)	µg/l					< 88	< 0,088	< 0,088			< 88		< 88	< 88	< 88	< 88	< 88	< 88	<88	< 88	< 88
Cd (µg/l)	µg/l	0,15	0,22	0,12	0,09	0,12	0,53	0,74		0,10	0,08		<0,009	<0,009	<0,009	<0,009	0,01	0,02	0,011		
Ce (µg/l)	µg/l	0,36	0,84	0,05	0,14	0,06	0,02	0,03		0,90	0,31	0,07	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,008		
Co (µg/l)	µg/l	0,9	1,2	1,1	1,0	1,4	3,6	4,0		1,9	1,6	0,7	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,1	0,1	<0,002		
Cr (µg/l)	µg/l	0,7	0,4	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3		10,3	3,4	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,452		
Cs (µg/l)	µg/l	0,5	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3		1,0	0,4	0,1	2,8	1,5	1,3	1,1	0,5	0,5	0,58		
Cu (µg/l)	µg/l	9,2	4,2	1,9	3,7	1,3	3,9	3,0		3,0	6,6	3,2	0,7	1,1	0,4	0,3	0,5	2,6	5,442		
La (µg/l)	µg/l	0,28	0,07	0,05	0,13	0,06	0,03	0,04		0,67	0,20	0,16	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,012		
Mo (µg/l)	µg/l	2,1	1,9	2,6	2,4	1,8	1,5	1,6		8,4	5,2	2,1	2,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,4	0,173		
Ni (µg/l)	µg/l	3,7	3,0	3,2	4,2	3,1	3,6	4,1		56,9	34,8	1,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,9	1,1	0,371		
Pb (µg/l)	µg/l	0,37	0,18	0,05	0,16	0,07	0,04	0,09		1,27	2,43	0,09	0,09	0,10	0,04	0,01	7,7	1,4	0,192		
Rb (µg/l)	µg/l	20,4	20,7	22,9	24,1	13,4	4,6	5,2	4,5	20,7	9,7	5,1	18,0	8,1	6,8	6,6	4,8	5,5	1,5	3,3	5,4
Sb (µg/l)	µg/l	0,46	0,23	0,22	0,24	0,18	0,09	0,04		0,47	0,34	0,11	0,08	0,06	0,02	0,03	0,44	0,25	0,159		
Se (µg/l)	µg/l	0,49	0,41	0,29	0,45	0,25	0,65	0,72		0,94	0,83	0,38	0,29	0,09	0,08	0,13	0,51	0,35	0,268		
Th (µg/l)	µg/l	0,08	0,05	0,06	0,04	0,03	0,04	0,04		0,77	0,20		0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,015		
Ti (µg/l)	µg/l	9,0	2,6	2,1	3,0	3,6	2,7	3,9		186	19,4	14,2	1,6	0,6	0,4	0,4	<0,068	<0,068	<0,068		
Tl (µg/l)	µg/l	0,35	0,31	0,27	0,39	0,23	0,18	0,25		0,20	0,15		<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	0,22	0,24	0,007		
U (µg/l)	µg/l	2,0	2,2	2,2	2,5	1,9	2,5	3,3		1,2	0,6	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	1,6	2,0	0,757		
V (µg/l)	µg/l	1,6	0,8	0,5	0,8	0,5	0,2	0,2		13,6	3,7	0,4	<0,031	<0,031	<0,031	0,04	0,1	0,04	0,5		
Y (µg/l)	µg/l	0,32	0,17	0,16	0,24	0,17	0,18	0,30		1,36	0,38	0,17	0,12	0,11	0,10	0,10	0,03	0,03	0,024		
Zn (µg/l)	µg/l	36,5	14,1	16,0	12,4	5,2	41,0	21,6		8,5	17,0	23,3	13,2	5,3	4,6	2,7	32,4	35,8	20,6		

Anl. 5.9: Ergebnisse der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen (Zusammenstellung der Fa. Hydroisotop; HYDROISOTOP, 2009)

Probentabelle der Erkundungsbohrung EKB 1

Projekt: Erkundungsbohrung Staufen

Ort: Staufen, [redacted]

Bohrungsnummer: EKB 1

TK-Nr.: 8112, Blatt Staufen

Rechtswert:

Hochwert: [redacted]

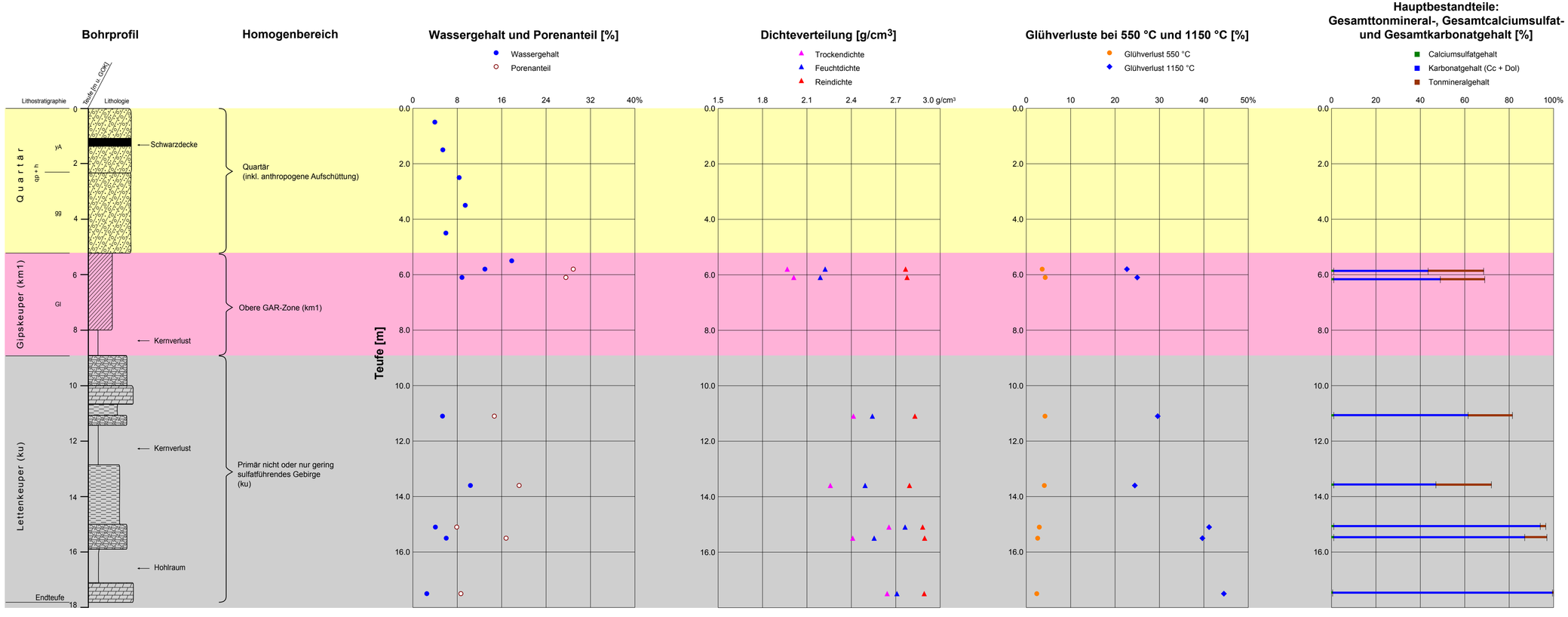
Höhe Ansatzpunkt: 286 m ü. NN* * Stand: 23.09.09

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763//10-563 Anlage: 5.10

Probenbezeichnung:						Laborversuche:										Ergebnisse: Boden- und gesteinsphysikalische Kennwerte und Mineralgehalte																																Sonstiges:		
		Teufe				Wassergehaltsbestimmung (40 °C)	Wassergehaltsbestimmung (105 °C)	Karbonatgehaltsbestimmung (Karbonatbombe)	Reindichtebestimmung (Kapillarpyknometer)	Trocken-/Feuchtdichtebestimmung (Tauchwägung)	Röntgenuntersuchungen (RDA und RFA)	Kornverteilung (Sieb-/Sedimentationsanalyse)	Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens	Bestimmung der Konsistenzgrenzen	Bestimmung der Glühverluste	Wassergehalt (40 °C)	Wassergehalt (105 °C)	Reindichte	Feuchtdichte	Trockendichte	Porenanteil	Glühverlust (550 °C)	Glühverlust (1150 °C)	Gesamt-Calciumsulfatgehalt	Gipsgehalt	Anhydritgehalt	Gesamt-Tonmineralgehalt	Gehalt Quellfähiger Tonminerale	Gesamt-Karbonatgehalt (Cc+Dol)	Wasseraufnahmevermögen	Sonstiger Mineralbestand	Fließgrenze	Ausrollgrenze	Plastizitätszahl	Konsistenz	Ton	Schluff	Sand	Kies	Steine	Blöcke	Kornkennziffer	Bodengruppe (DIN 18196)	Stratigraphie		Probenbeschreibung
Bohrungs-Nummer	Proben-Nr.	von	bis	Proben-Art	Entnahme-datum											w	w	ρr	ρ	ρd	n	Vgl	Vgl	SO_4	Gy	Anh	TM	QTM	Vca	w_A		wL	wP	IP	Ic	T	U	S	G	X	Y									
																%	%	g/cm³	g/cm³	g/cm³	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		[1]	[1]	[1]	[1]	%	%	%	%	%	%									
EKB 1	1	0,00	1,00	Eimer	09.03.09		x					x					3,96																		0	4	18	78	0	0	0.0.2.8.0	GW	qh	yA	Kies, sandig, kalkhaltig, erdfeucht, vergrünte Gerölle, Ziegelreste
EKB 1	2	1,00	2,00	Eimer	09.03.09		x					x					5,40																		0	9	21	45	0	25	0.1.2.4.3	GU	qh	yA	Kies, steinig, sandig, schluffig, dunkelgrau, kalkhaltig, feucht, Geruch nach Schwefelwasserstoff, mit Block > 10 cm
EKB 1	3	2,00	3,00	Eimer	09.03.09		x					x					8,34																		0	14	31	47	8	0	0.1.3.5.1	GU	qh	yA+gg	Kies, stark sandig, schluffig, steinig, dunkelgrau, kalkhaltig; mit Schluff- und Sandlagen, schwarzgrau, feucht bis nass, Geruch nach H_2S
EKB 1	4	3,00	4,00	Eimer	09.03.09		x					x					9,44																		0	6	20	36	0	38	0.1.2.3.4	GU	qh	gg	Kies und Steine, sandig, schluffig, grau, sehr nass
EKB 1	5	4,00	5,00	Eimer	09.03.09		x					x					5,95																		0	16	28	40	0	16	0.2.3.4.1	GU+	qh	gg	Kies, stark sandig, schluffig, steinig, graubraun-braun, erdfeucht, kalkhaltig, Kiesfraktion deutlich angewittert
EKB 1	6	5,00	5,80	Eimer	09.03.09	x	x					x				17,81																		19	29	24	28	0	0	2.3.2.3.0	UL	qh/km1		Top: Kies, stark schluffig, sandig, rötlichbraun-braungrau, erdfeucht bis feucht (Breisgau-FM); Basis siehe EKB 1/7 (GAR)
EKB 1	7	5,80	5,90	Folie	09.03.09	x			x	x	x		x	x	x	12,98		2,77	2,22	1,97	28,89	3,6	22,7	< 1	< 1	< 1	25	< 5	42,5	74,4	Dol, Cc, Qz, Gl, Kaol	0,39	0,22	0,16	1,11									TM	km1	Gl	Schluff, kiesig, sandig, tonig, schwach steinig, hellgrau-graugrün, halbfest, stark kalkhaltig, Komponenten innig vermengt (GAR)
EKB 1	8	6,10	6,20	Folie	09.03.09	x			x	x	x	x	x	x	x	8,85		2,78	2,19	2,01	27,57	4,3	25,0	< 1	< 1	< 1	20	< 5	48,0	78,2	Dol, Cc, Qz, Gl, Fsp					13	26	50	11	0	0	1.3.5.1	SU+	km1	Gl	Sand, schluffig, tonig, kiesig, graugrün-graugelb, trocken, stark kalkhaltig, fest; brecciös mit Kalk-/ Dolomitsteinbröckchen (GAR)
EKB 1	9	11,00	11,10	Folie	11.03.09	x			x	x	x	x		x	x	5,34		2,83	2,54	2,41	14,68	4,2	29,6	< 1	< 1	< 1	20	< 5	60,5	80,1	Dol, Qz, Gl														ku		Dolomitmergelstein, hellgrau-graugrün, erdfeucht, brüchig
EKB 1	10	13,50	13,60	Folie	11.03.09	x			x	x	x	x			x	10,37		2,79	2,49	2,26	19,15	4,1	24,5	< 1	< 1	< 1	25	< 5	46,0		Dol, Qz, Gl														ku		Tonmergelstein, dolomitisch, feinsandig, glimmerführend, hellgrau, erdfeucht, mürbe, absandend; einzelne Schlufflagen, steif
EKB 1	11	15,00	15,10	Folie	11.03.09	x			x	x	x	x	x		x	4,06		2,88	2,76	2,65	7,90	2,9	41,2	< 1	< 1	< 1	< 5	< 5	93,0	35,4	Dol, Qz														ku		Dolomitstein, hellgraugrün, kantig-splittrig; schwarz-rötliche Anlauffarben der Klüftchen
EKB 1	12	15,40	15,50	Folie	12.03.09	x			x	x	x	x	x		x	6,01		2,90	2,55	2,41	16,79	2,6	39,7	< 1	< 1	< 1	10	< 5	86,0	43,2	Dol, Qz, Gl														ku		Dolomitstein, tonig, graugelb-hellgelb, von Fe/Mn-Dendriten durchzogen, erdfeucht, mürbe, brüchig
EKB 1	13	17,40	17,50	Folie	12.03.09	x			x	x	x	x			x	2,51		2,89	2,71	2,64	8,65	2,4	44,5	< 1	< 1	< 1	< 5	< 5	99,0	29,5	Dol, Qz, Gl														ku		Dolomitstein, braungelb, erdfeucht, brüchig-splittrig, von Mn-Dendriten durchzogen

Graphische Darstellung der im Labor ermittelten Boden- und Gesteinskennwerte der EKB 1



Bohrprofil

- Kies und Sand
- Tonstein
- Dolomitstein
- Dolomitmergelstein
- Gipsauslaugungsresiduen (GAR)

Graphische Darstellung der im Labor ermittelten Boden- und Gesteinskennwerte der EKB 1

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763//10-563 Anlage: 5.11

Probentabelle der Erkundungsbohrung EKB 2

Projekt: Erkundungsbohrung Staufen

Ort: Staufen, [redacted] Flurstücksnr. [redacted]

Bohrungsnummer: EKB 2

TK-Nr.: 8112, Blatt Staufen

Rechswert: [redacted]*

Hochwert: [redacted]*

Höhe Ansatzpunkt: 286 m ü. NN* * Stand: 23.09.09

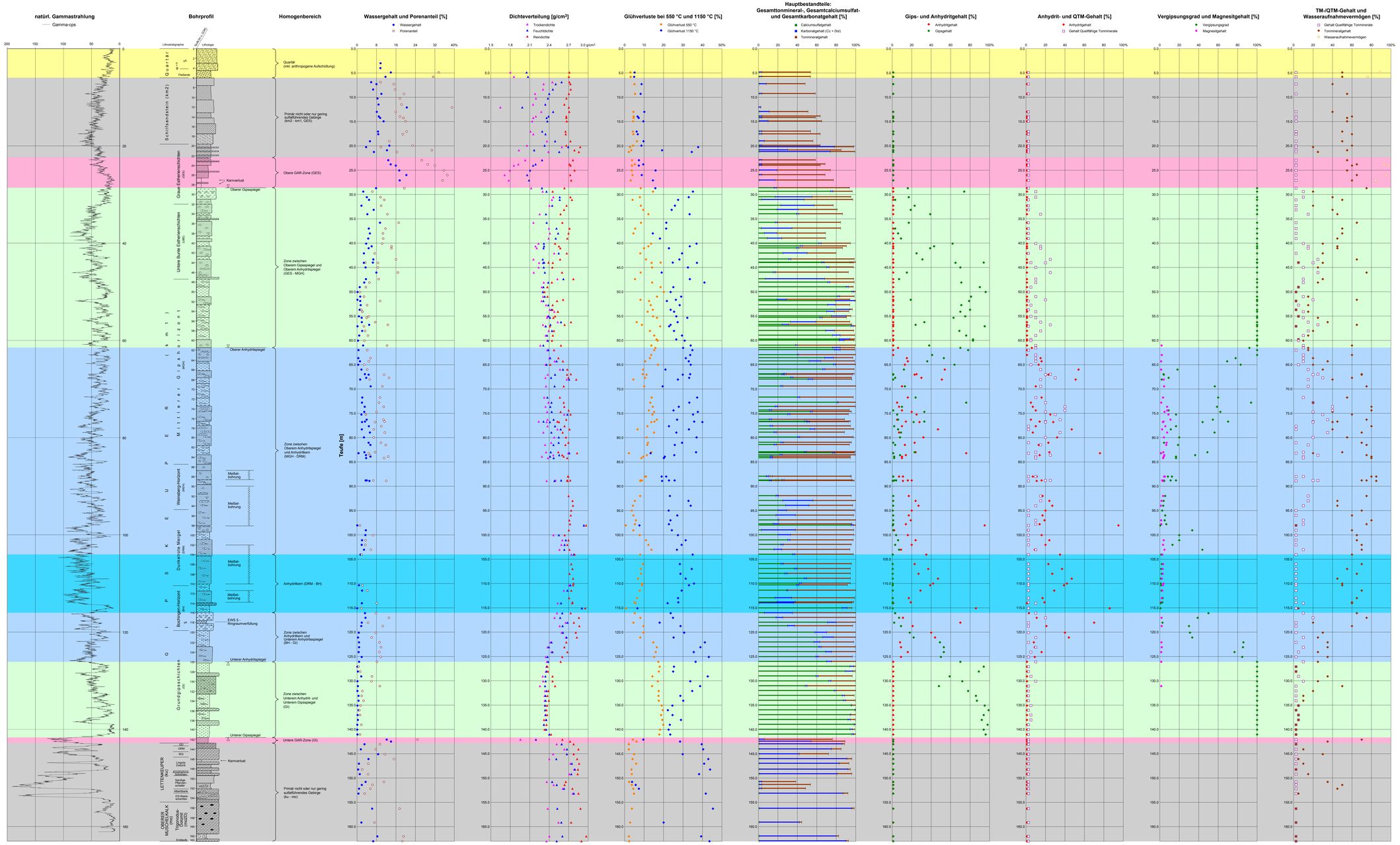
Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763//10-563 Anlage: 5.12

