



Baden-Württemberg

REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU

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

- Sachstandsbericht -

Aktenzeichen: 95-4764//18-6346 /Mt/Ps/Ru/Sag/Spf/Wid

Datum: 04.12.2018


Bearbeiter: Dr. Manfred Martin, Dr. Rupert Prestel, Dr. Clemens Ruch, Dipl.-Geol.
Ansgar Sage, M.Sc. Simone Schöpflin, Dipl.-Geol. Johannes Wiedenmann

Seitenzahl: 194

Anlagen: 11

Auftraggeber: Landratsamt Böblingen, Parkstraße 16, 71034 Böblingen

Bezug: Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen
im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen (Hebungsgebiet "Nord")
- Sachstandsbericht -, LGRB (Az.: 95-4764//15-7202 vom 22.12.2015)

Erste ingenieurgeologische Stellungnahme des LGRB (Az.: 95-4764//13-7101 vom 26.08.2013) zur Frage von Bauwerksschäden im Bereich  in Böblingen

Hydrogeologische Stellungnahme des LGRB (Az.: 95-4764.1//13-7101 vom 20.11.2013) zu möglichen Beeinflussungen des Untergrunds durch die Tiefbrunnen der Böblinger Therme GmbH in Böblingen

Betreff: Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen

Gemeinde: Böblingen

Kreis: Böblingen

TK 25: 7320

Mehrfertigungen an: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg,
Referate 41 und 54, Kernerplatz 9, 70182 Stuttgart;

Regierungspräsidium Stuttgart, Referat 54, Ruppmannstraße 21, 70565 Stuttgart



Inhaltsverzeichnis

Seite:

1	Vorbemerkungen und Veranlassung.....	15
1.1	Antrag und Anzeigen zum Bau der Erdwärmesonden	16
1.2	Fachtechnische Beurteilung durch das LGRB gemäß Geothermie- Leitfaden Baden-Württemberg	17
1.3	Erlaubnis-Bescheid	18
1.4	Dokumentation der ausgeführten Bohrungen.....	20
1.5	Erste Schadensmitteilungen.....	21
1.6	Einrichtung des Arbeitskreises	24
2	Arbeitshypothese	26
2.1	Entwicklung der Arbeitshypothese	26
2.2	Erkundungsprogramm.....	28
2.3	Geologische Grundlagen und Stand der Untersuchungen zum Phänomen des "Gipskeuperquellens"	30
3	Geologische, hydrogeologische und Baugrundverhältnisse.....	31
3.1	Vorbemerkung.....	31
3.2	Geologische Verhältnisse.....	31
3.3	Hydrogeologische Verhältnisse	38
3.3.1	Überblick	38
3.3.2	Tektonische Verhältnisse	39
3.3.3	Grundwasserstände	40
3.3.4	Durchlässigkeiten	42
3.4	Baugrundverhältnisse.....	42
4	Geländehebungen	43
4.1	Airborne-Laser-Scanning (Differenzmethode).....	43
4.2	Geodätischen Messungen (Feinnivellements am Messpunktnetz)	46
4.3	Geodätische Messungen von Kanaldeckeln/-sohlen und Vergleich mit der Kanaldatenbank (Gesamthebungsbeträge).....	52
4.4	Radarinterferometrie	54
4.4.1	Räumliche Ausdehnung und Beträge der Hebungsgeschwindigkeit	54
4.4.2	Auswertung zum Beginn der Hebungen.....	65



4.4.3	Zeitliche Entwicklung der Hebungsfigur	71
4.4.4	Auswirkungen der Sanierungsmaßnahmen im Hebungsgebiet "Süd"	75
4.5	Zusammenfassung der Messergebnisse	80
5	Schadensbild	83
6	Erkundungsmaßnahmen	86
6.1	Erkundungsbohrung B2a	86
6.1.1	Stammdaten, Ausbauhinweise	87
6.1.2	Bohrtechnische Besonderheiten B2a	93
6.1.3	Geologische Schichtabfolge B2a	95
6.2	Begleitende Grundwassermessstellen B2, B2b, B3 und B4	100
7	Hydrochemische Untersuchungen	108
7.1	Analytikumfang	108
7.2	Grundwasserstockwerke	109
7.2.1	Grundwasserstockwerk in der Stuttgart-Formation (Schilfsandstein)	109
7.2.2	Grundwasserstockwerk in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper)	112
7.2.3	Grundwasserstockwerk in der Erfurt-Formation (Unterkeuper)	121
7.2.4	Grundwasserstockwerk im Oberen Muschelkalk	123
7.3	Mineral-Sättigungszustände	131
8	Untersuchungen im Bohrloch der B2a	132
8.1	Geophysikalische Bohrlochmessungen	132
8.1.1	Optischer Bohrlochscanner (ETIBS)	132
8.1.2	Akustischer Scanner (BHTV)	132
8.1.3	Kalibermessung	133
8.1.4	Messung von Neigung und Richtung	133
8.1.5	Natürliche Gammastrahlung	134
8.2	Ergebnisse der geophysikalische Bohrlochmessungen	135
8.2.1	Bohrlochverlauf	136
8.2.2	Natürliche Gamma-Strahlung	136
8.2.3	Optischer und akustische Bohrlochscans	136
9	Laborergebnisse an Bohrkernproben der Bohrung B2a	142
9.1	Bohrkernscheiben / Bohrkernstücke	142
9.2	Durchgeführte Laboruntersuchungen (Indexversuche)	143



9.2.1	Bestimmung des Wassergehalts.....	143
9.2.2	Bestimmung der Trockendichte und Reindichte.....	144
9.2.3	Bestimmung des Karbonatgehaltes nach Müller (Karbonatbombe)	145
9.2.4	Röntgen-Pulverdiffraktometrie-Analyse (RDA).....	146
10	Gliederung der Erkundungsbohrung B2a in lithologische Homogenbereiche ...	147
10.1	Vorschachtungen (KA, evtl. q) 0,00–2,00 m.....	150
10.2	Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (kmSw) 2,00–4,20 m	150
10.3	GAR-Zone (kmSw) 4,20–6,00 m	150
10.4	Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (kmSw–kmGr) 6,00–17,54 m	150
10.5	Zone zwischen Oberem Gips- und Oberem Anhydritspiegel (kmGr) 17,54–58,52 m	150
10.6	Zone zwischen Oberem und Unterem Anhydritspiegel (kmGR) 58,52– 121,72 m	151
10.7	Anhydritkern, Oberer und Unterer (kmGr) 59,77–63,44 m und 115,89– 121,72 m	151
10.8	Zone zwischen Anhydritkern und Unterem Gipsspiegel (kmGr–ku) 121,72–130,47 m	152
10.9	Unterkeuper teilweise mit Gipsstein, bzw. Sulfatknollen (kuE) 130,47– 144,50 m	152
10.10	Primär nicht sulfatführendes Gebirge (mo) 144,50–162,20 m.....	152
11	Geologische und technische Angaben sowie Raumlagen (Inklination und Azimut) der Erdwärmesonden im Hebungsgebiet "Süd"	153
11.1	Raumlagemessungen der Erdwärmesonden	155
11.2	Ruhetemperaturprofile in den Erdwärmesonden im Hebungsgebiet "Süd"	157
11.2.1	Vorbemerkungen zu Temperaturmessungen in Erdwärmesonden	157
11.2.2	Temperaturprofilmessungen im Zuge der nachträglichen Abdichtung in den Erdwärmesonden am [REDACTED] sowie am [REDACTED]	169
11.3	Bohrlochgeophysikalische Messungen in den Erdwärmesonden.....	174
11.3.1	Natürliche Gammastrahlung.....	174
11.3.2	Weitere geophysikalische Bohrlochmessungen (gamma-gamma, Kurz- TRT).....	174
12	Prüfung und Einleitung schadensbegrenzender Maßnahmen	176



12.1	Ausgangslage	176
12.2	Nachverpressung der Erdwärmesonden in den Quartieren II, IIIa und IIIb	181
13	Zusammenfassung.....	188
14	LITERATUR.....	193

Abbildungsverzeichnis:



Abb. 1.1:	Ausdehnung und Hebungsbeträge der Schadensbereiche  und  in Böblingen.....	23
Abb. 3.1:	Ausschnitt aus Geologischer Karte GK 25, Bl. 7320 Böblingen, mit Eintrag der Schnittlage abgebildeter Geologischer Längsschnitte	32
Abb. 3.2:	Hydrogeologischer Übersichtsschnitt Böblingen mit Eintrag der bis in den Oberen Muschelkalk reichenden Aufschlussbohrungen sowie der mo-Druckhöhe	33
Abb. 3.3:	Hydrogeologischer Detailschnitt (7 km Länge) mit Eintrag der als Stützstellen gewählten Bohrungen, der mo-Druckhöhe sowie des Grundwasserstandes in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper).....	34
Abb. 3.4:	Lithostratigraphische Einheiten des Keupers und des Muschelkalks für Baden-Württemberg	37
Abb. 3.5:	Hydrogeologischer Detailschnitt (4 km Länge) mit Eintrag der als Stützstellen gewählten Bohrungen, der mo-Druckhöhe sowie des Grundwasserstandes in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper).....	39
Abb. 4.1:	Darstellung der absoluten Geländehebungsbeträge auf Grundlage eines Vergleichs von zwei Airborne-Laser-Scannmessungen 05. Februar 2002 – 09. Januar 2014 für das Hebungsg Gebiet "Süd"	45
Abb. 4.2:	Darstellung der geodätischen Messpunkte für die Messungen zwischen 29.04.2013 und 25.08.2015.....	47
Abb. 4.3:	Hebungsgeschwindigkeiten [mm/Monat] in der Messperiode 22.10.2013 – 25.02.2014	49



Abb. 4.4:	Hebungsgeschwindigkeiten [mm/Monat] in der Messperiode 25.02.2014 – 20.10.2014	50
Abb. 4.5:	Hebungsgeschwindigkeiten [mm/Monat] in der Messperiode 20.10.2014 – 25.08.2015	51
Abb. 4.6:	Darstellung der durch geodätische Messungen innerhalb unterschiedlich langer Messzeiträume nachgewiesenen absoluten Hebungsbeträge [mm].....	52
Abb. 4.7:	Differenz [mm] zwischen Höhenangaben aus der Kanaldatenbank (Messwerte Januar 1998 bis Juli 2008) und den Messergebnissen vom 26.01.2015 bis 11.02.2015	53
Abb. 4.8:	Darstellung der absoluten Geländehebungsbeträge auf Grundlage der Radarinterferometrie der Fa. AIRBUS für den Zeitraum Februar 2014 und Februar 2018.....	56
Abb. 4.9:	Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Februar 2014 und Februar 2015	58
Abb. 4.10:	Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Februar 2015 und Februar 2016	59
Abb. 4.11:	Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Februar 2016 und Juli 2017	60
Abb. 4.12:	Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Juli 2017 und Februar 2018.....	61
Abb. 4.13:	Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Februar 2014 und Februar 2018	63
Abb. 4.14:	Zeitliche Entwicklung der Hebungen (mit berechneter Hebungsgeschwindigkeit Februar 2014 – September 2014) im Bereich des zentralen Hebungsentrums (Airbus Defence and Space, Bericht vom 22.10.2014).....	64
Abb. 4.15:	Zeitliche Entwicklung der Hebungen (mit berechneter Hebungsgeschwindigkeit 25.02.2014 – 09.09.2015) im Bereich des zentralen Hebungsentrums (Airbus Defence and Space, Bericht vom 05.10.2015)	64



- Abb. 4.16: Drei Beispielzeitreihen (S1–S3) im Hebungsgebiet "Süd". Die roten Linien zeigen ein einfaches Bewegungsmodell, das bestmöglich an die gegebenen Verschiebungen (blau Punkte) angepasst wurden (Quelle: Wampach und Westerhaus (2018)). 66
- Abb. 4.17: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [REDACTED] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen [REDACTED] (rot umrandet) und [REDACTED] (grün umrandet) 67
- Abb. 4.18: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [REDACTED] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen [REDACTED] bzw. [REDACTED] (rot umrandet) und [REDACTED] (grün umrandet) 68
- Abb. 4.19: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [REDACTED] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen [REDACTED] bzw. [REDACTED] (rot umrandet) und [REDACTED] (grün umrandet) 68
- Abb. 4.20: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [REDACTED] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen [REDACTED] bzw. [REDACTED] (rot umrandet) und [REDACTED] (grün umrandet) 69
- Abb. 4.21: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [REDACTED] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen [REDACTED] bzw. [REDACTED] (rot umrandet) und [REDACTED] (grün umrandet) 69
- Abb. 4.22: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [REDACTED] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen [REDACTED] bzw. [REDACTED] (rot umrandet) und [REDACTED] (grün umrandet) 70
- Abb. 4.23: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [REDACTED] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen [REDACTED] bzw. [REDACTED] (rot umrandet) und [REDACTED] (grün umrandet) 70
- Abb. 4.24: Entwicklung der Hebungsfigur "Süd" zwischen Oktober 2004 und Oktober 2007 (Abbildung oben links) bis März 2013 (Abbildung unten rechts) 72



Abb. 4.25:	Prinzipiskizzen zur Entwicklung der Hebungsfigur "Süd". Obere Abbildung: Entwicklung der Hebungsfigur durch Hebungsbewegungen aus dem Hebungszentrum. Untere Abbildung: Entwicklung der Hebungsfigur mit Überlagerung durch Hebungsbewegungen aus dem Hebungszentrum.	74
Abb. 4.26:	Zeit-/Geländeveränderungsdiagramme für ausgewählte Reflektoren im Bereich des südwestlichen Hebungsentrums.	76
Abb. 4.27:	Zeit-/Geländeveränderungsdiagramme für ausgewählte Reflektoren im Bereich zwischen dem südwestlichen Hebungszentrum und dem Westrand des zentralen Hebungsentrums.	77
Abb. 4.28:	Zeit-/Geländeveränderungsdiagramme für ausgewählte Reflektoren im Bereich zwischen dem Westrand des zentralen Hebungsentrums und dem südöstlichen Rand des Hebungsgebietes "Süd".	77
Abb. 4.29:	Dreidimensionale Südansicht des Hebungsgebietes "Süd" bei 250-facher Überhöhung.	81
Abb. 4.30:	Dreidimensionale Nordansicht des Hebungsgebietes "Süd" bei 250-facher Überhöhung.	82
Abb. 5.1:	Interpolierte Absoluthebungen von 2002 (Ausgangs-DGM) bis Februar 2018 und Schadensverteilung im südwestlichen Teil des Hebungsgebietes "Süd".	84
Abb. 5.2:	Interpolierte Absoluthebungen von 2002 (Ausgangs-DGM) bis Februar 2018 und Schadensverteilung im zentralen Teil des Hebungsgebietes "Süd".	84
Abb. 5.3:	Interpolierte Absoluthebungen von 2002 (Ausgangs-DGM) bis Februar 2018 und Schadensverteilung im südöstlichen Teil des Hebungsgebietes "Süd".	85
Abb. 6.1:	Lageplan der Erkundungsbohrungen B2a, der begleitend errichteten Grundwassermessstellen B2, B2b, B3 und B4 sowie der Erdwärmesonden (rot) im Quartier II und Quartier III des Hebungsgebiets "Süd".	88



Abb. 6.2:	Grobschematische Darstellung der Erkundungsbohrung B2a mit temporärem Ausbau zur Grundwassermesssstelle.....	94
Abb. 6.3:	Grobschematische Darstellung der begleitenden Grundwassermessstellen B2 und B2b	102
Abb. 6.4:	Grobschematische Darstellung der begleitenden Grundwassermessstelle B3	103
Abb. 6.5:	Grobschematische Darstellung der begleitenden Grundwassermessstelle B4	104
Abb. 6.6:	Datenlogger-Aufzeichnungen der Grundwasserstände in allen zur Verfügung stehenden Grundwassermessstellen (Hebungsgebiet Nord: B1 und B1 flach, Hebungsgebiet "Süd": B2, B2 flach, B 2a, B3 und B4)	105
Abb. 7.1:	Piper-Diagramm: Hydrochemische Typisierung von Schilfsandstein- und Gipskeuper- Grundwässern in der GWM B1b und GWM B1.....	110
Abb. 7.2:	Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Schilfsandstein-Grundwasser in der GWM B1b (09.07.2015, Mg-Ca-HCO ₃ -Cl-Typ)	111
Abb. 7.3:	Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B1 (10.07.2015, Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Typ).....	113
Abb. 7.4:	Schoeller-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Schilfsandstein- und Gipskeuper-Grundwässern in der GWM B1b und GWM B1.....	114
Abb. 7.5:	Piper-Diagramm: Hydrochemische Typisierung von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B2a, der GWM B3 und der GWM B4	115
Abb. 7.6:	Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B3 (11.04.2016, Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Typ).....	116
Abb. 7.7:	Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B4 (04.04.2016, Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Cl-Typ).....	117
Abb. 7.8:	Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B2a (26.05.2015, Ca-Mg-SO ₄ -Typ).....	119



Abb. 7.9:	Schoeller-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwässern in der GWM B2a, GWM B3 und GWM B4	120
Abb. 7.10:	Piper-Diagramm: Hydrochemische Typisierung von Unterkeuper-Grundwasser und Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B2a.....	122
Abb. 7.11:	Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Unterkeuper-Grundwasser in der GWM B2a (06.08.2015, Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Typ).....	123
Abb. 7.12:	Piper-Diagramm: Hydrochemische Typisierung von Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B1a und im Tiefbrunnen I..	124
Abb. 7.13:	Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B1a (27.03.2015, Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄ -Typ)	125
Abb. 7.14:	Schoeller-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B1a und im Tiefbrunnen I..	126
Abb. 7.15:	Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Oberer Muschelkalk-Grundwasser im Tiefbrunnen I (1979, Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Typ).....	128
Abb. 7.16:	Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B2a (24.09.2015, Ca-Mg-HCO ₃ -Typ).....	130
Abb. 8.1:	Polpunkte (Projektion untere Halbkugel) der mittels optischer und akustischer Bohrlochscans in B2a gemessenen sedimentären Flächen (Schichtflächen, fazielle Grenzflächen)	138
Abb. 8.2:	Polpunkte (Projektion untere Halbkugel) der mittels optischer und akustischer Bohrlochscans in B2a gemessenen Kluftflächen	139
Abb. 8.3:	Polpunkte und gemittelte Großkreise (Projektion untere Halbkugel) der mittels optischer und akustischer Bohrlochscans in B2a im Abschnitt unterhalb des Unteren Gipsspiegels (130,5 m u. A. bis Endteufe) gemessenen Trennflächen	141
Abb. 8.4:	Kluftrosendarstellung der tektonischen Streichrichtungen	141



Abb. 11.1:	Ermittlung des geothermischen Gradienten in der Erkundungsbohrung B2a.....	158
Abb. 11.2:	Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungs-Maßnahmen; Außerbetriebnahme: 02.04.2014....	161
Abb. 11.3:	Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungs-Maßnahmen; Außerbetriebnahme: 02.04.2014....	162
Abb. 11.4:	Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungs-Maßnahmen; Außerbetriebnahme: 12.03.2014....	163
Abb. 11.5:	Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungs-Maßnahmen; Außerbetriebnahme: 11.03.2014....	164
Abb. 11.6:	Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1, 2 und 3) vor den Abdichtungs-Maßnahmen; Außerbetriebnahme: 05.06.2014.....	166
Abb. 11.7:	Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungs-Maßnahmen; Außerbetriebnahme: 26.06.2014.....	167
Abb. 11.8:	Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungs-Maßnahmen; Außerbetriebnahme: 26.06.2014.....	168
Abb. 11.9:	Zeitreihe der faseroptisch gemessenen Temperaturmessungen der Erdwärmesonden [REDACTED] (mit Eintrag des geothermischen Gradienten).....	173
Abb. 12.1:	Entwicklung der Hydratationswärme beim Abbinden von Sulfadur ..	181
Abb. 12.2:	Röntgenbeugungsdiagramm einer Schneidewasserprobe EWS 4/1	183
Abb. 12.3:	Verpressmengen (Σ = summarisch, z.B. 1450 l = Einzelverpressung) zur nachträglichen Abdichtung der Erdwärmesonden am [REDACTED] (Niveau des Gipsspiegels nach B2a)	185
Abb. 12.4:	Verpressmengen (Σ = summarisch, z.B. 1590 l = Einzelverpressung) zur nachträglichen Abdichtung der Erdwärmesonden am [REDACTED] (Niveau des Gipsspiegels nach B3)	185
Abb. 12.5:	Verpressmengen (Σ = summarisch, z.B. 1600 l = Einzelverpressung) zur nachträglichen Abdichtung der Erdwärmesonden am [REDACTED] (Niveau des Gipsspiegels nach B3)	186



Tabellenverzeichnis:

Tab. 1.1:	Bohranzeigen der EWS-Anlagen im Hebungsgebiet "Süd"	17
Tab. 1.2:	Wasserrechtliche Erlaubnisse der EWS-Anlagen im Hebungsgebiet "Süd"	19
Tab. 2.1:	Geologische Informationen zu den Erdwärmesondenbohrungen in den Quartieren II, III und IV	28
Tab. 3.1:	Mächtigkeiten der einzelnen Schichtfolgen der Grabfeld-Formation (Gipskeuper)	33
Tab. 3.2:	Schichten und Mächtigkeiten in der Umgebung von Böblingen	36
Tab. 6.1:	Stammdaten der Erkundungsbohrung B2a und der begleitenden Grundwassermessstellen im Zuge der Erkundung im Hebungsgebiet "Süd"	88
Tab. 6.2:	Bohrtechnische Eckdaten beim Abteufen der B2a	90
Tab. 6.3:	Zusammenstellung der in der B2a eingebauten Sperrrohrtouren	90
Tab. 6.4:	Zusätze und Parameter der inhibierten Bohrspülung	91
Tab. 6.5:	Bauzeitenplan der B2a (nach Geotechnischem Bericht VEES PARTNER, Anl. 11)	91
Tab. 6.6:	Kurzprofil B2a	95
Tab. 6.7:	Übersicht über die hydraulischen Versuche in B2a	99
Tab. 6.8:	Hydraulische Kennwerte ermittelt in B2a	100
Tab. 6.9:	Geologische Kurzprofile B2, B2b, B3 und B4	101
Tab. 7.1:	Hydrochemische Analysen von Grundwässern in Böblingen (Hebungsgebiet "Nord")	109
Tab. 7.2:	Mineral-Sättigungszustände von Grundwässern in Böblingen	131



Tab. 8.1:	Übersicht über die eingesetzten geophysikalischen Untersuchungsmethoden in B2a	135
Tab. 9.1:	Übersicht über Art und Anzahl der durchgeführten Laboruntersuchungen	143
Tab. 10.1:	Gliederung der Bohrung B2a in lithologische Homogenbereiche	149
Tab. 11.1:	Zusammenstellung der Ringraumabdichtung (Soll- und Ist-Volumina) der Erdwärmesonden im [REDACTED]	154
Tab. 11.2:	Abweichungen (ca.-Werte) der EWS-Bohrachsen aus der Vertikalen (nach terratec, bullseye-Darstellungen)	156

Anlagenverzeichnis:

Anlagen DVD zum Sachstandsbericht Süd

Anlage 1:	Übersichtslageplan
Anlage 2:	Bohrungen B2a, B2, B2b, B3, B4, Bohrprofile und Ausbau der GWM
Anlage 2.1:	Bohrung B2a (mo)
Anlage 2.2:	Bohrung B2 (km1)
Anlage 2.3:	Bohrung B2b (km2)
Anlage 2.4:	Bohrung B3 (km1)
Anlage 2.5:	Bohrung B4 (km1)
Anlage 3:	Grundwasseranalysen (LGRB)
Anlage 3.1:	Bohrung B2a (mo): 4 Analysen
Anlage 3.2:	Bohrung B3 (km1): 2 Analysen
Anlage 3.3:	Bohrung B4 (km1): 2 Analysen
Anlage 4:	Geophysikalische Bohrlochmessungen
Anlage 4.1:	Bohrlochmessungen in Bohrung B2a (mo)
Anlage 4.1.1:	Bohrlochmessungen in Bohrung B2a (mo) durch Fa. terratec
Anlage 4.1.2:	Bohrlochmessungen in Bohrung B2a (mo) durch das Büro Voutta
Anlage 4.2:	Bohrlochmessungen in Bohrung B2 (km1)
Anlage 4.3:	Bohrlochmessungen in Bohrung B3 (km1)
Anlage 4.4:	Bohrlochmessungen in Bohrung B4 (km1)
Anlage 5:	Grundwasserhydraulische Versuche in Bohrung B2a (mo), Bericht des Büro Voutta vom 17.11.2016



- Anlage 6: Temperatur- und Gamma-Gamma-Dichteanomaliemessungen in den EWS
- Anlage 6.1: Geophysikalische Messungen in den Erdwärmesonden im [REDACTED]
[REDACTED] Bericht des Büro Voutta vom 07.07.2014
- Anlage 6.2: Geophysikalische Messungen in den Erdwärmesonden vor und nach den Sanierungsarbeiten im [REDACTED]
[REDACTED], Ergebnisse des Büro Voutta
- Anlage 6.3: Geophysikalische Messungen in den Erdwärmesonden im [REDACTED]
[REDACTED], Bericht des Büro Voutta vom 14.12.2014
- Anlage 7: Geophysikalische Messungen in den EWS
- Anlage 7.1: Geophysikalische Messungen in den EWS 1 – EWS 8, Quartier II,
[REDACTED] Bericht der Fa. terratec vom 24.02.2015
- Anlage 7.2: Geophysikalische Messungen in den EWS 1 – EWS 3, Quartier III,
[REDACTED], Bericht der Fa. terratec vom 14.08.2015
- Anlage 7.3: Geophysikalische Messungen in den EWS 1 und EWS 2, Quartier III,
[REDACTED] Bericht der Fa. terratec vom 05.02.2016
- Anlage 8: Mineralogische Untersuchungen
- Anlage 8.1: LGRB Probentabelle der Bohrproben aus Bohrung B2a (mo)
- Anlage 8.2: LGRB Probenspiegel der Bohrproben aus Bohrung B2a (mo)
- Anlage 9: EWS-Sanierung
- Anlage 9.1: Schnitt- und Injektionspläne der Erdwärmesonden im [REDACTED]
[REDACTED]
- Anlage 9.2: Schnitt- und Injektionspläne der Erdwärmesonden im [REDACTED]
- Anlage 9.3: Schnitt- und Injektionspläne der Erdwärmesonden im [REDACTED]
[REDACTED]
- Anlage 10: Satellitenbasierte Bodenbewegungsmessung, Berichte der Fa. Airbus DS Geo GmbH
- Anlage 11: Geotechnische Berichte VEES|PARTNER
- Anlage 11.1: Geotechnischer Bericht VEES|PARTNER Az. 14012 (Quartier II) vom 31.10.2016
- Anlage 11.2: Geotechnischer Bericht VEES|PARTNER Az. 14012 (Quartier III) vom 28.09.2018



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 oberflächennahe Geothermie.

Im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen wurden zwei Hebungsgebiete, das Hebungsgebiet "Nord" und das Hebungsgebiet "Süd" festgestellt. Dabei standen Erdwärmesonden im Verdacht, im Untergrund Prozesse auszulösen, die zu den im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen zunehmenden Gelände- und Geländeverformungen sowie den Verformungen und Schäden an Gebäuden und Infrastruktur führen.

Das Hebungsgebiet "Nord" mit der Erdwärmesonden-Anlage in der [REDACTED] (Quartier I) als Auslöser der Hebungsbewegungen war Gegenstand des 1. Sachstandsbericht "Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen (Hebungsgebiet "Nord")" des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) mit LGRB-Az.: 95-4764//15-7202 vom 22.12.2015.

Der nun vorliegende 2. Sachstandsbericht behandelt das Hebungsgebiet "Süd" im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen (vgl. Anl. 1). Analog zum Hebungsgebiet "Nord" wurden auch hier im Hebungsgebiet "Süd" im Auftrag privater Bauherren Erdwärmesonden-Anlagen (EWS-Anlagen) hergestellt, um deren Wohngebäude mit Erdwärme beheizen zu können (Quartier II: [REDACTED]; Quartier III a: [REDACTED]; Quartier III b: [REDACTED]; Quartier IV: [REDACTED]).

Die genannten Erdwärmesonden-Anlagen wurden - wie in der [REDACTED] - von der Bohrfirma im Imlochbohrhammerverfahren ausgeführt. Angaben zur Anzahl und gebohrten Endteufe der Erdwärmesonden sowie zu dem Bohrzeitraum können der nachfolgenden Tab. 1.1 entnommen werden.



Zum Zeitpunkt der Planung und Umsetzung der EWS-Anlagen bildete der "Geothermie-Leitfaden des Landes Baden-Württemberg (UM 2005)" den rechtlichen Rahmen für die Erstellung von EWS-Anlagen. Nach den Erfahrungen des EWS-Schadensfalls Staufen hat das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) konkrete Auflagenempfehlungen zur Vermeidung von durch Erdwärmesondenbohrungen induzierte Schäden abgegeben.

Die Beantragung und Herstellung der in Tab. 1.1 aufgeführten Erdwärmesonden liegen zum Teil vor dem Zeitpunkt der konkreten Auflagenempfehlung (Quartier III: ~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~), zum Teil nach diesem Zeitpunkt (Quartier II: ~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~; Quartier IV: ~~XXXXXXXXXXXX~~). Allerdings wurden alle betroffenen Erdwärmesonden-Anlagen noch vor der sogenannten "Gipsspiegelbegrenzung" (Rundmail des LGRB an die Umweltämter der Stadt- und Landkreise, LGRB-Az.: 94-4763//09-942 En/Pop vom 03.02.2009) verwirklicht.

1.1 Antrag und Anzeigen zum Bau der Erdwärmesonden

Für den Bau und Betrieb von Erdwärmesondenanlagen sind wasserrechtliche Genehmigungen einzuholen. Die Anträge auf Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis wurden beim zuständigen Landratsamt (LRA) Böblingen gestellt. Für die zugehörigen Bohrungen bestehen auch außerhalb des Wasserrechts Anzeigepflichten.

Nach § 4 Lagerstättengesetz besteht gegenüber dem Geologischen Dienst am LGRB Anzeigepflicht aller Bohrungen sowie die Pflicht zur Überlassung der Bohrergebnisse für die Zwecke der geologischen Landesaufnahme.

Das Datum der Bohranzeige, die dabei angezeigte Anzahl der Bohrungen einschließlich der auszuführenden Endteufe sowie deren LGRB-Archivierungsnummer (ARNUM) jeder EWS-Anlage können der nachfolgenden Tab. 1.1 entnommen werden.



Tab. 1.1: Bohranzeigen der EWS-Anlagen im Hebungsgebiet "Süd"

Quartier	EWS-Anlage	Bohranzeige				
		LGRB-ARNUM	Eingangsdatum	Anzahl Bohrungen	Bohrzeitraum	Endteufe [m u. GOK]
Quartier II		4721.5/2008009804	25.10.2008	2	01.12.2008	80
		4721.5/2008008104	06.09.2008	2	25-26.11.2008	80
		4721.5/2008007768	27.08.2008	2	26-27.11.2008	80
		4721.5/2008007418	18.08.2008	2	27-28.11.2008	80
Quartier III		4721.5/2006014371	05.12.2006	2	24-25.01.2007 29-30.01.2007	80
		4721.5/2006014371	05.12.2006	2	18-19.01.2007 22-23.01.2007	80
		4721.5/2006013088	18.09.2006	3	12-18.10.2006	99 ¹⁾
Quartier IV		4721.5/2008008987	01.10.2008	3	05-07.11.2008	87

¹⁾Die beantragte Bohrtiefen liegen bei 3 x 99 m, anhand der später erfolgten Messungen in den EWS-Schläuchen beträgt die tatsächliche Bohrtiefe ca. 133 m.

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

Die Bohrungen wurden mit weniger als 100 m Endteufe (80–99 m Endteufe, vgl. Tab. 1.1) beantragt, wodurch gemäß "Geothermie-Leitfaden des Landes Baden-Württemberg (UM 2005)" im Kontext des wasserrechtlichen Verfahrens keine weitere fachtechnische Prüfung durch das LGRB vorgesehen ist und keine schriftliche Rückäußerung durch das LGRB erfolgte.

Die Bohrlokationen der Quartiere II und III liegen nach Geothermie-Leitfaden (Bewertungskarte: Hydrogeologische Kriterien zur Anlage von Erdwärmesonden in Baden-Württemberg) in der Zone B3, wonach die "Untergrundverhältnisse für den Bau und Betrieb von Erdwärmesonden hydrogeologisch nur bis zu begrenzten Tiefen unter 100 m günstig" sind und "Einzelfallprüfung erforderlich" ist. Die EWS-Anlage im Quartier IV befindet sich im Übergangsbereich zwischen Zone B1 und B3. Zone B1 bezeichnet die Untergrundverhältnisse für den Bau und Betrieb von Erdwärmesonden bis zu einer Tiefe von 200 m hydrogeologisch günstig und bei größeren Bohrtiefen wegen ausgeprägter Stockwerksgliederung hydrogeologisch un-



günstig, was eine Einzelfallprüfung erforderlich macht. In Übersignatur weist die Bewertungskarte des Geothermie-Leitfadens auf die Lage in rechtskräftigen und fachtechnisch abgegrenzten Wasserschutzgebieten und Heilquellenschutzgebieten hin, wonach "Erdwärmesonden nicht erlaubt bzw. im Einzelfall zu beurteilen sind".

1.3 Erlaubnis-Bescheid

Gemäß § 127 BBergG sind ausschließlich Bohrungen über 100 m Eindringtiefe durch das Regierungspräsidium Freiburg, Landesbergdirektion, genehmigungspflichtig, was eine Anzeigenbestätigung mit fachtechnischer Stellungnahme (bergrechtliche Genehmigung) einschließt. Hinweisen auf besondere Georisiken und Auflagen durch das LGRB nach sich ziehen würde. In den Bohranzeigen der beantragten EWS-Sondenbohrungen wurden Endteufen zwischen 80 m und 99 m angegeben (vgl. Tab. 1.1), wodurch gegenüber der Landesbergdirektion keine Genehmigungspflicht bestand und somit auch keine Anzeigenbestätigung mit fachtechnischer Stellungnahme durch das LGRB erfolgte. Im Zuge der Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Erdwärmesonden im [REDACTED] entgegen der in der Bohranzeige angegebenen 99 m mit 133 m Endteufe ausgeführt wurden und somit bei dieser EWS-Anlage gegen die Anzeigepflicht gegenüber der Landesbergdirektion verstoßen wurde.

Im Vorfeld der Erstellung von Erdwärmesondenanlagen muss gemäß Wasserhaushaltsgesetz (WHG) beim zuständigen LRA die wasserrechtliche Erlaubnis eingeholt werden. Die wasserrechtliche Erlaubnis wurde für die EWS-Anlagen [REDACTED] mit dem Bescheid des LRA Böblingen gemäß §§ 2, 3 und 7 WHG unter Auflagen und Bedingungen erteilt. Für die restlichen EWS-Anlagen wurden keine schriftlichen wasserrechtlichen Erlaubnisse erteilt. Die Bohrungen der EWS-Anlagen [REDACTED] wurden vor Erteilen der wasserrechtlichen Erlaubnis begonnen. Die Aktenzeichennummer sowie das Datum der Erlaubniserteilung jeder EWS-Anlage im Hebungsgebiet "Süd" sind (soweit schriftliche Aufzeichnungen vorliegen) in nachstehender Tab. 1.2 gelistet.



Tab. 1.2: Wasserrechtliche Erlaubnisse der EWS-Anlagen im Hebungsgebiet "Süd"

Quartier	EWS-Anlage	Wasserrechtliche Erlaubnis	
		Aktenzeichennummer	Datum der Erlaubniserteilung
Quartier II		41-692.241	25.11.2008
		41-692.241	27.01.2009
		mündlich erteilt ¹⁾	
		mündlich erteilt ¹⁾	
Quartier III		41-692.241	23.01.2007
		41-692.241	23.01.2007
		41-692.241	11.10.2006
Quartier IV		keine vorhanden	

¹⁾ Nach Auskunft des Wasserwirtschaftsamt BB erfolgte eine mündlich erteilte Erlaubnis, nachdem ein gleichlautender Bohrantrag wie für vorlag und analog zu entscheiden war.

Die wasserrechtlichen Erlaubnisse sind inhaltlich u. a. an folgende Auflagen und Bedingungen gebunden:

- Bau der Anlage erfolgt nach den anerkannten Regeln der Technik
- Lage im Heilquellenschutzgebiet Stuttgart: bei Bohrungen im Unterkeuper und Muschelkalk nur "nicht wassergefährdende" Flüssigkeiten oder Glykol-Wasser-Gemische mit max. 200 Liter und in einer Konzentration von max. 3 % Glykol
- Betrieb der Erdsonde erfolgt nur ohne Gefahr einer Vereisung des Untergrundes
- Nur eine nach DVGW-Merkblatt W 120 zertifizierte Bohrfirma darf beauftragt werden
- Bohrung ist durch geologische Aufnahme zu dokumentieren. Stockwerksübergreifender Ausbau ist unzulässig. Falls eine eindeutige Klärung der geologischen Verhältnisse, besonders bei Stockwerksbau, anhand der Bohrproben nicht möglich ist, ist ein gamma-ray-log zu fahren. Bei der ersten Bohrung sind alle Meter Bohrproben zu entnehmen und für eine Aufnahme durch das LGRB einen Monat lang aufzubewahren.
- Beim Bohren sind Grundwasserstände, Spülverluste, Hohlräume, Klüftigkeit etc. zu protokollieren. Bei Anomalien ist das weitere Vorgehen mit dem Landratsamt, Wasserwirtschaftsamt abzustimmen
- Bohrlochringraum ist von unten nach oben vollständig mit Suspension zu verpressen, die nach Erhärtung dauerhaft dicht und beständig sein muss. Bohrl Lochdurchmesser ist ausreichend groß zu wählen und Verpressschlauch mit der Sonde einzubringen (nach VDI 4640). Suspensionsmenge ist zu erfassen.
- Es ist im Lufthebeverfahren zu bohren.



Gegenüber den vorliegenden wasserrechtlichen Erlaubnissen der EWS-Anlagen [REDACTED] wurde die wasserrechtliche Erlaubnis EWS-Anlage [REDACTED] um nachfolgende Auflagen und Bedingungen erweitert:

- Bei angetroffenen Hohlräumen > 2 m oder vollständigem Spülverlust ist die Bohrung abbrechen und entsprechend den Vorgaben im Leitfaden zu verfüllen. Es ist sicherzustellen, dass es zu keiner zusätzlichen Lösung von Gips oder einer Umwandlung von Anhydrit in Gips kommt
- Die im Bohrlochringraum verwendete Verpresssuspension muss sulfatbeständig sein

1.4 Dokumentation der ausgeführten Bohrungen

Der gegenüber dem Geologischen Dienst (LGRB) am Regierungspräsidium Freiburg bestehenden Pflicht zur Überlassung der Bohrdokumentationen (§ 4 Lagerstättengesetz) wurde nur bedingt nachgekommen. Die Bohrdokumentationen der Erdwärmesondenbohrungen im [REDACTED] wurden am 18.09.2006 beim LGRB eingereicht und unter ARNUM: 7320-1141, 7320-2254 und 7320-2255 in der LGRB-Aufschlussdatenbank erfasst. Analog dazu wurden die Dokumentationen der Bohrungen im [REDACTED] am 01.10.08 beim LGRB eingereicht und dort unter ARNUM: 7320-2093 registriert. Die Aufzeichnungen zum [REDACTED] wurden am 15.04.2010 dem LGRB überlassen und unter ARNUM: 7320-1372 und 7320-1373 in der LGRB-Aufschlussdatenbank archiviert. Einzig die Pflichtunterlagen der EWS-Anlage [REDACTED] wurden vollständig eingereicht. Die Dokumentationen zu den EWS-Anlagen im [REDACTED] sowie im [REDACTED] waren unvollständig. Für die restlichen in Tab. 1.1 gelisteten Erdwärmesonden-Anlagen wurden beim LGRB keine Dokumentationen eingereicht.

Besonderheiten oder Probleme beim Bohren, beim Ausbau oder beim Abdichten der Erdwärmesondenbohrungen wurden nicht gemeldet.



1.5 Erste Schadensmitteilungen

Nach Mitteilung des LRA Böblingen wurden im Bereich der [REDACTED] (Quartier I (Hebungsgebiet "Nord")) sowie im [REDACTED] (Quartier II (Hebungsgebiet "Süd")) in Böblingen ab dem Jahr 2011 und vermehrt im Jahr 2012 Bauwerksschäden gemeldet, die sich als Risse an Haupt- und Nebengebäuden darstellen. Das LRA Böblingen hat hierüber das LGRB per E-Mail vom 07.02.2013, vom 26.06.2013 und vom 05.07.2013 in Kenntnis gesetzt.



Nach Angabe des LRA Böblingen sei die Schadensentwicklung nach Mitteilung betroffener Grundstückseigentümer anhaltend und fortschreitend. Einzelne betroffene Grundstückseigentümer haben darüber hinaus im Jahr 2013 eigene Begutachtungen durch ein privates Ingenieurbüro veranlasst. In seinen Stellungnahmen zu Anwesen im [REDACTED] (Hebungsgebiet "Süd") kommt der Gutachter zu der Ansicht, dass "ein Zusammenhang der Risse mit einem nicht ausreichend tragfähigen Untergrund aus geotechnischer Sicht nicht besteht" (BGU, Deckenpfronn 2013).



Wie das LRA Böblingen im damaligen Bezugsschreiben (E-Mail vom 07.08.2013) festhält, wird seitens der Betroffenen auf Grund der zeitlichen Entwicklung der aufgetretenen Schäden der "hochgradige Verdacht" geäußert, dass die festgestellten Schadensbilder bzw. die Schadensentwicklung Folge von in der Umgebung durchgeführten Erdwärmesondenbohrungen sein könnten. Hierdurch seien "möglicherweise Hebungsprozesse durch die Umwandlung von Anhydrit in Gips in Gang gesetzt worden" (BGU, Deckenpfronn 2013).

Zur Objektivierung des vorgetragenen Sachverhaltes hat das LRA Böblingen im Frühjahr 2013 ein Vermessungsbüro (intermetric GmbH) damit beauftragt, in den beiden bis dahin in Rede stehenden Wohngebieten [REDACTED] und [REDACTED] geodätische Messpunkte einzurichten sowie nach erfolgter Nullmessung präzise geodätische Messungen nach Lage und Höhe vorzunehmen.

Das LRA Böblingen hat dem LGRB die bis dahin in zweiter Folgemessung vorliegenden geodätischen Messergebnisse mit der Bitte um fachtechnische Bewertung und um Hinweise zur weiteren Vorgehensweise übersandt. Das LGRB hat daraufhin in der Bezugsstellungnahme LGRB-Az. 95-4764//13-7101 vom 26.08.2013 eine erste fachliche Bewertung vorgenommen und die Messergebnisse in einer Übersichtskarte auf Grundlage des hochauflösenden Digitalen Geländemodells sowie des Amtlichen

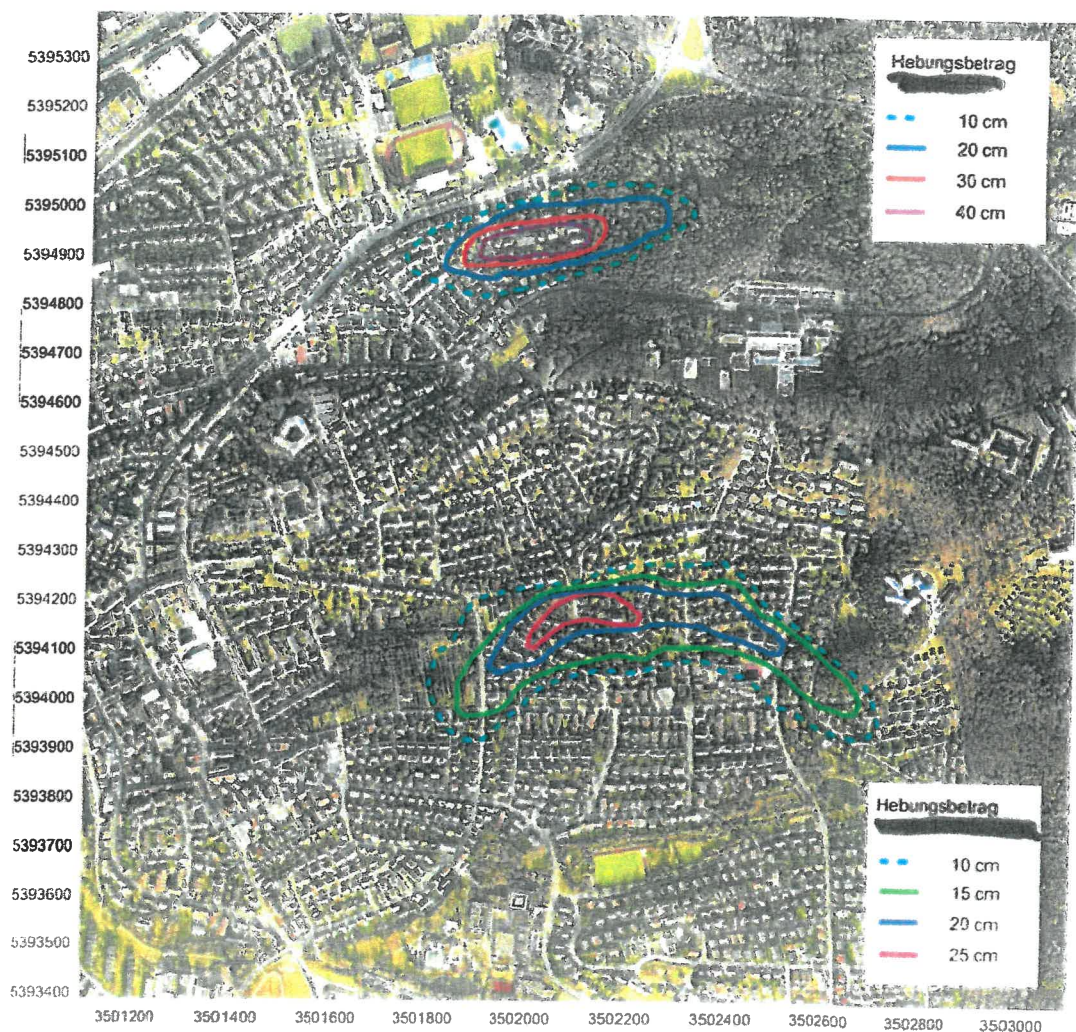


Liegenschaftskatasters dargestellt. Darin sind für zwei erkennbare Hebungsareale  sowie  die an den Straßenmesspunkten bis zur zweiten Folgemessung aufgelaufenen Hebungsbeträge eingetragen. Ferner sind darin die dem LGRB bekannten Bohrvorhaben für Erdwärmesonden dargestellt.

Das LGRB hat im Zuge der Ingenieurgeologischen Landesaufnahme am 09.01.2014 eine Laserscan-Befliegung beauftragt (Fa. BSF, Pasewalk). Durch Differenzbildung der landesweit vorhandenen Airborne-Laserscannmessungen vom 05.02.2002 (LVA Baden-Württemberg) und vom 09.01.2014 war es erstmals möglich, die Ausdehnung und Hebungsbeträge der beiden Hebungsareale um  (Hebungsgebiet "Nord") und um  (Hebungsgebiet "Süd") darzustellen (Abb. 1.1). Dabei wurde auch erkennbar, dass sich das Hebungsgebiet "Süd" in mindestens zwei lokale Hebungszentren differenzieren lässt (s. u.).



Ausdehnung und Hebungsbeträge der Schadenfälle und in Böblingen



Darstellung berechnet durch Differenzenbildung der Messergebnisse der Airborne-Laserscannungen vom 05. Feb. 2002 (LVA Baden-Württemberg) und vom 09. Jan. 2014 (Fa. BSF, Pasewalk im Auftrag des LGRB).

Kartengrundlage: Ortholuftbild vom 09. Jan. 2014 (Fa. BSF, Pasewalk im Auftrag des LGRB)

Lokal sind erhebliche Messungenauigkeiten (insbesondere durch Bewuchs, Waldgebiete, Geländemodellierung) möglich! Flugstreifenfehler der Messung vom 05. Feb. 2002 wurden teilweise korrigiert.

Insbesondere die 10 cm-Isolinie stellt nur eine grobe Abschätzung dar. Das jeweilige Hebungsgebiet reicht über die dargestellten Isolinien hinaus.

Erkennbare Maximalhebung im Bereich 40 - 45 cm
Erkennbare Maximalhebung im Bereich 25 - 30 cm

Im Bereich sind in einer Differenzenbildung der weiteren Laserscannung vom 07. März 2013 (Fa. TopScan) und der Messung vom 09. Jan. 2014 signifikante Hebungen mit Beträgen von bis zu 5-8 cm innerhalb der obigen 20 cm-Isolinie erkennbar.



Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Stadt Böblingen, TK 7320

Hebungsbereich

Hebungsbereich

Darstellung der aus Laserscannung ermittelten Hebungsbeträge [cm] vom 05. Feb. 2002 bis 09. Jan. 2014

Kh. 12. Feb. 2014

Abb. 1.1: Ausdehnung und Hebungsbeträge der Schadensbereiche und in Böblingen

Aus der Differenzbildung der Messergebnisse der Airborne-Laserscannmessungen (Abb. 1.1) ist erkennbar:

- Ein nördliches, elliptisches Hebungsgebiet (bezogen auf einen Hebungs-betrag ab 10 cm: Länge ca. 600 m, Breite ca. 200 m) mit einem Hebungs-zentrum zwischen [REDACTED]. Dieses Hebungsgebiet ist deckungsgleich abgrenzbar bei einer Differenzbildung zwischen den dem LGRB vorliegenden, weiteren Präzisionslaserscannmessungen vom 07.03.2013 und vom 09.01.2014 bei einem in diesem Zeitraum aufgelaufenen Hebungsbeitrag von 5 cm bis 8 cm. Das Hebungsgebiet erstreckt sich im Westen über eine bebaute Wohngebietsfläche und im Osten über Waldgebiet.
- Ein südliches, sichelförmiges Hebungsgebiet (bezogen auf einen Hebungsbeitrag ab 10 cm: Länge ca. 900 m, Breite bis ca. 250 m) mit einem erkennbaren Hebungszenrum im Bereich des [REDACTED]. Es ergeben sich jedoch deutliche Hinweise auf ein weiteres, eigenständiges Zentrum an der Südostecke des Hauptfriedhofes sowie ein nur undeutliches, bereits im Bereich der Signifikanz befindliches Zentrum im Bereich [REDACTED].

Die Signifikanz der Differenzbildung liegt auf Grund der Messgenauigkeit der Laserscannmessung aus dem Jahre 2002 bei 10 cm. Aufgrund der vorgenommenen Differenzbildung betragen die im Januar 2014 erkennbaren Maximalhebungen im Hebungsgebiet "Nord" ca. 40–45 cm und im Hebungsgebiet "Süd" ca. 25–30 cm. Wie die Auswertung der Radarinterferometrie ergab (Kap. 4.4), haben die Hebungen im Hebungsgebiet "Süd" bis zum Februar 2018 um bis zu weitere sieben Zentimeter zugenommen.

1.6 Einrichtung des Arbeitskreises

Als Reaktion auf die sich in zwei Bereichen des Böblinger Stadtgebiets abzeichnenden Hebungen des Untergrunds hat das LRA Böblingen im Februar 2013 zunächst ein Moratorium für weitere Erdwärmesonden im Stadtgebiet erlassen und am 03.06.2014 schließlich eine Karte zur Zulässigkeit von Erdwärmesonden im Landkreis Böblingen mit Eintrag von Restriktionsgebieten (Ampelkarte) herausgegeben.



Zur Koordinierung aller Untersuchungs- und Sanierungsmaßnahmen hat das LRA Böblingen am 15. Januar 2014 einen behördlichen Arbeitskreis einberufen, dem neben Vertretern des Umweltministeriums Baden-Württemberg, des Regierungspräsidiums Stuttgart, des Fachbereichs Vermessung und Geoinformation sowie der Wasserwirtschaft bzw. des Umweltamts des LRA Böblingen auch Vertreter des Regierungspräsidiums Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) angehören.

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 über das LRA Böblingen zu veranlassen. Das LRA Böblingen berichtet der betroffenen Bevölkerung sowie der Presse in regelmäßigen Abständen vom jeweiligen Sachstand der Erkundung.

Ferner hat das LRA Böblingen ein privates Ingenieurbüro (VEES|PARTNER, Leinfelden-Echterdingen) beauftragt, die Ausschreibungen sowie die Bauüberwachung aller anstehenden Erkundungs-, Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen vorzunehmen.

Die bislang gewonnenen Erkenntnisse zum Hebungsgebiet "Süd" werden im vorliegenden Sachstandsbericht durch das LGRB zusammengefasst. Die hierfür verwendeten Unterlagen wurden dem umfangreichen E-Mail-Verkehr (Stand November 2018: ca. 800 E-Mails mit und ohne Anlagen) gerichtet an das LGRB entnommen. Ferner hat das Ingenieurbüro VEES|PARTNER am 22.11.2016 einen geotechnischen Bericht unter dortigem Az. 14 012 zu den ausgeführten Erkundungs- und Sanierungsarbeiten im Quartier II [REDACTED] sowie am 28.09.2018 einen geotechnischen Bericht unter gleichlautendem Az. 14 012 zu den ausgeführten Erkundungs- und Sanierungsmaßnahmen im Quartier IIIa [REDACTED] und im Quartier IIIb [REDACTED] vorgelegt (Anl. 11), welche im vorliegenden Sachstandsbericht berücksichtigt sind. Diese geotechnischen Berichte beinhalten alle Dokumentationen, Tagesberichte und Vermerke, die im Zusammenhang mit der Erkundung und deren Ergebnisse angefallen sind; einige Anlagen des Sachstandsberichts entstammen dieser Zusammenstellung.



2 Arbeitshypothese

Wie die Erfahrungen von Erdwärmesonden-Schadensfällen der Vergangenheit zeigen, waren alle bislang beobachteten Gelände- bzw. Baugrundhebungen im Mittleren Keuper (diese Gesteine stehen auch im Stadtgebiet Böblingen an) auf anthropogene Eingriffe in den Untergrund zurück zu führen, bei denen es zu einer Bewässerung vormals trockener quelfähiger Gebirgsabschnitte und in der Folge zu dem sogenannten "Gipskeuperquellen" (s.u.) gekommen ist.

2.1 Entwicklung der Arbeitshypothese

Zur Planung der im vorliegenden Bericht vorgestellten Untersuchungen hat das LGRB auf Grundlage aller bis dahin verfügbaren Einzelhinweise die nachstehende Arbeitshypothese aufgestellt:

- a) Die Schäden an Gebäuden und Infrastruktur werden durch Quellvorgänge im Untergrund verursacht.

Bemerkung: Spätestens ab August 2013 war auf Grund der feinnivellitischen Messungen eindeutig belegt, dass mindestens zwei Teilbereiche in der Ortslage von Böblingen einer anhaltenden Hebungsbewegung unterworfen sind.

- b) Die beobachteten Hebungen sind auf Quellvorgänge in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper), dem sogenannten "Gipskeuperquellen" zurückzuführen (s. u.). Für die Hebungen verantwortlich sind quelfähige sulfatführende Abschnitte (Anhydrit).

Bemerkung: Im Fall von Böblingen wie auch in den bereits zuvor vom LGRB untersuchten Erdwärmesonden-Schadensfällen Staufen und Rudersberg 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.



- c) Die räumliche Nähe sowie die zeitliche Abhängigkeit der eingetretenen Verformungen legen einen Zusammenhang mit den niedergebrachten Erdwärmesonden-Bohrungen nahe.
- d) Die Quellungsvorgänge in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) werden aktiviert, wenn Wasser in vormals "trockene" quelfähige Abschnitte der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) eindringt. Wichtig ist daher zu klären, auf welche Weise das Wasser zutritt und wie es zu einer flächenhaften Ausbreitung im Bereich der bekannten Hebungen kommt.

Zunächst vorgetragene Vermutungen eines ursächlichen Zusammenhanges mit den weiter im Norden zwischen 1979 (TB I), 1982–1983 (TB II) und 1985–1986 (TB III) abgeteufte Bohrungen der Mineraltherme Böblingen als möglicher Wasserzulieferant für den in der Tiefe anstehenden quelfähigen Gebirgsabschnitt konnten ausgeschlossen werden (vgl. LGRB-Stellungnahme Az. 94-4763//13-10482 vom 20.11.2013 und Kap. 3). Mit den vorliegenden geodätischen Messungen, der Laserscandaten als auch der Radarinterferometrie kann eindeutig belegt werden, dass die zu beobachtenden Hebungen im Hebungsgebiet "Süd" in keinem Zusammenhang mit der Mineraltherme Böblingen stehen (vgl. Abb. 1.1).

Als Vermutung geäußerte "natürliche" Ursachen des Quellhebungsprozesses, z. B. durch Micro-Erdbeben (d. h. unter der Erfassungsgrenze des Landeserdbebendienstes liegend) hervorgerufene Wasserwegsamkeiten, kommen aus Sicht des LGRB aufgrund ihrer geringen und zweifellos schon seit geologischen Zeiträumen ablaufenden Bewegungsbeträge nicht als kausal für die ab Ende 2006/Anfang 2007 im Hebungsgebiet "Süd" in Böblingen eingetretene Wasserwegsamkeit in Frage.

- e) Einen wichtigen Baustein bei der Formulierung der Arbeitshypothese stellen die vom LGRB empfohlenen und seitens des LRA Böblingen beauftragten und vom Büro Voutta, Herrenberg, ausgeführten Ruhetemperatur-Profile in den Erdwärmesonden dar (siehe Kap. 11.2).



2.2 Erkundungsprogramm

Vorliegende Dokumentationen, Ausgangsinformationen

Die geologischen Dokumentationen zu den Bohrungen der EWS-Anlagen im [REDACTED] sowie zu den EWS-Bohrungen im [REDACTED] wurden den Behörden vorgelegt, während zu den Bohrungen im [REDACTED] und [REDACTED] keine geologischen Dokumentationen eingereicht wurden.

Für die acht EWS-Bohrungen im [REDACTED] liegen gleichlautende Schichtenverzeichnisse mit Aufnahmedatum vom 05.03.2009 vor, wobei das aufgenommene Schichtenverzeichnis mindestens drei Monate nach Abschluss der letzten Bohrung erstellt wurde. Die vorliegenden Schichtenverzeichnisse der vier EWS-Anlagen im [REDACTED] unterscheiden sich somit lediglich im Bauvorhaben und der Bohrzeit. Selbst der Grundwasserzutritt sowie die Ruhespiegelmessung (mit Datumsangabe) sind in allen Schichtenverzeichnissen identisch. Zu welcher Bohrung (EWS 1/ EWS 2) dieses Schichtenverzeichnis letztlich aufgenommen wurde, lässt sich anhand der vorliegenden Unterlagen nicht nachvollziehen.

Somit ergeben sich anhand der vorliegenden EWS-Dokumentationen hinsichtlich der durchörterten geologischen Schichtglieder seitens der ausführenden Bohrfirma folgende Ausgangsinformationen:

Tab. 2.1: Geologische Informationen zu den Erdwärmesondenbohrungen in den Quartieren II, III und IV

EWS	Ansatz m NN (Einmessung intermetric GmbH)	Ansatz m NN (Angabe Bohr- firma)	Quartär	Bunte Mergel (km 3)	Schilfsandstein (km 2)	Gipskeuper (km 1)
[REDACTED]	EWS 1: 484,30 EWS 2: 484,40	493,50	0 - 4 m	- 17 m	- 23 m	- 80 m
[REDACTED]	EWS 1: 484,01 EWS 2: 484,09	490,75	0 - 4 m	- 17 m	- 23 m	- 80 m
[REDACTED]	EWS 1: 483,82 EWS 2: 483,53	490,25	0 - 4 m	- 17 m	- 23 m	- 80 m



EWS	Ansatz m NN (Einmessung intermetric GmbH)	Ansatz m NN (Angabe Bohr- firma)	Quartär	Bunte Mergel (km 3)	Schilfsandstein (km 2)	Gipskeuper (km 1)
[REDACTED]	EWS 1: 482,96 EWS 2: 482,72	492,00	0 - 4 m	- 17 m	- 23 m	- 80 m
[REDACTED]	EWS 1: 466,60 EWS 2: 466,99 EWS 3: 467,03	466,5	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
[REDACTED]	EWS 1: 467,99 EWS 2: 467,94	467,95	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
[REDACTED]	EWS 1: 468,06 EWS 2: 468,08	467,95	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
[REDACTED]		473,80	0 - 9 m	- 21 m	- 33 m	- 90 m

Erste Hinweise auf Sulfatführung ergeben sich im [REDACTED] (gleichlau-
tend) ab 23 m unter Bohransatz bis Endteufe, Anhydrit wird für die EWS im [REDACTED]
[REDACTED] im gesamten Bohrprofil nicht beschrieben. Nachdem weder für die EWS
im [REDACTED] noch für die EWS im [REDACTED] Schichtenverzeichnisse
vorliegen, lassen sich auch keine Angaben zur Sulfatführung ableiten. In der EWS im
[REDACTED] setzt die Sulfatführung erstmals ab 33 m unter Bohransatz ein und
setzt sich laut Bohrprofil bis 87 m fort. Für die untersten drei Meter wird Gips/Anhydrit
gemeinsam angegeben.

Zu den Wasserspiegelmessungen/Wasserzutritten in das Bohrloch lauten die Anga-
ben für die Bohrungen im [REDACTED] gleichlautend GWZ(utritt) 36 m/
GWR(uhestand) 58 m. Für die EWS-Bohrungen im [REDACTED] werden nach Boh-
rende gleichlautend 73,9 m und für die EWS-Bohrung im [REDACTED] 70,3 m als
Wasserstände angegeben.

Unklar bleibt, ob sich die teils über mehrere Meter zusammengefassten Beschreibun-
gen des Bohrgutes ("Cuttings") auf Einzelbohrproben (in der wasserrechtlichen Ent-
scheidung war eine Probennahme pro Meter vorgesehen) oder auf entsprechende
Sammelbohrproben beziehen.



Erkundungsmaßnahmen

Zur Überprüfung der Arbeitshypothese wurde im Arbeitskreis entschieden, den Untergrund im Bereich des Hebungsgebietes "Süd" geologisch-hydrogeologisch eingehend zu erkunden. Mit einer Kernbohrung sollten der genaue geologische Schichtenaufbau, die petrographische Ausbildung der einzelnen Schichtglieder, die Sulfatführung, die tektonischen Verhältnisse, der hydrogeologische Stockwerksbau einschließlich der angetroffenen Druckpotenziale sowie die Beschaffenheit der Grundwässer als belastbare Daten- und Bewertungsgrundlage zur Beweissicherung wie auch 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 und zulässig. Die erwartete hydrogeologische Stockwerkstrennung musste im Zuge der Bohrarbeiten durch eine entsprechende Teleskopierung der Bohrung mit Einbau von Sperrverrohrungen aufrechterhalten werden. Die Erkundungsbohrung war so zu konzipieren, dass in ihr gegebenenfalls ein Abwehrbetrieb gefahren werden kann, um einen Druckspiegel bei stark gespanntem Grundwasser in der Erfurt-Formation (Unterkeuper) mindestens bis unter den in Quellung befindlichen quellfähigen Profilabschnitt in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) abzusenken.

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 der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) 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), WITTKÉ et al. (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. Freudenstein-Tunnel, Engelberg-Basistunnel, Stuttgart 21) zusammengestellt, so dass auf diese Ergebnisse im Hinblick auf den bisherigen allgemeinen Kenntnisstand zum Themenkomplex Quellhebungen verwiesen werden kann.

3 Geologische, hydrogeologische und Baugrundverhältnisse

3.1 Vorbemerkung

Im vorliegenden Sachstandsbericht wurde der Symbolschlüssel "Geologie" angewandt, der in bundesweiter Abstimmung mit den beteiligten Staatlichen Geologischen Diensten, der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe sowie des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik erstellt wurde. Es werden die aktuellen stratigraphischen Einheiten (Stand 2015) verwendet und die bislang gebräuchlichen Bezeichnungen als Synonym in Klammer angegeben.

3.2 Geologische Verhältnisse

Der Untergrund von Böblingen besteht im Wesentlichen aus Schichten des Keupers (vgl. geologische Übersichtskarte (Abb. 3.1), hydrogeologische Schnitten (Abb. 3.2, Abb. 3.3, Abb. 3.5)), die von unterschiedlich mächtigen quartären Deckschichten überlagert werden. Die hydrogeologischen Schnitte (Abb. 3.2, Abb. 3.3, Abb. 3.5) wurden anhand des vorhandenen Geologischen Kartenmaterials, der am LGRB vorhandenen Bohrdaten sowie der im Zuge der Erkundung der Hebungsgebiete "Nord" und "Süd" ermittelten geologischen Schichtgrenzen konstruiert. Die Schnitte gliedern sich in einen hydrogeologischen Übersichtsschnitt (Abb. 3.2) sowie in zwei hydrogeologische Detailschnitte von 7 km (Abb. 3.3) bzw. 4 km Betrachtungslänge (Abb. 3.5) mit Eintrag der Hebungsgebiete "Nord" und "Süd", erkundeter Grundwasserpotenziale sowie der als Stützstellen gewählten Bohrungen.

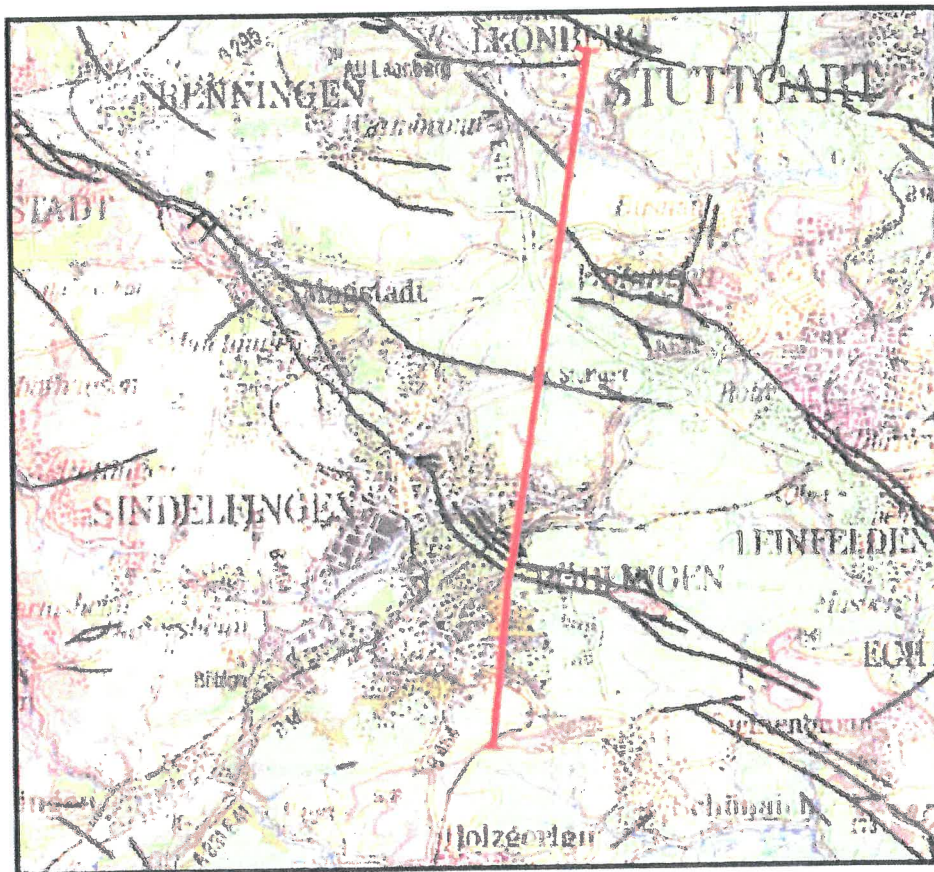


Abb. 3.1: Ausschnitt aus Geologischer Karte GK 25, Bl. 7320 Böblingen, mit Eintrag der Schnittlage abgebildeter Geologischer Längsschnitte

In den tiefsten Lagen von Böblingen, in den Talauen von Murkenbach, Goldbach, Schwippe usw., besteht der Untergrund aus Talablagerungen unterschiedlicher Beschaffenheit. Lehmige Kiese und Sande werden von Auenlehm überlagert. Zwischengeschaltet sind auch organische Ablagerungen (Torf, Sumpftorf). Weitflächig stehen die Schichten der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) an.



Hydrogeologischer Übersichtsschnitt Böblingen

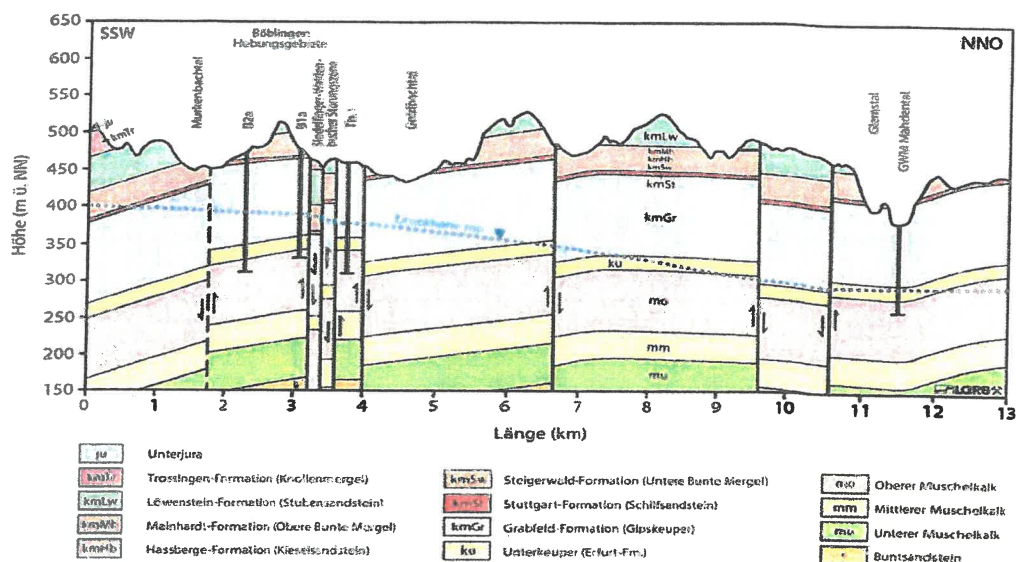


Abb. 3.2: Hydrogeologischer Übersichtsschnitt Böblingen mit Eintrag der bis in den Oberen Muschelkalk reichenden Aufschlussbohrungen sowie der mo-Druckhöhe

Die Schichtenfolge der **Grabfeld-Formation (Gipskeuper)** besteht aus Gips-, Anhydrit-, Tonstein-, Mergelstein- und Dolomitsteinschichten, deren einzelne Untergliederung und Mächtigkeiten aus Tab. 3.1 hervorgeht.

Tab. 3.1: Mächtigkeiten der einzelnen Schichtfolgen der Grabfeld-Formation (Gipskeuper)

Mächtigkeit	Schichtenbezeichnung
4–5 m	Obere Bunte Estherienschichten
16 m	Graue Estherienschichten
15 m	Untere Bunte Estherienschichten
1 m	Engelhofen-Horizont (Acrodus-Corbula-Horizont)
36 m	Mittlerer Gipshorizont
1–1,3 m	Weinsberg-Horizont (Bleiglanzbank)
15 m	Dunkelrote Mergel
7 m	Bochingen Horizont
11–18 m	Grundgipsschichten

Hydrogeologischer Detailschnitt 1 Böblingen

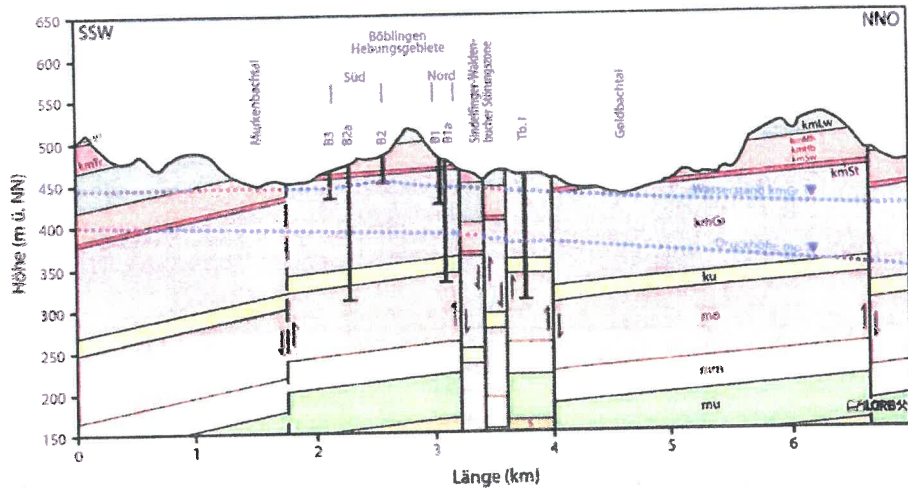


Abb. 3.3: Hydrogeologischer Detailschnitt (7 km Länge) mit Eintrag der als Stützstellen gewählten Bohrungen, der mo-Druckhöhe sowie des Grundwasserstandes in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper)

Die Grundgipsschichten als unterstes Schichtglied der Grabfeld-Formation sind in den Hebungsbereichen aufgrund der meist mächtigen Überlagerung durch jüngere Schichten noch in ihrer ursprünglichen Ausbildung mit mächtigen Anhydrit- und Gipsbänken vertreten. Aufgrund der relativ hohen Lage der örtlichen Vorfluter (Schwippe bei der A81 Anschlussstelle Böblingen/Sindelfingen ca. 425 m NN, Oberer See beim Kongresszentrum 442 m NN, Goldbach nördlich des Thermalbads 434,5 m NN) strömt das oberflächennahe Grundwasser im Wesentlichen in den höheren Schichten der Grabfeld-Formation dem Druckgefälle folgend den Vorflutern zu. In den durchströmten Bereichen kommt es zu einer Auflösung der Sulfatminerale und zur Ausbildung des Gipsspiegels im Sinne einer unregelmäßigen Fläche, unterhalb der die Schichten gipsführend sind, während die Schichten darüber ausgelaugt sind. Die Lösung von Sulfatmineralen durch strömendes Grundwasser findet auch heute noch statt. Über entstandenen Hohlräumen können die überdeckenden Schichten nachstürzen und wannen- oder trichterförmige Vertiefungen bilden. Die Nachbrüche



können je nach Überdeckungsmächtigkeit mehrere Zehner Meter bis zur Geländeoberfläche reichen.

Die Dolinenfüllungen bestehen aus den nachgestürzten Deckschichten und eingeschwemmtem feinem und gröberem Material aus höheren Hangbereichen.