Probenbezeichnung: | Laborversuche: | Ergebnisse: Boden- und gesteinsphysikalische Kennwerte und Mineralgehalte | Sonstiges:

Bohrungs-Nummer	Proben-Nr.	Teufe von	Teufe bis	Proben-Art	Entnahme-datum	Wassergehaltsbestimmung (40 °C)	Karbonatgehaltbestimmung (Karbonatbombe)	Reindichtebestimmung (Kapillarpyknometer)	Trocken-/Feuchtdichtebestimmung (Tauchwägung)	Röntgenuntersuchungen (RDA und RFA)	Kornverteilung (Sieb-/Sedimentationsanalyse)	Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens	Bestimmung der Konsistenzgrenzen	Bestimmung der Glühverluste	Wassergehalt	Reindichte	Feuchtdichte	Trockendichte	Porenanteil	Glühverlust (550 °C)	Glühverlust (1150 °C)	Gesamt-Calciumsulfatgehalt	Gipsgehalt	Anhydritgehalt	Vergiesungsgrad	Gesamt-Tonmineralgehalt	Gehalt Quellfähiger Tonminerale	Gesamt-Karbonatgehalt (Cc+Dol)	Magnesit-Gehalt (Mag)	Wasseraufnahmevermögen	Sonstiger Mineralbestand	Fließgrenze	Ausrollgrenze	Plastizitätszahl	Konsistenz	Ton	Schluff	Sand	Kies	Steine	Blöcke	Kornkennziffer	Bodengruppe (DIN 18196)	Stratigraphie		Probenbeschreibung
															w	ρr	ρ	ρd	n	Vgl	Vgl	SO_4	Gy	Anh		TM	QTM	Vca	Mag	w_A		wL	wP	IP	Ic	T	U	S	G	X	Y					
															%	g/cm³	g/cm³	g/cm³	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		[1]	[1]	[1]	[1]	%	%	%	%	%	%					
EKB 2	1	2,00	3,00	Eimer	26.03.09						x				9,7																			0	8	34	58	0		0.1.3.6	GU	qh	yA	Fein- bis Grobkies, stark sandig, schwach schluffig, graubraun, nass, kalkhaltig, gut gerundet, Einzelblock (Arkose) mit ca. 10 cm Durchmesser, Auffüllung
EKB 2	2	3,00	4,00	Eimer	26.03.09						x				9,6																			0	8	32	60	0		0.1.3.6	GU	qh	yA	Fein- bis Grobkies, stark sandig, schwach schluffig, graubraun, nass, stark kalkhaltig, Einzelgerölle gut gerundet aus Kalkstein, Auffüllung
EKB 2	3	4,00	4,50	Eimer	26.03.09																																				q	gg	Kies, steinig, sandig, schluffig, gerundete Gneise, schwach kalkhaltig, graubraun-hellbraun, Schwarzwaldschotter
EKB 2	4	4,85	4,90	Folie	26.03.09	x	x	x	x	x	x	x		x	13,9	2,71	2,05	1,80	33,57	2,96	5,10	<1	<1	<1		50	<5	<5		88,62	Kaol, Ill, Qz, Fsp					19	40	36	5	0		2.4.3.1	TA	q	fl	Schluff (TA), stark sandig, tonig, schwach kiesig, rotbraun-braun, halbfest-fest, erdfeucht, brecciiert (Tonstückchen); rostfarbene Sandstein-Einschaltung
EKB 2	5	5,75	5,80	Folie	26.03.09	x	x	x	x	x		x		x	11,7	2,70	2,07	1,86	31,35	3,09	4,89	<1	<1	<1		50	<5	<5		76,06	Kaol, Ill, Qz, Fsp												TM	q	fl	Schluff (TM), tonig, sandig, hellrotbraun, rotbraune Schlieren, halbfest-fest, erdfeucht, verwitterte Ton-/Schluffsteine des Schilfsandsteins
EKB 2	6	11,90		Folie	26.03.09																																							Spülprobenentnahme: Schluff, stark sandig, tonig, feinkiesig, gelbbraun, flüssig
EKB 2	7	6,85	6,90	Folie	30.03.09	x		x	x						5,8	2,71	2,59	2,45	9,66																							km2		Feinsandstein, hellgrau und dunkelgrau laminiert, geflasert, mit dunklen, tonigen Linsen, glimmerführend, dünnplattig, mäßig hart, Schrägschichtung, glaukonitisch?
EKB 2	8	7,20	7,30	Folie	30.03.09	x	x	x	x	x				x	8,0	2,73	2,50	2,31	15,13	5,05	8,72	<1	<1	<1		40	<5	7,0			Qz, Kaol, Ill, Dol, Fsp													km2		Feinsandstein, laminiert, Tonlinsen, grau-dunkelgrau, glimmerführend, erdfeucht, stückig bis kleinstückig
EKB 2	9	8,30	8,40	Folie	30.03.09	x		x	x						6,6	2,73	2,46	2,30	15,67																							km2		Tonstein, feinsandig, glimmerführend, sandflaserig, grau bis dunkelgrau, erdfeucht, stückig bis großstückig
EKB 2	10	9,25	9,30	Folie	30.03.09	x	x	x	x	x		x		x	10,0	2,70	2,40	2,18	19,27	5,35	8,22	<1	<1	<1		55	<5	< 5		84,08	Kaol, Ill, Qz, Fsp													km2		Tonstein, schwach feinsandig, glimmerführend, dunkelgrau bis schwarzgrau, erdfeucht, stückig
EKB 2	11	10,20	10,25	Folie	30.03.09	x		x	x						8,4	2,67	2,38	2,20	17,64																							km2		Tonstein, feinsandig, glimmerführend, dunkelgrau-grauschwarz, erdfeucht, stückig bis kleinstückig
EKB 2	12	11,45	11,50	Folie	30.03.09	x		x	x						8,8	2,63	2,34	2,15	18,31																							km2		Ton-/Schluffstein, stark feinsandig, sandflaserig, dunkelgrau-hellgrau laminiert, erdfeucht, stückig, Harnische, ockerfarben angelaufen
EKB 2	13	12,05	12,10	Folie	30.03.09	x	x	x	x						20,5	2,70	1,99	1,65	39,05								< 5															km2		Mittelsandstein, feinsandig, schwach schluffig, rostbraun mit schwarzen Laminae, erdfeucht, stückig, absandend, mürb
EKB 2	14	12,95	13,00	Folie	30.03.09	x	x	x	x	x		x		x	8,1	2,71	2,46	2,28	15,93	4,54	10,12	<1	<1	<1		40	<5	10,0		54,34	Qz, Kaol, Ill, Dol, Cc, Fsp													km2		Feinsandstein, mittelsandig, mit merklichem Tongehalt, hellgrau laminiert, einzelne kohlige Flitter, erdfeucht, stückig bis kleinstückig, kantig brechend
EKB 2	15	13,90	13,95	Folie	01.04.09	x	x	x	x	x		x		x	8,9	2,66	2,39	2,19	17,62	4,63	6,65	<1	<1	<1		60	<5	<5		77,92	Qz, Kaol, Ill, Fsp													km2		Ton-/Schluffstein, feinsandig, glimmerführend, dunkelgrau laminiert, erdfeucht, stückig-großstückig, mürb
EKB 2	16	14,20	14,25	Folie	01.04.09	x	x	x	x	x					9,5	2,66	2,36	2,16	19,09	4,61	7,25	<1	<1	<1		55	<5	<5			Qz, Kaol, Ill, Fsp													km2		Fein- bis Mittelsandstein, Tonlinsen/Tontapeten, schräggeschichtet, hellgrau-dunkelgrau, an der Basis rotbraun, glimmerführend, erdfeucht, großstückig, schwach absandend, mäßig hart
EKB 2	17	14,90	14,95	Folie	16.04.09	x	x	x	x	x		x		x	10,9	2,67	2,37	2,14	19,96	4,38	9,62	<1	<1	<1		55	<5	9		51,89	Qz, Kaol, Ill, Dol, Fsp													km2		Wechsellagerung: Schluffstein und Feinsandstein, tonig, laminiert, glimmerführend, grau-dunkelgrau, erdfeucht bis feucht, großstückig, schwach absandend, mäßig hart
EKB 2	18	17,00	17,05	Folie	17.04.09	x	x	x	x	x					8,6	2,65	2,29	2,11	20,38	4,25	6,18	<1	<1	<1		50	<5	<5			Qz, Kaol, Ill, Fsp, Dol													km2		Fein- bis Mittelsandstein, grau bis dunkelgrau, glimmerführend, dunkle Tonlinsen, schwarze Tontapeten, erdfeucht, stückig bis kleinstückig, schwach absandend, mäßig hart
EKB 2	19	17,55	17,60	Folie	17.04.09	x	x	x	x	x		x		x	8,7	2,65	2,34	2,16	18,81	4,51	6,76	<1	<1	<1		60	<5	<5		52,20	Qz, Kaol, Ill, Fsp, Dol													km2		Schluffstein, feinsandig, tonig, glimmerführend, sandflaserig, dunkelgrau, laminiert, erdfeucht, stückig, mürb-kantenbrüchig
EKB 2	20	19,00	19,05	Folie	17.04.09	x	x	x	x	x		x		x	5,3	2,73	2,49	2,37	13,28	6,30	9,71	<1	<1	<1		50	<5	5		62,97	Qz, Kaol, Ill, Fsp, Dol													km2		Fein- bis Mittelsandstein, schluffig, glimmerführend, mit schwarzer Tontapete inkl. Pyrit-Kristallen, dunkelgrau und hellgrau laminiert, erdfeucht, kalkhaltig an Klüftchen, großstückig
EKB 2	21	19,90	19,95	Folie	17.04.09	x	x	x	x	x		x		x	13,3	2,66	2,33	2,06	22,83	4,34	8,62	<1	<1	<1		60	<5	<5		75,67	Ill, Qz, Fsp, Dol													km1	GES	Ton-/Schluffstein, feinsandig, schwarzgrau, erdfeucht, stark zerbohrt (steif-halbfest)
EKB 2	22	20,20	20,25	Folie	20.04.09	x	x	x	x	x		x		x	3,7	2,88	2,69	2,60	9,80	2,79	37,79	<1	<1	<1		20	<5	77		41,92	Dol, Ill, Qz													km1	GES	Dolomitstein, stark tonig, schwarzgrau, erdfeucht bis feucht, kleinstückig, stark zerbohrt
EKB 2	23	20,85	20,90	Folie	20.04.09	x	x	x	x	x				x	12,3	2,79	2,17	1,93	30,73	3,42	19,25	<1	<1	<1		55	<5	29			Ill, Dol, Qz, Fsp													km1	GES	Tonmergelstein, feinsandig, dolomitisch, hellgrau, erdfeucht bis feucht, stark zerbohrt (halbfest-fest)
EKB 2	24	21,20	21,25	Folie	20.04.09	x	x	x	x	x		x		x	6,9	2,86	2,55	2,39	16,41	2,17	34,50	<1	<1	<1		25	<5	73		56,63	Dol, Ill, Qz													km1	GES	Dolomitmergelstein, schwach feinsandig, hellgrau, erdfeucht, stückig-kleinstückig, polygonal-bröckelig, scherbig-kantig brechend, mürb
EKB 2	25	21,80	21,85	Folie	20.04.09																																						Probe aus Kernfanghülse: Tonstein, schwach feinsandig, kalkhaltig, trocken (nur Rückstellprobe)
EKB 2	26	23,75	23,80	Folie	20.04.09	x	x	x	x	x	x	x		x	13,8	2,71	2,19	1,92	29,06	5,20	9,57	<1	<1	<1		65	<5	<5		92,81	Ill, Kaol, Qz					29	55	16	0	0	3.5.2.0	TA	km1	GES	Schluff, stark tonig, sandig, schwarz, erdfeucht, halbfest-fest, "fetter Ton"; Fein- bis Mittelsandstein, tonig, schluffig, graugrün, erdfeucht (GAR)
EKB 2	27	22,90	22,95	Folie	20.04.09	x	x	x	x	x		x		x	12,8	2,77	2,29	2,03	26,61	3,81	7,35	<1	<1	<1		55	<5	<5		93,81	Ill, Qz, Fsp													km1	GES	Ton-/Schluffstein, grau bis grünlichgrau, erdfeucht, stückig bis kleinstückig, polygonal-bröckelig, mürb-brüchig (GAR)
EKB 2	28	24,00	24,05	Folie	22.04.09	x	x	x	x	x		x		x	15,9	2,73	2,15	1,86	32,00	3,74	7,31	<1	<1	<1		60	<5	<5		97,50	Ill, Qz, Fsp													km1	GES	Ton-/Schluffstein, stark feinsandig, dunkelgrau laminiert, erdfeucht-trocken, halbfest-fest, großstückig (GAR)
EKB 2	29	25,00	25,05	Folie	22.04.09	x	x	x	x	x					17,4	2,79	2,11	1,79	35,70	3,66	15,90	<1	<1	<1		55	<5	18			Ill, Dol, Qz, Fsp													km1	GES	Schluff, stark tonig, stark sandig, schwach kiesig, brecciös, dolomitisch, rotbraun und beigegrün, halbfest, erdfeucht (GAR mit Tonsteinbröckchen)
EKB 2	30	25,95	26,00	Folie	22.04.09	x	x	x	x	x	x	x	x	x	20,3	2,72	2,06	1,71	37,12	4,09	8,78	<1	<1	<1		65	<5	<5		95,40	Ill, Dol, Qz, Fsp	0,4	0,24	0,16	1,18	13	36	51	0	0	1.4.5.0	TM	km1	GES	Sand (TM), stark schluffig, schwach tonig, Karbonatknöllchen (Durchmesser: 1 mm), rotbraun und beigegrün-marmoriert, halbfest, erdfeucht (GAR)
EKB 2	31	27,05	27,10	Folie	22.04.09	x	x	x	x	x	x	x	x	x	17,5	2,74	2,09	1,78	35,15	3,13	14,53	<1	<1	<1		60	<5	16		84,42	Ill, Dol, Cc, Qz, Fsp	0,4	0,24	0,16	1,18	10	40	48	2	0	1.4.5.0	TM	km1	GES	Sand (TM), stark schluffig, schwach tonig, sehr schwach kiesig, Dolomitknöllchen (Durchmesser: 1 mm), rotbraun und dunkelgrau, erdfeucht, halbfest (GAR)
EKB 2	32	28,65	28,70	Folie	22.04.09	x	x	x	x	x		x		x	7,8	2,63	2,29	2,12	19,45	8,28	15,78	16	16	<1	100	75	<5	<5		87,68	Ill, Chl, Qz													km1	GES	Ton-/Schluffstein, dunkelgrau, Marienglasblättchen, wolkiger, rosa Gips, Fasergipsklüfte, erdfeucht, polygonal-bröckelig; Gips 16 % (**Oberer Gipsspiegel**)
EKB 2	33	29,35	29,40	Folie	22.04.09	x	x	x	x	x		x		x	2,6	2,45	2,36	2,30	6,31	14,59	35,10	74	74	<1	100	20	10	<5		80,88	Ill, Chl, Qz													km1	GES	Wechsellagerung: Gipsstein, hellgrau und Tonstein, dunkelgrau, kalkhaltig, erdfeucht, mit rosafarbenen, wolkig verteilten Gipsknötchen, 7 mm Durchmesser; Fasergips, weiß, 5 mm; Gips 74 %
EKB 2	34 a+b	30,00	30,00	Dose	23.04.09																																						Auflandung nach Pumpversuch: Fein- bis Mittelsand, schluffig, schwach tonig und kiesig, dunkelgrau, kalkhaltig, nass
EKB 2	35	30,50	30,55	Folie	24.04.09	x	x	x	x	x		x		x	4,0	2,73	2,56	2,46	9,66	7,83	32,94	17	17	<1	100	40	10	38		70,25	Ill, Chl, Qz													km1	GES	Tonmergelstein, dolomitisch, gipshaltig, grau-graugrünlich, feucht, homogen, polygonal-bröckelig, mäßig hart, kantenbrüchig, Fasergips/Marienglas, Harnische; Gips 3 %
EKB 2	36	31,05	31,10	Folie	24.04.09	x	x	x	x	x		x		x	4,9	2,75	2,56	2,44	11,20	4,10	27,48	3	3	<1	100	50	<5	44		70,22	Dol, Chl, Ill, Qz													km1	UBE	Tonmergelstein, dunkelrotbraun und graugrün, großstückig, trocken, mäßig-hart, rosa Wolkengips, weißer Fasergips, Harnische; Gips 23%
EKB 2	37	32,25	32,30	Folie	24.04.09	x	x	x	x	x		x		x	1,8	2,67	2,45	2,40	9,92	8,33	25,83	23	23	<1	100	20	<5	34		66,24	Dol, Qz, Ill, Chl													km1	UBE	Tonmergelstein, dunkelrotbraun und graugrün, großstückig, trocken, mäßig-hart, rosa Wolkengips, weißer Fasergips, Harnische; Gips 23%
EKB 2	38	33,10	33,15	Folie	12.05.09	x	x	x	n.b	x		x		x	6,8	2,63	n.b	n.b	0,00	9,59	24,17	19	19	<1	100	40	<5	22		70,15	Dol, Qz, Ill, Chl													km1	UBE	Ton-/Schluffstein, dolomitisch, dunkelrotbraun, mit rotbraunen Gipssteinlagen, stückig, brüchig-splittrig; Gips 19 %
EKB 2	39	34,00	34,05	Folie	12.05.09	x	x	x	x	x		x		x	4,3	2,57	2,35	2,25	12,49	12,22	33,39	39	39	<1	100	45	15	<5		100,50	Ill, Chl, Qz													km1	UBE	Tonstein, dunkelrotbraun bis dunkelgrau, erdfeucht, splittrig, brüchig; Wolkengips, grau; Fasergipslagen; Gips 39 %
EKB 2	40	35,75	35,80	Folie	13.05.09	x	x	x	x	x		x		x	9,4	2,60	2,36	2,16	17,11	8,40	21,43	17	17	<1	100	65	<5	<5		117,94	Ill, Chl, Qz													km1	UBE	Tonstein, dunkelrotbraun-graugrün; weißrötlicher Wolkengips, erdfeucht, fest, brüchig, Klüfte mit Fasergips; Gips 17 %
EKB 2	41	36,95	37,00	Folie	13.05.09	x	x	x	x	x		x		x	4,8	2,71	2,51	2,40	11,70	5,43	21,35	3	3	<1	100	50	<5	31,5		86,50	Dol, Ill, Chl, Qz													km1	UBE	Tonmergelstein, dolomitisch, dunkelgrau und hellgrau laminiert, erdfeucht bis trocken, fest, kantenbrüchig, großstückig, Fasergipslagen, Harnische; Gips 3 %
EKB 2	42	37,90	38,00	Folie	13.05.09	x	x	x	x	x		x		x	5,3	2,70	2,54	2,41	10,66	4,55	14,49	6	6	<1	100	50	<5	13		63,43	Ill, Qz, Chl, Dol													km1	UBE	Tonstein, dolomitisch, dunkelrotbraun, mit grüngrauen, 2-3 cm großen Reduktionshöfen, großstückig, trocken, Fasergipse, Harnische; Gips 6 %
EKB 2	43	39,00	39,05	Folie	13.05.09	x	x	x	x	x		x		x	4,6	2,68	2,50	2,39	10,75	18,15	18,15	9	9	<1	100	45	<5	15		75,25	Ill, Qz, Dol													km1	UBE	Tonstein, dolomitisch, dunkelrotbraun und graugrün, trocken, stückig, mäßig hart, brüchig, Harnische, versch. Fasergipslagen bis 1 cm; Gips 9 %
EKB 2	44	40,00	40,10	Folie	18.05.09	x	x	x	x	x		x		x	3,8	2,49	2,32	2,23	10,32	13,62	36,94	62	62	<1	100	30	10	<5		100,80	Ill, Qz, Corr													km1	UBE	Gipsstein, wolkig, knollig, rötlich weiß; Tonstein, dunkelgrau, trocken-erdfeucht, Harnische, Fasergipslagen bis 0,5 cm; Gips 62 %
EKB 2	45	40,60	40,65	Folie	18.05.09	x	x	x	x	x		x		x	6,0	2,55	2,32	2,19	14,17	12,19	33,48	43	43	<1	100	45	15	<5		64,18	Ill, Corr, Qz													km1	UBE	Tonstein, dunkelgrau, erdfeucht, brüchig, polygonal zerfallend; mit rosa Gipsknollen (2-5 cm), Fasergipslagen; Gips 43 %
EKB 2	46	41,00	41,05	Folie	18.05.09	x	x	x	x	x		x		x	4,8	2,57	2,31	2,21	14,13	9,96	22,76	39	39	<1	100	45	15	<5		49,35	Ill, Corr, Qz													km1	UBE	Tonstein, dunkelgrau und dunkelrotbraun, stückig, erdfeucht; Gipsknollen, rötlichweiß (bis 5 cm), Fasergipslagen; Gips 39 %
EKB 2	47	42,00	42,10	Folie	18.05.09	x	x	x	x	x		x		x	2,8	2,67	2,55	2,48	7,26	8,03	29,52	25	25	<1	100	30	<5	25		60,26	Qz, Ill													km1	UBE	Tonstein, kalkig, dunkelgrau, einzelne rotbraune Schlieren, trocken, großstückig, mäßig hart-hart; Fasergipslagen, weiß/rosafarben; Gips 25 %
EKB 2	48	43,25	43,35	Folie	18.05.09	x	x	x	x	x		x		x	6,7	2,57	2,30	2,16	16,00	10,98	26,14	31	31	<1	100	65	25	<5		70,15	Corr, Ill													km1	UBE	Tonstein, dunkelgrau, erdfeucht, polygonal-bröckelig, brecciiert, großstückig; Gipsknollen, rosa, (2 bis 6 cm), Fasergipslagen; Gips 31 %
EKB 2	49	43,90	44,00	Folie	18.05.09	x	x	x	x	x		x		x	6,5	2,39	2,32	2,31	3,40	18,49	24,74	94	94	<1	100	5	5	<5		64,81	Corr													km1	UBE	Gipsstein, wolkig-knollig, rötlich-weiß, leicht fasrig, wenig weißer Fasergips; in Zwickeln: Tonstein, dunkelgrau; erdfeucht-trocken, Harnische, Gips 94 %
EKB 2	50	44,00	44,05	Folie	19.05.09	x	x	x	x	x		x		x	2,8	2,46	2,31	2,24	8,61	13,85	37,16	65	65	<1	100	30	20	5		60,61	Corr, Ill													km1	UBE	Gipsstein, wolkig-knollig, rötlich weiß, weißer Fasergips; in Zwickeln: Tonstein, dunkelgrau; erdfeucht-trocken, stückig; Gips 65 %
EKB 2	51	44,90	45,00	Folie	19.05.09	x	x	x	x	x		x		x	3,5	2,45	2,32	2,24	8,62	14,12	32,52	70	70	<1	100	25	10	<5		65,04	Corr, Ill, Qz													km1	UBE	Gipsstein, wolkig-knollig, rötlich weiß, weißer Fasergips 5 %; in Zwickeln: Tonstein, dunkelgrau; erdfeucht-trocken, großstückig, Gips 70 %
EKB 2	52	46,00	46,05	Folie	19.05.09	x	x	x	x	x		x		x	7,9	2,60	2,33	2,16	16,77	8,24	19,04	15	15	<1	100	75	25	<5		115,98	Corr, Ill, Qz													km1	UBE	Tonstein, dunkelgrau-rotbraun, mäßig hart, stückig, Harnische, erdfeucht, rosa Gipsknollen (6x3 cm), Fasergips weiß; Gips 15 %
EKB 2	53	47,35	47,40	Folie	19.05.09	x	x	x	x	x		x		x	3,7	2,77	2,62	2,53	8,88	5,34	33,52	7	7	<1	100	30	10	61		75,47	Dol, Ill, Corr, Qz													km1	UBE	Dolomitmergelstein, hellgrau-rotbraun, mäßig hart, stückig, trocken, rosa Gipsknolle, Fasergips weiß; Gips 7 % (Engelhofen-Platte)
EKB 2	54	48,00	48,10	Folie	20.05.09	x	x	x	x	x		x		x	3,0	2,44	2,39	2,32	5,11	14,14	41,01	71	71	<1	100	25	10	<5		66,00	Ill, Corr, Qz													km1	MGH	Gipsstein, hellgrau-rosa; mit Tonstein, rotbraun-dunkelgrau, trocken, mäßig hart-brüchig, stückig, Harnische, Fasergips weiß; Gips 71 %
EKB 2	55	49,00	49,05	Folie	20.05.09	x	x	x	x	x		x		x	1,1	2,37	2,31	2,29	3,62	18,47	25,03	90	90	<1	100	5	5	<5		95,43	Corr, Qz													km1	MGH	Gipsstein, wolkig, knollig, weißlich-grau, mit dunklen Tonlinsen in Zwickeln, erdfeucht-trocken, dunkelrote Gipsknolle; Gips 90 %
EKB 2	56	50,00	50,05	Folie	20.05.09	x	x	x	x	x		x		x	0,2	2,33	2,31	2,30	1,13	20,10	23,64	96	96	<1	100	<5	<5	<5		56,33	Corr													km1	MGH	Gipsstein, wolkig, knollig, weißlich-grau, mit dunklen Tonlinsen, trocken, stückig, Harnische; Gips 94 %
EKB 2	57	50,90	51,00	Folie	20.05.09	x	x	x	x	x		x		x	1,3	2,37	2,33	2,31	2,86	16,66	29,06	81	81	<1	100	15	10	<5		65,61	Corr, Qz													km1	MGH	Gipsstein, grauweißlich, knotig, perlartig; mit Tonstein, dunkelgrau; großstückig, trocken, weißer Fasergips; Gips 81 %
EKB 2	58	51,50	51,65	Folie	26.05.09	x	x	x	n.b.	x		x			x	2,61	n.b	n.b		8,15	26,33	19	19	<1	100	65	20	10		85,41	Ill, Corr, Dol, Qz													km1	MGH	Tonstein, dolomitisch und Gipsstein; zerbohrt, weich, gebohrt mit 101 mm für Triaxzelle; Gips 19 %
EKB 2	59	51,90	51,90	Folie	26.05.09	x	x	x	x	x		x		x	1,3	2,52	2,31	2,28	9,47	12,57	21,71	79	79	<1	100	<5	<5	20,5		85,24	Bassanit, Dol, Corr													km1	MGH	Gipsknolle, bassanitisch, dolomitisch, außen weißlich porös, innen hart, grau, trocken, einzelne Tonlasern, dunkelgrau; Gips 79 %
EKB 2	60	52,65	52,75	Folie	26.05.09	x	x	x	x	x		x		x	1,5	2,45	2,39	2,35	4,15	13,44	28,29	71	71	<1	100	15	5	8		61,63	Dol, Qz, Corr, Ill													km1	MGH	Gipsstein, grauweißlich, knollig, perlartig; Tonsteinfasern dunkelgrau, großstückig, trocken; weißer Fasergips; Gips 71 %
EKB 2	61	53,60	53,70	Folie	26.05.09	x	x	x	x	x		x		x	1,1	2,45	2,44	2,41	1,73	14,49	23,65	80	80	<1	100	<5	<5	14		52,95	Dol, Qz, Corr, Ill													km1	MGH	Gipsstein, knollig, weißlich-rosa, mit Tonstein, dolomitisch, flaserig; trocken, Fasergips, weiß; Gips 80 %
EKB 2	62	54,05	54,10	Folie	26.05.09	x	x	x	x	x		x		x	2,2	2,53	2,53	2,48	2,17	11,84	25,42	70	70	<1	100	15	10	8		64,74	Corr, Ill, Qz													km1	MGH	Gipsstein, grau mit Tonstein, dunkelgrau, trocken-erdfeucht, mäßig hart-brüchig, stückig; Gipsknollen, weißlich-rot, Fasergips weiß; Gips 70 %
EKB 2	63	55,30	55,35	Folie	26.05.09	x	x	x	x	x		x		x	1,9	2,46	2,41	2,37	3,97	16,61	32,20	63	63	<1	100	25	10	<5		53,39	Ill, Corr, Qz													km1	MGH	Gipsstein, außen weißlich, innen grau mit Tonstein, dunkelgrau, trocken-erdfeucht, stückig, Harnische; Gips 63 %
EKB 2	64	55,00	55,05	Folie	26.05.09	x	x	x	x	x		x		x	0,8	2,49	2,39	2,37	4,72	14,61	26,55	75	75	<1	100	5	5	15		55,56	Corr, Dol, Qz													km1	MGH	Gipsstein, knollig-wolkig, grauweiß mit Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau, wellig-laminiert; Fasergipslagen schichtparallel, trocken, stückig; Gips 75 %
EKB 2	65	56,20	56,25	Folie	26.05.09	x	x	x	x	x		x		x	2,0	2,74	2,58	2,53	7,46	6,22	27,24	33	33	<1	100	35	15	26		74,40	Ill, Corr, Dol, Qz													km1	MGH	Wechsellagerung: Tonstein, dolomitisch, dunkelgrau und Gipsstein, hellgrau, spätiger Gips; „slumping-Strukturen", trocken, stückig; Gips 33 %
EKB 2	66	56,70	56,80	Folie	26.05.09	x	x	x	x	x		x		x	5,0