Über der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) folgt die **Stuttgart-Formation (Schilfsandstein)**. Es handelt sich dabei um eine Folge von feinsandigen Tonsteinen (Normalfazies) bis mittelkörnigen Sandsteinen (Flutfazies). Die Schilfsandstein-Ablagerungen sind als Rinnensediment bereichsweise in die Schichten des Gipskeupers eingetieft. Ihre Mächtigkeit variiert beträchtlich.

Über der Stuttgart-Formation (Schilfsandstein) folgt hangaufwärts die **Steigerwald-, Hassberge- und Mainhardt-Formation (Bunte Mergel-Formation)**. Diese Schichtenfolge besteht aus zum Teil dolomitischen Tonsteinen mit Gipsknollen und -linsen, karbonatischen Lagen und aus Schichten von oft kieselig gebundenem Sandstein (Kieselsandstein, Hassberge-Formation) von insgesamt etwa 40 m Mächtigkeit.

Über Steigerwald-, Hassberge- und Mainhardt-Formation folgt die **Löwenstein-Formation (Stubensandstein)**, eine Folge von meist mittel- bis grobkörnigen, zum Teil feldspatreichen Sandsteinen mit Tonsteinlagen. Im Osten und Süden von Böblingen bildet diese Schichtfolge die oberen Hangabschnitte und die Kuppen, die bis auf Höhen von 489 m NN (Wasserberg) und mehr als 500 m NN wenig südöstlich der Siemensstraße/Altinger Straße (z. B. Klinikum Sindelfingen-Böblingen) aufragen.

Die darüber folgende **Trossingen-Formation (Knollenmergel)** schließt den Mittelkeuper ab und besteht aus einer Folge von 15–22 m mächtigen, braunroten Tonsteinen mit Kalkknollen. Diese Schichtenfolge ist in Böblingen nur noch in tektonischer Tieflage sowie im Süden bis Südosten in den höheren Hangabschnitten vorhanden.

Die Ton- und Sandsteine der **Exter-Formation (Oberkeuper, Rhät)** zwischen der Trossingen-Formation und dem Schwarzen Jura erreichen nur wenige Meter Mächtigkeit und sind nur noch als kleine Vorkommen (Rauher Kapf) vorhanden bzw. bereits vollständig abgetragen.

Die Schichten des **Schwarzen Jura (Unterjura)** sind in der Umgebung von Böblingen nur noch in tektonischer Tieflage sowie im Süden bis Südosten in den höchsten

Hangabschnitten und den stark zergliederten Hochflächen vorhanden. Die Restmächtigkeit dieser Schichtenfolge beträgt bis ca. 20 m und besteht aus der Pylonotenton- und der Angulatensandstein-Formation. Es handelt sich hierbei um eine Abfolge von Tonsteinen mit Sandstein- und Kalksteinbänken.

Nicht zutage anstehend sind in Böblingen die unter der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) folgenden Schichten. Es handelt sich dabei um die **Erfurt-Formation (Unterkeuper, Lettenkeuper)**. Die Erfurt-Formation (Unterkeuper) besteht aus einer Folge von Dolomit-, Ton-, Mergel- und Sandsteinen. Der obere Abschnitt ist häufig gipsführend.

Unter der Erfurt-Formation (Unterkeuper) folgt der **Obere Muschelkalk**. Es handelt sich dabei um eine Folge von Kalksteinen mit feinen bis mächtigeren Ton- und Mergelsteinlagen. Im oberen Abschnitt des Oberen Muschelkalks befindet sich die **Rottweil-Formation (Trigonodusdolomit)**, die häufig stark verwittert und verkarstet ist. Größere, mehrere Meter messende Hohlräume in dieser Formation sind bei Bohrungen relativ häufig angetroffen worden. Im unteren Abschnitt ist eine Folge von Tonmergelsteinschichten (Haßmersheim-Schichten) eingeschaltet.

Unter dem Oberen Muschelkalk folgt der **Mittlere Muschelkalk**, der aus einer Folge von Dolomit-, Ton- und Mergelsteinen (Obere und Untere Dolomit-Formation), sowie Anhydrit- und Steinsalzschieben (Salinar-Formation) besteht.

Die beschriebenen Schichten weisen in der Umgebung von Böblingen ungefähr folgende Mächtigkeiten auf (Tab. 3.2):

Tab. 3.2: Schichten und Mächtigkeiten in der Umgebung von Böblingen

Schichtenbezeichnung	Mächtigkeit
Talablagerungen der Schwippe	bis ca. 13 m
Hangschutt	1–5 m
Dolinenfüllungen	bis über 50 m
Unterjura	ca. 20 m (Restmächtigkeit)
Exter-Formation (Oberkeuper, Rhät)	-
Trossingen-Formation (Knollenmergel)	15–22 m
Löwenstein-Formation (Stubensandstein)	90–100 m

Schichtenbezeichnung	Mächtigkeit
Steigerwald-, Hassberge- und Mainhardt-Formation (Bunte Mergel-Formation)	60–65 m
Stuttgart-Formation (Schilfsandstein)	1–30 m
Grabfeld-Formation (Gipskeuper)	75–100 m
Erfurt-Formation (Unterkeuper)	19 m
Oberer Muschelkalk	78 m
Mittlerer Muschelkalk	66 m

In den beiden nachstehenden Abbildungen (Abb. 3.4) sind die lithostratigraphischen Einheiten des Keupers und des Muschelkalks für Baden-Württemberg dargestellt. Für den untersuchten aktuellen Schadensfall sind darin die unterhalb der quartären Deckschichten relevanten Einheiten mit rotem Rahmen farblich markiert.

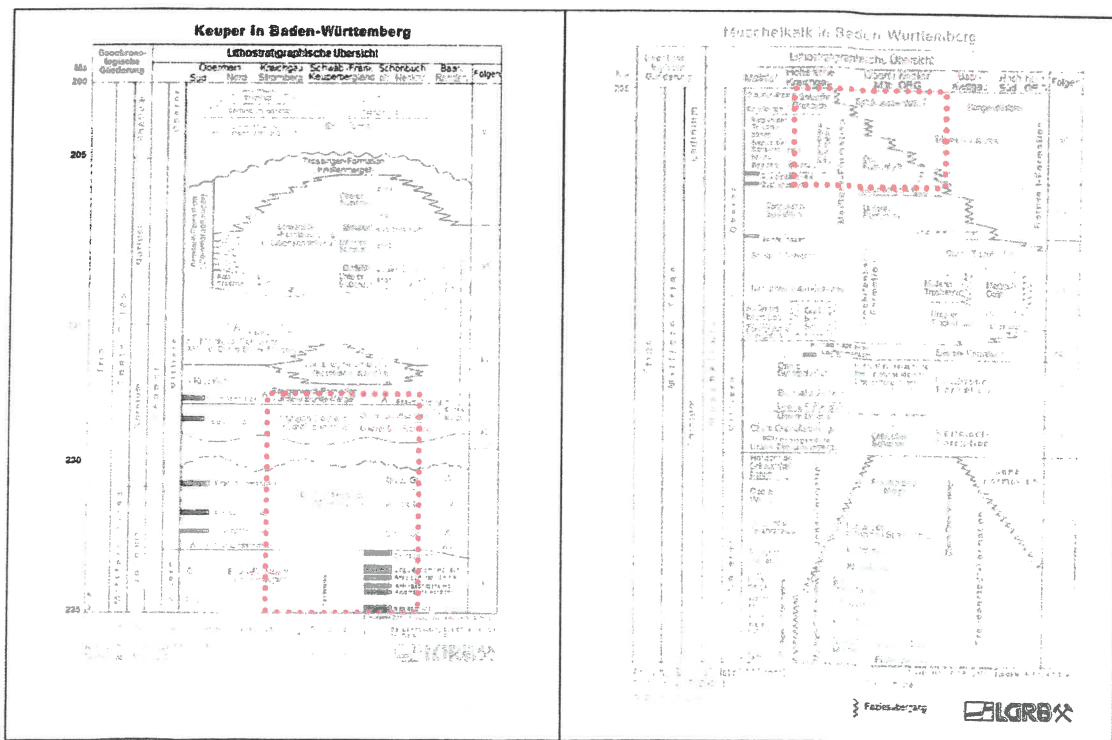


Abb. 3.4: Lithostratigraphische Einheiten des Keupers und des Muschelkalks für Baden-Württemberg



3.3 Hydrogeologische Verhältnisse

3.3.1 Überblick

Neben den Talablagerungen sind auch die Festgesteine im Untergrund von Böblingen zum großen Teil grundwasserführend.

Die **Löwenstein-Formation (Stubensandstein)** ist aufgrund der bereichsweise ausgeprägten Klüftung und der schichtigen Gliederung als schichtig gegliederter Kluftgrundwasserleiter zu bezeichnen.

In der darunter folgenden Gesteinsfolge der **Steigerwald- (Untere Bunte Mergel), Hassberge- (Kieselsandstein) und Mainhardt-Formation (Obere Bunte Mergel)**, früher insgesamt als **Bunte Mergel-Formation** bezeichnet, wirkt hauptsächlich der Kieselsandstein als Kluftgrundwasserleiter. Die über- und unterlagernden Schichtpakete wirken dagegen meist grundwasserstauend.

Die Schichtenfolge der **Grabfeld-Formation (Gipskeuper)** führt leicht wasserlösliche Sulfatgesteinsschichten und ist daher als Kluft- und Karstgrundwasserleiter ausgebildet. Die Grundgipsschichten sind in Böblingen von einer mächtigen Folge jüngerer Schichten überdeckt und liegen daher zum großen Teil in ihrer ursprünglichen Ausbildung vor. Dementsprechend ist hier eine Wasserführung nicht vorhanden. Die Druckhöhe des Grundwassers im oberen Abschnitt der Grabfeld-Formation ist in der Regel deutlich höher als diejenige im tieferen Grundwasserstockwerk des Oberen Muschelkalks.

Die **Erfurt-Formation (Unterkeuper)** stellt mit seinen Mergel-, Dolomit- und Sandsteinbänken einen Kluftgrundwasserleiter meist geringer Ergiebigkeit dar. In der Regel bildet der Unterkeuper eine hydraulisch wirksame Trennschicht zwischen den Grundwasserleitern Grabfeld-Formation und Oberer Muschelkalk.

Der **Obere Muschelkalk** bildet einen Kluft- und Karstgrundwasserleiter. Vor allem der obere Abschnitt, die Rottweil-Formation (Trigonodusdolomit), hat aufgrund der häufig starken Verkarstung dann auch eine sehr hohe Durchlässigkeit. Die Hohlraumbildung im Trigonodusdolomit führt bereichsweise auch zum Nachbruch der überlagernden Schichten des Unterkeupers und des Gipskeupers (Dolinen). Die Verbruchzonen füllen sich mit der Zeit wieder durch eingeschwemmte Massen unterschiedlicher

Korngröße und Zusammensetzung, so dass meist auch wieder eine Abdichtung erfolgt.

Der Mittlere Muschelkalk bildet in seinem oberen Abschnitt (Diemel-Formation, Obere Dolomite) einen Kluft- und Karstgrundwasserleiter, der mit dem Grundwasser im Oberen Muschelkalk hydraulisch zusammenhängen kann. Die darunter folgende Heilbronn-Formation (Salinar-Formation) wirkt grundwasserstauend und bildet die Basis des Grundwasserleiters.

3.3.2 Tektonische Verhältnisse

Böblingen liegt am südwestlichen Rand des Fildergrabens. Die Hebungsgebiete "Nord" und "Süd" liegen auf der Hochscholle oder der Grabenschulter des Fildergrabens (vgl. Abb. 3.2, Abb. 3.3, Abb. 3.5).

Hydrogeologischer Detailschnitt 2 Böblingen

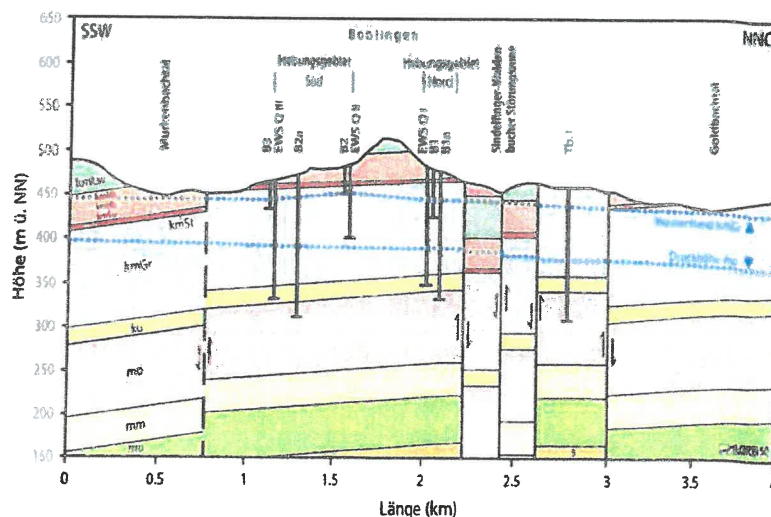


Abb. 3.5: Hydrogeologischer Detailschnitt (4 km Länge) mit Eintrag der als Stützstellen gewählten Bohrungen, der mo-Druckhöhe sowie des Grundwasserstandes in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper)



Östlich schließt sich die Mittelscholle zwischen der Sindelfingen-Waldenbucher Störungszone und der Vaihinger Verwerfung an. Das Verwerfungssystem der Sindelfingen-Waldenbucher Störungszone ist gekennzeichnet durch einen relativ schmalen Grabenbruch mit über 100 m Schichtenversatz (BRUNNER, H. (1986): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25000, Blatt 7320 Böblingen, S. 50, Beilage 3).

Noch weiter östlich, jenseits der Vaihinger Verwerfung, liegt die Tiefscholle des Fildergrabens.

Die Erkundungsbohrung B2a sowie die weiteren Bohrungen (B2, B2b, B3) im Hebungsgebiet "Süd" liegen auf der Hochscholle. Die Tb I der Böblinger Terme befindet sich auf der Mittelscholle. Diese ist durch die Sindelfingen-Waldenbucher Störungszone von der Hochscholle abgetrennt. Die Muschelkalk-Oberfläche bei der Bohrung B1a befindet sich auf 342,55 m NN, bei der Tb I auf 337,65 m NN. Die Höhendifferenz beträgt somit nur 4,90 m. Aufgrund der großen Sprunghöhe der Verwerfungen der Sindelfingen-Waldenbucher Störungszone sind viele Schichten (z. B. der Obere Muschelkalk) hydraulisch voneinander abgetrennt. Einen Überblick über die tektonischen Verhältnisse sowie die Druckhöhe des gespannten Grundwassers im Oberen Muschelkalk gibt der hydrogeologische Übersichtsschnitt (Abb. 3.2), Einzelheiten im näheren Umfeld des Hebungsgebietes "Süd" sind im Detailschnitt (Abb. 3.5) dargestellt.

3.3.3 Grundwasserstände

Im aktuellen Hebungsgebiet "Süd" (Hochscholle) wurden im Zuge der Erkundungsmaßnahmen in verschiedenen Grundwasserstockwerken die Grundwasserstände/Druckhöhen gemessen. Aus den Messungen ist ersichtlich, dass die hydraulischen Druckhöhen von oben nach unten abnehmen. Im Schilfsandstein-Stockwerk steht die Grundwasseroberfläche bei ca. 466 m NN, im Gipskeuper-Stockwerk bei ca. 447 m NN und im Muschelkalk-Stockwerk bei ca. 390 m NN.

Die einzelnen Grundwasserstockwerke sind durch zwischengeschaltete abdichtende Schichten hydraulisch entkoppelt.



Im Bereich der Bohrung B2a ist das Grundwasser im Muschelkalk-Grundwasserstockwerk gespannt. Der Druckspiegel liegt ca. 60 m über der Grenze Oberer Muschelkalk/Unterkeuper. Es könnte daher, sofern Wasserwegsamkeiten in die überlagernden Schichten bestehen, bis in die anhydritführenden Schichten des Gipskeupers aufsteigen. Das höhere Gipskeuper-Grundwasserstockwerk oberhalb des Gips- und Anhydritspiegels weist ein deutlich höheres hydraulisches Potential auf; es ist hydraulisch vom Oberen Muschelkalk-Grundwasserstockwerk abgetrennt. Andernfalls könnte das Wasser aus dem Gipskeuper-Stockwerk in den Oberen Muschelkalk abströmen.

Die vorhandene Differenzierung der Druckhöhen, die im hydrogeologischen Schnitt (Abb. 3.3 und Abb. 3.5) dargestellt ist, weist darauf hin, dass zwischen den Stockwerken keine hydraulische Verbindung besteht, da sich die Potentiale sonst auf das tiefste oder jeweils tiefere Potential einstellen würden.

Die Tiefbrunnen der Böblinger Therme GmbH bestehen bereits seit mehreren Jahrzehnten. Hydraulisch erschlossen sind die Grundwasserstockwerke Oberer Muschelkalk, Buntsandstein und das Grundgebirge (Granit). Die Grundwasserverhältnisse beim Thermalbad Böblingen werden von KOBLER, H.-U. in: BRUNNER, H. (1986): Erläuterungen zu Blatt 7320 Böblingen, Geologische Karte 1:25000 von Baden-Württemberg, Seite 64, beschrieben.

Aus den Grundwasserstandsmessungen zum Hebungsgebiet "Nord" ist ersichtlich, dass auch hier die hydraulischen Druckhöhen von oben nach unten abnehmen. Während die Stockwerke Buntsandstein (Tiefbrunnen III) und Grundgebirge (Tiefbrunnen II) - nachgewiesen durch einen Pumpversuch (22.07.–29.07.1986) - in hydraulischer Verbindung stehen, ist das Grundwasser im Oberen Muschelkalk durch die zwischengeschalteten abdichtenden Schichten hydraulisch entkoppelt.

Die Druckhöhe des gespannten Grundwassers im Oberen Muschelkalk schwankt im Tiefbrunnen I im 10jährigen Beobachtungszeitraum (1979–1989) lediglich von ca. 379–381 m NN und ist somit 9 m - 11 m tiefer als in der Bohrung B2a. Diese deutliche Druckdifferenz ist auf die hydraulische Abtrennung durch die Sindelfingen-Waldenbucher Störungszone zurückzuführen.



3.3.4 Durchlässigkeiten

Im Hebungsgebiet "Süd" erfolgten Untersuchungen zu Durchlässigkeiten allein in verschiedenen Ausbaustadien der Erkundungsbohrung B2a. Die verschiedenen hydraulischen Tests und deren Ergebnisse sind in Kapitel 6.1.3 (Tab. 6.7 und Tab. 6.8) zusammengefasst. Zur Versuchsdurchführung und deren versuchsspezifischen Randbedingungen wird auf Anlage 5 verwiesen.

3.4 Baugrundverhältnisse

Die Baugrundeigenschaften im Untersuchungsbereich Böblingen werden oberflächennah von tonigen und tonig-schluffigen Verwitterungsbildungen des Keupers sowie deren Umlagerungsprodukten (Fließerden) bestimmt. Tonige, bzw. tonig-schluffige, skelettfreie Böden im Untersuchungsgebiet neigen je nach Witterung zu erheblichen Volumenänderungen durch Schrumpfen bei Austrocknung oder durch Quellen bei Wiederbefeuchtung. Diese meist ungleichen Bodenverformungen können bei flach gegründeten Bauteilen zu Bauwerksschäden führen und je nach vorhandener Hangneigung auch Kriechvorgänge in den bindigen Deckschichten begünstigen. Letzteres ist instruktiv in Hanglage an talseitigen Banketten vorhandener asphaltierter Wege oder Randsteinen beobachtbar.

Gebäudeschäden durch Schrumpfen können besonders an nur flach auf Einzel- oder Streifenfundamenten gegründeten Gebäuden oder Bauteilen auftreten und sind besonders dort zu erwarten, wo sich mehrere Einflussfaktoren summieren. Als derartige Einflussfaktoren gelten z. B. Niederschlagsarmut, Sonneneinstrahlung, Wärmeeintrag und/oder die Absenkung der Grundwasseroberfläche. In den tonig-schluffigen Böden des Schichtstufenlandes können oberflächennah Schrumpfbeträge bis 20–30 Vol. % auftreten. Untergeordnet können im Einflussbereich der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) auch die in größerer Tiefe stattfindenden Prozesse einer natürlichen Gipsauslaugung (Gipskarst) die Baugrundeigenschaften beeinflussen und lokale Setzungen hervorrufen.

Ferner stellen die in Talkiesen teilweise zwischengeschalteten organischen Ablagerungen (Torf, Sumpftorf), sonstige oberflächennah anstehende organische Ablagerungen wie auch die Auenlehme ungünstige, d. h. sehr setzungsempfindliche und kaum zur Aufnahme höherer Lasten geeignete Schichten dar.



4 Geländehebungen

Zur Feststellung von Geländeänderungen wurden im Hebungsgebiet "Süd" - wie nachfolgend beschrieben - folgende Methoden zum Einsatz gebracht:

- Airborne-Laser-Scanning (Differenzmethode)
- Geodätische Messungen (Feinnivellements am Messpunktnetz)
- Geodätische Messungen von Kanaldeckeln/-sohlen und Vergleich mit der Kanaldatenbank (Gesamthebungsbeträge)
- Radarinterferometrie

4.1 Airborne-Laser-Scanning (Differenzmethode)

Nach den Meldungen von Baugrunds Schäden sowie dem ersten geodätischen Nachweis von aktuellen Geländehebungen an einzelnen Messpunkten hat das LGRB im Rahmen der ingenieurgeologischen Landesaufnahme nach Methoden einer schnellen, flächigen Abgrenzung des Hebungsgebietes gesucht. Da in der Arbeitshypothese davon ausgegangen wurde, dass die Hebungen mit der Errichtung von Erdwärmesondenbohrungen in Zusammenhang stehen und diese in den Hebungsgebieten im Zeitraum 2006–2008 errichtet wurden, sollte die Methode eine Aussage über Geländeänderungen ab diesem Zeitraum zulassen. Da flächenhafte, geodätisch erfasste, präzise Höhenmessungen nicht vorliegen, entstand die Überlegung, auf fernerkundliche Messdaten des Airborne-Laser-Scanning zurückzugreifen.

Das damalige Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (LVA, heute: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung LGL) ließ in den Jahren 2000–2005 landesweit Airborne-Laserscanbefliegungen mit einer Auflösung von im Mittel etwa 0,8 Pkt./m² durchführen. Hieraus erstellte das LVA in den Folgejahren das hochauflösende Digitale Geländemodell.

Durch Filterung und manuelle Nachbearbeitung weist das Digitale Geländemodell im Einzelfall für eine Präzisionsauswertung nachteilige Abweichungen von den Messdaten auf. Daneben liegen aber landesweit auch die sogenannten Transformierten Rohdaten vor. Hierbei handelt es sich um lediglich automatisch (durch einen landesweit angewandten Algorithmus) als Gelände- bzw. Gebäude/Bewuchstreffer (first-/last-Pulse) klassifizierte Messpunkte, die ansonsten unbearbeitet sind. Auf Grund der ausschließlich automatischen Klassifizierung treten beispielsweise an Geländekanten und Hausecken Fehlzuordnungen auf. Insgesamt stellt der Geländedatensatz der Transformierten Rohdaten allerdings ein hochwertiges Abbild der Geländeoberfläche dar.



Im Bereich des Hebungsgebietes "Süd" fand die entsprechende Befliegung und Messung am 05. Februar 2002 und somit deutlich vor dem vermuteten Beginn der Hebungen statt.

Als für die Erkennung von Geländeänderungen notwendige aktuelle Airborne-Laser-Scanbefliegungsdaten konnte eine Messung der Fa. TopScan GmbH, Rheine, vom 07.03.2013 mit einer Auflösung von etwa 4 Pkt./m², ebenfalls als Transformierte Rohdaten (last Pulse), erworben werden. Diese ursprünglich im Auftrag für eine benachbarte Gemeinde erstellte Messung umfasst auch die Hebungsgebiete "Nord" und "Süd" in Böblingen.

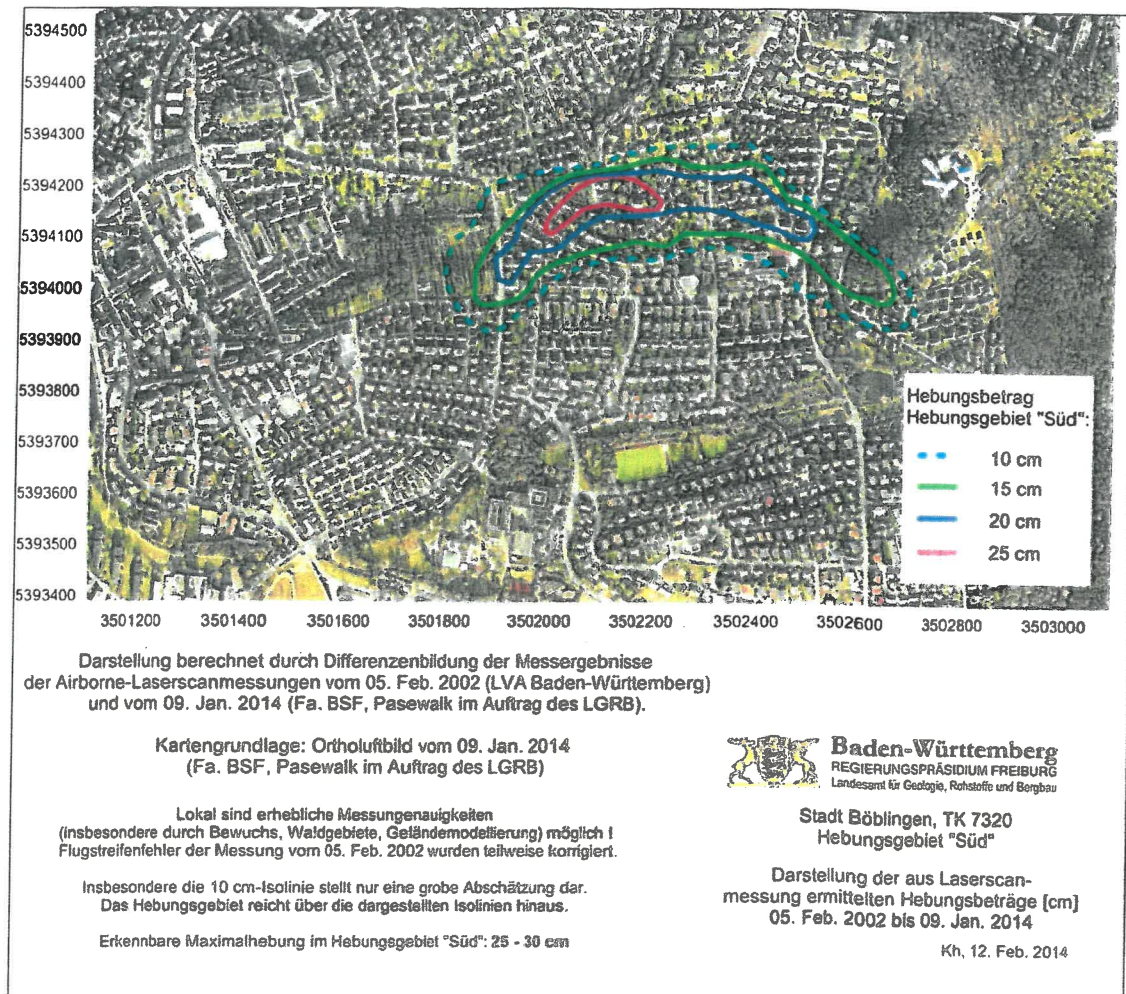


Abb. 4.1: Darstellung der absoluten Geländehebungsbeträge auf Grundlage eines Vergleichs von zwei Airborne-Laser-Scanmessungen 05. Februar 2002 – 09. Januar 2014 für das Hebungsgebiet "Süd"

Zur Erfassung des Hebungsgebietes "Süd" sowie zur weiteren Aktualisierung der Geländeänderungen im Hebungsgebiet "Nord" hat das LGRB am 14.10.2013 eigene Airborne-Laser-Scanmessungen für das gesamte Stadtgebiet von Böblingen ausgeschrieben. Die mit der Messung beauftragte Fa. BSF Swissphoto GmbH, Pasewalk, hat die Befliegung am 09. Januar 2014 vorgenommen und dem LGRB am 12.02.2014 als Datensatz mit einer Auflösung von etwa 4 Pkt./m² zur Verfügung gestellt. Hieraus konnte wiederum eine Differenzberechnung gegenüber den Messdaten vom 05. Februar 2002 errechnet werden. Nach Prüfung der im LGRB errechneten Hebungsfigur durch das LGL, Karlsruhe, wurden die Ergebnisse am 14.02.2015 dem LRA Böblingen übermittelt. Abb. 4.1 umfasst den Ausschnitt des südlichen Hebungsgebietes.



Die mittels Differenzbildung von zwei Airborne-Laser-Scanmessdaten erreichbare Aussagegenauigkeit liegt nach bisheriger Erfahrung bei unter 10 cm. So weisen zwar die Messungen aus den landesweiten Befliegungen der Jahre 2000–2005 bei einer generellen absoluten Messgenauigkeit von etwa 10–20 cm zusätzlich "Flugstreifenfehler" (Höhensprünge von wenigen Zentimetern zwischen den einzelnen Flugbahnen) auf, jedoch können diese durch Eichung der absoluten Höhen in von nicht durch Geländehöhenveränderungen betroffenen Gelände und im Vergleich zu den aktuellen Messergebnissen weitestgehend eliminiert werden. Die relative Genauigkeit - innerhalb eines Flugstreifens - liegt erfahrungsgemäß bereits bei diesen Daten im Bereich der Messwertangabe (1 cm).

In beiden neuen Messungen (2013 und 2014) sind dagegen keine erkennbaren "Flugstreifenfehler" vorhanden. Sie erreichen eine absolute Höhengenaugkeit von besser als ± 8 cm. Dies konnte auch durch unabhängig vom LGL geodätische eingemessene Kontrollflächen bestätigt werden. Die relative Genauigkeit innerhalb der Messgebiete liegt erfahrungsgemäß zuverlässig im Bereich der Messwertangabe (1 cm).

Die Vorteile der flächigen Auswertung von Höhendifferenzen mittels Airborne-Laser-Scandaten liegen einerseits in der Unabhängigkeit von Reflektoren im Gelände (vgl. Abhängigkeit von Gebäuden oder Straßenflächen bei der Radarinterferometrie, Kap. 4.4) und andererseits in der fast ausschließlichen Erfassung der vertikalen Komponente (sofern die lateralen Bewegungen im Bereich von nicht mehr als wenigen Dezimetern liegen, vgl. "schräge" Messung in der Radarinterferometrie). Nachteilig sind hingegen die relativ große Messungenauigkeit sowie der hohe Aufwand zur Durchführung einer Befliegung, die noch dazu ausschließlich bei laubarmen und schneefreien Bedingungen (Dezember–März) erfolgen können. Die Methode ist daher zur engmaschigen Überwachung eines Hebungsgebietes bzw. zur Bewertung von Veränderungen in den Hebungsgeschwindigkeiten nicht geeignet.

4.2 Geodätischen Messungen (Feinnivellements am Messpunktnetz)

Zur Feststellung punktueller Geländehöhenänderungen hat das LRA Böblingen am 09.04.2013 Präzisionsmessungen bei der intermetric GmbH, Stuttgart, beauftragt. Das Messverfahren der geodätischen Feinnivellierung weist bei Ausführung als Doppelnivellement nach Auskunft der intermetric GmbH einen Fehler von weniger als 1 mm auf. Erfahrungsgemäß, auch unter Berücksichtigung der Gestaltung der Messpunkte in Böblingen (Verkehrsraum, nur in Einzelfällen Gebäudemesspunkte), können auch Fehler von 2 mm oder mehr nicht ausgeschlossen werden. Die Signifikanz von Messergebnissen ergibt sich daher aus der Dauer des Messintervalls.

Die Nullmessung im Hebungsgebiet "Süd" erfolgte am 29. April 2013 anfänglich an zehn Messpunkten (zehn Höhenmesspunkte, davon vier zusätzlich mit Lagemesspunkten) im Bereich des [REDACTED]. Als Referenzpunkte wurden hierbei insgesamt vier Messpunkte [REDACTED] sowie nahe der Kreuzung [REDACTED] verwendet, welche sich nördlich des Hebungsgebietes befinden. Der Vergleich dieser Nullmessung zur ersten Folgemessung am 20.06.2013 ergab Lageveränderungen von bis zu 3 mm und Hebungen von 5 mm in 52 Tagen. Das Hebungszentrum (Messpunkt mit der größten Hebungsgeschwindigkeit) befand sich am Kopfende des Wendehammers [REDACTED]. Bei einer weiteren

Folgemessung am 14.08.2013 wurden im Bereich des Hebungsentrums Hebungen von bis zu 12 mm gegenüber der Nullmessung (Messintervall: 107 Tage) festgestellt. Daraus ergibt sich eine mittlere Hebungsgeschwindigkeit im Hebungszentrum von etwa 3,4 mm/Monat.

Die Lagemessungen wurden am 14.08.2013 auf Grund der systembedingten Messungenauigkeit (> 2 mm) eingestellt und die Firma intermetric GmbH beschränkte sich seitdem auf Höhennivellments. Aufgrund des Verdachts einer deutlich größeren Ausdehnung des Hebungsgebiets wurde ab dem 14.08.2013 der Referenzpunkt verschoben, das Messgebiet mehrmals vergrößert und bis einschließlich den 25.08.2014 auf insgesamt 50 Messpunkte erweitert. Dem LGRB liegen letztmalig Messwerte vom 25.08.2015 vor. In Abb. 4.2 ist die Lage der Messpunkte verzeichnet.

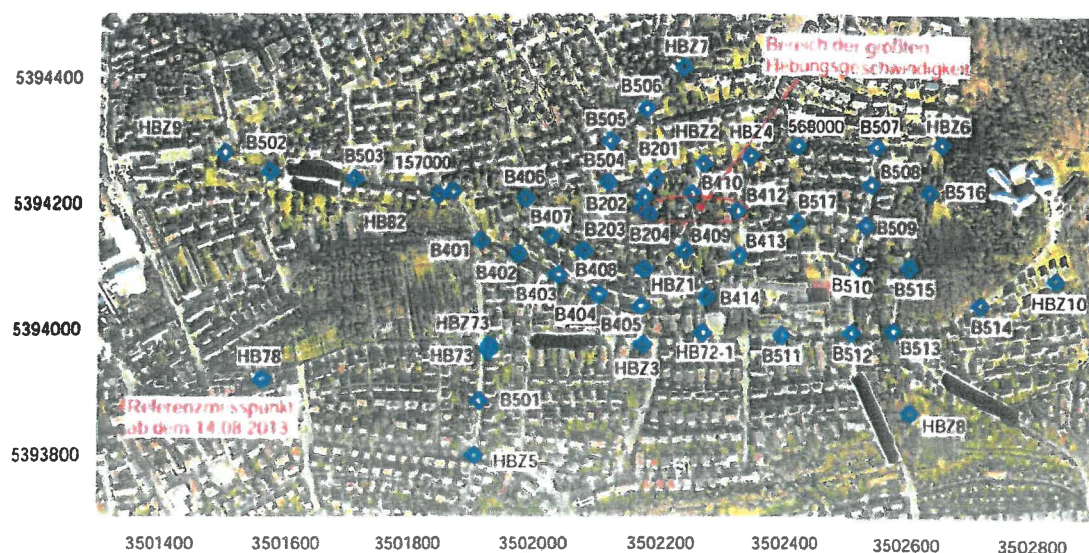


Abb. 4.2: Darstellung der geodätischen Messpunkte für die Messungen zwischen 29.04.2013 und 25.08.2015 (Feinnivellment)

Anhand der im Abstand von jeweils mehreren Monaten durchgeführten geodätischen Höhenmessungen hat das LGRB die Hebungsgeschwindigkeit in einem Geographischen Informationssystem ausgewertet. Die Verlängerung des Messintervalls auf mehrere Monate ist den systembedingten Messungenauigkeiten geschuldet, um zuverlässigere Aussagen zu erhalten. Aufgrund der bereichsweise relativ geringen Messpunktdichte sowie den unterschiedlichen Messpunktintervallen der erhobenen Messwerte wurde zur Vermeidung von übermäßigen Interpolationseffekten auf eine



flächenhafte Auswertung verzichtet. Vielmehr werden im Folgenden für die Messintervalle ab dem 22.10.2013 die Beträge der Hebungsgeschwindigkeit an den einzelnen Messpunkten in der Einheit mm/Monat wiedergegeben. Aufgrund der im Vergleich zum Hebungsgebiet "Nord" insgesamt geringeren monatlichen Hebungsgeschwindigkeiten im Hebungsgebiet "Süd" machen sich im Hebungsgebiet "Süd" systembedingte Messungenauigkeiten deutlicher bemerkbar.

In Abb. 4.3 werden die Hebungsgeschwindigkeiten in der Messperiode 22.10.2013–25.02.2014 dargestellt. Das signifikante Hebungsgebiet weist einen sichelförmigen Umriss auf. Im Südwesten wird das Hebungsgebiet von [REDACTED] und [REDACTED] begrenzt. In nordöstlicher Richtung erstreckt sich das Hebungsgebiet über das [REDACTED] und umfasst nahezu vollständig [REDACTED]. Im Norden begrenzt ungefähr [REDACTED] das Hebungsgebiet. Die östlichsten Hebungsbewegungen wurden nahe der [REDACTED] sowie nahe der [REDACTED] gemessen.

Das Hebungszentrum befindet sich am Messpunkt B 402 nahe der [REDACTED] mit einer Hebungsgeschwindigkeit von 3 mm/Monat. Die Messpunkte nahe der [REDACTED] zeigen mit -0,6 mm/Monat, bzw. mit -0,8 mm/Monat scheinbar starke Setzungsbewegungen an. Dies ist wahrscheinlich auf Messungenauigkeiten in der vorangegangenen Messreihe zurückzuführen. Im vorangegangenen Messzeitraum wurden für diese beiden Messpunkte Hebungsbewegungen mit ähnlich großen Beträgen registriert.

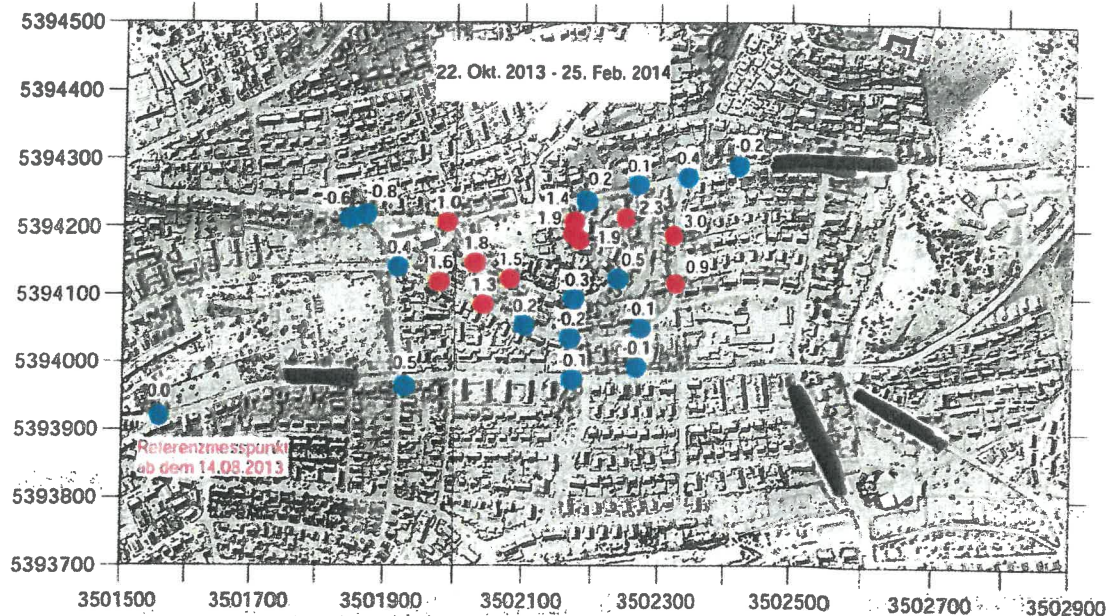


Abb. 4.3: Hebungsgeschwindigkeiten [mm/Monat] in der Messperiode 22.10.2013 – 25.02.2014
(rote Punkte: Hebung; blaue Punkte: Stabilität)

In Abb. 4.4 sind die Hebungsgeschwindigkeiten in der Messperiode 25.02.2014 - 20.10.2014 wiedergegeben. Von kleinen Unterschieden ~~abgesehen~~, die vermutlich auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sind, wurden im Vergleich zum vorangegangenen Messzeitraum analoge Hebungsraten gemessen.

Das Hebungszentrum liegt ortsfest am Messpunkt B 402 nahe der ~~...~~ mit einer Hebungsgeschwindigkeit von 3 mm/Monat.

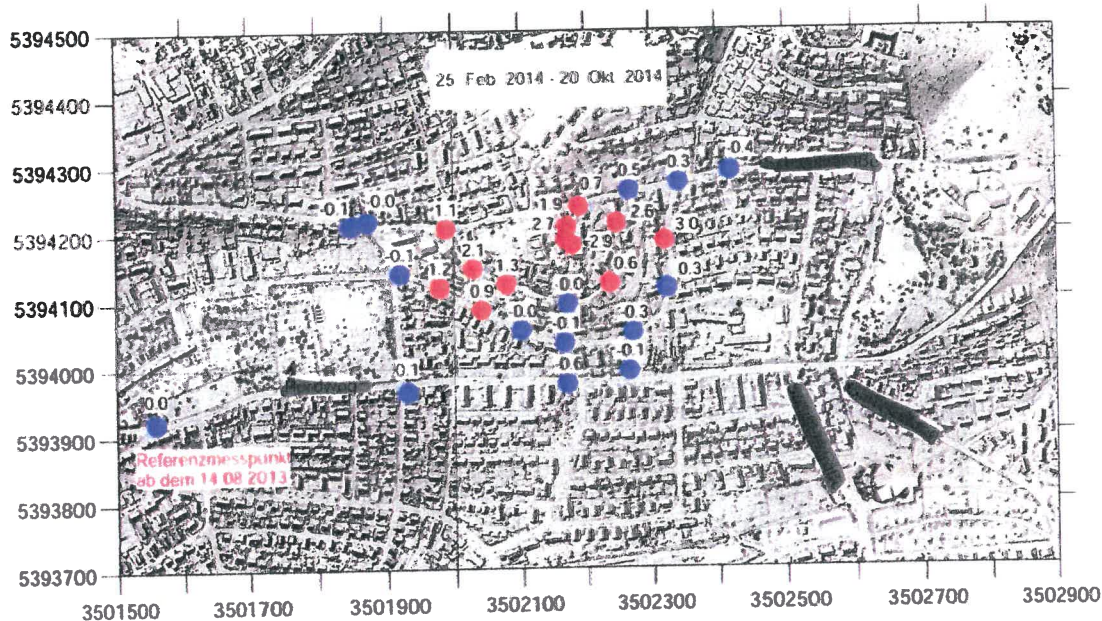


Abb. 4.4: Hebungsgeschwindigkeiten [mm/Monat] in der Messperiode 25.02.2014 – 20.10.2014 (rote Punkte: Hebung; blaue Punkte: Stabilität)

In Abb. 4.5 sind die Hebungsgeschwindigkeiten im letztmalig gemessenen Zeitraum 20.10.2014 bis 25.08.2015 wiedergegeben. Im Unterschied zu vorangegangenen Messungen liegen nun auch Folgemessungen für den Bereich ~~...~~ vor. Signifikante Hebungen wurden dort bis zur ~~...~~ gemessen. Auch sind nun Messungen nördlich der ~~...~~ vorhanden, wodurch das Hebungsgebiet im Norden abgegrenzt werden kann. Abweichend von den vorangegangenen Auswertungen (vgl. Abb. 4.3 und Abb. 4.4) wurden im Messintervall 20.10.2014 bis 25.08.2015 deutliche Hebungsraten (0,7 mm/Monat bzw. 0,8 mm/Monat) nahe der ~~...~~ gemessen. Dieser Bereich stellt den südwestlichsten Teil des Hebungsgebietes "Süd" dar.

Das Hebungszentrum bleibt relativ ortsfest nahe der ~~...~~ ~~Schulwaldstraße~~, erstreckt sich jedoch in westlicher Richtung bis zum Wendehammer ~~des Hans-Thoma-Wegs~~. Im Vergleich zu den vorangegangenen Messperioden ist im Hebungszentrum mit einer durchschnittlichen Hebungsrate von 2,4 mm/Monat eine Abnahme der Hebungsgeschwindigkeit zu beobachten. Hier macht sich bereits die erfolgreiche Sanierung der EWS-Anlagen im ~~...~~ zwischen dem 11. Februar 2015 und dem 27. Juli 2015 bemerkbar (vgl. Kap. 12).

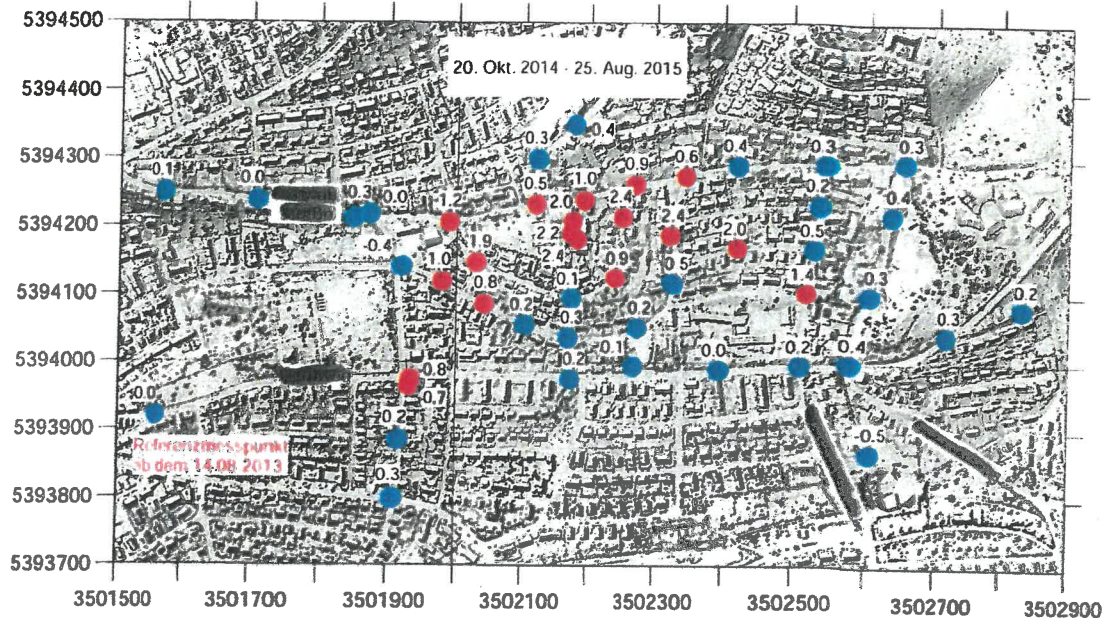


Abb. 4.5: Hebungsgeschwindigkeiten [mm/Monat] in der Messperiode 20.10.2014 – 25.08.2015 (rote Punkte: Hebung; blaue Punkte: Stabilität)

Der durch Feinnivellement messtechnisch erfasste Umfang der absoluten Hebungsbeträge in den Messzeiträumen ab dem 29.04.2013 (violette Markierungen), ab dem 14.08.2013 (orange Markierungen), ab dem 22.10.2013 (lila Markierungen) bzw. ab dem 20.10.2014 (grüne Markierungen) bis zum 25.08.2015 ist in Abb. 4.6 dargestellt. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass teilweise Ausgleichsrechnungen durch die Fa. intermetric GmbH enthalten sind, die durch die zwischenzeitliche Veränderung des Referenzmesspunktes nötig wurden. Auf die Angabe einer durchschnittlichen Hebungsgeschwindigkeit wird verzichtet, da sich bereits die erfolgte Sanierung der EWS-Anlagen ~~an der südwestlichen Hebungszentrum~~ im ersten Halbjahr 2015 bemerkbar macht. Das Hebungszentrum befindet sich zwischen dem Wendehammer ~~und dem südwestlichen Hebungszentrum~~ ~~an der südwestlichen Hebungszentrum~~ und weist einen absoluten Hebungsbetrag von 60 mm in gut 22 Monaten bzw. von 76 mm in fast 29 Monaten auf.

Im Unterschied zu den Kapiteln 4.1, 4.3 und 4.4 konnten bei der geodätischen Vermessung keine zwei Hebungszentren differenziert werden. Grund hierfür ist das Fehlen von Messpunkten im Bereich des südwestlichen Hebungszentrums ~~an der südwestlichen Hebungszentrum~~.

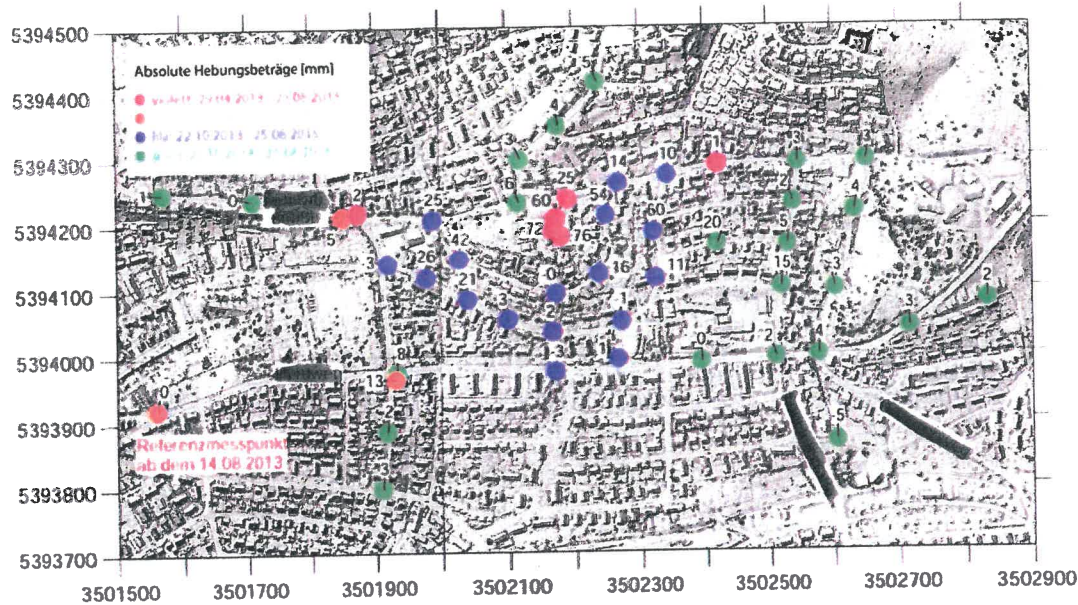


Abb. 4.6: Darstellung der durch geodätische Messungen innerhalb unterschiedlich langer Messzeiträume nachgewiesenen absoluten Hebungsbeiträge [mm]

Auf Grund der Erfahrung in den EWS-Schadensfällen Böblingen (Hebungsgebiet "Nord") und Rudersberg im Rems-Murr-Kreis bei ähnlichen geologischen und morphologischen Verhältnissen sowie einzelnen geodätischen Messergebnissen im Hebungsgebiet "Süd" ist grundsätzlich davon auszugehen, dass innerhalb des Hebungsgebietes auch horizontale Bewegungen aufgetreten sind, deren Beträge jedoch nicht näher bekannt sind.

4.3 Geodätische Messungen von Kanaldeckeln/-sohlen und Vergleich mit der Kanaldatenbank (Gesamthebungsbeiträge)

Die Fa. intermetric GmbH hat im Zeitraum vom 26.01.2015 bis 11.02.2015 eine Reihe von Kanaldeckeln bzw. -sohlen mittels Feinnivellement aufgenommen. Aus einem Vergleich mit den Messwerten aus der Kanaldatenbank des Eigenbetriebs Stadtentwässerung Böblingen ergeben sich daraus absolute Höhenbeiträge der Gesamthebung. Die Einmessung der Höhenlage der Kanaldeckel/-sohlen fand zumeist zwischen dem 12.01.1998 und dem 27.09.2005 und somit noch vor dem Errichten der Erdwärmesonden-Anlagen statt. Lediglich eine einstellige Anzahl wurde im Zeitraum



zwischen Dezember 2006 und Juli 2008, d.h. kurz nach Installation der Erdwärmesonden-Anlagen, eingemessen.

Grundsätzlich besteht bei der Verwendung von Kanalmessungen zur Abschätzung der Gesamthebungsbeträge in EWS-Schadensfällen die Problematik, dass einerseits die Ursprungsmessung üblicherweise kein Feinnivellement war und andererseits schon die Gestaltung der Messpunkte keine mm-genaue Auswertung zulässt. In Einzelfällen kann auch der in der ursprünglichen Vermessung verwendete Messpunkt (auf dem Kanaldeckel oder im Sohlbereich) nicht mehr genau nachvollzogen werden, sodass nur zentimetergenaue Angaben gemacht werden können und ein Einzelergebnis daher nur eine geringe Aussagekraft besitzt. Andererseits stellen die Kanaldeckel häufig die einzige Möglichkeit eines geodätischen Vergleichs zur Ermittlung eines Absoluthebungsbetrages dar.

In Abb. 4.7 ist die Differenz der ursprünglichen Kanalmessungen (Kanaldatenbank Januar 1998 bis Juli 2008) gegenüber der Messung vom 26.01.2015 bis 11.02.2015 ausgewertet.

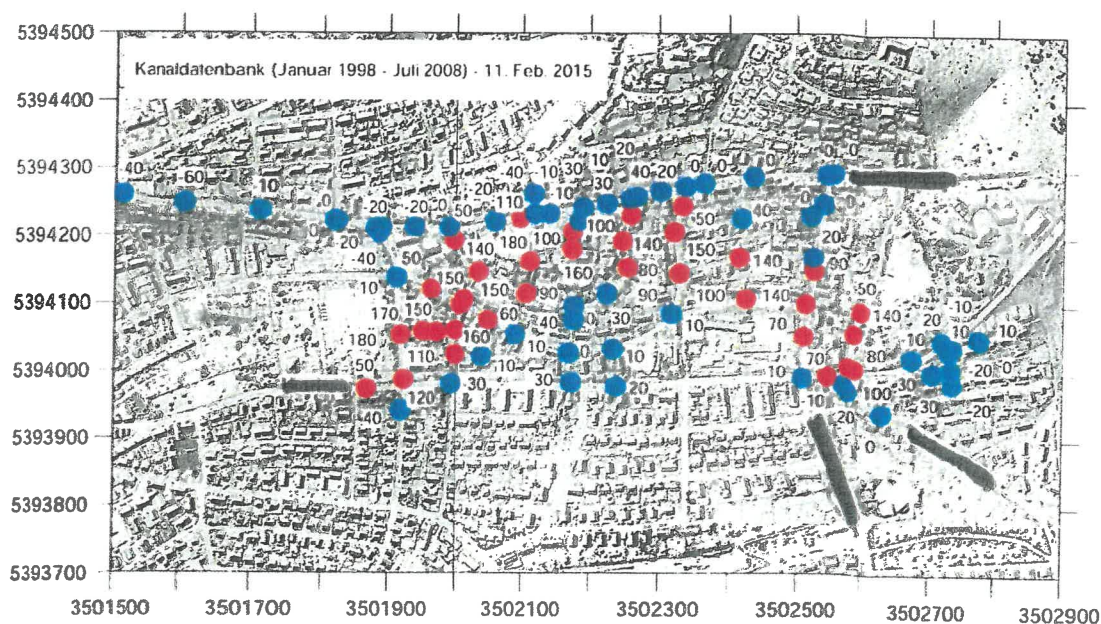


Abb. 4.7: Differenz [mm] zwischen Höhenangaben aus der Kanaldatenbank (Messwerte Januar 1998 bis Juli 2008) und den Messergebnissen vom 26.01.2015 bis 11.02.2015, (rote Punkte: Hebung; blaue Punkte: Stabilität)



Es ergeben sich daraus im Hebungsgebiet "Süd" zwei Hebungscentren. Mit Gesamthebungsbeträgen bis 180 mm befindet sich das südwestlichere Hebungscentrum nahe der [REDACTED]. Im nordöstlicheren Hebungscentrum, zwischen den Wendehammern [REDACTED], wurden ebenfalls Gesamthebungsbeträge bis 180 mm gemessen. Zwischen den beiden Hebungscentren wurden geringere Gesamthebungsbeträge ermittelt.

4.4 Radarinterferometrie

4.4.1 Räumliche Ausdehnung und Beträge der Hebungsgeschwindigkeit

Die Hebungsgebiete in Böblingen weisen eine große Ausdehnung sowie erhebliche natürliche Höhenunterschiede auf. Die aus verschiedenen Gründen unerlässliche, regelmäßige Erfassung der Geländeänderungen durch geodätische Feinnivellements ist extrem aufwändig und letztlich auch fehleranfällig. Daher wurde nach Möglichkeiten einer Fernerkundungs-Messung der Geländeänderungen gesucht. Auf Grund der überwiegend dichten Bebauung im Hebungsgebiet und der somit hinreichend vorhandenen Reflektoren hat sich hierfür die Methode der Radarinterferometrie (InSAR, interferometrische Zeitserienanalyse) empfohlen, wie diese von der Fa. Airbus Defence and Space, Potsdam, angeboten wird.

Im Rahmen der Arbeitskreis-Sitzung am 16.07.2014 hat das LRA Böblingen hierfür die Fa. Airbus Defence and Space mit der im halbjährlichen Rhythmus durchzuführenden Auswertung von Geländeänderungen beauftragt. Bis Redaktionsschluss vorliegend sind die Berichte der Fa. Airbus Defence and Space zu Hebungsentwicklungen seit dem 25.02.2014 vom 22.10.2014, 22.05.2015, 05.10.2015, 12.04.2016, 04.11.2016, 17.05.2017, 20.07.2017, 30.01.2018, 25.04.2018 und vom 26.09.2018 (Anl. 10).

Grundlage der Messung sind Messdaten des Satelliten TerraSAR-X, für welche die Fa. Airbus Defence and Space das kommerzielle Exklusivrecht der Vermarktung besitzt. Für die Auswertung verwendet wurden Daten des sog. High-Resolution Spotlight-Modus (HS), die für den Bereich Böblingen ab dem 25.02.2014 bestellt und in der Folge aufgenommen wurden. Die Bodenauflösung dieses Modus beträgt 1 x 1 m. Die Aufnahmen des TerraSAR-X erfolgen in einem Rhythmus von 11 Tagen, wobei einzelne Ausfälle durch andere Prioritätsentscheidung des Satellitenbetreibers aufgetreten sind. Bezüglich Details zu den Messauswertungen, insbesondere zu der verwendeten Auswertemethode des "Small Baseline approach (SBAS)" wird auf die im Anhang befindlichen Berichte der Fa. Airbus Defence and Space verwiesen (Anl. 10).



Randbedingungen

Grundsätzlich ist bei der Anwendung von Radarinterferometrie zu beachten, dass ein Datenstapel von etwa 20 Messungen (Messwerterhebung > 6 Monate) aufzubauen ist, bevor eine erste Auswertung erfolgen kann.

Die Auswertbarkeit ist an entsprechende Reflektoren am Boden gebunden, die entweder durch eigens aufgestellte sog. Corner-Reflektoren (in Böblingen nicht erfolgt) oder aber durch Gebäude bzw. große Asphaltflächen gewährleistet sind. Für reflektorarme Bereiche, wie Wald- und Wiesenflächen, können hingegen keine Informationen zu Geländehöhenveränderungen gewonnen werden. Diese Situation liegt im Bereich des Hebungsgebietes "Süd" im Bereich des Friedhofes am westlichen Rand sowie im Waldgebiet im Gewann ~~Waldgebiet~~ nahe dem östlichen Rand des Hebungsgebietes "Süd" vor. Ansonsten besteht auf Grund der Bebauung eine sehr gute Anzahl von Reflektoren. Weiterhin konnten innerhalb des Ausleuchtungsbereichs der High-Resolution Spotlight-Daten (HS) eine hinreichende Anzahl von Reflektoren ohne Geländeänderungen gefunden werden, so dass die Grundlagen für eine Auswertung in den Hebungsgebieten "Nord" und "Süd" insgesamt sehr gut waren.

Auf Grund von Mehrdeutigkeiten der Messergebnisse, die von der verwendeten Wellenlänge des Radarsignals abhängen (TerraSAR-X: 31 mm), können mit der angewandten Auswertmethode lediglich Geländeänderungen von minimal 3 mm/Jahr bis maximal 20 cm/Jahr bestimmt werden. Die durch andere Messmethoden festgestellten Beträge der Hebungen im Hebungsbereich "Süd" liegen durchweg in diesem Bereich, so dass von einer Eindeutigkeit der Messergebnisse ausgegangen werden kann.

Bezüglich der Messgenauigkeit ist weiterhin auszuführen, dass bei dem Messverfahren die Distanzänderung zwischen Satellit und Messpunkten erfasst wird. Auf Grund der Position des Satelliten im All entspricht die so festgestellte Änderung nicht dem Vertikalhebungsbetrag; vielmehr erfolgt sie ausgehend von einer polaren Orbitgeometrie (Überflugrichtung annähernd Nord-Süd) schräg mit einem Winkel von etwa 42 Grad. Bisher wurden für die Auswertungen ausschließlich die descending-Daten verwendet. Für die Angabe einer exakten vertikalen Geländehöhenveränderung müsste das Verhältnis von horizontalen und vertikalen Bewegungen bekannt sein.

Da im vorliegenden Fall – im Gegensatz z. B. zu den geologischen Verhältnissen im EWS-Schadensfall Staufen – eine weitgehend söhlige geologische Schichtlagerung vorliegt (s. u.), ist insgesamt davon auszugehen, dass die horizontalen Verschiebungen im jeweiligen Hebungszentrum eher gering sind, von dort aus nach außen zunehmen und am Außenrand des Hebungsbereichs wiederum gegen Null tendieren. Auf Grund der Schwierigkeiten, horizontale Lageverschiebungen messtechnisch hochgenau erfassen zu können (s. o.), liegen hierzu keine Detaildaten vor.

Auswertezeitraum Februar 2014 bis Februar 2018

In der nachfolgenden Abb. 4.8 konnten für den Zeitraum Februar 2014 bis Februar 2018 die in diesem Zeitraum aufgelaufenen absoluten Geländehebungsbeträge im Hebungsgebiet "Süd" ausgewertet und in einer fortgeführten Grafik dargestellt werden.

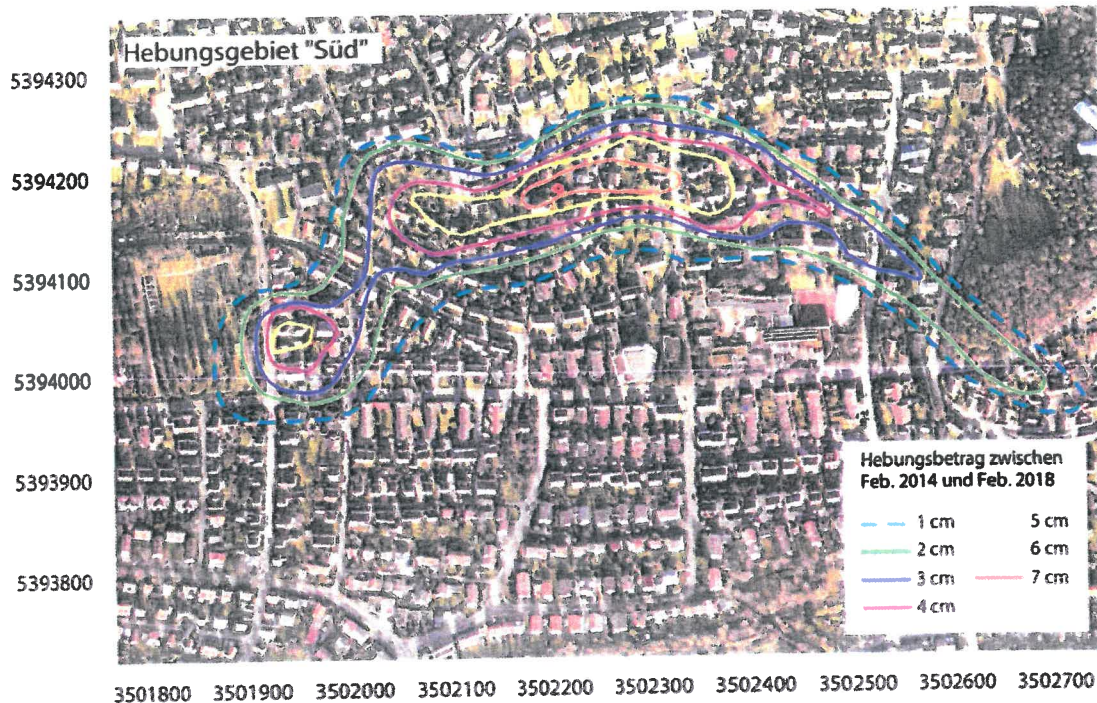


Abb. 4.8: Darstellung der absoluten Geländehebungsbeträge auf Grundlage der Radarinterferometrie der Fa. AIRBUS für den Zeitraum Februar 2014 und Februar 2018

Die Abb. 4.8 lässt eine Differenzierung der bis Februar 2018 aufgelaufenen Hebungsbeträge in zwei Hebungscentren zu (s.u.): Eines im Westen des Hebungsgebietes "Süd" nahe der Kreuzung A 63 mit der B 31 und ein weiteres im zentralen Bereich der Hebungssichel. Die beiden Hebungscentren sind durch eine merkliche Einschnürung voneinander getrennt. Grundsätzlich fällt auf, dass das Hebungsgebiet "Süd" weit nach Osten ausstrahlt, was vermutlich durch eine tektonisch verursachte Wasserwegsamkeit (s.u.) bedingt sein dürfte.

In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 4.9 bis Abb. 4.13) werden für mindestens jährliche Zeiträume die vertikalen Geländeänderungen auf Grundlage der Radarinterferometrie für das Hebungsgebiet "Süd" im Zeitraum zwischen Ende Februar 2014



und Ende Februar 2018 dargestellt. Bereiche die generell weniger als 3 mm vertikaler Geländeänderung innerhalb von 6 Monaten ($<0,5$ mm/Monat) aufweisen, werden ausgeblendet. Die Lage der EWS-Anlagen [REDACTED] ist in diesen Abbildungen markiert (Sternchen-Symbole).

Auswertezeitraum Februar 2014 bis Februar 2015

Abb. 4.9 (Hebungszeitraum Februar 2014 bis Februar 2015) zeigt eine deutliche sichelförmige Hebungsfigur (Hebungsbereich mit mehr als 3 mm/Halbjahr Hebungsgeschwindigkeit). Im Südwesten endet die Hebungsfigur an der ~~Hebungsfigur~~ ~~Hebungsfigur~~ im Norden etwa ~~Hebungsfigur~~ ~~Hebungsfigur~~ sowie im Südosten ~~Hebungsfigur~~ ~~Hebungsfigur~~. Damit misst die sichelförmige Hebungsfigur rund 950 m x 450 m.

Ein Hebungszentrum befindet sich mit rund 1,6 mm/Monat ~~Hebungsfigur~~ ~~Hebungsfigur~~ nahe dem Südwestrand der Hebungsfigur.

Ein weiteres deutliches Hebungszentrum mit Hebungsgeschwindigkeiten von mehr als 2 mm/Monat zeichnet sich im Zentrum der Hebungsfigur zwischen ~~Hebungsfigur~~ ~~Hebungsfigur~~ im Westen und etwa ~~Hebungsfigur~~ ~~Hebungsfigur~~ im Osten ab. Die größten Hebungsgeschwindigkeiten mit ca. 2,8 mm/Monat wurden in diesem Zeitraum im Bereich ~~Hebungsfigur~~ ~~Hebungsfigur~~, ca. 150 m bis 200 m östlich der EWS-Anlagen im ~~Hebungsfigur~~ ~~Hebungsfigur~~ gemessen.

Zwischen beiden Hebungszentren deutet sich eine Einschnürung in der Hebungsfigur an. Diese befindet sich im Bereich ~~Hebungsfigur~~ ~~Hebungsfigur~~.

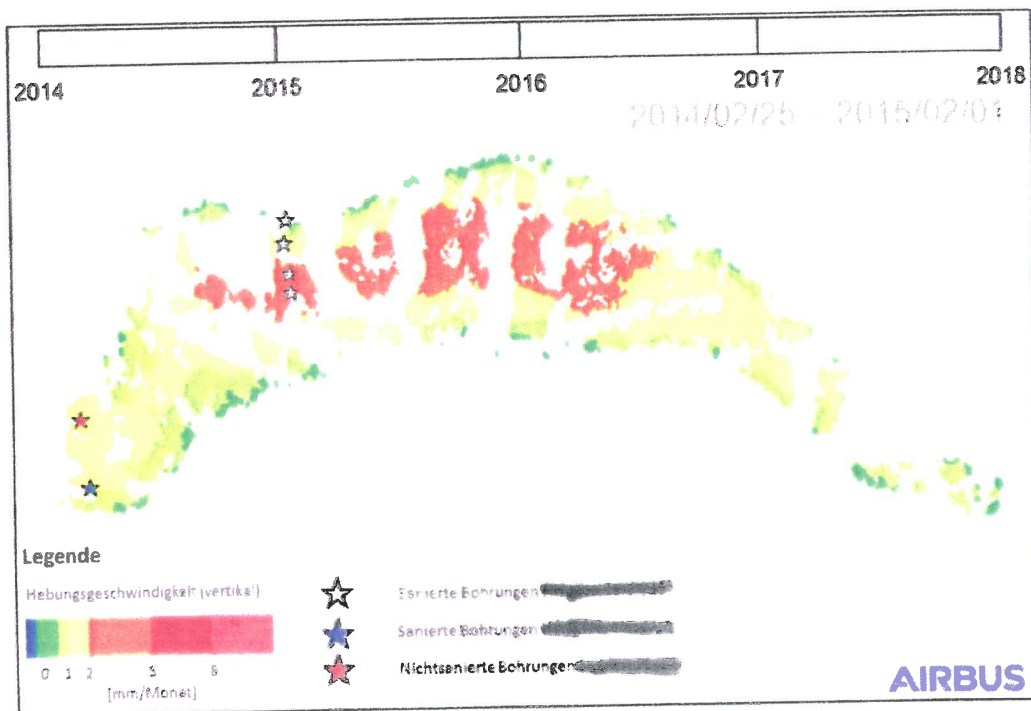


Abb. 4.9: Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Februar 2014 und Februar 2015



Auswertezeitraum Februar 2015 bis Februar 2016

Abb. 4.10 (Hebungszeitraum Februar 2015 bis Februar 2016) lässt sich im Vergleich zum vorangegangenen Auswertungszeitraum (Abb. 4.9) eine deutliche Verlangsamung der Hebungsgeschwindigkeit erkennen.

Das südwestliche Hebungszenrum befindet sich mit einer Hebungsgeschwindigkeit von ca. 1,2 mm/Monat bis etwa 1,3 mm/Monat relativ ortsfest im Bereich

Im zentralen Hebungszenrum wurden einzig an einem Messpunkt mit 2,2 mm/Monat Hebungsgeschwindigkeiten von mehr als 2 mm/Monat gemessen.

Eine deutliche Trennung zeichnet sich zwischen dem zentralen Hebungszenrum, welches durch Undichtigkeiten der EWS-Anlagen gespeist wird und dem südwestlichen Hebungszenrum mit Ursprung ab.

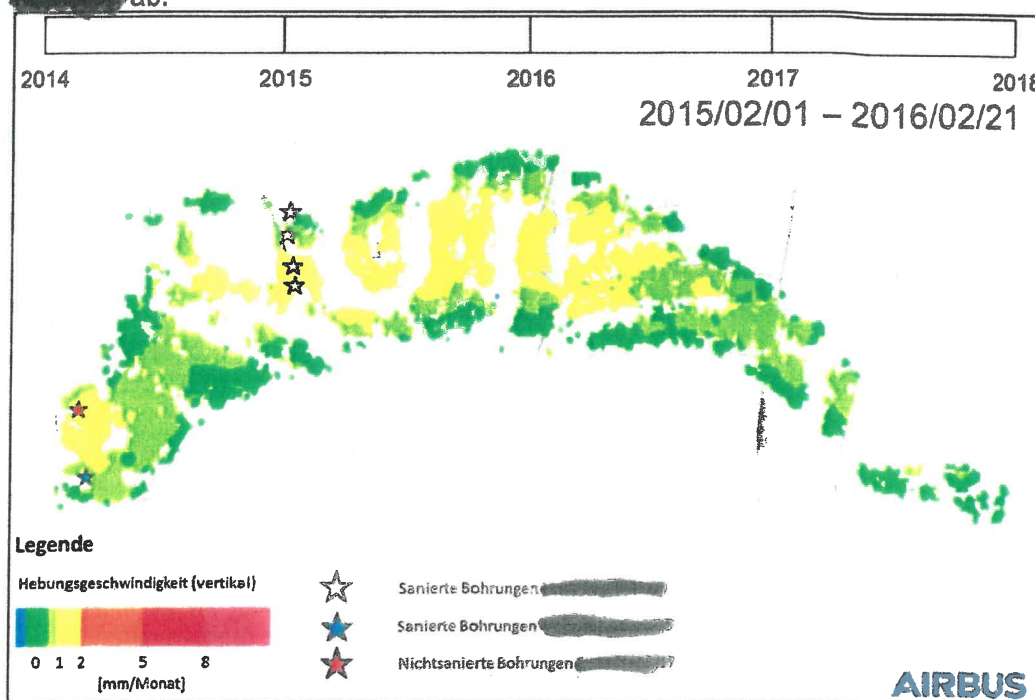


Abb. 4.10: Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Februar 2015 und Februar 2016

Auswertezeitraum Februar 2016 bis Juli 2017

Im dritten Auswertungsabschnitt (Hebungszeitraum Februar 2016 bis Juli 2017; vgl. Abb. 4.11) lässt sich im zentralen Hebungsgebiet eine weitere Verlangsamung der Hebungsgeschwindigkeit beobachten. Im Hebungsgebiet östlich der EWS-Anlagen im Bereich Heine Weg haben sich die Hebungsgeschwindigkeiten größtenteils auf Werte von unter 0,5 mm/Monat verlangsamt. Punktuell (z. B. nahe im Umfeld des Hebungsentrums ~~Waldstraße 63~~ sowie ~~Heine Weg 3 bis 2, Waldstraße 63~~, nahe der ~~Kontanz~~ ~~Waldstraße~~) werden Hebungsgeschwindigkeiten von 0,5 mm/Monat überschritten. Das zentrale Hebungsgebiet befindet sich im ~~Waldstraße 63~~. Hier wurden an zwei Messpunkten Hebungsraten von 1,1 mm/Monat gemessen.