Graphische Darstellung der im Labor ermittelten Boden- und Gesteinskennwerte der EKB 2



Bohrprofil

- Kies und Sand
- Schluff
- Mittelsandstein
- Feinsandstein
- Schluffstein
- Wechsellagerung Feinsand-/Schluffstein
- Tonstein
- Dolomitstein
- Dolomitmergelstein
- Mergelstein, dolomitisch
- Mergelstein
- Gipsstein
- Anhydritstein
- Knollen
- Lagen
- Bänkchen
- Gipsauslaugungsresiduen
- Hornsteinknollen
- Störungsbrekzie
- Ringraumverfüllung

Graphische Darstellung der im Labor ermittelten Boden- und Gesteinskennwerte der EKB 2

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763/10-563 Anlage: 5.13

Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität • gegründet 1825

Materialprüfungs- und
Forschungsanstalt

MPA
KARLSRUHE

Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Aktenzeichen: 94-4763//10-563 Anlage: 5.14

Prüfbericht

Auftraggeber: Stadtverwaltung Staufen
[redacted]
Hauptstraße 53
79219 Staufen i. Br.

Betreff: Gebäudeschäden durch Hebung im Stadtgebiet von Staufen
Untersuchung des Verpressgutes der Erdwärmesonde EWS5

Bericht Nr.: 09 20 65 0500

Datum des Berichts: 23.09.2009
Textseiten: 3
Anlagen: 2

Bearbeiter: [redacted]
Durchwahl: 0721 608-6792

ausgefertigt:
2fach: Bürgermeisteramt Stadt Staufen i. Br.
1fach: Regierungspräsidium Freiburg
1fach: Ingenieurgruppe Geotechnik GbR
1fach: Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe

Postanschrift: Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe
Universität Karlsruhe (TH) - 76128 Karlsruhe
Telefon: (0721) 608-6504
Telefax: (0721) 608-7796

Lieferanschrift: Gotthard-Franz-Straße 2 - 76131 Karlsruhe, Gebäude 50.32

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Veröffentlichung und auszugsweise Wiedergabe bedarf der schriftlichen Genehmigung der MPA.