Dem gegenüber lässt sich im Südwesten der Hebungsfigur weiterhin ein deutliches flächig ausgebildetes Hebungszentrum (Hebungsrate 0,5 mm/Monat bis 1 mm/Monat) erkennen. Das Hebungszentrum befindet sich hier nahezu ortsfest im Bereich zwischen ~~Hebungsrate 0,5 mm/Monat bis 1 mm/Monat~~

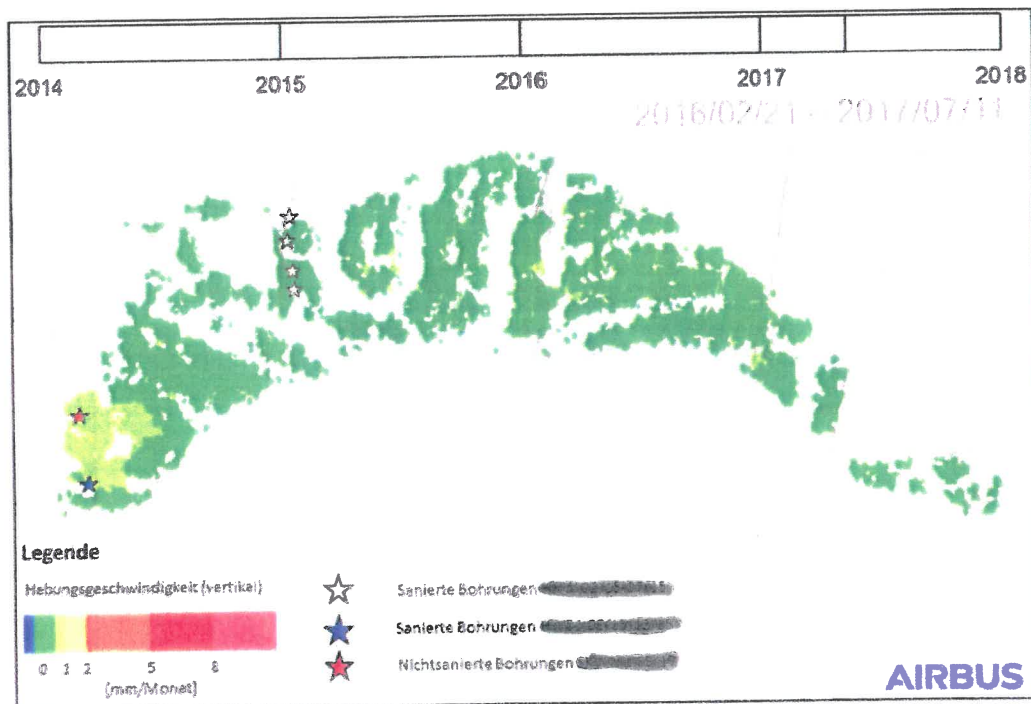


Abb. 4.11: Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Februar 2016 und Juli 2017

Auswertezeitraum Juli 2017 bis Februar 2018

Im letzten Auswertungszeitraum (Juli 2017 bis Februar 2018; vgl. Abb. 4.12) zeigt sich eine weitere Verlangsamung der Hebungen im zentralen Bereich der Hebungsfigur. Vereinzelte Messpunkte im zentralen Hebungsgebiet nahe dem Wendehammer weisen Hebungsgeschwindigkeiten von 0,5 mm/Monat bis 1 mm/Monat auf.

Auch im Südwesten des Hebungsgebietes haben sich die Hebungsgeschwindigkeiten verringert. Der Bereich mit Hebungsgeschwindigkeiten zwischen 0,5 mm/Monat und 1 mm/Monat hat sich hier nahezu halbiert. Das Zentrum der Hebungen mit rund 1,0 mm/Monat befindet sich weiterhin ortsfest im Bereich zwischen ~~Wendehammer~~ ~~Amschlag~~.

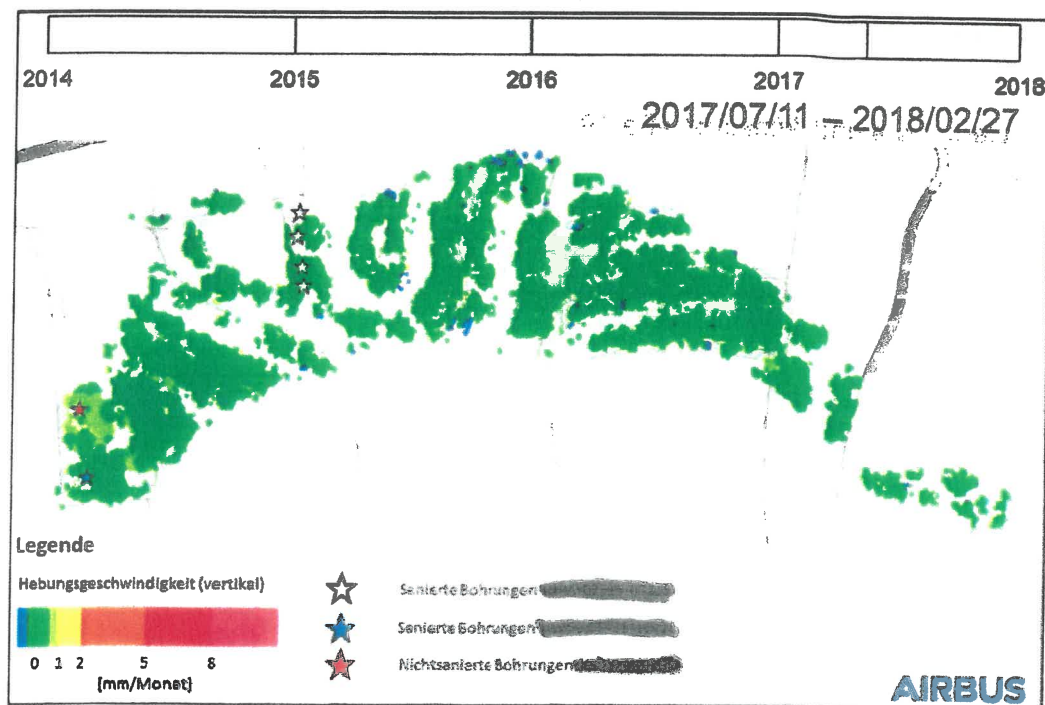


Abb. 4.12: Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Juli 2017 und Februar 2018



Hebungszentren

Die Auswertung der interferometrisch ermittelten durchschnittlichen Hebungsgeschwindigkeiten im vierjährigen Zeitraum zwischen Februar 2014 und Februar 2018 ergibt im Hebungsgebiet "Süd" zwei Hebungszentren.

Das zeitlich sich zuerst entwickelte südwestliche Hebungszentrum umfasst den Bereich [REDACTED] sowie die [REDACTED]. Die dortige Hebungsgeschwindigkeit beträgt in diesem Zeitraum im Mittel zwischen 1 mm/Monat und 1,2 mm/Monat. Die durchschnittlich größten Hebungsrate wurden in diesem Zeitraum im Herdweg 4 gemessen.

Das zeitlich sich etwas später entwickelte zentrale Hebungszentrum mit einer mittleren Hebungsgeschwindigkeit von 1 mm/Monat bis 1,4 mm/Monat befindet sich etwa zwischen [REDACTED] im Westen und etwa der [REDACTED] bzw. der [REDACTED] im Osten. Das Gebiet mit der durchschnittlich größten Hebungsrate befindet sich hier im Bereich zwischen [REDACTED] ca. 100 m östlich der EWS-Anlagen im [REDACTED].

Im Übergangsbereich zwischen beiden Hebungszentren (im Umfeld [REDACTED]) wird eine durchschnittliche Hebungsgeschwindigkeit von etwa 0,5 mm/Monat bis ca. 0,56 mm/Monat erreicht (vgl. Abb. 4.13).

Die Entwicklung der Hebungsgeschwindigkeit unter Einfluss bzw. Auswirkung der erfolgten EWS-Sanierungen wird in Kapitel 4.4.4 näher beschrieben.

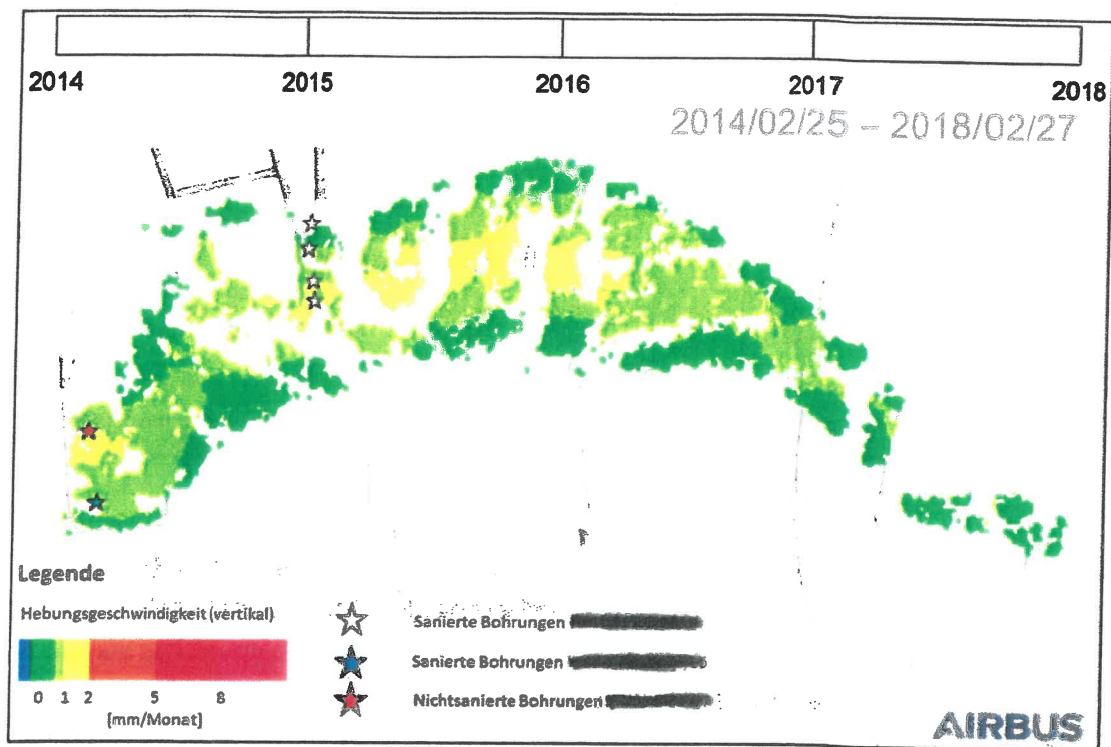


Abb. 4.13: Darstellung der monatlichen Hebungsgeschwindigkeit zwischen Februar 2014 und Februar 2018

Zeitliche Entwicklung der Hebungen

Die interferometrisch ermittelte maximale Hebungsgeschwindigkeit im Hebungsgebiet "Süd" wird von Airbus Defence and Space im Bericht vom 22.10.2014 mit 3,1 mm/Monat im Bereich (ermittelt über Koordinatentransformation) angegeben (vgl. Abb. 4.14).

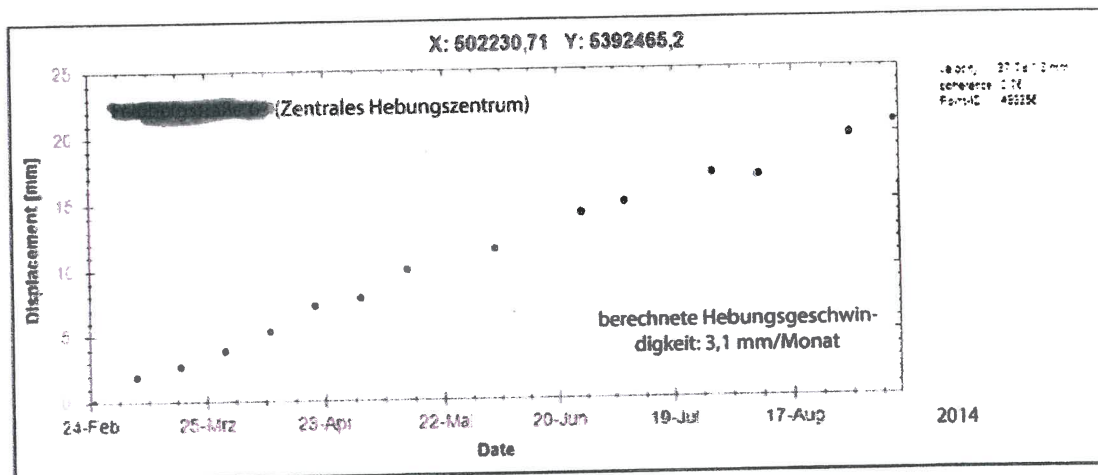


Abb. 4.14: Zeitliche Entwicklung der Hebungen (mit berechneter Hebungsgeschwindigkeit Februar 2014 – September 2014) im Bereich des zentralen Hebungscentrums (Airbus Defence and Space, Bericht vom 22.10.2014)

Nach der auf diesen Zeitraum folgenden Auswertung bis Herbst 2015 bleibt das zentrale Hebungscentrum weiterhin relativ ortsfest. Auch die Hebungsgeschwindigkeit ändert sich bis Juni 2015 nur geringfügig (vgl. Abb. 4.15). Ab Juni 2015 wird die sich später fortsetzende Verlangsamung der Hebungsgeschwindigkeit erkennbar. Insgesamt werden im Zeitraum 25.02.2014 bis 09.09.2015 mittels Radarinterferometrie linear verlaufende Hebungen im Betrag von etwa 45 mm im Hebungscentrum erfasst.

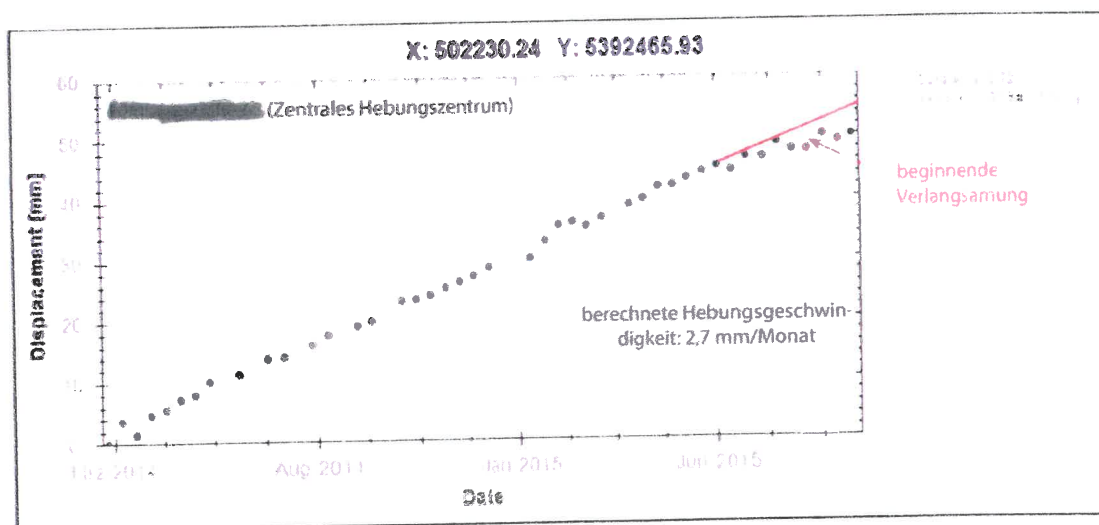


Abb. 4.15: Zeitliche Entwicklung der Hebungen (mit berechneter Hebungsgeschwindigkeit 25.02.2014 – 09.09.2015) im Bereich des zentralen Hebungscentrums (Airbus Defence and Space, Bericht vom 05.10.2015)



Die vorbenannten Auswertungen wurden auch auf Grund der Fehlerzunahme bei horizontalen Bewegungskomponenten überwiegend für die Umgebung des Hebungsentrums vorgenommen. Die Fa. Airbus Space and Defence hat mit Angeboten vom 07.08.2015 und 04.09.2015 eine Auswertung von ascending- und descending-Daten offeriert. Hierzu wurden bereits zusätzlich zu den HS-descending-Daten ab Februar 2014 geringer auflösende (3 m x 3 m Bodenauflösung) Daten im ascending-StripMap-Modus und ab Juni 2015 auch ascending-Messwerte im High Resolution SpotLight-Modus erfasst und in einem Archiv abgelegt. Bedingt durch die Betrachtung aus verschiedenen Blickwinkeln könnte durch eine vergleichende Auswertung der ascending- und descending-Daten eine Aussage über die horizontalen Bewegungen und in der Folge auch eine verbesserte Einschätzung des tatsächlichen Betrags der vertikalen Komponente der Geländeänderungen erfolgen. Auf Grund der polaren Umlaufbahn des Satelliten können mit dieser Methode allerdings lediglich horizontale Bewegungen in (angenähert) West-Ost-Richtung errechnet werden. Bewegungen in (angenähert) Nord-Süd-Richtung würden auch mit dieser Messmethodik weiterhin nicht erfasst werden können. Aus ingenieurgeologischer Sicht sind durch die deutliche Verringerung der Hebungsgeschwindigkeiten im Hebungsgebiet "Süd" z. Z. keine über die Fortsetzung der descending-Auswertung hinausgehenden Beauftragungen erforderlich.

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

4.4.2 Auswertung zum Beginn der Hebungen

Zwischen dem 01.10.2015 und dem 30.09.2017 lief unter Federführung des Geodätischen Institut am Karlsruhe Institute of Technology (KIT) ein durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördertes Forschungsprojekt. Ziel war die Gewinnung von Erkenntnissen über die Hebungen im Zeitraum vor 2011 mittels Einsatz der Persistent Scatterer SAR-Interferometrie (PSI) von ENVISAT Satelliten-Daten. WAMPACH UND WESTERHAUS (2018) benennen in ihrem Abschlussbericht den 05.11.2006 als den wahrscheinlichsten Beginn von Hebungsbewegungen im Hebungsgebiet "Süd" (vgl. Abb. 4.16) und gelangen zu folgender Aussage:

"Bezieht man die Ergebnisse auf den Zeitpunkt der EWS-Bohrarbeiten im Oktober 2006, so lässt sich die Frage nach dem Hebungsbeginn unter diesen Voraussetzungen wie folgt beantworten: ca. 24 Tage nach Beginn der ersten Bohrphase am 12.10.2006 manifestiert sich das Hebungssignal in der westlichen Hälfte des südlichen Schadensgebietes in Böblingen nahezu flächenhaft."

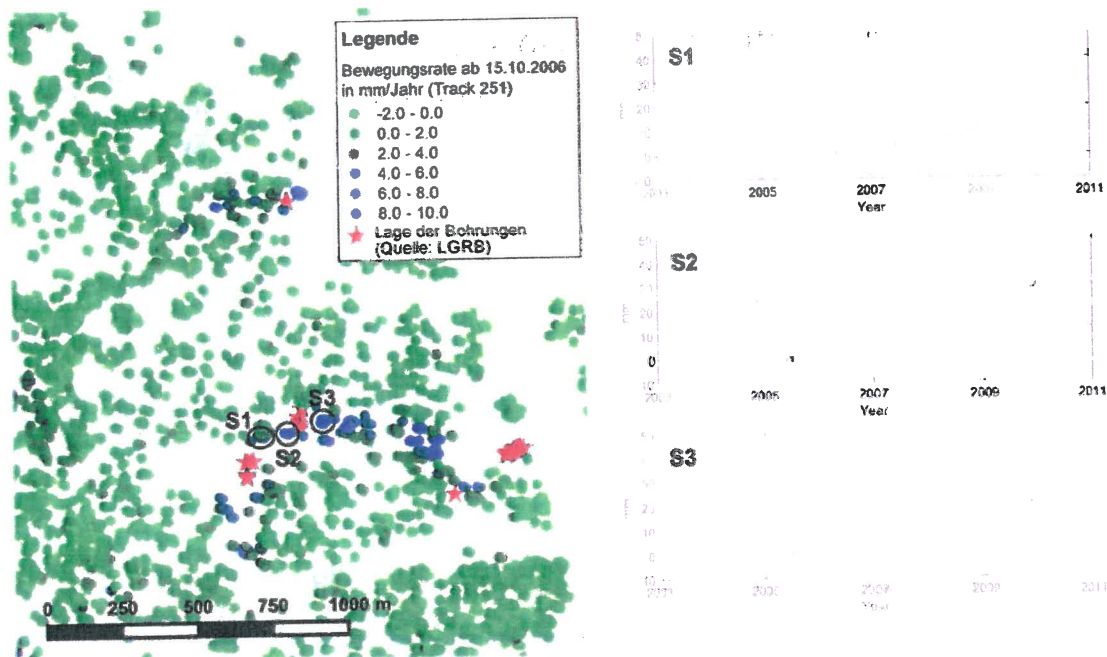


Abb. 4.16: Drei Beispielzeitreihen (S1–S3) im Hebungsgebiet "Süd". Die roten Linien zeigen ein einfaches Bewegungsmodell, das bestmöglich an die gegebenen Verschiebungen (blau Punkte) angepasst wurden (Quelle: Wampach und Westerhaus (2018)).

Im Auftrag der Versicherungsgesellschaft Allianz sowie der Bohrgesellschaft Gungl mbH hat die Fa. Airbus Defence and Space verfügbare Radarmessdaten des Zeitraums Mitte 2004–Mitte 2015 zusammenfassend mittels interferometrischer Zeitserienanalyse ausgewertet. Hierbei wurden Daten der Satelliten ENVISAT, ALOS (Advanced Land Observing Satellite), Cosmo SkyMed und TerraSAR-X-HS ausgewertet. Diesbezüglich liegen dem LGRB Berichte vom 20.02.2014, 14.04.2014 und 21.05.2015 sowie darüber hinaus weitere Abbildungen und Graphiken vor.

Die Grafiken der Fa. Airbus Defence and Space wurden vom LGRB dahingehend abgeändert, dass eine in den ursprünglichen Darstellungen enthaltene Regressionskurve sowie gestrichelte Linien entfernt wurden, die nach Interpretation der Fa. Airbus Defence and Space den Zeitraum von Initialbewegungen hätten eingrenzen sollten (vgl. Sachstandsbericht zum Hebungsgebiet "Nord").

Das LGRB hat für die jeweils annähernd linearen Hebungen im Zeitraum 2011 bis 2013 aus den Diagrammen eine Hebungsgeschwindigkeit errechnet. Hierbei ist festzustellen, dass die Hebungsgeschwindigkeiten insgesamt gut mit den Berechnungen der geodätischen Messwerte der Periode 22.10.2013 – 25.02.2014 übereinstimmen.

In den nachfolgenden Abb. 4.17 bis Abb. 4.23 wird die Hebungsentwicklung vom Südwesten des Hebungsgebietes, am Feldweg 57 beginnend (südwestliches He-



bungszentrum), bis zum [REDACTED] im Südosten des Hebungsgebietes (ca. 700 m östlich des Hebungscentrums [REDACTED] ersichtlich.



Abb. 4.17: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [REDACTED] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen im [REDACTED] (rot umrandet) und [REDACTED] (grün umrandet)

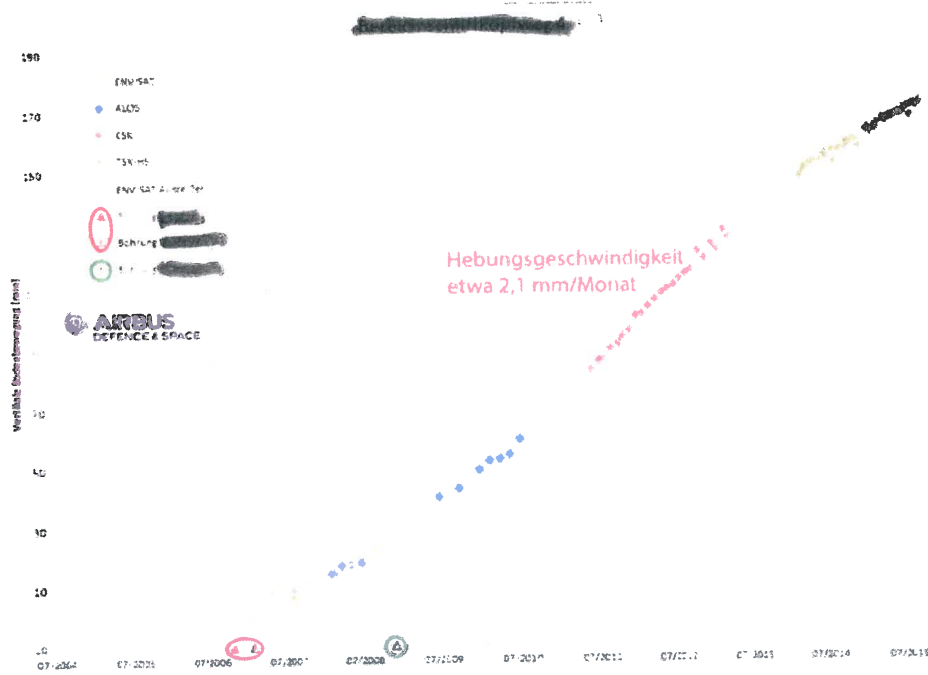


Abb. 4.18: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [redacted] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen im [redacted] bzw. [redacted] (rot umrandet) und im [redacted] (grün umrandet)



Abb. 4.19: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [redacted] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen im [redacted] bzw. [redacted] (rot umrandet) und im [redacted] (grün umrandet)

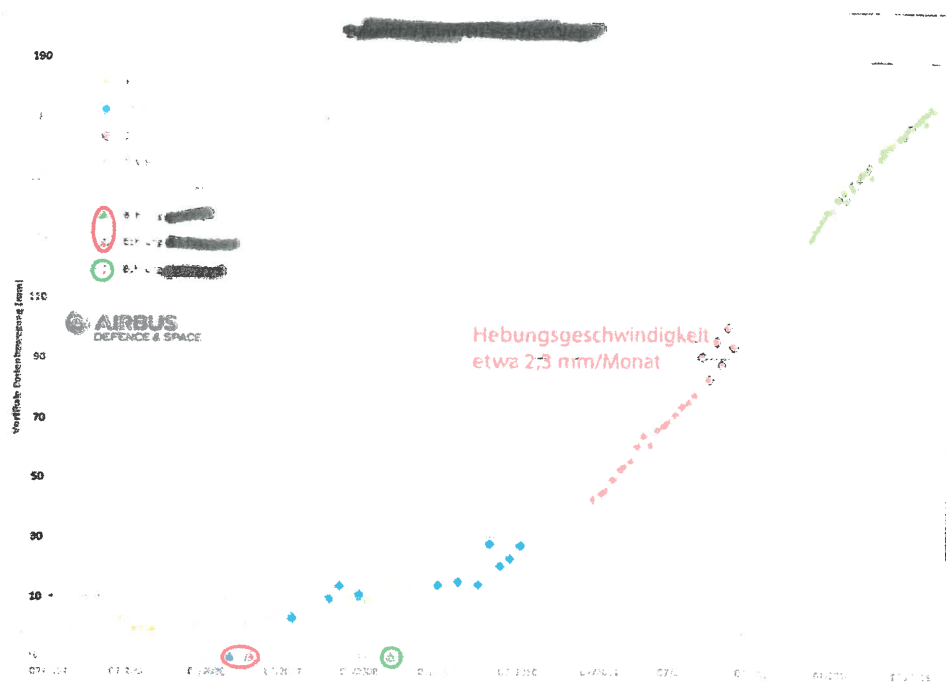


Abb. 4.20: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [redacted] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen [redacted] bzw. [redacted] (rot umrandet) und [redacted] (grün umrandet).

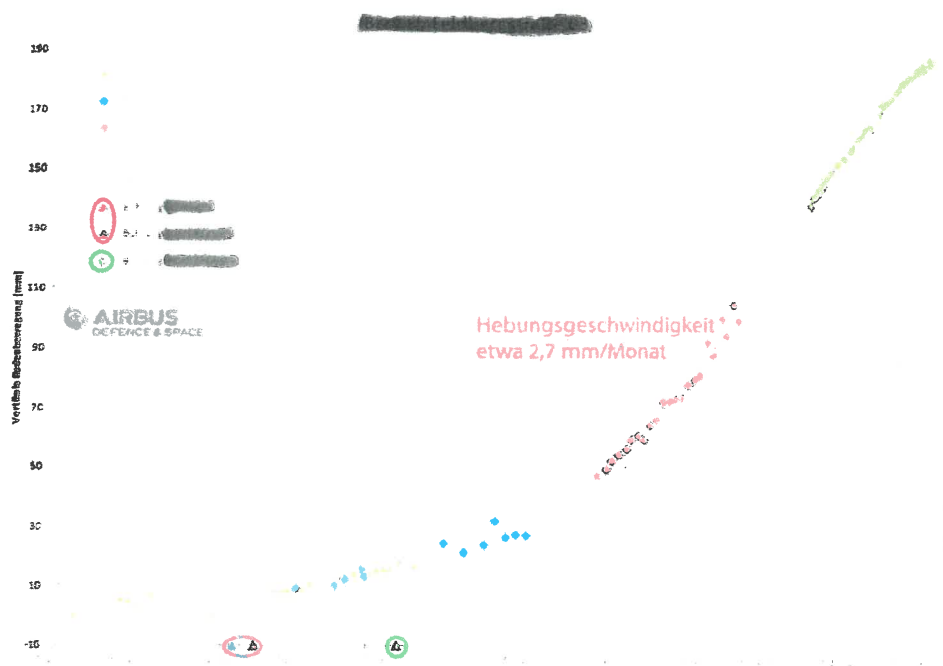


Abb. 4.21: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [redacted] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen [redacted] bzw. im [redacted] (grün umrandet).

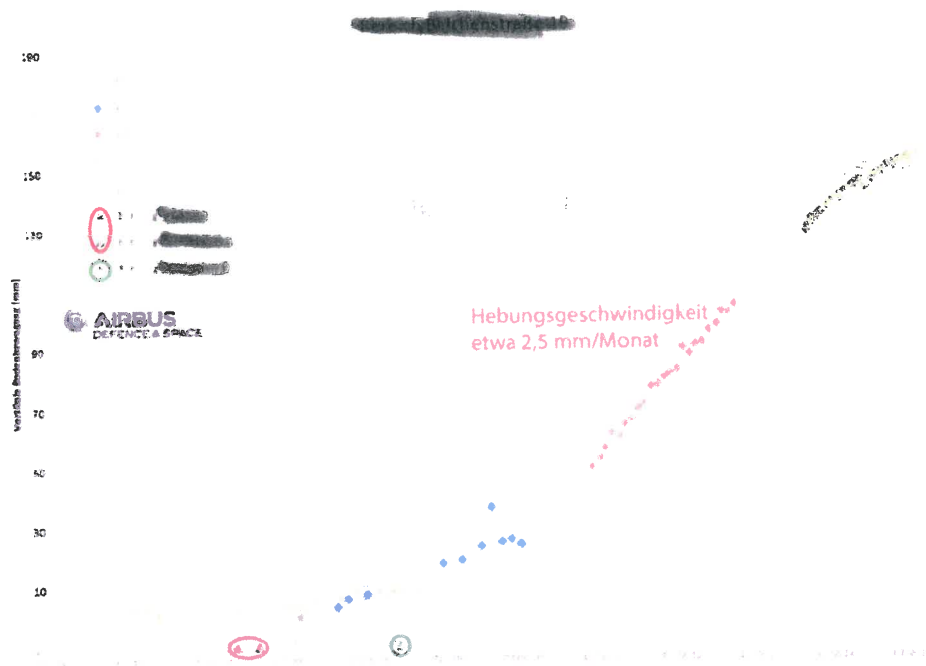


Abb. 4.22: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [redacted] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen im [redacted] (rot umrandet) und im [redacted] (grün umrandet)



Abb. 4.23: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramm für ein Reflektionssignal im Bereich [redacted] mit Eintragung der Ausführungszeitpunkte der Bohrungen im [redacted] bzw. [redacted] (rot umrandet) und im [redacted] (grün umrandet)



Aus den vorstehenden Diagrammen ergibt sich ein deutlicher zeitlicher und räumlicher Zusammenhang zwischen dem Einsetzen der Hebungen im Hebungsgebiet "Süd" und der Ausführung der jeweiligen Bohrungen im Bereich [REDACTED] (südwestliches Hebungszentrum, Bohrzeitraum: Oktober 2006 bis Januar 2007) und den Bohrungen [REDACTED] (zentrales Hebungszentrum, Bohrzeitraum: Ende November bis Anfang Dezember 2008).

Da die Hebungsgeschwindigkeiten im Vergleich zum Hebungsgebiet "Nord" insgesamt geringer ausfallen und die Hebungen im Gegensatz zum Hebungsgebiet "Nord" auch weniger abrupt einsetzen, lässt sich der Zeitpunkt des Hebungsbeginns auf Grundlage der vorliegenden Diagramme zum Teil nur auf einen mehrere Monate umfassenden Zeitraum eingrenzen. Dieser Umstand verstärkt sich mit zunehmender Entfernung der Reflektionssignale zum initialen Hebungszentrum im Bereich [REDACTED] (südwestliches Hebungszentrum). Eine Erklärung bezüglich dieser Verzögerung wäre, dass zunächst Wasser entlang der Trennflächensysteme (bevorzugt Klüftung) in die weit östlich gelegenen Bereiche vordringen musste, bevor sich auch hier Hebungen zeigen konnten.

Wesentlich ist weiterhin, dass vor der Ausführung der Bohrungen im [REDACTED] im Herbst 2006 in allen Diagrammen keinerlei signifikante Geländeänderungen erkennbar sind. Geländehebungen für den Zeitraum Ende 2004 bis Oktober 2006 können auf der bestehenden Datengrundlage sicher ausgeschlossen werden.

4.4.3 Zeitliche Entwicklung der Hebungsfigur

Die zeitliche Entwicklung der Hebungsfigur "Süd" zwischen Oktober 2004 und März 2013 wird kaleidoskopartig in Abb. 4.24 ersichtlich und nachfolgend beschrieben.

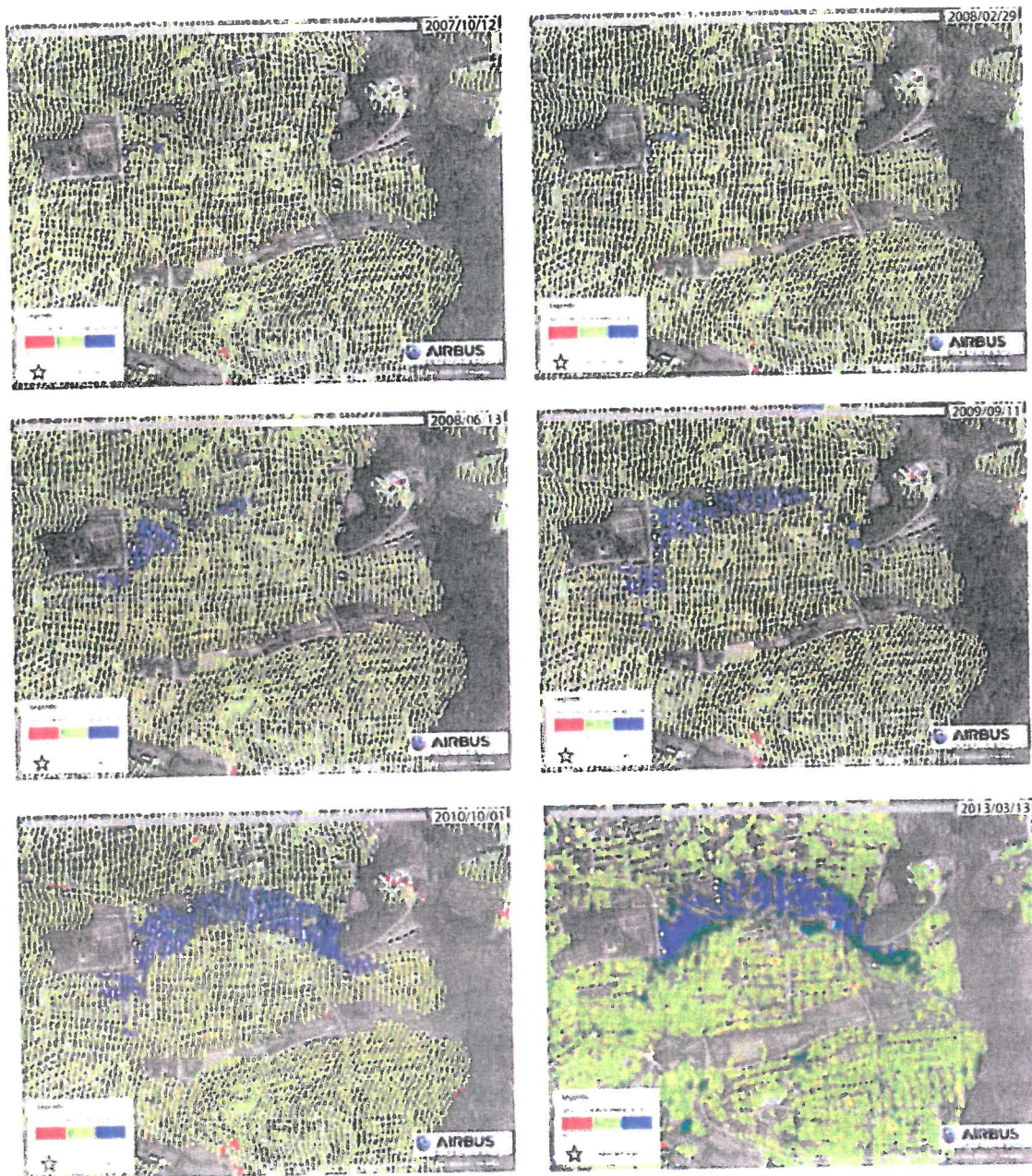


Abb. 4.24: Entwicklung der Hebungsfigur "Süd" zwischen Oktober 2004 und Oktober 2007 (Abbildung oben links) bis März 2013 (Abbildung unten rechts)

- Bis Oktober 2007 sind in erster Linie signifikante Hebungen im Umfeld des Hebungscentrums **[REDACTED]** zu verzeichnen.



- Bis Ende Februar 2008 haben sich weitere Hebungsbewegungen im Nahbereich des Hebungsentrums [REDACTED] akkumuliert und das Hebungsgebiet vergrößerte sich in nordöstlicher Richtung bis zur [REDACTED]
- Eine allseitig deutliche Vergrößerung erfährt das Hebungsgebiet bis Juni 2008 (in südwestlicher Richtung etwa bis südlich des Friedhofs). Insbesondere in nordöstlicher Richtung zeichnet sich eine starke Vergrößerung der Hebungsfigur ab. Diese verläuft südlich der EWS-Anlagen im [REDACTED] und erstreckt sich bis Juni 2008 etwa bis zur [REDACTED]
- Die räumliche Auswertung der Hebungsbewegungen bis September 2009 lässt den beginnenden Einfluss der EWS-Anlagen im [REDACTED] auf die Entwicklung der Hebungsfigur erkennen. Im östlichen Teil der Hebungsfläche (östlich der EWS-Anlagen im [REDACTED]) zeichnet sich eine deutliche Längen- und Breitenzunahme der Hebungsfigur ab. Im östlichsten Teil des Hebungsgebiets sind nun punktuell deutliche Hebungen bis [REDACTED] und [REDACTED] festzustellen. Hier zeigt sich zusehends eine Überlagerung der initialen Hebungen, welche durch das Hebungszentrum im [REDACTED] [REDACTED] ausgelöst wurden, durch die stärkeren Hebungsbewegungen infolge der Errichtung der EWS-Anlagen im [REDACTED]. Demgegenüber sind im westlichen Teil der Hebungsfigur (westlich der EWS-Anlagen im [REDACTED]), vor allem im Umfeld des südwestlichen Hebungsentrums [REDACTED] keine nennenswerten Flächenzuwächse der Hebungsfigur im Vergleich zur Auswertung vom Juni 2008 zu erkennen.
- In Abb. 4.24 zeigen die beiden letzten Darstellungen der Hebungsfigur vom Oktober 2010 und März 2013 eine sich weiter verstärkende Überlagerung der initialen Hebungsbewegungen, welche aus dem südwestlichen Hebungszentrum [REDACTED] ausstrahlen, durch den Hebungsimpuls aus dem zentralen Hebungszentrum im [REDACTED]. Dies führt vorzugsweise zu einer Vergrößerung der Hebungsfigur östlich der EWS-Anlagen im [REDACTED]. In geringerem Umfang vergrößert sich die Hebungsfigur im Nahbereich westlich der EWS-Anlagen im [REDACTED]. Im Gegensatz dazu verändert sich die Hebungsfigur im Umfeld des südwestlichen Hebungsentrums [REDACTED] nur unwesentlich.



In den nachfolgenden Prinzipskizzen in Abb. 4.25 ist die Entwicklung der Hebungsfigur ausgehend von den beiden Hebungsquellen ~~Hebungsquelle Nord~~ veranschaulicht.

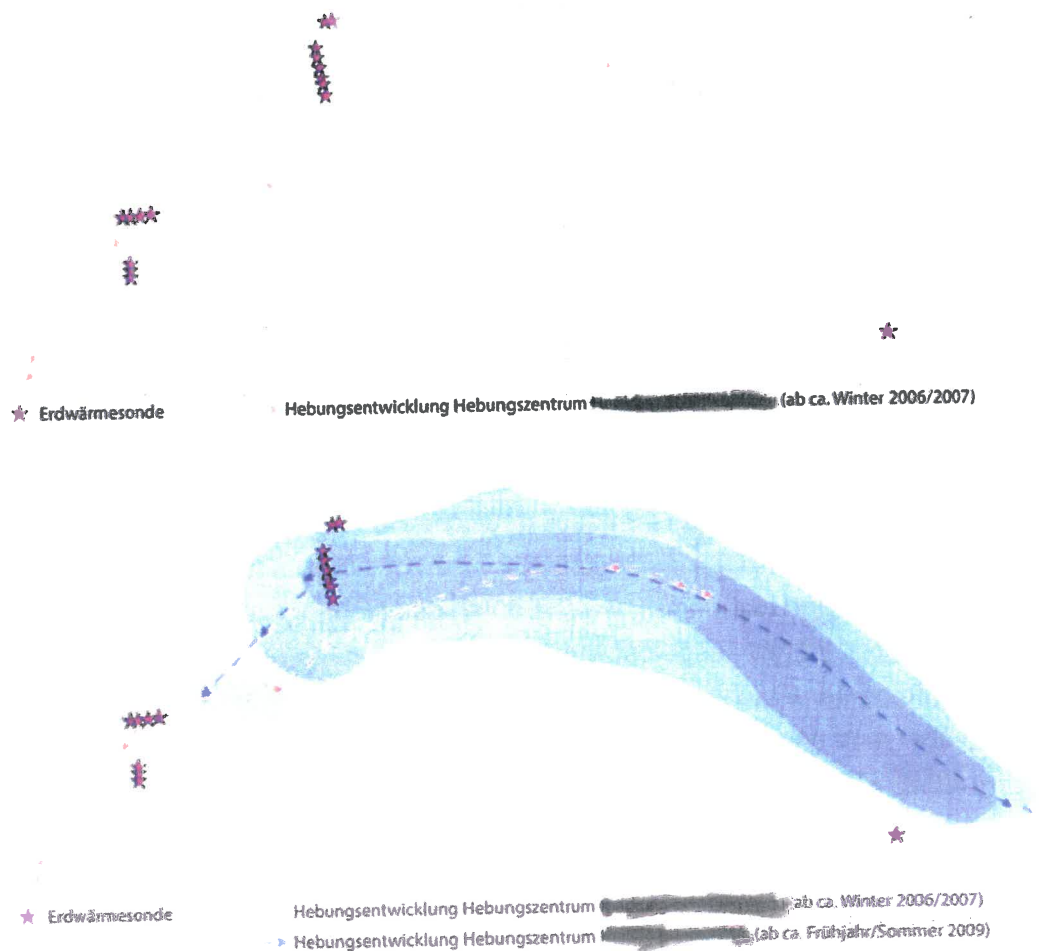


Abb. 4.25: Prinzipskizzen zur Entwicklung der Hebungsfigur "Süd".
Obere Abbildung: Entwicklung der Hebungsfigur durch Hebungsbewegungen aus dem Hebungszentrum ~~Hebungsquelle Nord~~
Untere Abbildung: Entwicklung der Hebungsfigur mit Überlagerung durch Hebungsbewegungen aus dem Hebungszentrum ~~Hebungsquelle Nord~~ und ~~Hebungsquelle Süd~~



4.4.4 Auswirkungen der Sanierungsmaßnahmen im Hebungsgebiet "Süd"

Die undichten Ringräume der Erdwärmesonden im [REDACTED] (zentrales Hebungszentrum) wurden ab dem 11.02.2015 bis zum 27.07.2015 nachträglich abgedichtet (vgl. Kap. 12). Die Abdichtung der Ringräume der Erdwärmesonden im [REDACTED] erfolgte zwischen dem 03.08.2015 und dem 07.12.2015 bzw. [REDACTED] ab dem 14.08.2017 bis zum 27.07.2018.

Geländemonitoring

Das LRA Böblingen beauftragte die Fa. Airbus Defence and Space damit, zur Auswertung der mittels dem Satelliten TerraSAR-X gemessenen Bodenbewegungen eine Internet-basierte Anwendung (Surface Movement Monitoring (SMM) WebGIS) einzurichten. Diese Web-Anwendung ermöglicht eine räumliche und zeitliche Auswertung von Vertikalbewegungen (Hebungen, Senkungen). Bis Redaktionsschluss liegen aufbereitete Daten des TerraSAR-X-Satelliten vom 25. Februar 2014 bis zum 27. Februar 2018 vor.

In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 4.26 bis Abb. 4.28) ist die Hebungsentwicklung von Februar 2014 bis Februar 2018 ausgewählter Reflektoren entlang der Längsachse der Hebungsfigur "Süd" von West nach Ost dargestellt. Die Abb. 4.26 bis Abb. 4.28 zeigen hierzu entsprechende Zeit-/Geländeveränderungsdiagramme wie folgt:

- In Abb. 4.26 wird der Hebungsverlauf im Umfeld des südwestlichen Hebungs-zentrums, beginnend am südwestlicher Rand des Hebungsgebiets "Süd" [REDACTED], in nordöstlicher Richtung folgend über das Hebungszentrum [REDACTED] zum Übergangsbereich [REDACTED] zwischen dem südwestlichen Hebungszentrum und dem zentralen Hebungszentrum ersicht-lich.
- Abb. 4.27 zeigt die Entwicklung der Hebungen im Bereich zwischen dem süd-westlichen Hebungszentrum [REDACTED] und dem Westrand des zentra-len Hebungsentrums [REDACTED].
- In Abb. 4.28 werden die Hebungen zwischen dem Westrand des Zentralen He-bungsentrums [REDACTED], dem zentralen Hebungszentrum

zum südöstlichen Rand des Hebungsgebiets "Süd" dargestellt.

Zusätzlich sind in den Abbildungen die Sanierungszeiträume der jeweiligen EWS-Anlagen sowie der vereinfachte lineare Hebungsverlauf (schwarz gestrichelte Linie) mit dem wahrscheinlichen Zeitpunkt der Verlangsamung dargestellt. Die hellgrau gestrichelten Linien zeigen einen möglichen Hebungsverlauf ohne Verlangsamung infolge der Sanierungen.

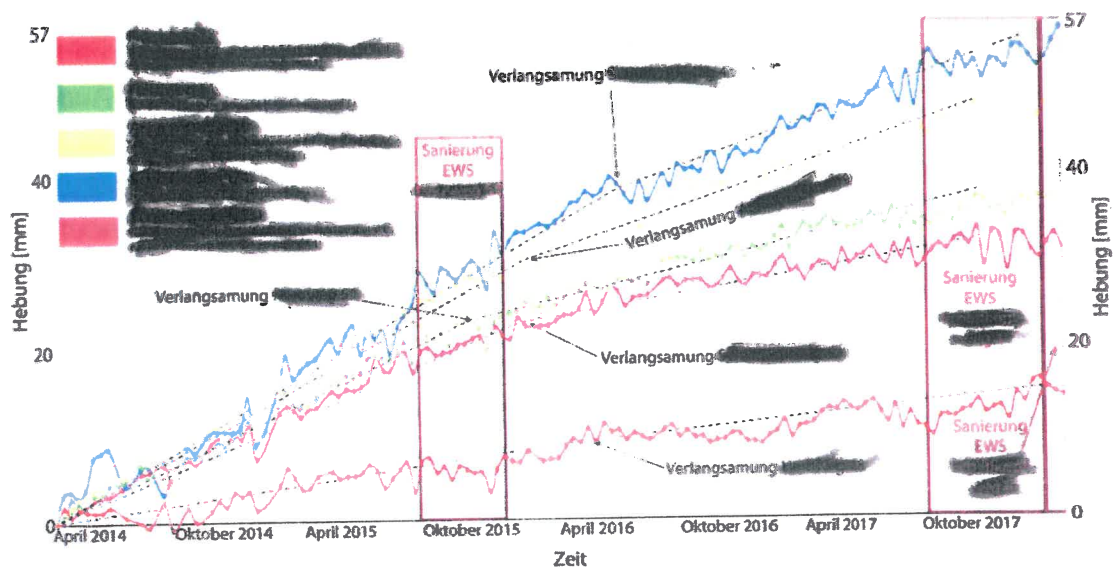


Abb. 4.26: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramme für ausgewählte Reflektoren im Bereich des südwestlichen Hebungscentrums

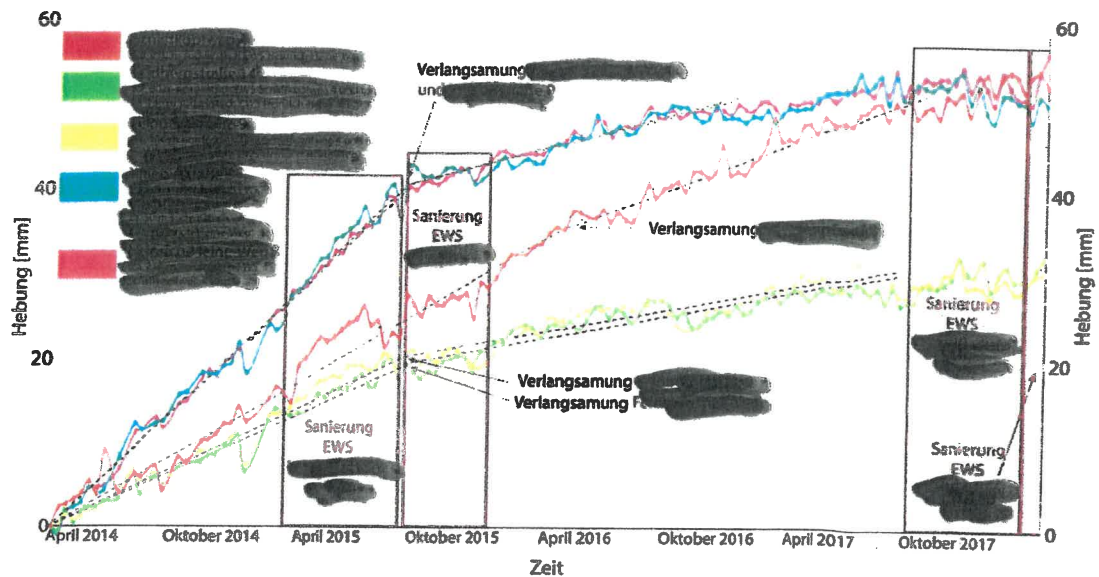


Abb. 4.27: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramme für ausgewählte Reflektoren im Bereich zwischen dem südwestlichen Hebungszentrum und dem Westrand des zentralen Hebungscentrums

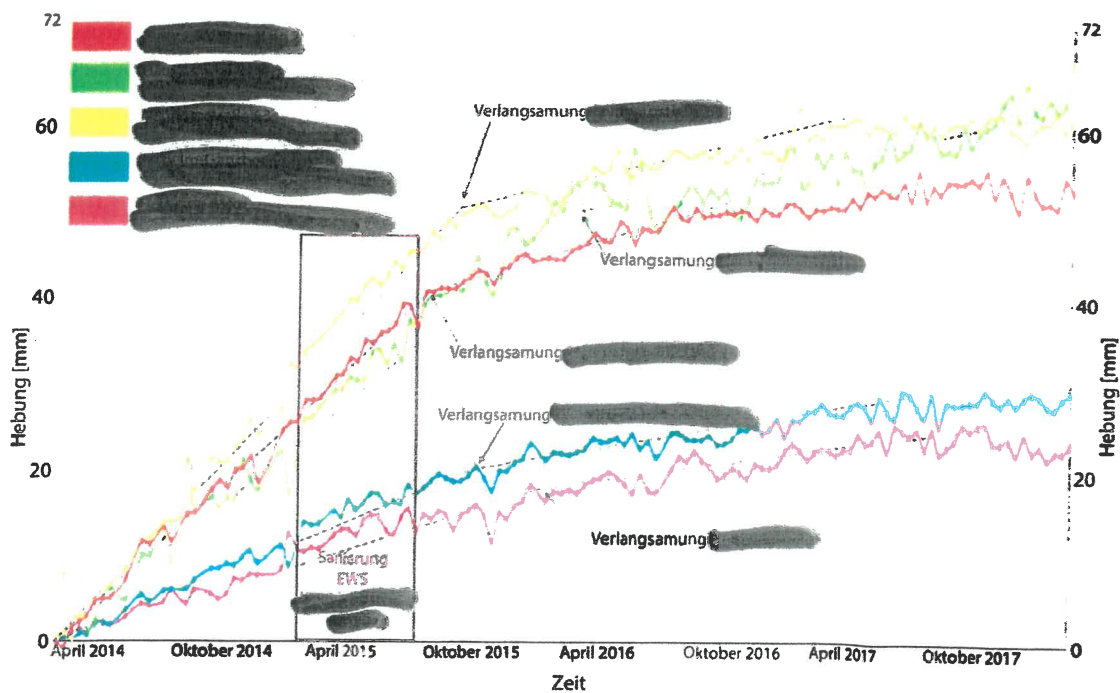


Abb. 4.28: Zeit-/Geländeveränderungsdiagramme für ausgewählte Reflektoren im Bereich zwischen dem Westrand des zentralen Hebungscentrums und dem südöstlichen Rand des Hebungsgebietes "Süd"



Insgesamt lassen die dargestellten Auswertungen eine sehr gute zeitliche und räumliche Korrelation zwischen der Durchführung der Sanierungsarbeiten und dem signifikanten Rückgang von Hebungsbewegungen erkennen.

Generell reagieren Reflektoren, die eine geringere Distanz zu undichten EWS-Bohrungen aufweisen, früher und mit einer stärkeren Verlangsamung der Hebungsgeschwindigkeit als weiter entfernt Gelegene. Im Nahbereich von undichten EWS-Bohrungen gelegene Reflektoren weisen demzufolge nach erfolgter Sanierung der EWS-Anlagen einen sehr starken "Knick" im Hebungsverlauf auf. Von in Randbereichen gelegenen Reflektoren zeigen die Hebungskurven hingegen eher eine allmähliche Verringerung der Hebungsgeschwindigkeit an und weisen annähernd liegende Parabelformen auf. Auch wird in den Abb. 4.26 bis Abb. 4.28 das Zusammenspiel sich überlagernder, weiterhin nahezu konstanter Hebungsraten (aufgrund bisher nicht sanierter EWS-Anlagen) und stark reduzierter Hebungsbewegungen (aufgrund erfolgreich durchgeführter Sanierungen im [REDACTED]) ersichtlich. Die durchgeführte, erst im April 2018 abgeschlossene Sanierung der EWS-Anlagen im Schliffkopfweg 4 und 6 bildet sich im Untersuchungszeitraum im Hebungsverlauf zwangsläufig noch nicht ab.

Nach Abb. 4.26 reagiert der ausgewählte Reflektor im [REDACTED] am schnellsten und stärksten auf die erfolgte Abdichtung der EWS-Anlagen im gleichen Grundstück. Dem gegenüber wirkt sich die erfolgte Sanierung dieser EWS-Anlage [REDACTED] deutlich später und schwächer am Reflektor im [REDACTED] (nordöstlich, in rund 50 m Entfernung zum [REDACTED]) aus. Das Hebungsdiagramm des Reflektors im [REDACTED] reagiert zwar mit einer Verlangsamung der Hebungsgeschwindigkeit auf die erfolgte Sanierung der EWS-Anlagen im [REDACTED], jedoch sind weiterhin starke Hebungsbewegungen zu verzeichnen. Diese sind auf die bis dahin nach wie vor undichten EWS-Anlagen im [REDACTED] zurückzuführen, die hier die induzierten Hebungsbewegungen aus dem [REDACTED] stark überlagern.

Die Abb. 4.27 (Hebungsbereich zwischen dem südwestlichen Hebungszentrum und dem zentralen Hebungszentrum) zeigt eine unmittelbare Verlangsamung der Hebungsbewegungen im [REDACTED] und in der [REDACTED] nach Abschluss der Sanierungsarbeiten im [REDACTED].

Die Hebungsbewegungen dieser, den EWS-Bohrungen nächst gelegenen Reflektoren nehmen von ca. 2,3 mm/Monat vor der Sanierung auf rund 0,6 mm/Monat nach



der erfolgten Sanierung ab. Im Gegensatz dazu wirkt sich die Abdichtung der EWS-Anlagen am Reflektor im Reflektor mit der größten räumlichen Distanz zu den EWS-Bohrungen im nicht aus. Hier bleiben die Hebungsraten nahezu noch konstant, wodurch sich im vierjährigen Zeitraum bis Februar 2018 auch größere Absoluthebungen aufsummieren als im dem Bereich mit nahezu zweifach größeren Hebungsbewegungen vor erfolgter Sanierung. In geringem Umfang macht sich hier lediglich die Sanierung der Bohrungen im bemerkbar (vgl. vorheriger Absatz).

Die Reflektoren in der befinden sich zwischen beiden Hebungscentren. Sie weisen zwischen April 2014 und August 2015 mit durchschnittlich ca. 1,2 mm/Monat geringere Hebungsraten auf als Reflektoren näher an den beiden Hebungscentren (südwestliches Hebungscentrum, zentrales Hebungscentrum). Auch ist die Verlangsamung der Hebungsraten infolge der Sanierungen im in der weniger stark ausgeprägt als in Bereichen näher am zentralen Hebungscentrum. Dies ist auf einen größeren Anteil an Hebungsbewegungen zurückzuführen, die durch die Undichtigkeiten der EWS-Anlagen im verursacht werden.

In Abb. 4.28 wird die eingangs erwähnte zeitliche und räumliche Korrelation zwischen der Durchführung der Sanierungsarbeiten der EWS-Anlagen im und dem signifikanten Rückgang von Hebungsbewegungen im östlich daran anschließenden Hebungsgebiet ersichtlich. Der Einfluss einer zunächst vermuteten weiteren potentiellen Hebungsquelle östlich des zentralen Hebungscentrums (d.h. in Quartier IV) lässt sich anhand der bisherigen Messergebnisse nicht bestätigen.

Aus vergleichbaren Schadensfällen (Staufen, Rudersberg, Böblingen "Nord") ist bekannt, dass ein Unterbinden der Wasserzufuhr zu einer Verlangsamung der Hebungsgeschwindigkeiten führt. Dies wird unmittelbar auf das eingeschränkte Dargebot an Reaktionswasser zurückgeführt, so dass dem Lösungs-/Fällungsprozess bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips letztlich nur noch das bereits in das quelfähige Gebirge eingedrungene Wasser zur Verfügung steht und noch umgesetzt wird. Diese Entwicklung lässt sich ebenfalls in Abb. 4.26 bis Abb. 4.28 nachvollziehen.



4.5 Zusammenfassung der Messergebnisse

Die angewandten Messmethoden ergeben ein in sich stimmiges Bild und bieten eine ausreichende Datenbasis zur Beurteilung der im Hebungsgebiet "Süd" aufgetretenen Geländeänderungen.

- Zusammenfassend handelt es sich bei dem Hebungsgebiet "Süd" um einen ca. 950 m in West–Ost und ca. 375 m in Nord–Süd messenden, angenähert sichelförmigen Bereich mit signifikanten Geländehebungen, der durch folgende Straßen bzw. Örtlichkeiten begrenzt ist. Die Grenzziehung basiert auf Grundlage von Airborne-Laser-Scans, geodätischen Feinnivellements, Auswertungen der Kanaldatenbank und der Radarinterferometrie:

Im Norden:

Im Nordosten:

Im Südosten:

Im Süden:

Südlichster Punkt

Im Südwesten:

Ca. 50 m südwestlich

Im Westen:

ca. 50–100 m westlich der

- Im Hebungsgebiet "Süd" haben sich infolge von Undichtigkeiten an EWS-Anlagen und daraus resultierenden Hebungsvorgängen in Folge des „Gips-keuperquellens“ zwei sich zeitlich und räumlich überlagernde Hebungszentren entwickelt:

Südwestliches Hebungszentrum: EWS-Anlagen

Zentrales Hebungszentrum: EWS Anlagen

- Das südwestliche Hebungszentrum ist nahezu ortsfest und befindet sich im östlich bis südlich angrenzenden Bereich der

- Die festgestellte Hebungsgeschwindigkeit hat im südwestlichen Hebungszen-
trum bis 1,8 mm/Monat (Radarinterferometrie) erreicht.
- Das zentrale Hebungszenrum umfasst den östlich der EWS-Anlagen im [REDACTED]
[REDACTED] gelegenen Bereich zwischen dem Wendehammer des [REDACTED]
[REDACTED] und der [REDACTED]
- Im zentralen Hebungszenrum betrug die gemessene Hebungsgeschwindigkeit
bis zu 3,1 mm/Monat (nach Radarinterferometrie) ggf. auch bis zu
4,8 mm/Monat (nach geodätischem Feinnivellement) erreicht.
- Die absoluten Hebungsbeträge seit Beginn der Hebungen betragen im süd-
westlichen Hebungszenrum etwa 24–25 cm und im zentralen Hebungszen-
trum rund 25–35 cm (jeweils Kanaldatenbank, Laser-ScanDifferenz + Extrapo-
lation bis Februar 2018). Zur Veranschaulichung der aufgelaufenen Hebungen
zwischen 2002 und Februar 2018 wurden die verfügbaren Datensätze des Air-
borne-Laser-Scanning (2002 bis Januar 2014) sowie der Radarinterferometrie
(Februar 2014 bis Februar 2018) addiert in Abb. 4.29 (Südansicht) und in
Abb. 4.30 (Nordansicht) mit jeweils 250-facher Überhöhung in einem 3D-
Modell dargestellt.

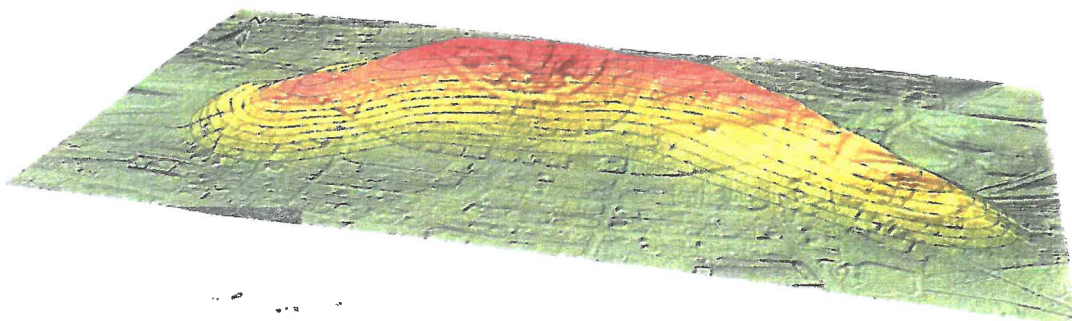


Abb. 4.29: Dreidimensionale Südansicht des Hebungsgebietes "Süd" bei 250-facher Überhöhung

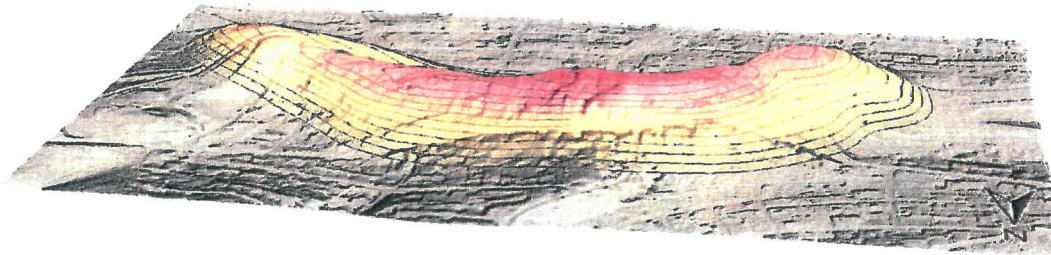


Abb. 4.30: Dreidimensionale Nordansicht des Hebungsgebietes "Süd" bei 250-facher Überhöhung

- Das südwestliche Hebungszenrum befindet sich im Bereich der EWS-Bohrungen im [REDACTED], in deren unmittelbar räumlichen Beziehung. Das zentrale Hebungszenrum liegt am südöstlichen Rand des Wendehammers [REDACTED] 75 m östlich bis südöstlich der EWS-Bohrungen [REDACTED]. Der geringe Versatz des zentralen Hebungszenrums vom Ort der Bohrungen lässt sich auf Grund vorhandener Inhomogenitäten des Gebirges und der daraus resultierenden unterschiedlichen Wasserverteilung erklären. Zwischen beiden Hebungszenren weist die Hebungsfigur eine Einschnürung mit einer dazwischen ausgebildeten Muldenstruktur aus.
- Weiterhin besteht zwischen Ausführung der Bohrungen und Beginn der Hebungen ein eindeutiger zeitlicher Zusammenhang. Dieser ergibt sich aus den Auswertungen von verschiedenen Satellitendaten.
- Ebenfalls in eindeutiger zeitlicher Korrelation nehmen die Hebungsgeschwindigkeiten im Hebungsgebiet "Süd" seit den an den Erdwärmesonden durchgeführten Sanierungen ab. Seither kommt es auch zu einer deutlichen Verkleinerung des Hebungsgebietes.
- Ein Ende des Hebungsvorganges setzt voraus, dass sämtliches in den quellfähigen Gebirgsabschnitt eingedrungenes Wasser durch den Umwandlungsprozess Anhydrit in Gips umgesetzt ist und kein weiteres Wasser mehr Zutritt. Nachdem nicht bekannt ist, wieviel Wasser in den quellfähigen Gebirgsabschnitt eingedrunnen ist, können auch keine abschließenden Angaben zum Ende des Quellhebungsprozesses abgegeben werden.



- Aus Sicht des LGRB sollten die entsprechenden Messungen, insbesondere der Radarinterferometrie, fortgesetzt werden. Zur Ermittlung von Horizontalbewegungsentwicklungen empfiehlt das LGRB zusätzlich ein umfangreiches geodätisches Messpunktenetz anzulegen.

5 Schadensbild

Am 04.09.2018 hat das LGRB eine Ortsbegehung zur Erhebung des Rissmusters in asphaltierten Straßen, in Grundstücksmauern und an Gebäuden vorgenommen. In den nachfolgenden Abb. 5.1 bis Abb. 5.3 sind die dabei gewonnenen Erkenntnisse (Verformungen und Risse von wenigen Millimetern bis drei Zentimetern) graphisch dargestellt. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird dabei nicht erhoben. Die interpolierte Hebungsfigur (Absoluthebungen von ≥ 100 mm zwischen 2002 (Erstellung des hochauflösenden Digitalen Geländemodells Baden-Württemberg = Ausgangs-DGM) und Februar 2018) wurde durch Addition der beiden Hebungsfiguren (Abb. 4.1, Hebungen zwischen 2002 und Januar 2014; Abb. 4.8, Hebungen zwischen Februar 2014 und Februar 2018) ermittelt. Absoluthebungen von weniger als 50 mm in dieser Zeitspanne wurden nicht räumlich abgegrenzt. Zusätzlich sind die Flurstücke der bis 15.07.2015 beim LRA Böblingen eingegangenen Schadensmeldungen farblich hervorgehoben.

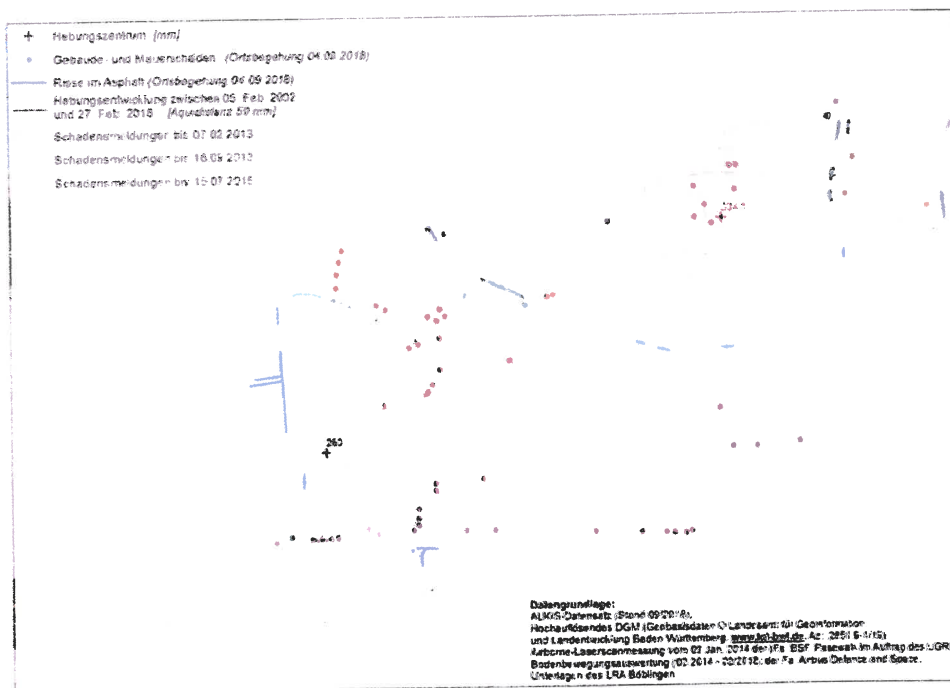


Abb. 5.1: Interpolierte Absoluthebungen von 2002 (Ausgangs-DGM) bis Februar 2018 und Schadensverteilung im südwestlichen Teil des Hebungsgebietes "Süd"

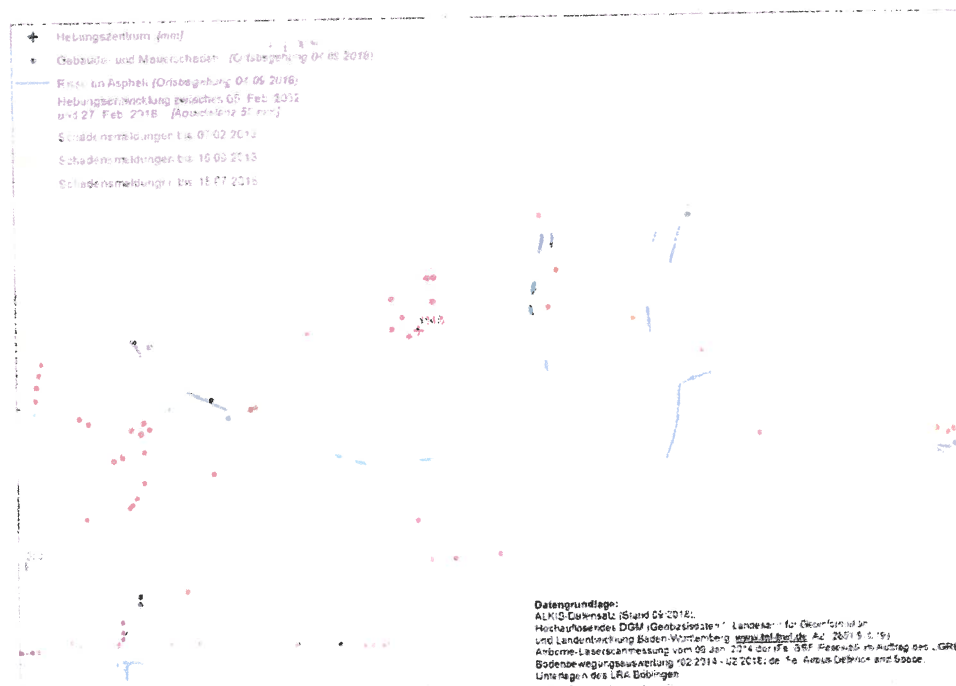


Abb. 5.2: Interpolierte Absoluthebungen von 2002 (Ausgangs-DGM) bis Februar 2018 und Schadensverteilung im zentralen Teil des Hebungsgebietes "Süd"

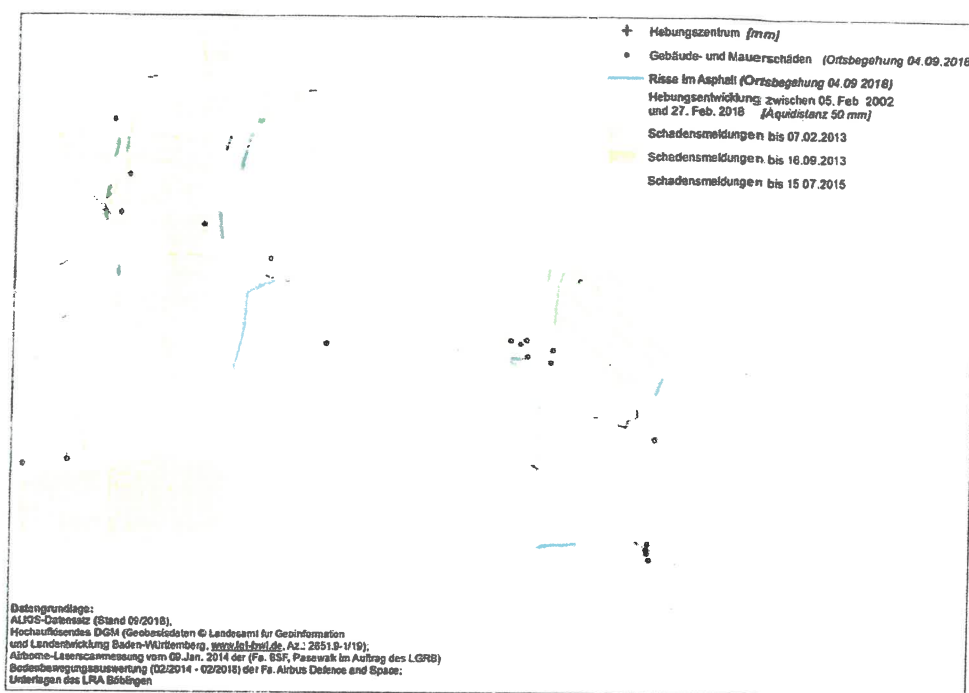


Abb. 5.3: Interpolierte Absoluthebungen von 2002 (Ausgangs-DGM) bis Februar 2018 und Schadenverteilung im südöstlichen Teil des Hebungsgebietes "Süd"

Besonders große Schäden sind im Übergangsbereich [REDACTED] zwischen den beiden Hebungscentren entstanden. Dies ist vermutlich auf eine stärker ausgeprägte Belastung/Winkelverdrehung der Gebäudestrukturen zurückzuführen als in anderen Bereichen der Hebungsfigur "Süd". Dieser zwischen den beiden Hebungscentren (südwestliches Hebungscentrum, zentrales Hebungscentrum) gelegene Bereich erfuhr zunächst einen initialen Hebungsimpuls aus südwestlicher Richtung (südwestliches Hebungscentrum), welcher später durch deutlich ausgeprägtere Hebungsbewegungen aus nordöstlicher Richtung überlagert wurden (s.o.). Ein weiterer Bereich mit konzentriert auftretenden Schäden befindet sich im [REDACTED] dem zentralen Hebungscentrum mit den größten Absoluthebungen von bis zu 33,5 cm. Auch gingen aus diesen beiden Gebieten die ersten Schadensmitteilungen beim LRA Böblingen ein. Flurstücke mit beim LRA Böblingen angezeigten Schäden sowie während der Ortsbegehung am 04.09.2018 aufgenommene Schäden befinden sich auch außerhalb der abgegrenzten Hebungsfigur in deren näheren Umfeld.