1 Auftrag

Mit Schreiben vom 12.08.2009 wurde die Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, MPA Karlsruhe der Universität Karlsruhe (TH) von der Stadtverwaltung Staufen i. Br. beauftragt, chemische Untersuchungen des Verpressgutes der Erdwärmesonde EWS5 durchzuführen, mit dem Ziel die Zementzusammensetzung dieser Ringraumfüllung zu bestimmen. Im Speziellen sollte untersucht werden, ob ein sulfatbeständiger Zement verwendet wurde.

2 Ver wendete Unterlagen

[1] DIN EN 52170-2:1980-02 Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton

[2] DIN EN 196-2: 2005-05 Prüfverfahren für Zement. Teil 2: Chemische Analyse von Zement

[3] DIN 1164-10: 2004-08 Zemente mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften

3 Prüfmaterial und Prüfumfang

Am 06.08.2009 erhielt die MPA Karlsruhe Probenmaterial von einer Erkundungsbohrung, die die Erdwärmesonde EWS5 durchstoßen hat. Bei dem Probenmaterial handelt es sich um Teile der Verrohrung der Erdwärmesonde, anstehendes Anhydritgestein und zementöse Ringraumfüllung. Die Fotodokumentation der Probe ist in Anlage 1 in den Bilder 1 – 6 hinterlegt. Die chemischen Untersuchungen und röntgenographische Phasenanalyse beschränkt sich dabei auf die zementöse Ringraumfüllung (Anlage 1, Bild 6). Insbesondere sollte untersucht werden, ob ein sulfatbeständiger Zement verwendet wurde.

4 Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

4.1 Rön tgenographische Phasenanalyse

Die zementöse Ringraumfüllung wurde für die röntgenographische Phasenanalyse zunächst analysenfein aufgemahlen. Das Mahlgut wurde anschließend mit Hilfe eines Bruker D8 Advance Röntgendiffraktometers mineralogisch charakterisiert und der Phaseninhalt in einer Doppelmessung bestimmt.

In Anlage 2, Bild 7 ist das aufgenommene repräsentative Röntgenspektrum der Probe dargestellt. Nachfolgende Mineralphasen konnten identifiziert werden:

Ettringit, Quarz, kristallines CSH

4.2 Nas schemische Untersuchungen

Für die nasschemische Elementanalytik wurde ein Teil des Probenmaterials aufgemahlen und getrocknet. Durch Probenteilung wurde eine repräsentative Teilmenge abgetrennt und nach [1, 2] in einer Doppelbestimmung untersucht.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der nasschemischen Untersuchungen in Tabelle 1 als Mittelwert der Doppelbestimmung dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse der nasschemischen Untersuchungen als Mittelwert der Doppelbestimmung

Probe	Anteil bzw. Elementanteil als Oxid [Masse-%]								
	CaO	SiO_2	GB*	UR*	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	CO_2	SO_3
Ringraumfüllung EWS5	34,57	12,49	82,58	15,18	1,60	2,02	3,77	4,11	11,80

*mit GB = Glühbeständiges und UR = Unlöslicher Rückstand

5 Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen

Das Ergebnis der röntgenographischen Phasenanalyse zeigt, dass ein Großteil der Probe aus Ettringit besteht, Quarz als Nebenbestandteil auftritt und die CSH-Phasen vermutlich durch erhöhte Temperatureinwirkung einen hohen kristallinen Anteil haben. Das Auftreten von Ettringit als Hauptphase in dem Probenmaterial lässt die Vermutung zu, dass eine chemische Reaktion zwischen zementöser Ringraumfüllung und anstehendem Anhydritgestein stattfand und vermutlich kein sulfatbeständiger Zement für die Ringraumfüllung verwendet wurde.

Diese Vermutung wird durch die nasschemischen Untersuchungen des Probenmaterials weiter verstärkt. Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich ein CaO/SiO_2-Verhältnis von knapp 2,8 ermitteln, was auf die Verwendung von Portlandzement (CEM I) hindeutet. Nach [3] liegen die Anforderungen für hohen Sulfatwiderstand bei einem CEM I - Zement bei einem C_3A-Gehalt von ≤ 3 Masse-% und einem Al_2O_3-Gehalt von ≤ 5,0 Masse-%.

Da nach Auskunft des Auftraggebers keine reine Zementsuspension für die Ringraumfüllung verwendet wurde, ist eine eindeutige Angabe der Zusammensetzung des Zementes nicht möglich. Die Analyse ergibt jedoch einen Al_2O_3-Gehalt, der nahe am Grenzwert von 5 Masse-% liegt und einen C_3A-Gehalt über 3 Masse-%. Je nach verwendeter Datengrundlage berechnet sich der C_3A-Gehalt aus dem Probenmaterial nach Gleichung (1) zu 5 bis 9 Masse-% und liegt damit deutlich oberhalb des für hochsulfatbeständige CEM I - Zemente geforderten Grenzwertes.

$$C_3A = 2{,}650 \cdot Al_2O_3 - 1{,}692 \cdot Fe_2O_3 \qquad \text{Gl. (1)}$$

Die unterschiedlichen Ergebnisse bei der C_3A-Berechnung beruhen auf den unzureichenden Informationen zur Zusammensetzung und dem Mischungsverhältnis der Ausgangsstoffe. Die Ergebnisse der nasschemischen Analyse können auf den glühbeständigen Anteil der Probe, den Bindemittelanteil oder einen abgeschätzten Zementgehalt bezogen berechnet werden. Da allerdings alle berechneten Werte den geforderten Grenzwert deutlich übersteigen, liegt die Vermutung nahe, dass kein sulfatbeständiger Zement verwendet wurde.

Um diese Vermutungen abzusichern, wären weitere Untersuchungen an Proben aus der Ringraumfüllung sowie eine Charakterisierung der verwendeten Ausgangsstoffe erforderlich.

Der Direktor [redacted] Der Leiter der Abteilung Baustoffe [redacted] Der Sachbearbeiter [redacted]

MATERIALPRÜFUNG F. MASSIVBAU U. BAUSTOFFE

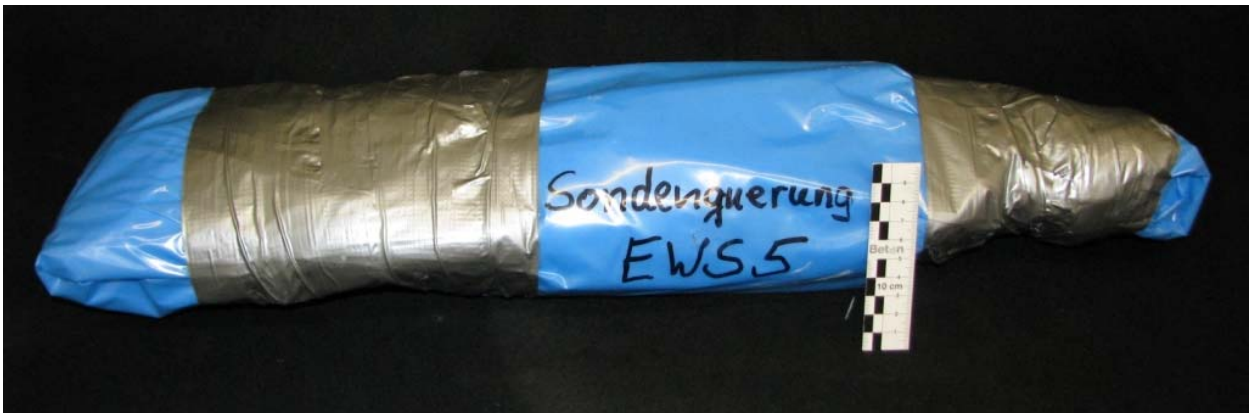


Bild 1: Übersichtsaufnahme der Probe nach der Anlieferung

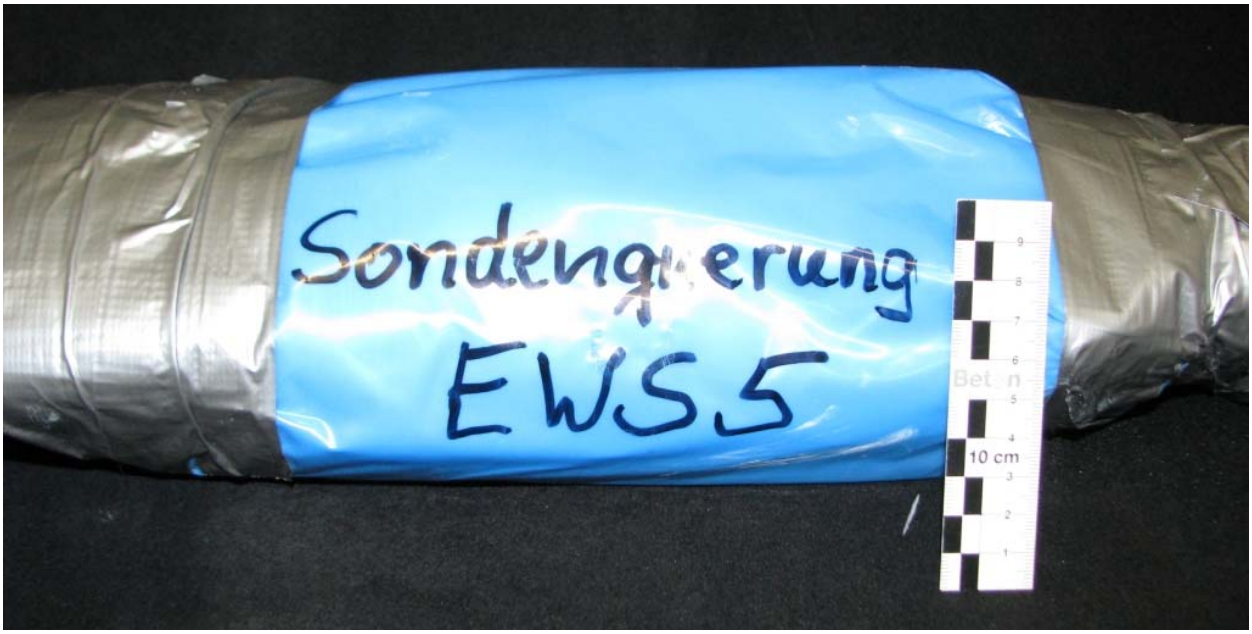


Bild 2: Detailaufnahme der Probebezeichnung nach der Anlieferung

UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH)
AMTL. MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
INSTITUT F. MASSIVBAU U. BAUSTOFFTECHNOLOGIE

Bild 3: Übersichtsaufnahme der ausgepackten Gesamtprobe (Kunststoffrohre, Umgebungsgestein (dunkel), Ringraumfüllung (hellgelb)

Bild 4: Detailaufnahme des Probenmaterials (Umgebungsgestein, Wärmesondenrohr)

UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH)
AMTL. MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
INSTITUT F. MASSIVBAU U. BAUSTOFFTECHNOLOGIE

Bild 5: Detailaufnahme des Probenmaterials (graues Umgebungsgestein, Wärmesondenrohr, helle Ringraumfüllung)

Bild 6: Detailaufnahme des Probenmaterials (graues Umgebungsgestein, helle Ringraumfüllung)

UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH)
AMTL. MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
INSTITUT F. MASSIVBAU U. BAUSTOFFTECHNOLOGIE

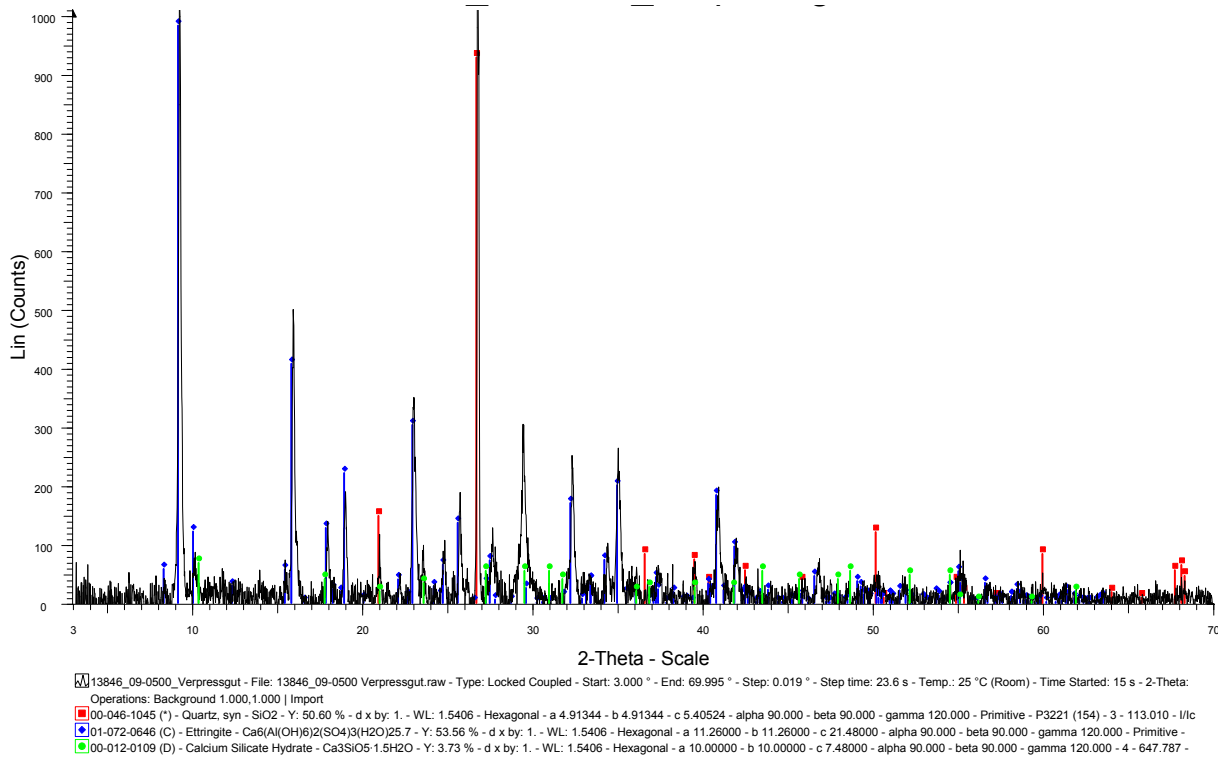


Bild 7: Röntgendiffraktogramm der Ringraumfüllung

B O H R P R O F I L

Bezeichnung:	EWS 1	**TK 25 Nr.:** 8112	**Archiv-Nr.:** 216
Projekt:	Rathaus Staufen	**Blatt:** Staufen	
Lage:	[redacted] Flst. [redacted]	**Koordinaten** (nach Einmessung):	
		R: [redacted]	**H:** [redacted]
Gemeinde:	Staufen	**Höhen** (nach Einmessung):	
Teilort:		**Ansatzpunkt:** 286.69	m ü. NN
Kreis:	Breisgau-Hochschwarzwald	**Messpunkt:**	m ü. NN
Geol. Aufnahme:	14.03.2008	**Ruhewasserspiegel:**	m u. A.
Bearbeiter/in:	[redacted]		m ü. NN
Bohrfirma:	Wälderbau		m ü. NN
Bohrzeit:	04.09. - 21.09. 2007		m ü. NN
Bohrverfahren (m u. A./Ø mm)**:**		**Endteufe:** 140	m u. A.

Filterstrecken (m u. A./Ø mm)**:**

Abdichtungen (m u. A.)**:**

Bemerkungen: Die ohne Nr. eingegangenen Proben wurden mit Vorbehalt der EWS 1 zugeordnet. Wegen des hohen Nachfall-Anteils sind die Schichtgrenzen unterhalb von 110 m unsicher.

Datum der Einmessung: 23. September 2009.

Kurzprofil (mit stratigr. Deutung):

0 – 2 m Anthropogene Aufschüttung (yA)

– 6 m Neuenburg-Schichten (qN)

– 8 m Hauptsteinmergel (H)

– 21 m Schilfsandstein-Formation (km2)

– 130 m Gipskeuper-Formation (km1)

- – 32 m: Graue Estherienschichten (GES)
- – 52 m: Untere Bunte Estherienschichten (UBE)

– m – 98 m: Mittlerer Gipshorizont (MGH) u. Weinsberg-Horizont (WEH)

– m – 116 m: Dunkelrote Mergel (DRM)

– m – 119 m: Bochingen-Horizont (BH)

– m – 130 m: Grundgipsschichten (GI)

– 140 m Lettenkeuper-Formation (kuL)

Bezeichnung/Projekt: EWS 1 / Rathaus Staufen **Anl. 6.1**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

Teufe (m u. A.)**:** Gesteinsart (Haupt-, Nebengemengeteile usw.), Farbe, Gefüge Verwitterungsgrad, Konsistenz, Fossilinhalt, Klüftung u. a.