Das während der Ortsbegehung aufgenommene Rissmuster sowie der Verlauf von Risscharen lassen sich zum Teil mit der Hebungsfigur - parallel zu den Isohypsen der Hebungsfigur - in Einklang bringen. Häufig verlaufen die entstandenen Hebungs-



risse jedoch parallel zur Straße. Vermutlich sind durch den Asphaltierungsprozess parallel zur Fahrtrichtung orientierte Schwächezonen entstanden, die nun bevorzugt aufreißen. In weiten Teilen wurde der Straßenbelag zwischenzeitlich erneuert und ein vormalig ausgebildetes Rissemuster damit beseitigt.

6 Erkundungsmaßnahmen

6.1 Erkundungsbohrung B2a

Im Zeitraum vom 19.05.2015 bis 20.08.2015 erfolgte in Böblingen die geologische Erkundung der Untergrundverhältnisse im Bereich der Erdwärmesonden im Hebungsgebiet "Süd".

Mit der 162,8 m tiefen, zum Schutz vorhandener Grundwasserstockwerke temporär zweifach teleskopierten Kernbohrung B2a sowie den dabei vorgenommenen Begleituntersuchungen konnte ein belastbarer geologischer, mineralogischer und hydrogeologischer Datensatz gewonnen werden, um die in Kapitel 2 beschriebene Arbeitshypothese zu überprüfen, sowie parallel zu den Erkundungen geeignete Maßnahmen zur Schadensbegrenzung bewerten und einleiten zu können. Nachdem der Quellhebungsprozess im Hebungsgebiet "Süd" noch anhält, wurde die Erkundungsbohrung B2a aus Sicherheitsgründen rückbaufähig ausgebaut. Nach Abschluss der Erkundungsmaßnahme und einer genügend langen Aufzeichnung von Grundwasserstandsdaten wird das Bohrloch der B2a nach Ziehen der eingebauten Sperrrohre und einem sorgfältigen Beräumen des Bohrloches vollständig mit Ton abgedichtet werden.

Die Untersuchungsmaßnahmen wurden vom LRA Böblingen, insbesondere durch das vom LRA Böblingen beauftragte Ingenieurbüro VEES|PARTNER sowie vom LGRB fachtechnisch begleitet.

Die im Zuge der Erkundungsbohrung angefallenen Bohrproben wurden im mineralogisch-petrographischen Labor des LGRB analysiert (s. u.). Insgesamt wurden 146 Kernstückproben untersucht. Die Laborergebnisse sind in den Anl. 8.1 und 8.2 (zusammen mit dem Bohrprofil) synoptisch dargestellt.



Die Ergebnisse der Erkundungsmaßnahmen werden im Folgenden beschrieben.

6.1.1 Stammdaten, Ausbauhinweise

Die Fa. Heinz Burkhardt GmbH & Co. KG, Neuweiler, hat im Auftrag des LRA Böblingen die Erkundungsbohrung B2a im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen abgeteuft. Der Bohrpunkt der B2a wurde gewählt, um einerseits im gemessenen Hebungsgebiet "Süd" zu liegen und um andererseits noch einen engeren Bezug zu den Erdwärmesonden [REDACTED] aufzuweisen. Ferner mussten bei der Wahl des Bohrstandorts infrastrukturelle Sachzwänge (z. B. Leitungen, Zufahrten) berücksichtigt werden.

Im Lageplan der Abb. 5.1 sind der Bohransatzpunkt der Erkundungsbohrung B2a, der zusätzlich eingerichteten Grundwassermessstellen B2, B2b und B3 (s. u.) zusammen mit den dort vorhandenen Erdwärmesonden eingetragen. Ferner wurden im Osten des Hebungsgebiets "Süd" eine Erkundungsbohrung/Grundwassermessstelle B4 eingerichtet. Die Stammdaten zur Erkundungsbohrung B2a sind in Tab. 6.1 zusammengestellt.



Abb. 6.1: Lageplan der Erkundungsbohrungen B2a, der begleitend errichteten Grundwassermessstellen B2, B2b, B3 und B4 sowie der Erdwärmesonden (rot) im Quartier II und Quartier III des Hebungsgebiets "Süd"

Tab. 6.1: Stammdaten der Erkundungsbohrung B2a und der begleitenden Grundwassermessstellen im Zuge der Erkundung im Hebungsgebiet "Süd"

Bohrungsbezeichnung LGRB-ARNUM	Lagebeschreibung
B2a 7320-2240	vor Gebäude [REDACTED]
B2 7320-2213	vor Gebäude [REDACTED]
B2b 7320-2214	vor Gebäude [REDACTED]
B3 7320-2259	[REDACTED]
B4 7320-2262	hinter Gebäude [REDACTED]



Bohrungsbezeichnung LGRB-ARNUM	Rechts Gauss-Krüger	Hoch Gauss-Krüger	Ansatz m NN	Endteufe m
B2a 7320-2240	35 02 064	53 94 130	474,62	162,75
B2 7320-2213	35 02 103	53 94 211	483,08	30,80
B2b 7320-2214	35 02 105	53 94 211	483,08	20,00
B3 7320-2259	35 01 905	53 93 980	464,97	31,50
B4 7320-2262	35 02 596	53 93 899	467,94	40,00

Bohrungsbezeichnung LGRB-ARNUM	Bohraufnahme erfolgt durch:	Erkundungstiefe bis zur stratigraphischen Einheit	GW-Messstellenausbau
B2a 7320-2240	LGRB	Oberer Muschelkalk	Oberer Muschelkalk
B2 7320-2213	VEES PARTNER	Grabfeld-Formation	Grabfeld-Formation
B2b 7320-2214	VEES PARTNER	Stuttgart-Formation	Stuttgart-Formation
B3 7320-2259	VEES PARTNER	Grabfeld-Formation	Grabfeld-Formation
B4 7320-2262	VEES PARTNER	Grabfeld-Formation	Grabfeld-Formation

Erkundungsbohrung B2a

Nach Fertigstellung der Baustelleneinrichtung konnte am 18. Mai 2015 mit den Bohrarbeiten der Erkundungsbohrung B2a begonnen werden. Dabei wurde bis 5,8 m Tiefe im Rammkernbohrverfahren (\varnothing 178 mm) und bis 162,8 m Tiefe im Seilkernbohrverfahren (SK 6 L, \varnothing 152 mm bis 131,6 m, \varnothing 146 mm bis 162,8 m) bei annähernd vollständigem Kerngewinn gebohrt. In der unten stehenden Tabelle (Tab. 6.2) sind die bohrtechnischen Eckdaten zusammengefasst, welche den Bohr- und Ausbaufortschritt der B2a bestimmten.

Tab. 6.2: Bohrtechnische Eckdaten beim Abteufen der B2a

• Kernbohrung im Ramm- / Rotationskernbohrverfahren (\varnothing 178 / 152 / 146 mm) bis 162,75 m Tiefe
• Einsatz von inhibierter Spülung in sulfathaltigem Gebirge zwischen 17,4 m und 129,85 m Tiefe
• Aufbohren des Bohrlochs mit Rollenmeißel bis 57,0 m (\varnothing 600 mm) bzw. 127,5 m (\varnothing 444 mm) Tiefe
• Einbau von Stahl-Sperrohren in 57 m und 127,5 m Tiefe (\varnothing 473 / 324 mm) und Hinterfüllung mit Quellton oder inhibierter Spülung oberhalb der Fußabdichtung
• Aufbohren des Bohrlochs mit Rollenmeißel (\varnothing 273 mm) nach Erreichen der Endtiefe in 162,75 m und anschließender Ausbau zur temporären 5"-Messstelle im Oberen Muschelkalk (Filterstrecke von 146,5 m bis 162,75 m)

Im Bereich einzelner Grundwasserhorizonte sowie im Quellungsbereich der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) wurde das Bohrloch mit dem (Stufen-) Rollenmeißel entsprechend aufgeweitet und mit zwei Sperrohren temporär teleskopiert ausgebaut (Tab. 6.3), um die hydrogeologische Stockwerkstrennung beim Bohren aufrecht zu erhalten. Die einzelnen Rohrtouren wurden mit Quellton als Fußabdichtung und die 2. Sperrverrohrung darüber mit inhibierter Bohrspülung hinterfüllt.

Tab. 6.3: Zusammenstellung der in der B2a eingebauten Sperrohr Touren

1. Sperrrohr bis	57,0 m	Bohrloch \varnothing 600 mm	Sperrohrtour \varnothing 473 mm
2. Sperrrohr bis	127,5 m	Bohrloch \varnothing 444 mm	Sperrohrtour \varnothing 324 mm
3. Messstellenausbau	162,75 m	Bohrloch \varnothing 273 mm	Hart-PVC \varnothing 125 mm (5")

Wie in der Ausschreibung vorgesehen, wurde oberhalb des Gipsspiegels mit Klarwasser gespült, ab Erreichen des Gipsspiegels durfte im gesamten Abschnitt des Sulfatgebirges (d. h. bis zum Einbau des 2. Sperrrohres) ausschließlich mit inhibierter Bohrspülung gearbeitet werden. Die inhibierte Bohrspülung besteht aus Trinkwasser



mit organischen und mineralischen Zusätzen (vgl. Tab. 6.4). Mit dem Einsatz der inhibierten Bohrspülung wurde einer unerwünschten Auslaugung von Sulfatgestein sowie einem eventuellen Quellen quellfähiger Tonminerale vorgebeugt. Die Spülungsqualität wurde während der Bohrarbeiten regelmäßig kontrolliert und bedarfsweise nachgebessert.

Tab. 6.4: Zusätze und Parameter der inhibierten Bohrspülung

Inhibierte Bohrspülung	
PacElv CMC Carboxymethylcellulose	30 kg/m³
KaliumCarbonat (Degussa)	60 kg/m³
Zitronensäure (wegen pH-Wert) ohne Bentonit-	
Zusatz	2,5 kg/m³
Spüldichte	ca. 1,10 g/cm³
pH	ca. 10,0
Leitfähigkeit LF	ca. 55000 µS/cm

Im nachfolgenden Bauzeitenplan (Tab. 6.5) sind auf Grundlage des Geotechnischen Berichts des Büro VEES|PARTNER (Anl. 11) die jeweiligen Maßnahmen (Bohrarbeiten, hydraulische oder bohrlochgeophysikalische Tests, Ausbauarbeiten) bei Herstellung und Ausbau der B2a zusammengestellt.

Tab. 6.5: Bauzeitenplan der B2a (nach Geotechnischem Bericht VEES|PARTNER, Anl. 11)

Zeitraum	ausgeführte Maßnahmen
19.05.–20.05.2015	Kernbohrung bis 21,3 m, Einsatz Einfachkernrohr Ø 178 mm (EK) bis 5,4 m, darunter Seilkernrohr Ø 152 mm (SK) mit Wasserspülung ab 5,4 m Tiefe, oberer Gipsspiegel makroskopisch bei 17,4 m erkennbar.
20.05.–12.06.2015	Kernbohrung bis 63,3 m unter Einsatz von inhibierter Bohrspülung ab 17,4 m Tiefe; Geophysikalische Messungen/Tests durch Fa. terratec und Büro Voutta bis 63,3 m; Spülwasserverluste/nachbrüchige Bohrlochwand zwischen 27 m – 38 m; Aufzementation des Bohrloches von 63,3 m bis 27,9 m; analytischer Nachweis oberer Anhydritspiegel bei 58,5 m durch LGRB.
15.06.–18.06.2015	Einbau temporärer Standverrohrung bis 5,1 m; Aufbohren des Bohrloches Ø 600 mm bis 26,8 m; starke Spülwasserverluste festgestellt.
19.06.–22.06.2015	5 m³ sulfatbeständiger Beton von 26,8 m bis 11,5 m Tiefe eingebracht; weiteres Aufbohren des Bohrloches Ø 600 mm bis 29,0 m; erneut starke Spülwasserverluste festgestellt.



Zeitraum	ausgeführte Maßnahmen
23.06.–24.06.2015	5 m³ sulfatbeständiger Beton von 28,8 m bis 12,6 m Tiefe eingebracht; weiteres Aufbohren des Bohrloches Ø 600 mm bis 31,6 m; erneut starke Spülwasserverluste festgestellt.
25.06.–29.06.2015	5 m³ sulfatbeständiger Beton von 31,4 m bis 14,8 m Tiefe eingebracht; weiteres Aufbohren des Bohrloches Ø 600 mm bis 43,8 m unter anhaltenden Spülwasserverlusten.
30.06.–02.07.2015	Weiteres Aufbohren des Bohrloches Ø 600 mm bis 57,0 m ohne weitere Spülwasserverluste; Einbau 1. Sperrrohr Ø 473 mm bis 57,0 m; Einfüllen Quellton zwischen Sperrrohr und Bohrlochwand bis 16,6 m.
03.07.–15.07.2015	Kernbohrung bis 131,6 m (inhibierte Spülung), zur Zentrierung und Abdichtung Hilfsverrohrung Ø 178 mm mit Abstandshaltern auf 57,0 m eingebaut und unterste 5 m mit Quellton hinterfüllt; Geophysikalische Tests durch Fa. terratec und Büro Voutta bis 131,6 m; Grenze Grabfeld-Formation zu Erfurt-Formation nach Geländeansprache bei 125,45 m festgestellt; Wasserstände zwischen den einzelnen Verrohrungen regelmäßig kontrolliert.
16.07.–30.07.2015	Zementation Kernbohrstrecke bis 120 m; Aufbohren des Bohrloches Ø 444 mm bis 127,5 m mit inhibierter Bohrspülung; Einbau 2. Sperrrohr Ø 324 mm bis 127,5 m mit Fußabdichtung zur Bohrlochwand (5 m Quellton unter Packer), darüber inhibierte Spülung bis ca. 5 m Tiefe im Ringraum zwischen den Sperrrohren eingebaut.
31.07.–11.08.2015	Kernbohrung Ø 146 mm bis 162,75 m (Klarwasserspülung), zur Zentrierung und Abdichtung Hilfsverrohrung Ø 178 mm mit Abstandshaltern auf 127,5 m eingebaut und unterste 5 m mit Quellton hinterfüllt; Geophysikalische Messungen/Tests durch Fa. terratec und Büro Voutta bis 162,75 m; Grenze Keuper-Muschelkalk nach Geländeansprache bei 145,52 m festgestellt.
12.08.–21.08.2015	Aufbohren des Bohrloches Ø 273 mm bis 162,75 m (Klarwasserspülung); Messstellenausbau 5", Filterstrecke 146,5 – 162,75 m (inkl. Gegenfilter); Räumen der Baustelle
21.08.– dato	Durchführung hydraulischer Langzeittests, dazu Einbau eines Datenloggers (Beobachtung Wasserstandsänderungen, Pumpversuch)



Die Grundwassermessstelle B2a wurde mit einem Datenlogger zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Wasserstandsänderungen ausgestattet.

6.1.2 Bohrtechnische Besonderheiten B2a

Das Abteufen der Bohrung B2a erfolgte im Zeitraum zwischen 18.05.2015 bis 21.08.2015.

Starke Spülungsverluste und eine nachbrüchige Bohrlochwand zwischen 27 m und 38 m unter Bohransatz erschwerten die Bohrarbeiten teilweise erheblich und machten eine dreimalige Aufzementation (insgesamt 15 m³ sulfatbeständiger Beton) des Bohrloches mit entsprechenden Aushärtungsphasen und anschließendem Wiederaufbohren erforderlich. Erst unterhalb von 43,8 m kam es zu keinen weiteren Spülungsverlusten und zu keinen weiteren Bohrerschwernissen mehr.

Zum Zeitpunkt der Berichtsvorlage und nach Abschluss aller begleitenden Untersuchungen wurde über den ordnungsgemäßen Rückbau der Bohrung B2a (mo-Grundwassermessstelle) entschieden. Dies beinhaltet den Rückbau des Messstellenausbaus, den Rückbau der Sperrrohre und das abschnittsweise Verfüllen des zuvor sorgfältig von Nachfall gesäuberten Bohrloches bis Geländeoberkante mit Quellton.

Die geologische Aufnahme der Bohrkern der Erkundungsbohrung B2a erfolgte vor Ort durch den betreuenden Geologen des Ingenieurbüro VEES|PARTNER sowie im Detail durch das LGRB. Das vom LGRB gefertigte geologische Schichtenverzeichnis der B2a ist dem Sachstandsbericht in Anl. 2.1 beigelegt.

Der Zwischen- und Endausbau der B2a kann der schematischen Darstellung in Abb. 6.2 entnommen werden.

Grobschematische Darstellung der Erkundungsbohrung B2a mit temporärem Ausbau

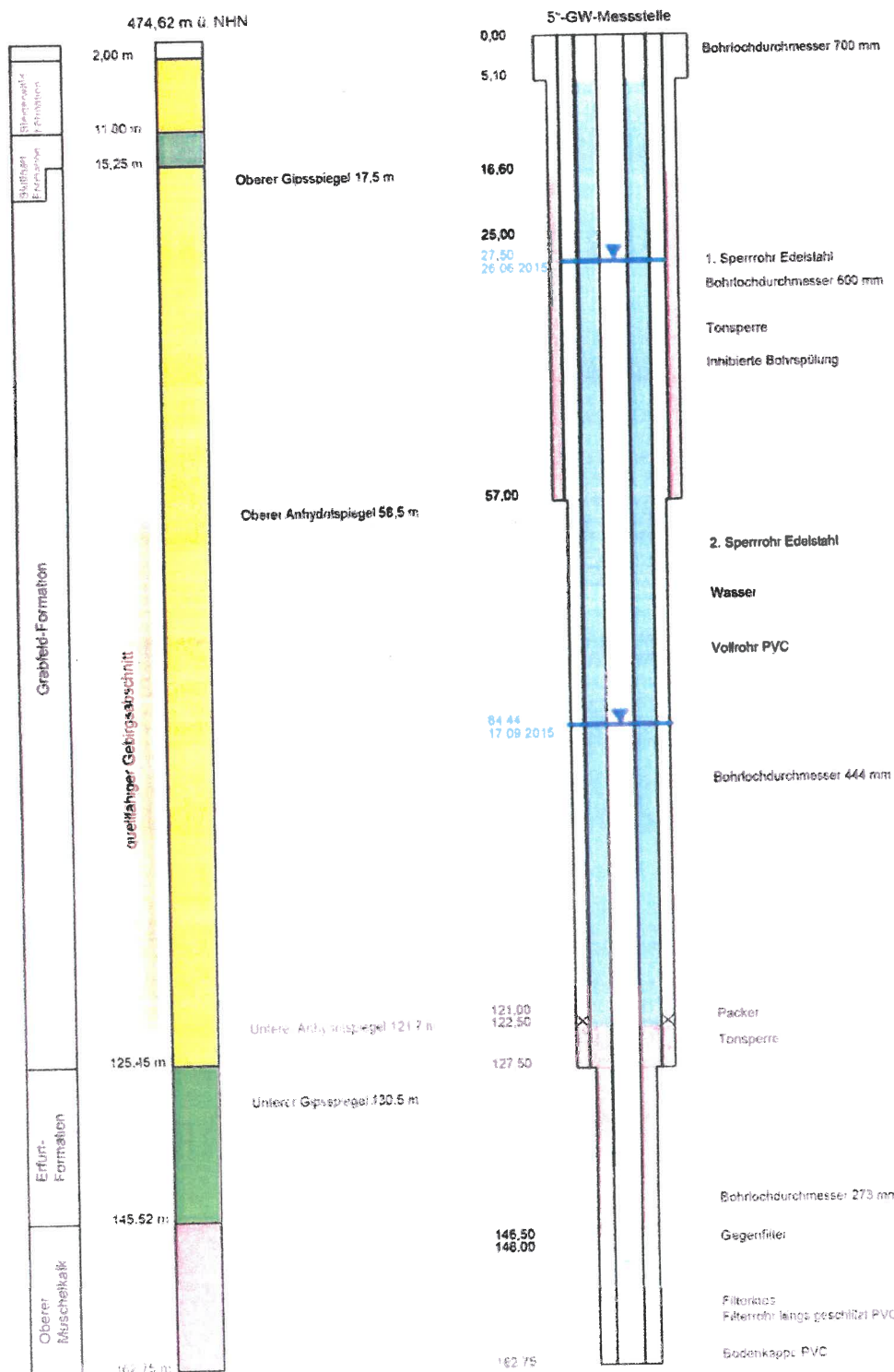


Abb. 6.2: Grobschematische Darstellung der Erkundungsbohrung B2a mit temporärem Ausbau zur Grundwassermessstelle



6.1.3 Geologische Schichtabfolge B2a

In Abb. 6.2 ist das Bohrprofil der Erkundungsbohrung B2a (graphische Darstellung mit geologischer Gliederung, der erkundeten GW-Druckpotenziale und Sulfatführung) vereinfacht dargestellt. Die Bohrkern-Fotodokumentation der Erkundungsbohrung B2a sowie die technische Ausbauzeichnung sind in Anl. 2 sowie in Anl. 2.1 beigelegt.

Die in der Bohrung B2a erbohrte geologische Schichtabfolge lässt sich im Einzelnen wie folgt untergliedern:

Tab. 6.6: Kurzprofil B2a

B2a (474,62 m NN) : Kurzprofil	
0 - 2,00 m:	Vorschacht, KA
- 11,00 m:	Steigerwald-Formation (Untere Bunte Mergel), kmSw
- 15,25 m:	Stuttgart-Formation (Schilfsandstein i. w. S.), kmSt
Grabfeld-Formation (Gipskeuper), kmGr	
- 31,70 m:	Graue Estheriensichten, kmGES
- 43,34 m:	Untere Bunte Estheriensichten, kmUBE
- 89,70 m:	Mittlere Grabfeld-Formation (Mittlerer Gipshorizont), kmGm
-105,00 m:	Dunkelrote Mergel, kmDRM
-109,88 m:	Bochingen-Horizont, kmBH
-125,45 m:	Grundgipsschichten, kmGI
Erfurt-Formation (Unterkeuper, Lettenkeuper) ku	
-125,85 m:	Grenzdolomit, kuD
-129,54 m:	Grüne Mergel, kuGRM
-129,66 m:	Böhringen-Sulfat, kuBS
-132,24 m:	Linguladolomit-Horizont, kuLd
-132,78 m:	Obere Graue Mergel, kuOGM
-134,33 m:	Anoplophoradolomite, kuAd
-135,50 m:	Untere Graue Mergel, kuUGM
-136,22 m:	Anthrakontbank, kuAk
-138,63 m:	Sandige Pflanzenschiefer, kuSPS
-139,00 m:	Albertibank-Horizont, kuHAB
-139,25 m:	Hauptsandsteinschichten, kuHSS



-143,66 m:	Estherienton, kuES
-145,52 m:	Basisschichten, kuB
Oberer Muschelkalk, moD/mo2	
-153,82 m:	Trigonodusdolomit, moD
-162,75 m:	Künzelsau-Schichten, moK

Nachstehend werden die charakteristischen Merkmale der erbohrten Schichtabfolge zusammengefasst:

Die Überdeckung durch **quartäre Deckschichten** ist am Bohrplatz insgesamt von nur sehr geringer Mächtigkeit.

Nach erfolgter Vorschachtung bis 2 m unter Bohransatz wurden bis in eine Tiefe von 124,45 m unter Bohransatz die Gesteinsabfolgen des Mittelkeupers erbohrt, die sich wie folgt untergliedern lassen:

Bis 11,00 m unter Bohransatz bestehen die Bohrkern aus wechselnd schluffigen Tonsteinen rotbrauner bis grüngrauer Färbung (**Rote Wand**), die stratigraphisch der **Steigerwald-Formation** (Untere Bunte Mergel) zugeordnet werden. Charakteristisch ist der an der Basis der Steigerwald-Formation entwickelte **Beaumont-Horizont**, der in B2a etwa 2,25 m mächtig ist. Eine etwa 0,50 m lange Kernverluststrecke deutet vermutlich auf eine ehemals vorhandene, inzwischen ausgelaugte Sulfatführung hin.

Bis 15,25 m setzt sich die Schichtenfolge mit der **Stuttgart-Formation** (Schilfsandstein i. w. S.) fort. Es handelt sich vorwiegend um graue und grüngraue Tonsteine (**Dunkle Mergel**). Nach unten folgt feinsandiger Tonstein und Tonstein, lagenweise mit gelblichen bis hellgrauen Sandflasern bis toniger Feinsandstein. Der Schilfsandstein ist ein typisches Rinnensediment, dementsprechend variieren dessen Schichtmächtigkeiten auf engem Raum in weitem Rahmen.

Die **Grabfeld-Formation** (Gipskeuper) setzt mit den **Grauen Estherienschiefern** ein, die sich bis 31,70 m Tiefe unter Bohransatz fortsetzen. In den Grauen Estherienschiefern beginnt die Sulfatführung der Grabfeld-Formation ab 17,54 m (**Oberer Gipsspiegel**), die als eine Wechsellagerung grauer Tonsteine mit verschiedenen mächtigen, teils knolligen weißen bis blassrosa Gipssteinlagen in Erscheinung tritt. In den Tonsteinen treten bereichsweise dünne weißliche, mitunter steilstehende Fasergipslagen auf.



Die **Untere Bunte Estheriensichten** sind mit grüngrauen wie auch dunkel violett bis grüngrau-fleckigen, teils marmorierten Tonsteinen mit mehrfach eingelagerten Dolomitbänken (z.B. 33,34 m–33,80 m = **Estherienbank**) vertreten. Der **Engelhofen-Horizont** (?) wird im Abschnitt zwischen 42,34 m und 43,34 m interpretiert. In den Unteren Bunten Estheriensichten treten hellrosa und weißliche Gipsknollen, ab 38,13 m dann verstärkt weißlich graue und graue, teils knollige Gipssteinlagen auf.

Die **Mittlere Grabfeld-Formation** (Mittlerer Gipshorizont) reicht insgesamt bis 89,7 m unter Bohransatz und besteht aus grüngrauem und rotvioletttem Tonstein im Wechsel von weißlich grauem und grauem Gipsstein und vereinzelt Dolomitsteinlagen. Millimeter-dünne, teils steilstehende weißliche Fasergipslagen haben ehemals vorhandene Klüfte verheilt. Der **Oberen Anhydritspiegel** wurde im mineralogisch-petrographischen Labor des LGRB bei 58,5 m analytisch ermittelt.

Der **Weinsberg-Horizont** setzt ab 87,6 m ein, setzt die Schichtenfolge bis 89,70 m unter Bohransatz fort und ist als dunkel grünlichgrauer Tonstein mit einzelnen Lagen aus dolomitischen Tonsteinen entwickelt. Die im Weinsberg-Horizont vielfach auftretende **Bleiglanz-Bank** war im Bohrkern der Bohrung B2a nicht ausgeprägt feststellbar.

In den darunter bis 105,00 m unter Bohransatz folgenden **Dunkelroten Mergel** dominieren violette, graugrüne Tonsteine im Wechsel mit Gips- und Anhydritstein oder einer Sulfatführung in Form von Gips- oder Anhydritknöllchen. Millimeter-dünne Klüfte sind mit weißlichen Fasergipslagen besetzt. Der Bohrkern ist zwischen 93,75 m und 93,90 m stückig zerlegt und zeigt reichlich Harnischflächen.

Der **Bochingen-Horizont** besteht bis 109,88 m unter Bohransatz aus einer Wechselagerung von grüngrauem Tonstein mit einer Sulfatführung aus Anhydritstein und untergeordnet aus Gipsstein und Fasergipslagen. Millimeter-dünne Klüfte sind mit weißlichen Fasergipslagen gefüllt.

Die **Grundgipsschichten** reichen bis 125,45 m unter Bohransatz und setzen mit den **Roten Grundgipsletten**, einem dunkelvioletten, graugrün gefleckten Tonstein ein, in dem einzelne graue Anhydritknollen vorkommen. Darunter folgt der **Plattengips** (Folge aus Ton- und Anhydritstein) und schließlich der **Felsengips**, welcher die Gesteins-



folge des Mittleren Keupers abschließt. In den Grundgipsschichten ist die Anhydritführung des Mittelkeupers mit dem **Unteren Anhydritspiegel** ab 121,7 m beendet.

In der Bohrung B2a fällt auf, dass an der Basis der Grundgipsschichten keine untere Auslaugungszone entwickelt ist, wie diese andernorts beobachtet werden konnte (z. B. EWS-Schadensfall Staufen). Nach der Kamerabefahrung sind jedoch gehäuft Schichtfugen an der Basis der Grundgipsschichten ausgebildet.

Die Gesteine der Erfurt-Formation (**Unterkeuper**) erstrecken sich bis in eine Tiefe von 145,52 m unter Bohransatz.

Der **Grenzdolomit** wurde in der Bohrung B2a als Gipsstein mit dolomitischen Flasen und Lagen bzw. als feinkörniger grauer bis gelblich grauer Dolomitstein erbohrt, dessen Basis bei 125,85 m unter Bohransatzpunkt liegt.

Die bis 129,54 m unter Bohransatz reichenden **Grüne Mergel** bestehen aus grün-grauem Tonstein, stark dolomitischem Tonmergelstein und an der Basis aus Dolomitstein mit Fasergipslagen. Darunter folgt bis 129,66 m unter Bohransatz weißlich grauer und weißer grauer Gipsstein (**Böhringen-Sulfat**).

Das Bohrprofil setzt sich mit den Dolomitsteinen und dünnen Tonsteinlagen des **Linguladolomit-Horizonts (Oberer und Unterer Linguladolomit)** bis 132,24 m unter Bohransatz fort. Darunter folgt bis 132,78 m grauer und grünlich grauer, z.T. schwach feinsandiger Tonstein der **Oberen Grauen Mergel**. Der im Anschluss bis 134,90 m erbohrte **Anoplophoradolomit-Horizont** ist durch feinkörnigen tonigen Dolomitstein, unten mit flasrigen Lagen aus Feinsandstein (Anaplophorasandstein) vertreten und darunter folgen bis 135,48 m dunkelgrauer Tonstein der **Unteren Grauen Mergel** sowie bis 136,22 m der graue bis gelblich graue feinkörnige Dolomitstein der **Anthra-konitbank**.

Der untere Abschnitt der Erfurt-Formation (Unterkeuper) wird zunächst vertreten durch dunkelgraue, teils dolomitische Ton-, Schluff- und Feinsandsteine. Dieser Abschnitt des Bohrprofils wird bis 138,63 m unter Bohransatz den **Sandigen Pflanzenschiefern** zugeordnet. Die **Albertibank** ist bis 139,00 m unter Bohransatz als grauer Dolomitstein ausgebildet. Darunter folgen bis 139,25 m die **Hauptsandsteinschichten** als feinsandigem Schluffstein und bis 143,66 m der **Estherienton**, welcher aus



dunkelgrauem, teils dolomitischem Tonstein und untergeordnet aus grauem Dolomit besteht.

Die Basisschichten der Erfurt-Formation (Unterkeuper) bilden bis 145,52 m die **Unteren Dolomite und dolomitischen Mergelschiefer**. Sie stellen eine Wechselfolge von grauen, teils tonigen, teils feinsparitischen Dolomitsteinen und schluffigen, teils dolomitischen Tonsteinen dar. Dolomitischer Kalkstein kommt zwischen 144,65 m und 144,90 m (**Blaubank**) vor. Die **Vitriolschiefer** (dunkelgrauer, schluffiger Tonstein) schließen die Schichtfolge der Erfurt-Formation (Unterkeuper) bei 145,52 m unter Bohransatz ab, das Grenzbonebed war nicht ausgebildet.

Der **Obere Muschelkalk** setzt das Profil zur Tiefe mit der Rottweil-Formation fort. Zuoberst liegen bis 153,82 m unter Bohransatz die grauen bis ockergrauen Dolomitsteine des **Trigonodusdolomits**. Bis zur Endteufe bei 162,75 m durchfährt die Bohrung die **Künzelsau-Schichten** (hier: Region der Terebratelbänke), welche durch einer Abfolge grauer bioklastischer Kalksteine vertreten sind.

In der nachfolgende Tab. 6.7 sind alle in B2a vom Büro Voutta in B2a während der Bohrarbeiten und danach ausgeführten hydraulischen Versuche in ihrer zeitlichen Abfolge zusammengestellt.

Tab. 6.7: Übersicht über die hydraulischen Versuche in B2a

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



In der nachstehenden Tab. 6.8 sind die aus den oben aufgeführten Versuchen abgeleiteten hydraulischen Kennwerte (Transmissivität T, Durchlässigkeitsbeiwert k) aufgeführt.

Tab. 6.8: Hydraulische Kennwerte ermittelt in B2a

Versuchstyp	Bohrtiefe	Geologie	Transmissivität T (m ² /s)	Durchlässigkeitsbeiwert k (m/s) bei Intervall M
Packerpumpversuch	38,0 m	km1	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$ bei M = 12 m
Pulsetest	51,4 m	km1	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$ bei M = 6,4 m
Pulsetest	51,4 m	km1	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$ bei M = 12,4 m
Pulsetest	57,4 m	km1	$3,7 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{-9}$ bei M = 6,4 m
Pulsetest	63,4 m	km1	$8,0 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$ bei M = 6,4 m
Pulsetest	84,8 m	km1	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-10}$ bei M = 21,3 m
Pulsetest	106,0 m	km1	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-11}$ bei M = 22,0 m
Pulsetest	132,0 m	ku	keine Auswertung möglich	keine Auswertung möglich
Packerpumpversuch	145,0 m	ku	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$ bei M = 12,0 m
Packerpumpversuch	163,0 m	mo	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$ bei M = 19,0 m
Packerpumpversuch	163,0 m	mo	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$ bei M = 13,0 m

Die Ergebnisse der hydraulischen Versuche im Einzelnen sind in Anl. 5 beigelegt.

Darüber hinaus wurden in der Bohrung B2a seitens der Fa. terratec sowie durch das Büro Voutta geophysikalische Bohrlochmessungen vorgenommen. Die Berichte zu diesen Messungen sind in Anl. 4.1.1 und Anl. 4.1.2 beigelegt.

6.2 Begleitende Grundwassermessstellen B2, B2b, B3 und B4

Etwa 100 m nordnordöstlich (Luftlinie) der Erkundungsbohrung B2a wurden zur Beobachtung der Grundwasserstände in den überlagernden Grundwasserstockwerken vor dem Gebäude [REDACTED] eine 5"- Grundwassermessstelle B2 in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) sowie eine weitere 5"- Grundwassermessstelle B2b in der Stuttgart-Formation (Schilfsandstein) hergestellt. Ferner wurde [REDACTED] sowie [REDACTED] je eine 5"- Grundwassermessstelle in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) eingerichtet. Bei diesen Bohrungen handelt es sich sowohl um Kernbohrungen (B2, B3 und B4) als auch bei bereits bekannter Geo-



logie um eine Spülbohrung (B2b). Die Stammdaten dieser Grundwassermessstellen sind in Tab. 6.1 angegeben. Die jeweiligen Bohrprotokolle, Bohrkernfotos und Ausbauschemata sind dem Sachstandsbericht als Anl. 2.2 bis 2.5 beigelegt.

In der nachstehenden Tab. 6.9 sind die Kurzprofile der als begleitende Grundwassermessstellen ausgebauten Bohrungen zusammengefasst.

Tab. 6.9: Geologische Kurzprofile B2, B2b, B3 und B4

B2 (483,08 m NN): Kurzprofil	
0 - 0,50 m	Auffüllung
-12,00 m	Steigerwald-Formation (Untere Bunte Mergel), kmSw
-20,40 m	Stuttgart-Formation (Schilfsandstein i.w.S.), kmSt
-30,60 m	Graue Estherienschichten, kmGES
B2b, als ergänzende Spülbohrung unmittelbar neben B2 gelegen.	
B3 (464,97 m NN): Kurzprofil	
0 - 2,80 m	Auffüllung
- 7,70 m	Stuttgart-Formation (Schilfsandstein i.w.S.), kmSt
-10,80 m	Obere Bunte Estherienschichten kmOBE
-23,50 m	Graue Estherienschichten, kmGES
-24,70 m	Estherienbank, kmEb
-31,50 m	Untere Bunte Estherienschichten, kmUBE
B4 (467,94 m NN): Kurzprofil	
0 - 0,80 m	Auffüllung
-14,00 m	Steigerwald-Formation (Untere Bunte Mergel), kmSw
-20,25 m	Stuttgart-Formation (Schilfsandstein i.w.S.), kmSt
-23,70 m	Obere Bunte Estherienschichten, kmOBE
-40,00 m	Graue Estherienschichten, kmGES

B2

Die Bohrung wurde im Zeitraum 02.10.2014 – 09.10.2014 ausgeführt. Die Bohrung B2 wurde nach Messung des gamma-logs (Büro Voutta) zur 5"-Grundwassermesssstelle zur Beobachtung des Druckpotenzials in der Grabfeld-Formation ausgebaut. Hierzu erfolgte zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Wasserstände der Einbau eines Datenloggers seit 09.10.2014. Die erste Sulfatführung setzt in B2 im Bereich der Steigerwald-Formation (kmSw) bereits bei 4,60 m unter Bohransatz ein. Der Obere Gipsspiegel in der Grabfeld-Formation wurde in B2 bei 27,70 m unter Bohransatz ermittelt.