0	–	2	m	Kristallinschotter (Gneis, Granit, Quarz), Ziegelbruchstücke
	–	6	m	Kristallinschotter (Gneis, Granit, Quarz), relativ frisch (80 %), Feinsand, vereinzelt Ziegelbruchstücke
	–	8	m	Schlufftonstein, hellgrün u. Kalkstein, feinkristallin (Dedolomit), hellbeige, GA-Calcit, wenig Kristallin
	–	10	m	Schlufftonstein, rotbraun bis dunkelrot (95 %), Dolomit, graubraun (5 %)
	–	12	m	Schlufftonstein, rotbraun, fein hellgrün marmoriert, z. T. schwach feinsandig (5-10 %)
	–	14	m	Feinsandstein, z. T. tonig, glimmerführend, geschichtet, rötlichbraun; "green pills"
	–	16	m	Feinsandstein, tonig, glimmerführend, geschichtet, graubraun bis grau
	–	20	m	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig, grau, kohliges Pflanzenhäcksel
	–	22	m	Schlufftonstein, dunkelgrau (50-55 %), Fein- bis Mittelsandstein, grau, z. T. mit tonigen Zwischenlagen; kohliges Pflanzenhäcksel (40 %), Dolomit, dunkelgrau (5-10 %)
	–	24	m	Schlufftonstein, dunkelgrau (50 %), Dolomit, mikritisch bis mikrosparitisch, hell- bis dunkelgrau (30 %), Feinsandstein, grau u. rötlich (20 %, Nachfall)
	–	26	m	Schlufftonstein, dunkelgrau (50 %), GA-Calcit u. wenig GA-Schluff, weiß u. rosa (40 %), Tonstein, rot (10 %, Nachfall)
	–	28	m	GA-Calcit u. wenig GA-Schluff, rosa (50 %), Schlufftonstein, dunkelgrau (40 %), Tonstein, rot (10 %, Nachfall)
	–	30	m	Dolomit, grau (50 %), Schlufftonstein, grau bis dunkelgrau (40 %), GA-Calcit, z. T. brecciös mit Tonstein-Klasten (10 %), vereinzelt Gips, feinkörnig, weiß
	–	32	m	Dolomit, grau (45 %), Schlufftonstein, grau bis dunkelgrau (40 %), GA-Calcit, z. T. brecciös mit Tonstein-Klasten (10 %), vereinzelt Gips, feinkörnig, weiß, Feinsandstein, tonig, hellrot (5 %, Nachfall aus km2)
	–	34	m	Schlufftonstein, grau, mit Gips (60 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, rotbraun, z. T. grau marmoriert, mit Gips durchsetzt (30 %), [Gipsanteil ca. 30-40 %], GA-Schluff, hellgrau (10 %)
	–	36	m	Schlufftonstein, grau, mit Gips (60 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, rotbraun, z. T. grau marmoriert, mit Gips durchsetzt (30 %), [Gipsanteil ca. 50 %], GA-Schluff, hellgrau (5 %), Dolomit, mikritisch, grau (5 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 1 / Rathaus Staufen **Anl. 6.1**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	38	m	Schlufftonstein, grau, mit Gips (60 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, rotbraun, z. T. grau marmoriert, mit Gips durchsetzt (40 %); [Gipsanteil ca. 60 %]; vereinzelt Nachfall aus km2
–	42	m	Schlufftonstein, schwarz, mit Gips (90 %), Schlufftonstein, rotbraun mit Gips (5 %), [Gipsanteil ca. 50 %], Dolomit, hellgrau (5 %), vereinzelt Nachfall aus km2
–	44	m	Dolomit, grau (60 %), Schlufftonstein, dolomitisch, dunkelgrau (30 %) und rotbraun (5 %), Gips, weiß (5 %)
–	46	m	Schlufftonstein, z. T. schwach dolomitisch, rotviolett (65 %) und dunkelgrau (25 %), Gips, weiß (5 %), Dolomit, mikritisch, hellgrau (5 %)
–	48	m	Schlufftonstein, z. T. dolomitisch, rotviolett (50 %) und dunkelgrau (25 %), Dolomit, grau (20 %), Gips, weiß (5 %)
–	50	m	Schlufftonstein, dolomitisch, grünlichgrau (75 %) und rotviolett (25 %), vereinzelt Gips, weiß u. Fasergips, rot
–	52	m	Schlufftonstein, z. T. dolomitisch, grau, bis grünlichgrau (80 %) und rotbraun (<5 %), Dolomit, tonig, grau (15 %), Gips, weiß (<5 %), vereinzelt Feinsandstein, dolomitisch, geschichtet, dunkelgrau (Engelhofenplatte),
–	54	m	Schlufftonstein, z. T. dolomitisch, dunkelgrau, vereinzelt rotbraun, vereinzelt Gips
–	56	m	Gips, weiß (40 %), Schlufftonstein, rotbraun, z. T. dunkelgrau marmoriert (30 %) und grau, rot marmoriert (30 %), vereinzelt Nachfall aus km2
–	70	m	- keine Proben -
–	74	m	Anhydrit, z.T tonig verunreinigt, grau (80 %), Schlufftonstein, grau, vereinzelt rotbraun gefleckt (20 %)
–	78	m	Schlufftonstein, dunkelgrau (70 %), Anhydrit, grau, z. T. feinkörnig, zartrosa (30 %)
–	82	m	Anhydrit, z.T tonig verunreinigt, grau (70-80 %), Schlufftonstein, grau (20-30 %)
–	84	m	Schlufftonstein, grau, z. T. rot gefleckt (60 %), Anhydrit, grau (40 %)
–	86	m	- Probe fehlt -
–	88	m	Schlufftonstein, grau, z. T. rot gefleckt (60 %), Anhydrit, grau (40 %)
–	92	m	Anhydrit, grau (50 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (50 %), vereinzelt Nachfall aus km2
–	94	m	Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (70 %), Anhydrit, grau (30 %)
–	98	m	Anhydrit, grau (60 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (40 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 1 / Rathaus Staufen **Anl. 6.1**
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 106 m Anhydrit, grau (50 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (40-45 %) u. dunkelrot bis rotviolett (5-10 %)

– 110 m Anhydrit, grau (60 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (35 %) u. dunkelrot (5 %)

– 114 m Anhydrit, grau (70 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (25 %) u. dunkelrot (5 %)

– 116 m Anhydrit, grau (80 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (15 %) u. dunkelrot (5 %)

– 118 m Anhydrit, grau (50 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (45 %) u. dunkelrot (5 %)

– 120 m Anhydrit, grau (60 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (30 %), dunkelrot (5 %) u. grauviolett (5 %)

– 128 m Anhydrit grau und Gips, weiß, durchsetzt mit kleinen Dolomit-Kriställchen (50 %; Röntgenanalyse: 100 % Bassanit: ehem. Gips, kein Anhydrit), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau, mit Gips (40 %), Schlufftonstein, dunkelrot (5 %) u. grauviolett (5 %) [Anhydrit wohl Nachfall]

– 130 m Anhydrit, grau (Nachfall) und Gips, z. T. oolithisch, weiß (60 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (35 %) u. dunkelrot (5 %) [viel Nachfall]

– 131 m Dolomit, mikritisch bis mikrosparitisch, hell graubraun (50 %), Schlufftonstein, z. T. dolomitisch, grau, vereinzelt rotbraun (50 %), vereinzelt Gips, weiß

– 132 m Anhydrit, grau und Gips, weiß (60 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, grau (35 %) u. dunkelrot (5 %) [überwiegend Nachfall]

– 134 m Schlufftonstein, grau (50 %) u. rotbraun (15 %), Dolomit, hell braungrau (30 %), Gips, weiß (5 %) [überwiegend Nachfall]

– 136 m Schlufftonstein, grau (70 %) u. rotbraun (15-20 %), Dolomit, hell braungrau (10-15 %), Gips, weiß (<5 %) [überwiegend Nachfall]

– 140 m Schlufftonstein, grau (65 %) u. rotbraun (30 %), Dolomit, Gips, weiß (5 %) [überwiegend Nachfall]

Regierungspräsidium Freiburg
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

B O H R P R O F I L

Bezeichnung:	EWS 2	**TK 25 Nr.:**	8112	**Archiv-Nr.:**	217
Projekt:	Rathaus Staufen	**Blatt:**	Staufen		
Lage:	[redacted] Flst. [redacted]	**Koordinaten** (nach Einmessung):			
		R: [redacted]		**H:** [redacted]	
Gemeinde:	Staufen	**Höhen** (nach Einmessung):			
Teilort:		**Ansatzpunkt:**	286.17		m ü. NN
Kreis:	Breisgau-Hochschwarzwald	**Messpunkt:**			m ü. NN
Geol. Aufnahme:	14. 01. 2008	**Ruhewasserspiegel:**			m u. A.
Bearbeiter/in:	[redacted]				m ü. NN
Bohrfirma:	Wälderbau				m ü. NN
Bohrzeit:	04.09. - 21. 09. 2007				m ü. NN
Bohrverfahren (m u. A./Ø mm)**:**		**Endteufe:**	140		m u. A.

Filterstrecken (m u. A./Ø mm)**:**

Abdichtungen (m u. A.)**:**

Bemerkungen: Die Übersichtsaufnahme durch [redacted] (LGRB) wurde zwischen 63 und 77 m wegen der hohen Kristallin-Schotter-Anteile in EWS 3 durch Einzelbeschreibung der Bohrproben ergänzt. Zwischen 34 und 73 m wurden ausgewählte Proben auf ihr Gips/Anhydrit-Verhältnis untersucht.

Datum der Einmessung: 23. September 2009.

Kurzprofil (mit stratigr. Deutung):

0	–	2	m	Anthropogene Aufschüttung (yA)
	–	6	m	Neuenburg-Schichten (qN)
	–	8	m	Breisgau-Schichten (qBS)
	–	21	m	Schilfsandstein-Formation (km2)
	–	131	m	Gipskeuper-Formation (km1)
				– 32 m: Graue Estherienschichten (GES)
				– 47 m: Untere Bunte Estherienschichten (UBE)
	–		m	– 94 m: Mittlerer Gipshorizont (MGH) u. Weinsberg-Horizont (WEH)
	–		m	– 111 m: Dunkelrote Mergel (DRM)
	–		m	– 117 m: Bochingen-Horizont (BH)
	–		m	– 131 m: Grundgipsschichten (GI)
	–	140	m	Lettenkeuper-Formation (kuL)

Bezeichnung/Projekt: EWS 2 / Rathaus Staufen **Anl. 6.2**
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

Teufe (m u. A.)**:** Gesteinsart (Haupt-, Nebengemengeteile usw.), Farbe, Gefüge Verwitterungsgrad, Konsistenz, Fossilinhalt, Klüftung u. a.

0	–	6	m	Kristallinschotter (Gneis, Granit, Quarz), stark verwittert (>95 %), Ziegelbruchstücke und Schlackenreste (<5 %, nach unten abnehmend)
	–	7	m	Kristallinschotter (Gneis, Granit, Quarz), sehr stark verwittert (80 %), Feinsandstein, geschichtet, hellrot verwittert (20 %), vereinzelt Tonstein, dunkelgrau und Ziegelbruchstücke
	–	8	m	Kristallinschotter (Gneis, Granit, Quarz), sehr stark verwittert (55 %), Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, rotbraun, hellrot verwittert (40 %), Tonstein, dunkelgrau (5 %)
	–	11	m	Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, dunkelrot und grau
	–	14	m	Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, schwach dolomitisch, z. T. mit tonigen Zwischenlagen, grau bis hell rostbraun (60 %), Tonschluffstein, feinsandig, glimmerführend, geschichtet, grau, kohliges Pflanzenhäcksel (40 %)
	–	21	m	Feinsandstein, hellgrau bis hellbraun, ca. 10-30 % hellrot (verwittert ?), z. T. mit tonigen Zwischenlagen, Pyrit, Glaukonit (70-80 %), Tonstein, feinsandig, geschichtet, grau (20-30 %); kohliges Pflanzenhäcksel; bei 20 m vereinzelt Kalkstein, schwach feinsandig, grau;
	–	25	m	Schlufftonstein, hellgrau bis graugrün, einzelne Schalenreste (55 %), Dolomit, mikritisch bis mikrosparitisch, hell- bis dunkelgrau (40 %), Feinsandstein (5 %, Nachfall)
	–	32	m	Schlufftonstein, dolomitisch, feinglimmerführend, mittel- bis dunkelgrau (40 %), Dolomit, mikritisch, hellgrau bis graubraun (10 %), Auslaugungsresiduen (10 %)
	–	47	m	Schlufftonstein, dolomitisch, schwach feinsandig, z. T. feingeschichtet, lagenweise wechselnd grau bis graugrün und dunkelrot, Gips, weiß, nach unten zunehmend mit Dolomit, grau bis graubraun Röntgenuntersuchung bei 34 m und 43 m: überwiegend Gips, viel Bassanit, kein Anhydrit
	–	63	m	Gips, weiß, wenig Anhydrit, mit Tonstein grau, Schlufftonstein, dolomitisch, schwach glimmerführend, z. T. geschichtet, grau, graugrünstichig u. rot, Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (stark schwankend, deutlich weniger als in EWS 3), wenig Dolomit Röntgenuntersuchung bei 49 und 55 m: überwiegend Gips, viel Bassanit, wenig Anhydrit

Bezeichnung/Projekt: EWS 2 / Rathaus Staufen **Anl. 6.2**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 64 m Gips, weiß u. Anhydrit, grau, mit grauen Tonstein-Lagen (50 %), Schlufftonstein, glimmerführend, geschichtet, dunkelgrau, z. T. grünstichig (35 %) u. rot (10 %), Dolomit, tonig, z. T. sandig, dunkelgrau (<5 %), vereinzelt Kristallin, stark verwittert

– 65 m Gips, weiß u. Anhydrit, grau, mit grauen Tonstein-Lagen, z. T. deutlich angelöst (40 %), Schlufftonstein, glimmerführend, geschichtet, dunkelgrau, z. T. grünstichig (25 %) u. rot (<5 %), Dolomit, tonig, z. T. sandig, dunkelgrau und mikritisch, hellbraun (5 %), Kristallin, stark verwittert (20 %) u. Schilfsandstein (5 %)

– 66 m Schlufftonstein, glimmerführend, geschichtet, dunkelgrau, z. T. grünstichig (65 %) u. rot (<5 %), Gips, weiß u. Anhydrit, grau, mit grauen Tonstein-Lagen, z. T. deut-lich angelöst (30 %), Kristallin, stark verwittert u. Schilfsandstein (<5 %), verein-zelt Dolomit, mikritisch, graubraun

– 67 m Schlufftonstein, glimmerführend, geschichtet, dunkelgrau, z. T. grünstichig (45 %) u. rot (<5 %), Gips, weiß u. Anhydrit, grau, mit grauen Tonstein-Lagen, z. T. deut-lich angelöst (40 %), Kristallin, stark verwittert u. Schilfsandstein (10 %)

– 68 m Gips, weiß u. Anhydrit, grau, mit grauen Tonstein-Lagen, z. T. deutlich angelöst (50 %), Schlufftonstein, glimmerführend, geschichtet, dunkelgrau, z. T. grünstichig (45 %) u. rot (<5 %), vereinzelt Dolomit, mikritisch, hellgrau sowie Kristallin, stark verwittert u. Schilfsandstein

– 69 m Schlufftonstein, glimmerführend, geschichtet, hell- bis dunkelgrau, z. T. grünstichig (50 %), selten rot, Gips, weiß u. Anhydrit, grau, mit grauen Tonstein-Lagen, z. T. deutlich angelöst (25 %), Kristallin, stark verwittert (10 %) u. Schilfsandstein (5 %), vereinzelt Dolomit, mikritisch, hellgrau

– 70 m Schlufftonstein, z. T. glimmerführend, geschichtet, hell- bis dunkelgrau, z. T. grünstichig (60 %) u. rot (5 %), Anhydrit, grau, wenig Gips, weiß, mit grauen Tonstein-Lagen, z. T. deutlich angelöst (35 %)

– 71 m Schlufftonstein, z. T. glimmerführend, geschichtet, hell- bis dunkelgrau, z. T. grünstichig (30 %) u. rot (5 %), Anhydrit, grau, wenig Gips, weiß, mit grauen Tonstein-Lagen, z. T. deutlich angelöst (30 %), Schlufftonstein, mit Dolomit-Rhomboedern, hellgrau, mit Gips durchsetzt (25 %), Kristallin u. Schilfsandstein (10 %)

– 72 m Anhydrit, grau, wenig Gips, weiß, mit grauen Tonstein-Lagen, z. T. deutlich angelöst (60 %),Schlufftonstein, z. T. glimmerführend, geschichtet, hell- bis dunkelgrau, z. T. grünstichig (30 %) u. rot (5 %), Schlufftonstein, mit Dolomit-Rhomboedern, hellgrau, mit Gips durchsetzt (25 %), Kristallin u. Schilfsandstein (10 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 2 / Rathaus Staufen **Anl. 6.2**
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 75 m Anhydrit, grau, wenig Gips, weiß (50 %), Schlufftonstein, feingeschichtet, hellgrau, mit kleinen Dolomit-Rhomboedern, mit Gips durchsetzt (35 %), Schlufftonstein, dunkelgrau, grünstichig (15 %)
Röntgenuntersuchung bei 73 m: überwiegend Anhydrit, viel Bassanit, wenig Gips

– 76 m Anhydrit, hellgrau und Gips, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (40 %), Schlufftonstein, hellgrau, mit Dolomit-Rhomboedern (35 %), Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, hellgrau bis dunkel grünlichgrau (25 %) u. rot (<5 %)

– 77 m Schlufftonstein, hellgrau, mit Dolomit-Rhomboedern (40 %), Anhydrit, hellgrau und Gips, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (30 %), Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, hellgrau bis dunkel grünlichgrau (30 %)

– 94 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, feingeschichtet, vorwiegend graugrün (40 %), untergeordnet braungrau u. rot, Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonstein (meist um 30 %, 84-87 m und bei 92 m 50-70 %)

– 95 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, feingeschichtet, graugrün (50 %), dunkelbraungrau (30 %) u. rot (5 %), Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonstein (10 %), Dolomit, mikritisch, graubraun (5 %)

– 108 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, dunkelrot, lagenweise graugrün und hellgrau, mit Lagen von Anhydrit u. Gips, z. T. hellrot

– 111 m Anhydrit u. Gips, z. T. hellrot (50 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, hellgrau (20-25 %), graugrün (20 %) rot (5-10 %), vereinzelt Schlufftonstein, glimmerführend, feingeschichtet, dunkelgrau [Entringen-Sulfat]

– 117 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, geschichtet, überwiegend graugrün und grau, selten rotbraun (Nachfall), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (ca. 25 %)

– 131 m Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, z. T. rot gefleckt, mit grauen Tonlagen (zwischen 30 und 70 % schwankend), Schlufftonstein, z. T. dolomitisch, geschichtet, glimmerführend, schwach feinsandig, dunkelgrau (20-45 % %), rot bis braun (5-30 %)

– 132 m Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (40 %), Dolomit, schwach tonig, mikritisch, hellbraun bis braungrau (30 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, mit grauen Tonlagen (20 %), Schlufftonstein, hell bis mittelgrau, z. T. schwach feinsandig (5 %), rotbraun (<5 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 2 / Rathaus Staufen **Anl. 6.2**
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 133 m Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (40 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (20 %) und grau-grün (15 %), rotbraun (10 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, mit grauen Tonlagen (10 %), Schlufftonstein, hell bis mittelgrau, z. T. schwach feinsandig (<5 %)

– 134 m Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (55 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (20 %) u. rot-braun (10 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (10 %), Schlufftonstein, hell bis mittelgrau, z. T. schwach feinsandig (5 %)

[131-134 m: Grenzschichten, GRE]

– 135 m Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (40 %), Tonmergelstein, dolomitisch, geschichtet, graubraun (20 %), Schluff-tonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (20 %) u. rot-braun (5-10 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (10 %), Tonstein, hell bis mittelgrau, z. T. schwach feinsandig (<5 %)

– 136 m Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (45 %), Tonmergelstein, dolomitisch, schwach feinsandig, geschichtet, graubraun (15 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (20 %) u. rot-braun (5-10 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (5-10 %), Tonstein, hell bis mittel-grau, z. T. schwach feinsandig (<5 %)

[134-136 m: Lingulaschichten, LI]

– 138 m Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, grau bis bräunlichgrau (40 %), Tonmergelstein, dolomitisch, schwach feinsandig, geschichtet, graubraun (25 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (20 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (5-10 %), Tonstein, hell bis mittel-grau, z. T. schwach feinsandig (5-10 %)

[136-138 m: Anoplophoraschichten, AP]

– 139 m Probe fehlt

– 140 m Sandstein, hellgrau, Pflanzenhäcksel, Glaukonit [Sandige Pflanzensch., SPS]

Regierungspräsidium Freiburg
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

B O H R P R O F I L

Bezeichnung:	EWS 3	**TK 25 Nr.:**	8112	**Archiv-Nr.:**	218
Projekt:	Rathaus Staufen	**Blatt:**	Staufen		
Lage:	[redacted] Flst. [redacted]	**Koordinaten** (nach Einmessung):			
		R: [redacted]		**H:** [redacted]	
Gemeinde:	Staufen	**Höhen** (nach Einmessung):			
Teilort:		**Ansatzpunkt:**	286.15		m ü. NN
Kreis:	Breisgau-Hochschwarzwald	**Messpunkt:**			m ü. NN
Geol. Aufnahme:	14. 01. 2008	**Ruhewasserspiegel:**			m u. A.
Bearbeiter/in:	[redacted]				m ü. NN
Bohrfirma:	Wälderbau				m ü. NN
Bohrzeit:	04.09. - 21.09. 2007				m ü. NN
Bohrverfahren (m u. A./Ø mm)**:**		**Endteufe:**	140		m u. A.

Filterstrecken (m u. A./Ø mm)**:**

Abdichtungen (m u. A.)**:**

Bemerkungen: Auffällig ist der z. T. extrem hohe Anteil von verwitterten Granit- u. Gneis-Geröllen zwischen 34 und 77 m. Dies deutet möglicherweise auf alte, verfüllte Karsthohlräume hin. Die untersten 4 m der Bohrung sind wegen des starken Nachfalls aus dem Gipskeuper nicht gliederbar.

Datum der Einmessung: 23. September 2009

Kurzprofil (mit stratigr. Deutung):

0	–	2	m	Anthropogene Aufschüttung (yA)
	–	6	m	Neuenburg-Schichten (qN)
	–	8	m	Breisgau-Schichten (qBS)
	–	23	m	Schilfsandstein-Formation (km2)
	–	131	m	Gipskeuper-Formation (km1)
				– 34 m: Graue Estherienschichten (GES)
				– 52 m: Untere Bunte Estherienschichten (UBE)
	–		m	– 96 m: Mittlerer Gipshorizont (MGH) u. Weinsberg-Horizont (WEH)
	–		m	– 112 m: Dunkelrote Mergel (DRM)
	–		m	– 117 m: Bochingen-Horizont (BH)
	–		m	– 131 m: Grundgipsschichten (GI)
	–	140	m	Lettenkeuper-Formation (kuL)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

Teufe (m u. A.)**:** Gesteinsart (Haupt-, Nebengemengeteile usw.), Farbe, Gefüge Verwitterungsgrad, Konsistenz, Fossilinhalt, Klüftung u. a.

0	–	6	m	Kristallinschotter (Gneis, Granit, Quarz), stark verwittert (>95 %), Ziegelbruchstücke und Schlackenreste (<5 %, nach unten abnehmend)
	–	7	m	Kristallinschotter (Gneis, Granit, Quarz), sehr stark verwittert (80 %), Feinsandstein, geschichtet, hellrot verwittert (20 %), vereinzelt Tonstein, dunkelgrau und Ziegelbruchstücke
	–	8	m	Kristallinschotter (Gneis, Granit, Quarz), sehr stark verwittert (55 %), Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, rotbraun, hellrot verwittert (40 %), Tonstein, dunkelgrau (5 %)
	–	10	m	Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, mit tonigen Zwischenlagen, dunkelrot, Glaukonit ? vereinzelt Nachfall aus Kristallinschotter
	–	11	m	Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, dunkelrot und grau
	–	12	m	Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, schwach dolomitisch, z. T. mit tonigen Zwischenlagen, grau bis hellbraun, Glaukonit (90 %), Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, dunkelrot (10 %)
	–	13	m	Tonschluffstein, feinsandig, glimmerführend, geschichtet, grau, mit Feinsandsteinlagen (90 %), Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, schwach dolomitisch, z. T. mit tonigen Zwischenlagen, grau bis hellbraun, Glaukonit (10 %)
	–	14	m	Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, schwach dolomitisch, z. T. mit tonigen Zwischenlagen, grau bis hellbraun (60 %), Tonschluffstein, feinsandig, glimmerführend, geschichtet, grau, kohliges Pflanzenhäcksel (40 %)
	–	15	m	Tonstein, feinsandig, geschichtet, grau, kohliges Pflanzenhäcksel, vereinzelt Feinsandstein, grau bis hellbraun
	–	16	m	Feinsandstein, glimmerführend, geschichtet, schwach dolomitisch, z. T. mit tonigen Zwischenlagen, hellgrau bis hellbraun, kohliges Pflanzenhäcksel (85 %), Tonstein, feinsandig, geschichtet, grau (15 %)
	–	17	m	Feinsandstein, z. T. schwach tonig, glimmerführend, geschichtet, schwach dolomitisch, z. T. mit tonigen Zwischenlagen, hellgrau bis hellbraun, kohliges Pflanzenhäcksel
	–	18	m	Feinsandstein, hellgrau bis hellbraun, z. T. mit tonigen Zwischenlagen, Pyrit, kohliges Pflanzenhäcksel, Glaukonit (65 %), Tonstein, feinsandig, geschichtet, grau (30 %), Schlufftonstein, grau (5 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 21 m Feinsandstein, hellgrau bis hellbraun, ca. 10-30 % hellrot (verwittert ?), z. T. mit tonigen Zwischenlagen, Pyrit, Glaukonit (70-80 %), Tonstein, feinsandig, geschichtet, grau (20-30 %); kohliges Pflanzenhäcksel; bei 20 m vereinzelt Kalkstein, schwach feinsandig, grau;

– 22 m Feinsandstein, hellgrau bis hellbraun, z. T. mit tonigen Zwischenlagen, Pyrit, Glaukonit (85 %), Tonstein, feinsandig, geschichtet, grau (15 %); kohliges Pflanzenhäcksel

– 23 m Tonstein, feinsandig, geschichtet, grau (50-60 %), Feinsandstein, hellgrau bis hellbraun, z. T. mit tonigen Zwischenlagen, Pyrit, Glaukonit (40-50 %); kohliges Pflanzenhäcksel; vereinzelt Hornstein, weiß bis hellgrau

– 25 m Schlufftonstein, hellgrau, einzelne Schalenreste (55 %), Dolomit, mikritisch bis mikrosparitisch, hell- bis dunkelgrau (40 %), Feinsandstein (5 %, Nachfall)

– 26 m Dolomit, mikritisch bis mikrosparitisch, hellgrau bis hellbraun (60 %), Calcit, weiß bis rosa (20 %, Neubildung n. Gipsauslaugung), Tonschluffstein, hell- bis dunkelgrau (10 %) und dunkelrotbraun, Schalenfragmente (10 %)

– 27 m Schlufftonstein, hell- bis dunkelgrau (35 %), Calcit-XX (30 %, GA-Neubildung), Dolomit, mikritisch, z. T. feinsandig, hellgrau bis hellbraun (15 %), Dolomit, dunkelgrau (10 %), Schlufftonstein, schwach feinsandig, hellrot (5 %), Schlufftonstein, glimmerführend, grau-schwarz (5 %)

– 28 m Gips mit Schlufftonstein-Lagen u. Dolomitklasten (50 %; Röntgenbefund: 20 % Gips, 70 % Bassanit[1], kein Anhydrit), Schlufftonstein, rotbraun und dunkelgrau (20 %), Schlufftonstein, geschichtet, dunkelgrau (15 %), Schlufftonstein, grau-schwarz (5 %), Auslaugungscalcit (5 %), Schlufftonstein, feinsandig, hellgrau (<5 %), selten Tonstein, dunkelbraun und Schilfsandstein (Nachfall)
[1]Bassanit = Halbhydrat entsteht erfahrungsgemäß immer durch Trocknung von Gips und nicht durch Hydratation von Anhydrit

– 29 m Schlufftonstein, undeutlich geschichtet, dunkelgrau (40 %), Gips, mit Schlufftonstein-Lagen u. Dolomitklasten (30 %), Schlufftonstein, rotbraun (15 %), Dolomit, feinkristallin, dunkelgrau bis hellbraun (5-10 %), Auslaugungscalcit (5 %), Schlufftonstein, feinsandig, hellgrau (<5 %)

– 30 m Gips (Röntgenbefund: 40 % Gips, 50 % Bassanit, kein Anhydrit), z. T. mit Quarz-Kriställchen, Tonstein und Dolomiteinschlüssen (30 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, feinsandig, rotbraun (25 %), Schlufftonstein, dunkelgrau, rotbraun marmoriert (20 %), Schluffonstein, schwach dolomitisch, z. T. feinsandig, grau (15 %), Auslaugungscalcit (<5 %), Dolomit, hellgrau bis hellbraun (<5 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 31 m Schlufftonstein, dolomitisch, feinglimmerführend, mittel- bis dunkelgrau (40 %), Gips, z. T. mit Quarz-Kriställchen, Tonstein und Dolomiteinschlüssen (20 %), Schlufftonstein, dolomitisch, feinglimmerführend, rotbraun (20 %), Dolomit, mikritisch, hellgrau bis graubraun (10 %), Auslaugungscalcit (10 %)

– 32 m Gips, z. T. mit Quarz-Kriställchen, Tonstein und Dolomiteinschlüssen (25 %), Schlufftonstein, dolomitisch, feinglimmerführend, mittel- bis dunkelgrau (25 %), Feinsandstein, dolomitisch, glimmerführend, z. T. geschichtet, dunkel graubraun (20 %), Schlufftonstein, dolomitisch, feinglimmerführend, rotbraun (10 %), Dolomit, mikritisch, hellgrau bis graubraun (10 %), Auslaugungscalcit (10 %)

– 33 m Gips, z. T. mit Quarz-Kriställchen, Tonstein und Dolomiteinschlüssen (40 %), Schlufftonstein, dolomitisch, feinglimmerführend, mittel- bis dunkelgrau (40 %), Schlufftonstein, dolomitisch, feinglimmerführend, rotbraun (5 %), Auslaugungscalcit (5 %), Schilfsandstein und Kristallin (Gneis u. Granit, stark verwittert) (10 %, Schlottenfüllung ?)

– 34 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau-schwarz (65 %) und hellrot (5 %), Gips, weiß (15 %), Auslaugungscalcit (5 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (5-10 %), Schilfsandstein (<5 %)

– 35 m Dolomit, z. T. tonig, mikritisch, graubraun, z. T. grünstichig (30 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau-schwarz (25 %) und hellrot (5 %), Gips, weiß (15 %), Auslaugungscalcit (5 %), Kristallin, verwittert (15 %), Schilfsandstein (5 %)

– 36 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (40 %), Dolomit, z. T. tonig, mikritisch, graubraun, z. T. grünstichig (20 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, z. T. schwach sandig, glimmerführend, dunkelgrau-schwarz (10 %), Schilfsandstein (10 %), Gips, weiß (5-10 %), Dolomitmergelstein, hellgrau (5 %), Auslaugungscalcit (5 %)

– 38 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (25-35 %), Schilfsandstein, hellgrau und dunkelrot (25 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, grau-schwarz (15-25 %), selten hellrot, Gips, weiß (10 %), Feinsandstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (10 %), Auslaugungscalcit (<5 %)

– 39 m Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, grau-schwarz (30 %) u. rot (20 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (25 %), Schilfsandstein, hellgrau u. dunkelrot (15%), selten hellrot, Gips, weiß, mit Tonstein (10 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 40 m Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, rot (30 %) u. grau-schwarz (30 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (25 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (15 %), Gips, weiß, mit Tonstein (10 %), Schilfsandstein (5 %), Auslaugungscalcit (5 %), Dolomit, mikritisch, hellgrau u. mikrosparitisch, hellbraun (5 %)

– 41 m Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, rot (25 %) und grau-schwarz (20 %), Schilfsandstein (20 %), Gips, weiß, mit Tonstein (15 %; Röntgenbefund: 90 % Bassanit), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (10 %), Dolomit, mikritisch, hellgrau und mikrosparitisch, hellbraun (5-10 %), Auslaugungscalcit (<5 %)

– 42 m Schlufftonstein, dolomitisch, z. T. geschichtet, glimmerführend, grau-schwarz (45 %), vereinzelt rot, Gips, weiß, mit Tonstein (25 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (15 %), Schilfsandstein (10 %), Auslaugungscalcit (5 %)

– 43 m Schlufftonstein, dolomitisch, z. T. feingeschichtet, dunkelrot (40 %) u. mittel- bis dunkelgrau; Schalenreste (25 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (20 %), Schilfsandstein (10 %), Gips, weiß (5 %)

– 44 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (55 %), Schlufftonstein, dolomitisch, schwach feinsandig, z. T. feingeschichtet, dunkelrot (20 %) und grau (10 %), Schilfsandstein (15 %)

– 46 m Schlufftonstein, dolomitisch, schwach feinsandig, z. T. feingeschichtet, mittel- bis dunkelgrau (30-35 %) und dunkelrot (5 %), Gips, weiß (20-25 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (20 %), Schilfsandstein (10 %), Dolomit, mikrosparitisch, hellbraun (5 %), Auslaugungscalcit (5 %)

– 47 m Schlufftonstein, dolomitisch, schwach feinsandig, z. T. feingeschichtet, mittel- bis dunkelgrau; Schalenreste (>90 %), selten dunkelrot, Gips, weiß (<5 %), Schilfsandstein und Kristallin (5 %)

– 48 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet, vereinzelt Schlufftonstein, dunkelgrau bzw. rot und Dolomit

– 50 m Schlufftonstein, dolomitisch, feinsandig, dunkelrot (40 %) und grau (10-15 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (30 %), Schilfsandstein (15 %), Gips, weiß (<5 %)

– 51 m Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau, grünstichig (75 %) und dunkelrot (5 %), Gips, z. T. mit Tonstein durchsetzt (10 %; Röntgenbefund: 15 % Gips, 75 % Bassanit), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet u. Schilfsandstein (10 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 52 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (75 %), Schilfsandstein (20 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau, grünstichig und dunkelrot (5 %), vereinzelt Gips

– 54 m Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, z. T. schwach feinsandig, dunkelrot und dunkelgrau, z. T. marmoriert (60-65 %), hellgrau (10 %) und hellrot (<5 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (15-20 %), Schilfsandstein (0-5 %), Dolomit, mikritisch bis mikrosparitisch (<5 %) hellgrau, Gips, weiß (bis 5 %)

– 56 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (50 %), Schilfsandstein (10-20 %), Gips, weiß (15 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, z. T. schwach feinsandig, dunkelrot und dunkelgrau, z. T. marmoriert (10-20 %), Auslaugungscalcit (<5 %), Dolomit, mikritisch, hellgrau (<5 %)

– 58 m Schlufftonstein, dolomitisch, schwach glimmerführend, geschichtet, mittel- bis dunkelgrau, grünstichig, selten rot (40-45 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (35-40 %), Schilfsandstein (10-15 %), Gips, weiß, z. T. kristallin (5-10 %), vereinzelt Dolomit, hellgrau bis hellbraun

– 60 m Schlufftonstein, dolomitisch, schwach glimmerführend, geschichtet, mittel- bis dunkelgrau, grünstichig; Schalenreste (30 %), rot (<5 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (30 %), Schilfsandstein (5 %), Gips, weiß, z. T. kristallin (15 %), Auslaugungscalcit (5 %), Dolomit, mikritisch bis mikrosparitisch, hell- bis dunkelgrau (15 %)

– 61 m Schlufftonstein, dolomitisch, schwach glimmerführend, geschichtet, z. T. mit Gipslagen, mittel- bis dunkelgrau, grünstichig; selten Schalenreste (40 %), vereinzelt dunkelrot, Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (20 %), Schilfsandstein (10 %), Gips, weiß, z. T. kristallin (30 %; Röntgenbefund: 20 % Gips, 70 % Bassanit)

– 62 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (50 %), Schilfsandstein (25 %), Gips, weiß, z. T. kristallin (15 %), Schlufftonstein, dolomitisch, z. T. feinsandig, geschichtet, dunkelgrau und dunkelrot (10 %)

– 63 m Gips, weiß, mit Tonstein grau (30 %), Schlufftonstein, dolomitisch, schwach glimmerführend, geschichtet, mittel- bis dunkelgrau, grünstichig (25 %) u. rot (10 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (20 %), Schilfsandstein (10 %), Dolomit, mikritisch bis mikrosparitisch (5 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 64 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (50 %), Schilfsandstein (15 %), Schluff-tonstein, glimmerführend, geschichtet, dunkelgrau, z. T. grünstichig (20 %) u. rot (<5 %), Gips, weiß, mit grauen Tonstein-Lagen (10 %), Dolomit, tonig, dunkelgrau (<5 %)

– 65 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (50 %), Schilfsandstein (5 %), Schluffton-stein, glimmerführend, grünlichgrau (20 %) u. rot (5 %), Gips, weiß, mit grauen Tonstein-Lagen (15 %), Dolomit, mikritisch, dunkelgrau (<5 %), vereinzelt Schluff-tonstein, stark glimmerführend, geschichtet, braun

– 66 m Schlufftonstein, glimmerführend, grünlichgrau (40 %) u. rot (5 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (30 %), Schilfsandstein (10 %), Gips, weiß, mit grauen Tonstein-Lagen (10 %), Dolomit, mikritisch, dunkelgrau (5 %)

– 67 m Gips, weiß (60 %), Schlufftonstein, glimmerführend, grau bis grünlichgrau (20 %) u. rot (5 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (10 %), Schilfsandstein (5 %), vereinzelt Dolomit, mikritisch, dunkelgrau

– 68 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (50 %), Schilfsandstein (10 %), Gips, weiß, z. T. mit Tonstein dunkelgrau (30 %), Schlufftonstein, z. T. schwach fein-sandig, grau u. rot; selten Schalenreste (10 %), vereinzelt Dolomit, dunkelgrau

– 69 m Anhydrit u. Gips (Röntgenbefund: 60 % Anhydrit, 10 % Gips, 30 % Bassanit), z. T. angelöst, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (40 %), Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, grau bis grünlichgrau (25 %) u. rot (5 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (20 %), Schilfsandstein (5 %), Dolomit, hellgrau bis hellbraun (<5 %)

– 70 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (40 %), Gips, z. T. angelöst, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (25 %), Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, grau bis grünlichgrau (15-20 %) u. rot (5 %), Schilfsandstein (10 %), Dolomit, hellgrau bis hell-braun (<5 %)

– 71 m Gips, z. T. angelöst, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (40 %), Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, grau bis grünlichgrau, z. T. rot gefleckt (20 %) u. rot (10 %), Dolomitmergelstein, feinsandig, porös, hellgrau (20 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet u. Schilfsandstein (10 %), vereinzelt Dolomit, hellbraun

– 72 m Gips, z. T. angelöst, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (15 %), Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, grau bis grünlichgrau, z. T. rot gefleckt (60 %) u. rot (<5 %), Tonstein, mit kleinen Dolomit-Rhomboedern, porös, hellgrau (<5 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet u. Schilfsandstein (20 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 73 m Tonstein, mit kleinen Dolomit-Rhomboedern, porös, hellgrau (30 %), Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, grau bis grünlichgrau (25 %) u. rot (10 %), Gips, z. T. angelöst, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (10 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet u. Schilfsandstein (15 %)

– 74 m Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, grau bis grünlichgrau (55 %) u. rot (5 %), Gips, z. T. angelöst, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (20 %), Tonstein, mit kleinen Dolomit-Rhomboedern, porös, hellgrau (10 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet u. Schilfsandstein (10 %)

– 75 m Anhydrit, hellgrau und Gips, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (50 %), Schluffton-stein, z. T. schwach feinsandig, grau bis grünlichgrau (25 %) u. rot (5 %), Ton-stein, mit kleinen Dolomit-Rhomboedern, porös, hellgrau (10 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet u. Schilfsandstein (10 %)

– 76 m Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet (50 %) u. Schilfsandstein (15 %), Anhy-drit, hellgrau und Gips, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (15 %), Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, hellgrau bis dunkel grünlichgrau (15-20 %) u. rot (<5 %)

– 77 m Anhydrit, hellgrau und Gips, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (30 %), Tonstein, mit kleinen Dolomit-Rhomboedern, porös, hellgrau (25 %), Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, hellgrau bis dunkel grünlichgrau (20 %) u. rot (5 %), Kristallin, stark verwittert, z. T. gerundet u. Schilfsandstein (20 %)

– 78 m Schlufftonstein, z. T. schwach feinsandig, mit Gipslagen, hellgrau bis dunkel grünlichgrau (55 %) u. rot (<5 %)Anhydrit, hellgrau und Gips, weiß, mit Tonstein dunkelgrau (35 %), Tonstein, mit kleinen Dolomit-Rhomboedern, porös, hellgrau (5-10 %)

– 80 m Schlufftonstein, dunkel grünlichgrau, mit Gipslagen (70 %), Anhydrit u. Gips (20 %; Röntgenbefund: 80 % Anhydrit, 20 % Bassanit), Tonstein, mit kleinen Dolomit-Rhomboedern, porös, hellgrau (10 %)

– 81 m Schlufftonstein, dunkel grünlichgrau, mit Gipslagen (50 %), Tonstein mit Dolomit-Rhomboedern, graugrün (30 %), Anhydrit u. Gips (20 %)

– 82 m Schlufftonstein, graugrün (65 %) und rot (5 %), Anhydrit u. Gips (20 %), Tonstein mit Dolomit-Rhomboedern, hellgrau (10 %)

– 84 m Schlufftonstein, dunkel grünlichgrau, rot gefleckt (45 %) und rot (5 %), Schluffton-stein, feinsandig, graugrün mit wenig Anhydrit (25 %), Anhydrit u. Gips (15 %), Tonstein mit Dolomit-Rhomboedern, hellgrau (10 %)

– 85 m Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonsteinlagen (50 %), Schlufftonstein, graugrün mit Gipslagen (35 %) und rot (5 %), Tonstein mit Dolomit-Rhomboedern, hellgrau (10 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 86 m Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonsteinlagen (70 %), Schlufftonstein, graugrün mit Gipslagen, z. T. feinsandig (20 %), vereinzelt rot, Tonstein mit Dolomit-Rhomboedern, hellgrau (10 %)

– 87 m Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonsteinlagen (50 %), Schlufftonstein, graugrün mit Gipslagen (35 %) und rot (5 %), Tonstein mit Dolomit-Rhomboedern, hellgrau (10 %)

– 88 m Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonsteinlagen (40 %), Schlufftonstein, graugrün mit Gipslagen (30 %), dunkel braungrau (10-15 %) und rot (5-10 %), Tonstein mit Dolomit-Rhomboedern, hellgrau (10 %)

– 90 m Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonsteinlagen (30-35 %; Röntgenbefund: 70 % Anhydrit, 25 % Bassanit), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, feingeschichtet, graugrün (55-60 %) und rot (<5 %), Schlufftonstein, feinsandig, hellgrau bis graugrün (5 %), Nachfall (<5 %)

– 91 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, feingeschichtet, graugrün (50 %), vereinzelt rot, Anhydrit u. Gips (35 %), Schlufftonstein, feinsandig, hellgrau bis graugrün (15 %)

– 92 m Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonstein (50 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, feingeschichtet, graugrün (40 %) u. rot (5 %), Schlufftonstein, feinsandig, hellgrau bis graugrün (5 %)

– 93 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, feingeschichtet, graugrün (45-50 %), dunkelbraungrau (30 %) und rot (5 %), Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonstein (15 %), Schlufftonstein, feinsandig, hellgrau bis graugrün (<5 %)

– 94 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, feingeschichtet, graugrün (40 %), dunkelbraungrau (25 %) u. rot (5 %), Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonstein (30 %)

– 95 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, feingeschichtet, graugrün (50 %), dunkelbraungrau (30 %) u. rot (5 %), Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonstein (10 %), Dolomit, mikritisch, graubraun (5 %)

– 96 m Schlufftonstein, schwach dolomitisch, glimmerführend, feingeschichtet, graugrün (50 %), dunkelbraungrau (25 %) u. rot (5 %), Dolomit, mikritisch, fein- bis mittelsandig, graubraun (10 %) [Bleiglanzbank]

– 98 m Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonstein (40 %; Röntgenbefund: 90 % Anhydrit, 5 % Bassanit), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, rot bis rotviolett, z. T. dunkel graugrün gefleckt (20-25 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, graugrün (20 %), dunkelbraungrau (15 %), Schlufftonstein, hellgrau bis hell graugrün (0-5 %), vereinzelt Dolomit, graubraun

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

–	99	m	Schlufftonstein, schwach dolomitisch, dunkelrot bis rotviolett (50 %), Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonstein (30 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, graugrün, selten hellgrau (20 %)
–	101	m	Schlufftonstein, schwach dolomitisch, dunkelrot bis rotviolett (35-40 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, graugrün, selten hellgrau (30 %), graubraun (10-15 %), Anhydrit u. Gips, z. T. mit Tonstein (20 %), Dolomit, z. T. tonig, mikritisch, graubraun (<5 %)
–	102	m	Schlufftonstein, schwach dolomitisch, dunkelrot bis rotviolett (40 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, graugrün, selten hellgrau (20 %), graubraun (15-20 %), Anhydrit u. Gips, z. T. hellrot (20 %), Dolomit, z. T. tonig, mikritisch, graubraun (<5 %)
–	105	m	Schlufftonstein, schwach dolomitisch, dunkelrot bis rotviolett (50 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, graugrün, selten hellgrau (15-30 %), graubraun (10-20 %), Anhydrit u. Gips, z. T. hellrot (10 %), Dolomit, z. T. tonig, mikritisch, graubraun (0-5 %)
–	108	m	Schlufftonstein, schwach dolomitisch, graugrün (55 %), hellgrau (20 %) u. rot (5 %), Anhydrit u. Gips, z. T. hellrot (20 %)
–	109	m	Anhydrit u. Gips, z. T. hellrot (35 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, hellgrau (30 %), graugrün (25 %) u. rot (10 %)
–	112	m	Anhydrit u. Gips, z. T. hellrot (50 %; Röntgenbefund: 90 % Anhydrit, 5 % Bassanit), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, hellgrau (20-25 %), graugrün (20 %) rot (5-10 %), vereinzelt Schlufftonstein, glimmerführend, feingeschichtet, dunkelgrau [Entringen-Sulfat]
–	115	m	Schlufftonstein, schwach dolomitisch, z. T. geschichtet, graugrün (60-65 %), hellgrau (5-10 %) u. dunkelrot, z. T. feinsandig (0-5 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (20-30 %)
–	116	m	Schlufftonstein, schwach dolomitisch, z. T. geschichtet, graugrün (70 %), hellgrau (5 %) u. dunkel rotbraun (5 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (20 %)
–	117	m	Schlufftonstein, schwach dolomitisch, graugrün (55 %) rotbraun (10 %), grau (5 %) u. hellrot (5 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (25 %), vereinzelt Schlufftonstein, glimmerführend, feinsandig, hellbraun
–	118	m	Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (50 %), Schlufftonstein, schwach dolomitisch, graugrün (20 %) rotbraun (15 %), dunkelrot (5 %), braun (5 %) u. grau (5 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**

zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 121 m Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, z. T. rot gefleckt (60-65 %; Röntgenbefund: 40 % Anhydrit, 30 % Gips, 20 % Bassanit), Schlufftonstein, z. T. geschichtet, graugrün (10-20 %) rotbraun, z. T. marmoriert (15-25 %) u. grau (0-5 %)

– 122 m Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, z. T. rot gefleckt, mit grauen Tonlagen (40 %), Schlufftonstein, z. T. geschichtet, rotbraun, z. T. marmoriert (30 %), graugrün (25 %), violett (<5 %) u. dunkelgrau (<5 %)

– 123 m Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, z. T. rot gefleckt, mit grauen Tonlagen (50 %), Schlufftonstein, z. T. geschichtet, graugrün (25 %), rotbraun, z. T. marmoriert (10-15 %), braun, z. T. feinsandig (10 %) u. hellgrau (5 %)

– 125 m Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, z. T. rot gefleckt, mit grauen Tonlagen (60 %), Schlufftonstein, z. T. geschichtet, graugrün (15 %), braun bis graubraun (10-15 %) u. grau, z. T. feinsandig (10 %), rotbraun (<5 %)

– 127 m Gips, grau u. weiß, z. T. rot gefleckt, mit grauen Tonlagen (70 %), Schlufftonstein, z. T. geschichtet, glimmerführend, z. T. schwach feinsandig, hellgrau bis dunkelgrau (25-30 %) u. dunkelrot (<5 %)

– 129 m Gips, grau u. weiß, mit grauen Tonlagen (30 %), Schlufftonstein, z. T. geschichtet, glimmerführend, z. T. schwach feinsandig, grau, graugrün u. dunkelgrau (40 %), rot bis rotbraun (15 %), graubraun/rot marmoriert (10 %) u. hellgrau (5 %), vereinzelt Dolomit, tonig, dunkelgrau (nach unten leicht zunehmend)

– 130 m Gips, grau u. weiß (Röntgenbefund: 40 % Gips, 50 % Bassanit), z. T. rot gefleckt, mit grauen Tonlagen (40 %), Schlufftonstein, z. T. geschichtet, glimmerführend, z. T. schwach feinsandig, dunkelgrau (30 %), schwach dolomitisch, schwach feinsandig, hell- bis mittel-grau, (10 %), rot bis rotbraun (10 %), graugrün (5 %), dunkel graubraun (5 %), vereinzelt Dolomit, sparitisch, hellbraun

– 131 m Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, z. T. rot gefleckt, mit grauen Tonlagen (60 %), Schlufftonstein, z. T. geschichtet, glimmerführend, z. T. schwach feinsandig, dunkelgrau (20 %), schwach dolomitisch, schwach feinsandig, hell- bis mittelgrau, (10-15 %), rot bis rotbraun (10 %)

– 132 m Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (40 %), Dolomit, schwach tonig, mikritisch, hellbraun bis braungrau (30 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, mit grauen Tonlagen (20 %), Schlufftonstein, hell bis mittelgrau, z. T. schwach feinsandig (5 %), rotbraun (<5 %)

Bezeichnung/Projekt: EWS 3 / Rathaus Staufen **Anl. 6.3**
zu Az.: 94-4763//10-563
Sachstandsbericht Staufen

Profilbeschreibung (Fortsetzung):

– 133 m Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (40 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (20 %) und grau-grün (15 %), rotbraun (10 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß, mit grauen Tonlagen (10 %), Schlufftonstein, hell bis mittelgrau, z. T. schwach feinsandig (<5 %) [131-133 m: Grenzschichten, GRE]

– 134 m Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (55 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (20 %) u. rot-braun (10 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (10 %), Schlufftonstein, hell bis mittelgrau, z. T. schwach feinsandig (5 %)

– 135 m Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (40 %), Tonmergelstein, dolomitisch, geschichtet, graubraun (20 %), Schluff-tonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (20 %) u. rot-braun (5-10 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (10 %), Tonstein, hell bis mittelgrau, z. T. schwach feinsandig (<5 %)

– 136 m Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (45 %), Tonmergelstein, dolomitisch, schwach feinsandig, geschichtet, graubraun (15 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (20 %) u. rot-braun (5-10 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (5-10 %), Tonstein, hell bis mittel-grau, z. T. schwach feinsandig (<5 %)
[133-136 m: Lingulaschichten, LI]

– 138 m Tonmergelstein, dolomitisch, schwach feinsandig, geschichtet, graubraun (15 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (30 %), rot bis rotbraun (20 %), graubraun (15 %), u. graugrün (10 %), Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (10 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (5 %), Tonstein, hell bis mittel-grau, z. T. schwach feinsandig (5 %), Auslaugungscalcit (5 %) [ca 75 % Nachfall aus km1]

– 140 m Tonmergelstein, dolomitisch, schwach feinsandig, geschichtet, graubraun (15 %), Schlufftonstein, dolomitisch, glimmerführend, dunkelgrau (30 %), rot bis rotbraun (15-20 %), graubraun (15 %), u. graugrün (5 %), Dolomit, schwach tonig, mikritisch, z. T. feinporös, hellbraun bis braungrau (10-15 %), Anhydrit u. Gips, grau u. weiß (5 %), Tonstein, hell bis mittel-grau, z. T. schwach feinsandig (5 %), Auslaugungscalcit (5-10 %), Tonmergelstein, dolomitisch, graubraun, Schalenreste ? (5 %) [ca 75 % Nachfall aus km1]

Anl. 7.1: Stammdaten der Bohrungen im Stadtgebiet von Staufen und in der näheren Umgebung
Quelle: Aufschlussdatenbank des Regierungspräsidiums Freiburg - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
Stand 15.03.2008

ARFACH	TK25	ARNUM	ANAME	RECHTS	HOCH	HOEHE	ET	AUFART
BO	8112	1	TB 1 Kunststoffwerk Staufen	3404780	5306390	273,60	9,00	BA
BO	8112	2	B4/1970 Wohngruppe Staufen	34046XX	53055XX	282,70	12,00	BA
BO	8112	3	B5/1970 Wohngruppe Staufen	34046XX	53055XX	282,45	8,00	BA
BO	8112	5	B6/1970 Wohngruppe Staufen	34046XX	53055XX	281,65	13,00	BA
BO	8112	6	B7/1970 Wohngruppe Staufen	34046XX	53056XX	281,35	8,00	BA
BO	8112	7	B8/1970 Wohngruppe Staufen	34045XX	53055XX	281,00	10,00	BA
BO	8112	8	B9/1970 Wohngruppe Staufen	34045XX	53056XX	280,20	8,00	BA
BO	8112	9	B10/1970 Wohngruppe Staufen	34044XX	53055XX	280,35	10,00	BA
BO	8112	13	Brunnen Gramelspacher Grunern	34038XX	53046XX	278,00	16,30	BA
BO	8112	15	Brunnen Schladerer Staufen	3405140	5305360	291,50	16,75	BA
BO	8112	16	Staufen, B 3 Neubau Progymnasium	3404240	5305880	275,00	6,50	B
BO	8112	17	Staufen, B 2 Neubau Progymnasium	3404240	5305880	275,00	7,00	B
BO	8112	18	Staufen, B 1 Neubau Progymnasium	3404240	5305880	275,00	8,00	B
BO	8112	21	Druckspülbohrung Staufen	34040XX	53058XX	273,00	54,00	B
BO	8112	22	Brunnen Fa. Altenburger Staufen	3404800	5306500	272,00	16,80	BA
BO	8112	23	B3/1970 Wohngruppe Staufen	34046XX	53054XX	282,65	16,00	B
BO	8112	24	B12/1970 Wohngruppe Staufen	34045XX	53055XX	280,90	15,00	B
BO	8112	37	S 1/86 Bahngelände Staufen	3404925	5306090	277,00	1,90	SCH
BO	8112	38	S 2/86 Bahngelände Staufen	3404870	5306180	277,00	1,80	SCH
BO	8112	39	S 3/86 Bahngelände Staufen	3404860	5306200	277,00	2,00	SCH
BO	8112	52	Staufen, Br.	3406200	5304000	316,52	10,60	BA
BO	8112	53	Staufen, Br.	3405540	5304480	303,76	5,00	BA
BO	8112	58	Wasserbohrung 1973 Grunern	3405370	5304210	304,00	70,00	B
BO	8112	64	VB 2, ZV WV Staufener Bucht	3404960	5305000	292,00	26,80	B
BO	8112	65	S 5 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405054	5306148	300,00	2,70	SCH
BO	8112	66	S 6 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405044	5306196	300,00	2,80	SCH
BO	8112	67	S 7 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405133	5306152	300,00	0,70	SCH
BO	8112	68	S 8 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405128	5306148	300,00	1,10	SCH
BO	8112	69	S 9 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405128	5306179	300,00	1,00	SCH
BO	8112	70	S 10 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405124	5306174	300,00	1,50	SCH
BO	8112	71	S 11 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405117	5306210	300,00	1,00	SCH
BO	8112	72	S 12 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405106	5306212	300,00	0,80	SCH
BO	8112	73	S 13 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405098	5306212	300,00	1,20	SCH
BO	8112	74	S 14 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405109	5306186	300,00	1,00	SCH
BO	8112	75	S 15 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405111	5306178	300,00	1,20	SCH
BO	8112	76	S 16 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405104	5306167	300,00	0,70	SCH
BO	8112	77	S 17 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405109	5306142	300,00	1,00	SCH
BO	8112	78	S 18 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405048	5306289	300,00	1,20	SCH
BO	8112	79	S 19 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405058	5306226	300,00	1,30	SCH
BO	8112	80	S 20 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405075	5306181	300,00	1,30	SCH
BO	8112	81	S 21 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405046	5306213	300,00	1,20	SCH
BO	8112	82	S 22 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405033	5306216	300,00	2,50	SCH
BO	8112	83	S 23 Flurbereinigung Schloßberg Staufen	3405043	5306222	300,00	1,20	SCH
BO	8112	112	B 1/99 Heizzentrale Wolfacker Staufen	34046XX	53051XX	287,73	13,00	BA
BO	8112	144	EWS 1/99 Bötzenstrasse Staufen	34054XX	53058XX	307,28	81,00	BA
BO	8112	145	EWS 2/99 Bötzenstrasse Staufen	34054XX	53058XX	307,50	81,00	BA
BO	8112	146	EWS 3/99 Bötzenstrasse Staufen	34054XX	53058XX	307,44	81,00	BA
BO	8112	156	KB 1/01 Sparkasse Münstertälerstrasse Staufen	3404950	5305650	285,30	0,75	B
BO	8112	167	EWS 1/01 Staufen Eckart-Ulmann-Straße	34046XX	53052XX	286,00	70,00	BA
BO	8112	168	EWS 2/01 Staufen Eckart-Ulmann-Straße	34046XX	53052XX	286,00	70,00	BA
BO	8112	169	EWS 3/01 Staufen Eckart-Ulmann-Straße	34046XX	53052XX	285,77	70,00	BA
BO	8112	178	B 1 / 05 Rathaus Staufen i. Brsg.	3405196	5305597	287,00	6,00	B
BO	8112	216	EWS 1/07 Rathaus Staufen	3405248	5305609	286,69	135,00	BA
BO	8112	217	EWS 2/07 Rathaus Staufen	3405245	5305614	286,17	105,00	BA
BO	8112	218	EWS 3/07 Rathaus Staufen	3405242	5305620	286,15	140,00	BA
BO	8112	219	EWS 4/07 Rathaus Staufen	3405239	5305625	285,99	140,00	BA
BO	8112	220	EWS 5/07 Rathaus Staufen	3405234	5305624	285,79	140,00	BA
BO	8112	221	EWS 6/07 Rathaus Staufen	3405236	5305618	285,94	140,00	BA
BO	8112	222	EWS 7/07 Rathaus Staufen	3405237	5305612	286,07	140,00	BA
BO	8112	226	EWS 1/07 Bahnhofstrasse Staufen	3405074	5305909	280,57	140,00	BA
BO	8112	227	EWS 2/07 Bahnhofstrasse Staufen	3405084	5305906	280,65	140,00	BA
BO	8112	229	B 1/95 Baugrube Hauptstr. Staufen	34051XX	53055XX	283,50	26,60	B
BO	8112	230	B 2/95 Baugrube Hauptstr. Staufen	34051XX	53055XX	283,50	14,00	B
BO	8112	231	B 3/95 Baugrube Hauptstr. Staufen	34051XX	53055XX	283,50	22,00	B
BO	8112	232	B 4/95 Baugrube Hauptstr. Staufen	34051XX	53055XX	283,50	15,00	B
BO	8112	233	B 5/95 Baugrube Hauptstr. Staufen	34051XX	53055XX	283,50	22,60	B
BO	8112	234	B 6/95 Baugrube Hauptstr. Staufen	34051XX	53055XX	283,50	18,30	B
BO	8112	235	EWS B 1/06 Staufen Alois-Schnorr-Straße	34056XX	53058XX	334,00	90,00	BA
BO	8112	236	EWS B 2/06 Staufen Alois-Schnorr-Straße	34056XX	53058XX	332,00	90,00	BA
BO	8112	237	EWS B 3/06 Staufen Alois-Schnorr-Straße	34056XX	53058XX	334,00	90,00	BA
BO	8112	238	EWS B 4/06 Staufen Alois-Schnorr-Straße	34056XX	53058XX	334,00	90,00	BA
BO	8112	239	EWS B 5/06 Staufen Alois-Schnorr-Straße	34056XX	53058XX	334,00	90,00	BA
BO	8112	240	EWS B 1/ 06 Staufen Grunern In den Elzmatten	34041XX	53041XX	308,78	90,00	BA
BO	8112	241	EWS B 2/ 06 Staufen Grunern In den Elzmatten	34041XX	53041XX	309,00	90,00	BA
BO	8112	242	EWS B 1/ 06 Staufen Grunern Ballrechter Straße	34038XX	53045XX	280,00	150,00	BA
BO	8112	243	EWS B 2/ 06 Staufen Grunern Ballrechter Straße	34038XX	53045XX	281,00	150,00	BA
BO	8112	244	EWS B 1/05 Staufen	34047XX	53053XX	285,75	110,00	BA
BO	8112	245	EWS B 1/ 07 Staufen Grünmatten	34047XX	53062XX	276,47	66,00	BA
BO	8112	246	EWS B 2/ 07 Staufen Grünmatten	34047XX	53062XX	276,56	66,00	BA
BO	8112	247	EWS B 3/ 07 Staufen Grünmatten	34047XX	53062XX	276,76	66,00	BA
BO	8112	248	EWS B 2/05 Staufen	34047XX	53053XX	285,94	110,00	BA

Anl. 7.2: Kurzprofile tieferer Bohrungen im Stadtgebiet von Staufen (Angaben zur Lage: siehe Anl. 7.1).

Bohrung Bo 8112/15, Brunnen Schladerer Staufen

- 5,3 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
-16,2 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
-16,7 m Gipskeuper-Formation, km1

Bohrung Bo 8112/21, Druckspülbohrung Staufen

- 4,0 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
-34,0 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
-54,0 m Mitteljura?, jm?

Bohrung Bo 8112/22, Brunnen Fa. Altenburger Staufen

- 7,5 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
-16,5 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär

Bohrung Bo 8112/58, Wasserbohrung 1973 Grunern

- 4,0 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
-16,0 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
-70,0 m Kristallines Grundgebirge

Bohrung Bo 8112/144-146, EWS 1/99 – 3/99 Bötzenstrasse Staufen

- 4,5 m Umlagerungssedimente, qum, Pleistozän bis Holozän
-42,0 m Bunte Mergel-Formation, km3
-54,0 m Schilfsandstein-Formation, km2
-81,0 m Gipskeuper-Formation, km1

Bemerkung: Schichtmächtigkeiten generell zu hoch –Schichtverstellung?

Bohrung Bo 8112/167-169, EWS 1/01 – 3/01 Staufen Eckart-Ulmann-Straße

- 1,5 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
-29,0 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
-70,0 m Jura?, jm?

Bohrung Bo 8112/226-227, EWS 1/07 – 2/07 Bahnhofstrasse Staufen

- 6,0 m Umlagerungssedimente, qum, Pleistozän bis Holozän
-140,0 m Unterjura – Mitteljura, ju - jm

Bohrung Bo 8112/229, B 1/95 Baugrube Hauptstr. Staufen

- 1,9 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
- 7,8 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
- 14,0 m Lymnäenmergel-Formation?, tLM?, Tertiär
- 25,0 m Bunte Mergel-Formation, km3
- 26,8 m Schilfsandstein-Formation, km2

Bohrung Bo 8112/230, B 2/95 Baugrube Hauptstr. Staufen

- 1,3 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
- 7,2 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
- 9,0 m Lymnäenmergel-Formation?, tLM?, Tertiär
- 14,0 m Bunte Mergel-Formation, km3

Bohrung Bo 8112/231, B 3/95 Baugrube Hauptstr. Staufen

- 2,1 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
- 7,2 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
- 12,9 m Lymnäenmergel-Formation?, tLM?, Tertiär
- 22,0 m Bunte Mergel-Formation, km3

Bohrung Bo 8112/232, B 4/95 Baugrube Hauptstr. Staufen

- 1,0 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
- 6,2 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
- 10,5 m Lymnäenmergel-Formation?, tLM?, Tertiär
- 15,0 m Bunte Mergel-Formation?, km3?

Bohrung Bo 8112/233, B 5/95 Baugrube Hauptstr. Staufen

- 2,0 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
- 7,5 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
- 11,5 m Lymnäenmergel-Formation?, tLM?, Tertiär
- 19,3 m Bunte Mergel-Formation, km3
- 22,6 m Schilfsandstein-Formation, km2

Bohrung Bo 8112/234, B 6/95 Baugrube Hauptstr. Staufen

- 1,7 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
- 7,3 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
- 8,5 m Lymnäenmergel-Formation?, tLM?, Tertiär
- 18,3 m Bunte Mergel-Formation?, km3?

Bohrung Bo 8112/235-239, EWS B 1/06 – 3/07 Staufen Alois-Schnorr-Straße

- 20,0 m Schwemmlöss, lu
- 24,0 m Umlagerungssedimente, qum, Pleistozän bis Holozän
- 68,0 m Muschelkalk, m
- 74,0 m Spaltenfüllung?, Spf?
- 90,0 m Muschelkalk, m

Bohrung Bo 8112/240-241, EWS B 1/ 06 – 2/06 Staufen Grunern In den Elzmatten

- 11,0 m Schwemmlöss, lu
- 90,0 m Jura?, j?

Bohrung Bo 8112/242-243, EWS B 1/ 06 – 2/06 Staufen Grunern Ballrechter Straße

- 2,0 m Anthropogene Aufschüttung, yA
- 3,0 m Schwemmlöss, lu
-18,0 m Quartäre Schichtenfolge im Oberrheingraben, qOR
-84,0 m Gipskeuper-Formation?, km1?
-98,0 m Unterkeuper?, ku?
-150,0 m Oberer Muschelkalk?, mo?

Bohrung Bo 8112/244, EWS B 1/05 Staufen

- 1,2 m Anthropogene Aufschüttung, yA
- 28,0 m Quartäre Schichtenfolge im Oberrheingraben, qOR
- 110,0 m Mitteljura bis Unterjura?, jm - ju?

Bohrung Bo 8112/245-247, EWS B 1/ 07 – 3/07 Staufen Grünmatten

- 4,0 m Bach und Flussablagerung, qBF, Pleistozän bis Holozän
-10,0 m Neuenburg-Formation, qN, Quartär
-30,0 m Breisgau-Formation, qBS, Quartär
-68,0 m Hauptrogenstein, bjHR