B2b

Im Zeitraum 17.12.2014 – 18.12.2014 wurde unmittelbar neben der Bohrung B2 eine Vollbohrung ohne Kerngewinn niedergebracht und anschließend zur 5"-Grundwassermesssstelle in der Stuttgart-Formation ausgebaut. In der ausgebauten Grundwassermesssstelle erfolgte am 14.10.2015 ein Pumpversuch mit Probenahme. Zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Wasserstände in der Stuttgart-Formation seit 22.12.2014 wurde ein Datenlogger eingebaut.

Die Abb. 6.3 gibt eine grobschematische Darstellung zum Bohrprofil und Ausbau der begleitenden Grundwassermessstellen B2 und B2b.

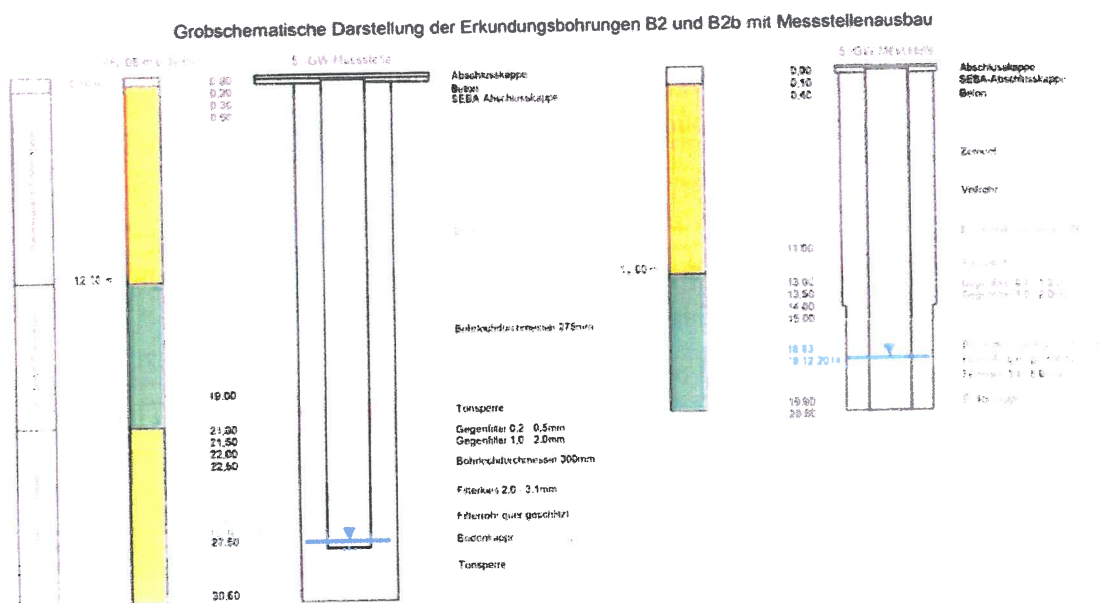


Abb. 6.3: Grobschematische Darstellung der begleitenden Grundwassermessstellen B2 und B2b



B3

Die Bohrung B3 wurde im Zeitraum 13.10.2014 – 22.10.2014 gebohrt und zur 5"-Grundwassermessstelle ausgebaut. Die Messstelle dient der Erfassung des Druckpotenzials in der Grabfeld-Formation. In B3 liegt der Obere Gipsspiegel bei 28,40 m unter Bohransatz. Neben geophysikalischen Messungen (gamma, FEL) wurde in der ausgebauten Grundwassermessstelle am 16.10.2015 ein Kurzpumpversuch durch das Büro Voutta ausgeführt und an dessen Ende eine Grundwasserprobe entnommen. Die Grundwassermessstelle B3 (vgl. Abb. 6.4) wurde mit einem Datenlogger zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Wasserstandsänderungen ab 09.10.2014 ausgestattet.

Grobschematische Darstellung der Erkundungsbohrung B3 mit Messstellenausbau

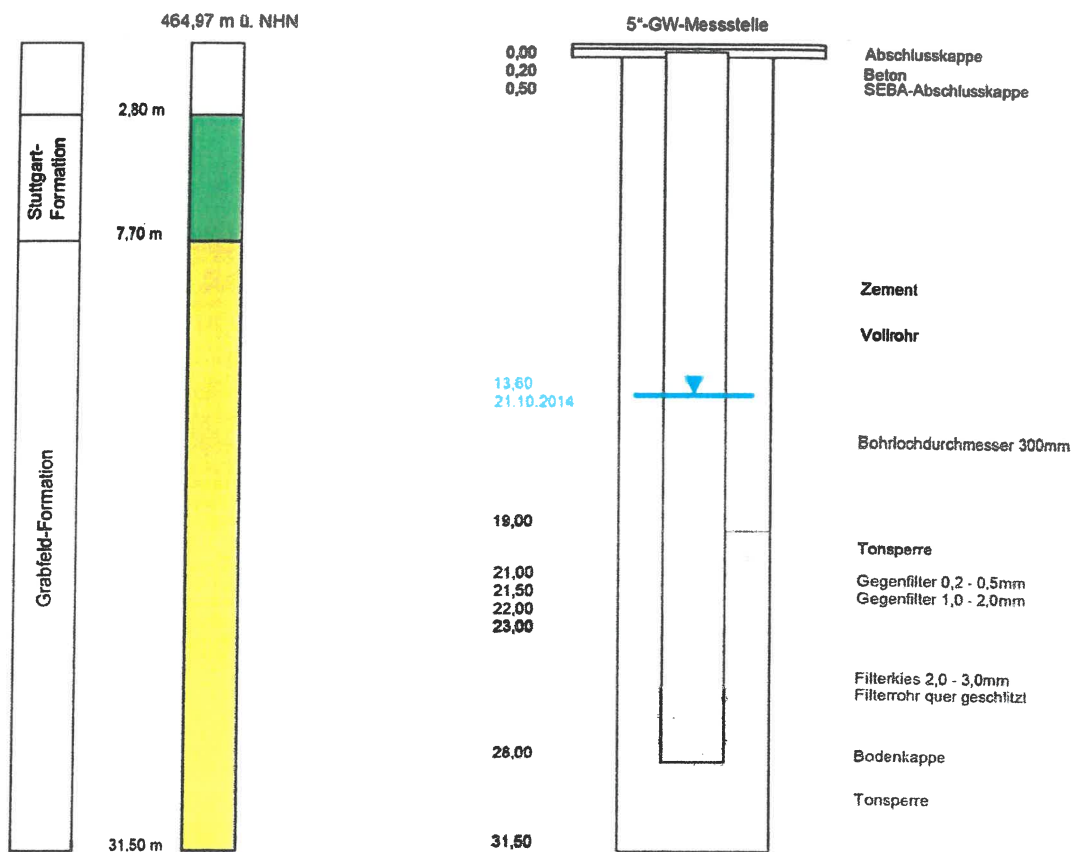


Abb. 6.4: Grobschematische Darstellung der begleitenden Grundwassermessstelle B3

Grobschematische Darstellung der Erkundungsbohrung B4 mit Messstellenausbau

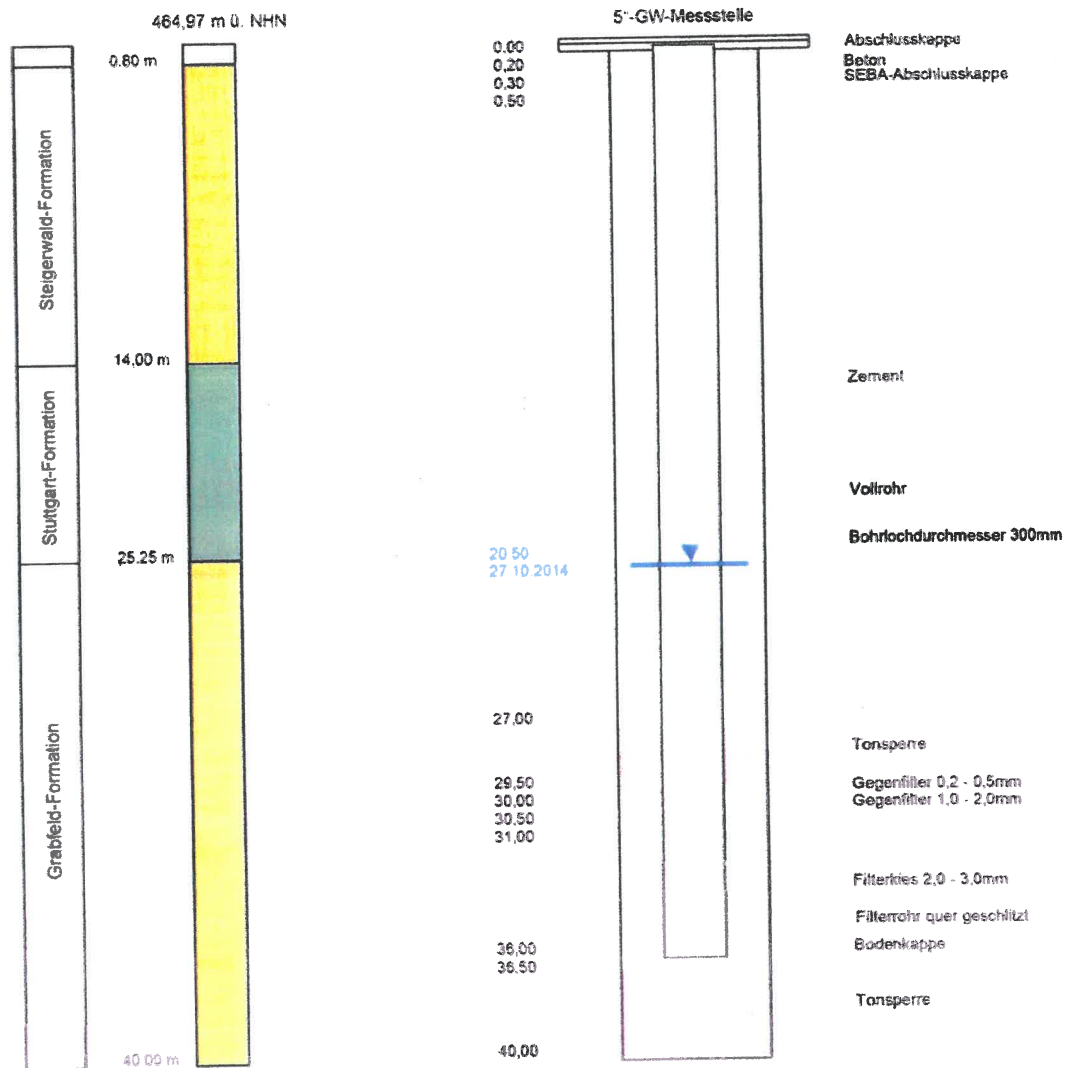


Abb. 6.5: Grobschematische Darstellung der begleitenden Grundwassermessstelle B4

B4

Die Bohrung B4 (vgl. Abb. 6.5) wurde am östlichen Rand des Hebungsgebiets "Süd" ausgeführt, um auch hier eine 5"-Grundwassermessstelle in der Grabfeld-Formation einzurichten. Merkbare Spülverluste waren namentlich in B4 im Niveau des Gipskars-tes (unmittelbar oberhalb des Oberen Gipsspiegels) feststellbar. Der Gipsspiegel wurde in B4 bei 36,60 m unter Bohransatz angetroffen.

Grundwasserstandsaufzeichnungen

In der nachstehenden Abb. 6.6 sind die mittels Datenlogger in allen zur Verfügung stehenden Grundwassermessstellen (Hebungsgebiet "Nord": B1 und B1 flach, Hebungsgebiet "Süd": B2a, B2, B2b, B3 und B4) seit Beginn der kontinuierlichen Messung aufgezeichneten Grundwasserstände graphisch dargestellt.

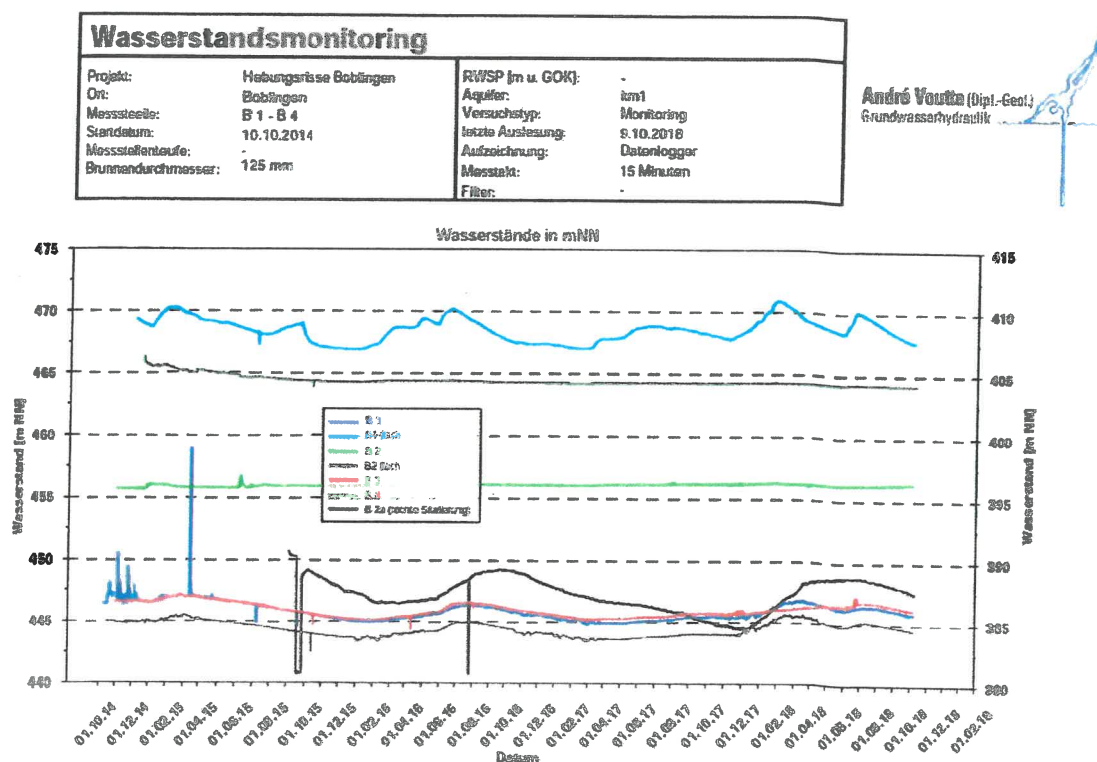


Abb. 6.6: Datenlogger-Aufzeichnungen der Grundwasserstände in allen zur Verfügung stehenden Grundwassermessstellen (Hebungsgebiet Nord: B1 und B1 flach, Hebungsgebiet "Süd": B2, B2 flach, B 2a, B3 und B4)

Grundwasserstands-Ganglinien in den Schilfsandstein- und Gipskeuper-Stockwerken

Die GWM B1 befindet sich im Hebungsgebiet Nord (Böblingen) und ist im Gipskeuper-Grundwasserstockwerk (Grabfeld-Formation) verfiltert. Der Grundwasserstand variiert im Beobachtungszeitraum von 2015 bis 2018 zwischen ca. 445 und 447 m NN. Die Ganglinie und ist stark gedämpft und zeigt keine kurzfristigen Reaktionen auf Niederschlagsereignisse.



Die GWM B1b (GWM B1 flach) befindet sich im Hebungsgebiet Nord () und ist im Schilfsandstein-Grundwasserstockwerk (Stuttgart-Formation) verfiltert. Der Grundwasserstand variiert im Beobachtungszeitraum von 2014 bis 2018 zwischen ca. 467 und 471 m NN und ist gedämpft. Die Ganglinie zeigt eine deutliche Reaktion auf die Unterschiede in der Grundwasserneubildung.

Die GWM B2 befindet sich im Hebungsgebiet Süd () und ist im Gipskeuper-Grundwasserstockwerk (Grabfeld-Formation) verfiltert. Der Grundwasserstand zeigt im Beobachtungszeitraum von 2014 bis 2018 nahezu keine Schwankungen und befindet sich auf ca. 456 m NN. Die Ganglinie zeigt nur einen minimal steigenden Trend. Die fehlende hydraulische Reaktion des Wassers in dieser Grundwassermessstelle weist auf einen dichten Gebirgsabschnitt im Umfeld der Grundwassermessstelle hin.

Die GWM B2b (GWM B2 flach) befindet sich im Hebungsgebiet Süd () und ist im Schilfsandstein-Grundwasserstockwerk (Stuttgart-Formation) verfiltert. Der Grundwasserstand zeigt im Beobachtungszeitraum von 2014 bis 2018 nahezu keine Schwankungen und befindet sich auf ca. 464 m NN. Die Ganglinie zeigt nur zu Beginn der Beobachtungszeit einen höheren Wasserstand, der mit der Zeit kontinuierlich auf das konstante, tiefe Niveau abgesunken ist. Die fehlende hydraulische Reaktion des Wassers in dieser Grundwassermessstelle weist auf einen dichten Gebirgsabschnitt im Umfeld der Grundwassermessstelle hin.

Die GWM B3 befindet sich im Hebungsgebiet Süd () und ist im Gipskeuper-Grundwasserstockwerk (Grabfeld-Formation) verfiltert. Der Grundwasserstand variiert im Beobachtungszeitraum von 2015 bis 2018 zwischen ca. 445 und 447 m NN. Die Ganglinie ist stark gedämpft und zeigt keine kurzfristigen Reaktionen auf Niederschlagsereignisse. Die Ganglinie der GWM B3 ist fast identisch mit der Ganglinie der GWM B1 im Hebungsgebiet Nord.

Die GWM B4 befindet sich im Hebungsgebiet Süd () und ist ebenfalls im Gipskeuper-Grundwasserstockwerk (Grabfeld-Formation) verfiltert. Der Grundwasserstand ist etwas tiefer als in der GWM B3 und variiert im Beobachtungszeitraum von 2015 bis 2018 zwischen ca. 443,5 und 445,5 m NN. Die Ganglinie ist stark gedämpft und zeigt keine kurzfristigen Reaktionen auf Niederschlagsereignisse. Die Ganglinie der GWM B4 ist bei etwas niedrigerem Grundwasserstand fast identisch mit den Ganglinien der GWM B1 und der GWM B3 im Hebungsgebiet Nord.



Grundwasserstands-Ganglinie im Stockwerk des Oberen Muschelkalks

Zu Beginn der Wasserstandsaufzeichnungen in der GWM B2a, die im Oberen Muschelkalk verfiltert ist, wurde ein Wasserstand von 84,44 m unter Gelände (390,18 m NN) gemessen (17.09.2015). Der Wasserstand ist somit deutlich tiefer als in den höheren Grundwasserstockwerken (Stuttgart- und Grabfeld-Formation). Das Grundwasser im Oberen Muschelkalk ist gespannt. An der Grenze Oberer Muschelkalk/Unterkeuper (145, 52 m unter Gelände) herrscht somit ein Druck entsprechend einer Wassersäule von rund 61 m. Der Verlauf der Ganglinie ist stark gedämpft und zeigt somit keine markanten kurzfristigen Schwankungen. Die Schwankungsbreite hat im dreijährigen Beobachtungszeitraum von September 2015 bis September 2018 lediglich ca. 5 m (ca. 384–389 m NN) betragen. Die relativ geringen Niederschläge im Jahr 2017 zeichnen sich durch ein deutliches Absinken des Wasserstands bzw. der Druckhöhe im November 2017 auf den Tiefstand von ca. 384 m NN ab. Danach steigt der Wasserstand aufgrund der Grundwasserneubildung wieder allmählich an. Die höchsten Grundwasserstände sind im Vergleich mit dem oberflächennahen Gipskeuper-Grundwasserstockwerk um rund drei Monate verschoben. Das Grundwasser im Oberen Muschelkalk reagiert somit erst mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung auf die Grundwasserneubildung. Dadurch ist belegt, dass der Obere Muschelkalk-Grundwasserleiter im betrachteten Gebiet nicht mit den oberflächennahen Grundwasserstockwerken in hydraulischer Verbindung steht.



7 Hydrochemische Untersuchungen

Im Zuge der weiteren Erkundungen im Hebungsgebiet "Süd" wurden aufgrund der unmittelbaren Nähe zu den bereits umfangreich vorliegenden hydrochemischen Untersuchungen und Typisierungen im Hebungsgebiet "Nord" vom LGRB nur noch vier Grundwasseranalysen im Zuge der Herstellung von B2a (Anl. 3.1), eine Grundwasseranalyse von B3 (Anl. 3.2) und eine Grundwasseranalyse von B4 (Anl. 3.3) vorgenommen. Nachfolgend werden die für das Hebungsgebiet "Nord" ermittelten hydrochemischen Untersuchungsergebnisse, welche bereits im ersten Sachstandsbericht für das Hebungsgebiet "Nord" ausführlich dokumentiert sind, in den vorliegenden Sachstandsbericht für das Hebungsgebiet "Süd" übertragen und in kursiver Schrift entsprechend kenntlich gemacht. Die hydrochemischen Analysen von Grundwasserproben aus B2a, B3 und B4 im Zuge der Erkundung im Hebungsgebiet "Süd" sind in den nachstehenden Diagrammen (Abb. 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.16) sowie in Tab. 7.2 entsprechend nachgetragen.

7.1 Analytikumfang

Begleitend zur Sanierung der Erdwärmesonden in der [REDACTED] wurden in den drei im näheren Umfeld errichteten Grundwassermessstellen B1b, B1 und B1a Grundwasserproben entnommen und im Labor des LGRB analysiert (Sachstandsbericht 1: Anl. 3).

Insgesamt wurden sechs Wasserproben hydrochemisch analysiert (Tab. 7.1). Darauf entfallen auf das Schilfsandstein-Stockwerk zwei Analysen, auf das Gipskeuper-Stockwerk eine Analyse und auf das Obere Muschelkalk-Stockwerk drei Analysen. Nicht untersucht wurde das Grundwasser im Unterkeuper-Stockwerk, da hier keine Grundwasserführung angetroffen wurde.



Tab. 7.1: Hydrochemische Analysen von Grundwässern in Böblingen (Hebungsgebiet "Nord")

Entnahmestelle	Grundwasserleiter	Probenahmedatum	Analysendatum	Labor	Probenehmer
B1b	Schilfsandstein	08.07.2015	14.09.2015	LGRB	VEES PARTNER
B1b	Schilfsandstein	09.07.2015	14.09.2015	LGRB	VEES PARTNER
B1	Gipskeuper	10.07.2015	14.09.2015	LGRB	VEES PARTNER
B1a	Oberer Muschelkalk	16.02.2015	25.02.2015	LGRB	André Voutta Grundwasserhydraulik
B1a	Oberer Muschelkalk	24.03.2015	31.03.2015	LGRB	LGRB
B1a	Oberer Muschelkalk	27.03.2015	15.04.2015	LGRB	André Voutta Grundwasserhydraulik

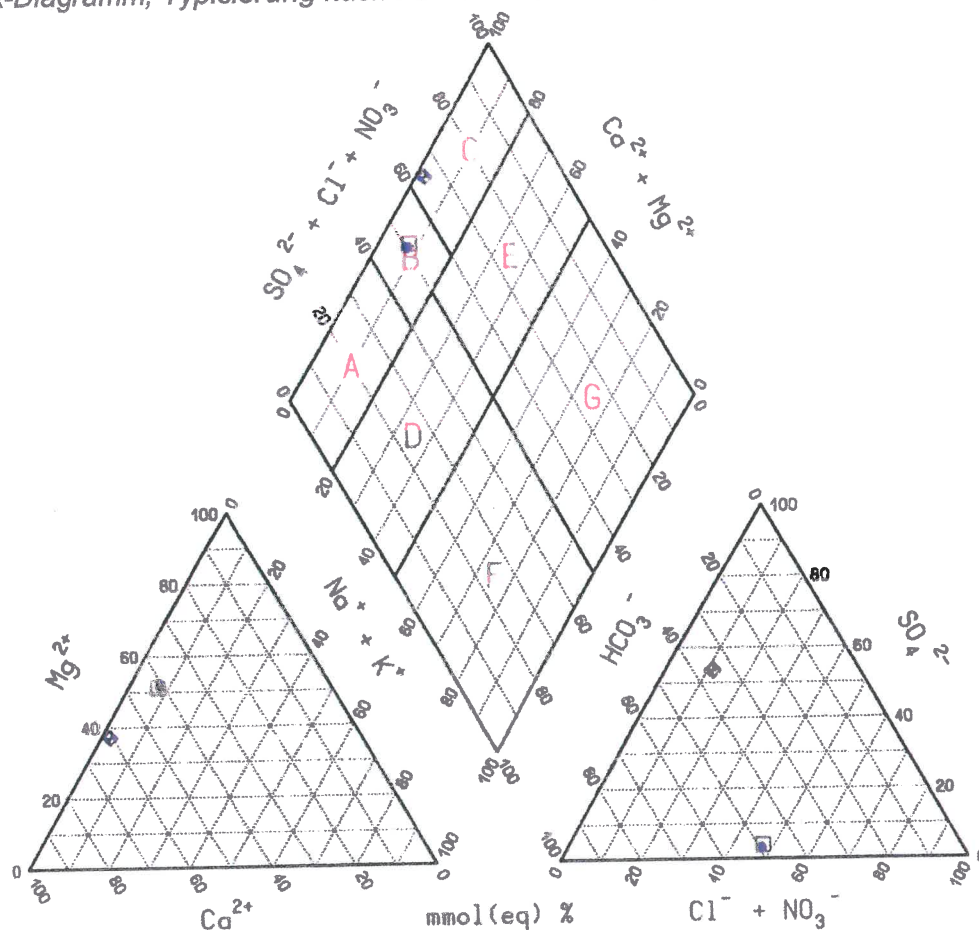
Neben der grundsätzlichen Analyse der hydrochemischen Unterschiede sowie den Typisierungen der Grundwässer nach verschiedenen Methoden ist vor allem die Berechnung der Mineral-Sättigungszustände von Bedeutung. Die Sättigungszustände an den Sulfatmineralen Gips und Anhydrit zeigen, welches Lösungs-/Ausfällungspotential hinsichtlich Gips und Anhydrit im Untergrund von Böblingen (Hebungsgebiet "Nord") vorhanden ist. Für die Mineralsättigungs-Berechnungen wurde das Windows-Programm PHREEQC (Version 3) des United States Geological Survey (USGS) verwendet.

7.2 Grundwasserstockwerke

7.2.1 Grundwasserstockwerk in der Stuttgart-Formation (Schilfsandstein)

Im Bereich der 13,8 m tiefen Bohrung B1b wurde kein Gips angetroffen. Der Ruhewasserstand von 9,80 m u. Gel. (28.11.2014, Messung Fa. Burkhardt) befindet sich nur wenig oberhalb der Filterstrecke (10,20 m–13,20 m u. Gel.). Das Grundwasser der B1b wurde zweimal analysiert (08.07.2015, 10.07.2015). Die Mineralisierung ist mit mehr als 1000 mg/l relativ hoch. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit 1433–1445 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bestimmt. Auffällig ist der hohe Chloridgehalt von ca. 250 mg/l (vermutlich Einfluss der Strassensalzung) und der leicht erhöhte Nitratgehalt (ca. 15–17 mg/l). Vergleichsweise gering ist der Sulfatgehalt mit ca. 23–29 mg/l.

Das in der B1b im Schilfsandstein erschlossene, oberflächennahe Grundwasser ist ein normal erdalkalisches, hydrogenkarbonatisch-sulfatisches Wasser (Feld B im PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTA & LANGGUTH, 1967, Abb. 7.1).



Ionenverhältnisse und Grundwassertypen (PIPER-Diagramm) Typisierung nach FURTA & LANGGUTH (1967)

Normal erdalkalische Wässer

- A überwiegend hydrogenkarbonatisch
- B hydrogenkarbonatisch-sulfatisch
- C überwiegend sulfatisch

Erdalkalische Wässer mit höherem Alkaliegehalt

- D überwiegend hydrogenkarbonatisch
- E überwiegend sulfatisch (Chlorid < 20 mmol(eq) %)
- überwiegend chloridisch (Chlorid > 50 mmol(eq) %)

Alkalische Wässer

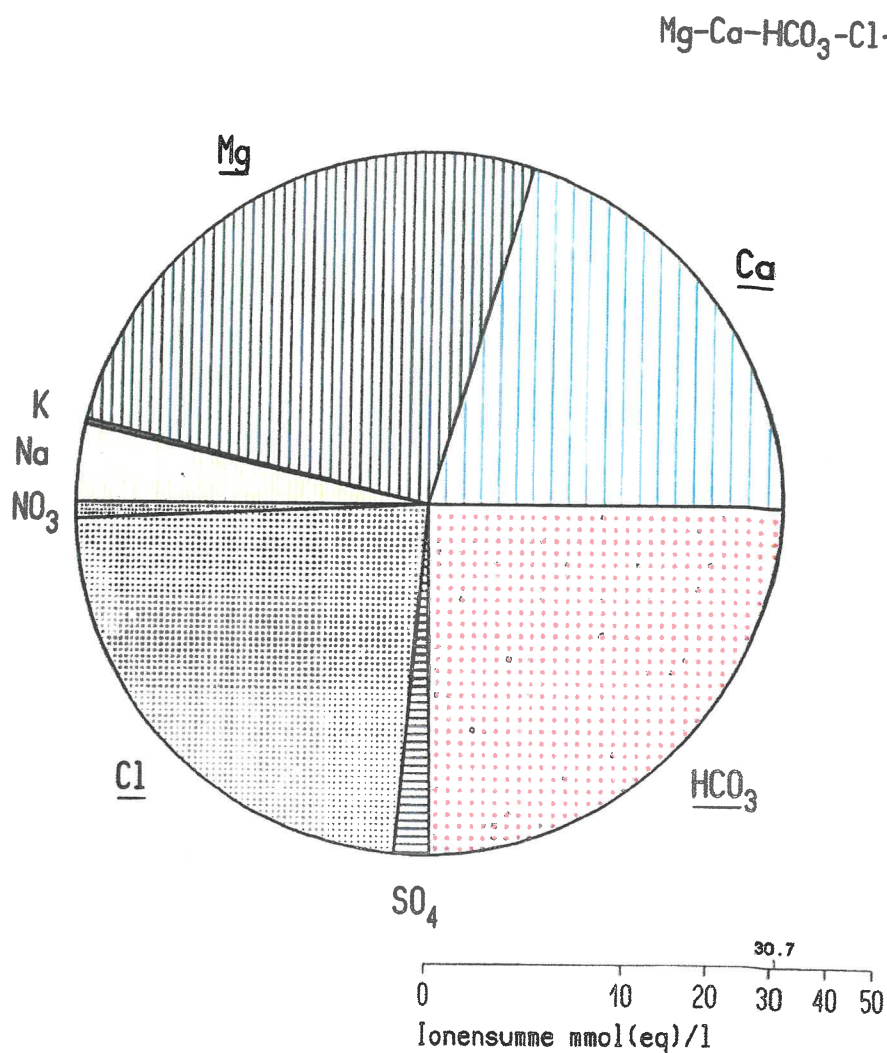
- F überwiegend (hydrogen-) karbonatisch
- G überwiegend sulfatisch-chloridisch (Hydrogenkarbonat < 50, Chlorid > 50 mmol(eq) %)
- überwiegend chloridisch (Hydrogenkarbonat < 20, Chlorid > 70 mmol(eq) %)

- B1b Schilfsandstein 08.07.2015
- B1b Schilfsandstein 09.07.2015
- ◆ B1 Gipskeuper 10.07.2015

Abb. 7.1: Piper-Diagramm: Hydrochemische Typisierung von Schilfsandstein- und Gipskeuper-Grundwässern in der GWM B1b und GWM B1



Nach der für Mineralwässer üblichen Typisierung ist dieses Grundwasser vom Mg-Ca-HCO₃-Cl-Typ (UDLUFT-Diagramm, Abb. 7.2).



B1b Böblingen Schilfsandstein 09.07.2015

Abb. 7.2: Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Schilfsandstein-Grundwasser in der GWM B1b (09.07.2015, Mg-Ca-HCO₃-Cl-Typ)

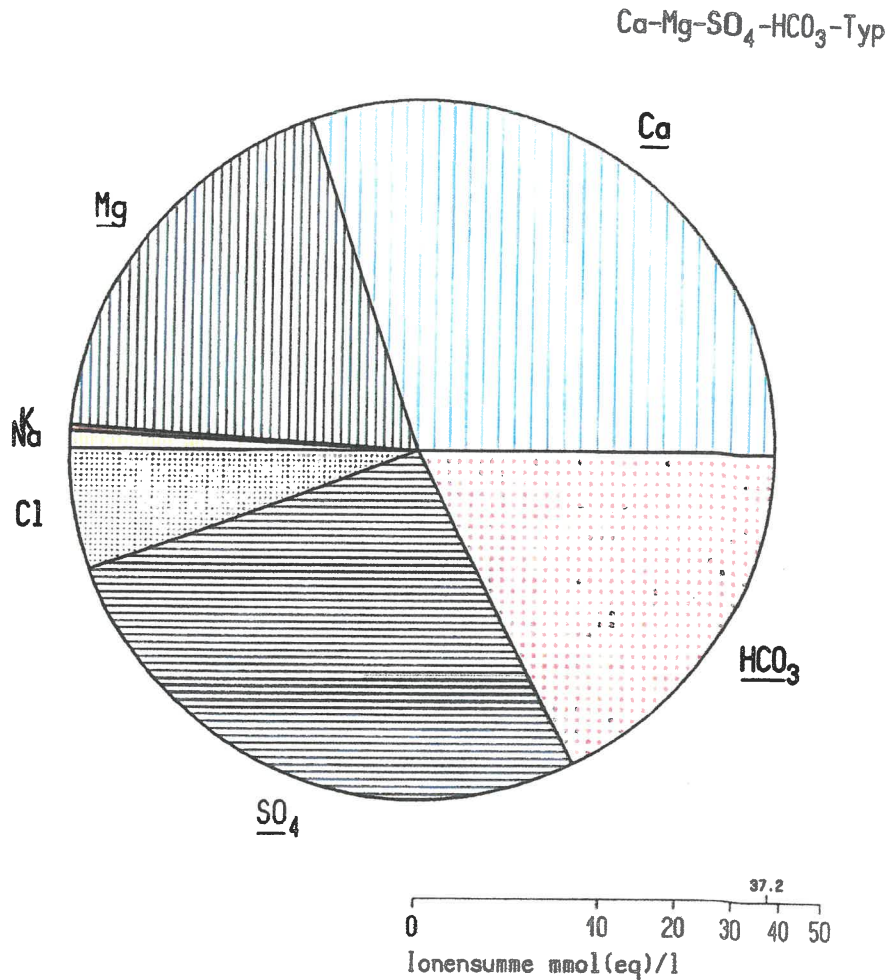
7.2.2 Grundwasserstockwerk in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper)

Im Bereich der 52,5 m tiefen Bohrung B1 befindet sich der Gipsspiegel in 50,48 m Tiefe im Bereich des Mittleren Gipshorizonts. Die Druckhöhe des Grundwassers von 26,45 m u. Gel. (29.09.2014, Messung Fa. Burkhardt) bzw. 32,5 m NN (13.06.2015, Messung Büro Voutta) befindet sich weit oberhalb des Gipsspiegels und oberhalb der Filterstrecke (45,00 m– 50,00 m u. Gel.). Der grundwassererfüllte Bereich ist somit bereits weitgehend ausgelaugt (Gipskarst). Nur im untersten Abschnitt der Grundwassermessstelle ist das Gebirge sulfatgesteinsführend.

Die Mineralisierung ist mit rund 1320 mg/l relativ hoch. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit 1432 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bestimmt. Etwas erhöht ist der Chloridgehalt mit ca. 75 mg/l, Nitrat ($<0,5$ mg/l) konnte nicht nachgewiesen werden. Erwartungsgemäß erhöht sind die Calcium- (227 mg/l) und Sulfatgehalte (486 mg/l), die zum Großteil aus der Gipslösung stammen.

Das Grundwasser im Bereich der B1 ist ein normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser (Abb. 7.1, Feld C im PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH, 1967). Nach der für Mineralwässer üblichen Typisierung ist das Gipskeuper-Grundwasser vom $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ -Typ (UDLUFT-Diagramm, Abb. 7.3).

Aus dem Schoeller-Diagramm (Abb. 7.4) sind die Unterschiede in der hydrochemischen Zusammensetzung des Gipskeuper-Grundwassers der B1 im Vergleich mit dem Schilfsandstein-Grundwasser der B1b direkt ersichtlich. Die erhöhten Natrium- und Chlorid- sowie Nitratgehalte kennzeichnen das oberflächennahe Grundwasserstockwerk, das darunter folgende Gipskeuper-Grundwasserstockwerk ist deutlich gekennzeichnet durch die Lösung von Sulfatmineralen.



B1 Böblingen Gipskeuper 10.07.2015

Abb. 7.3: Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B1 (10.07.2015, Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ)

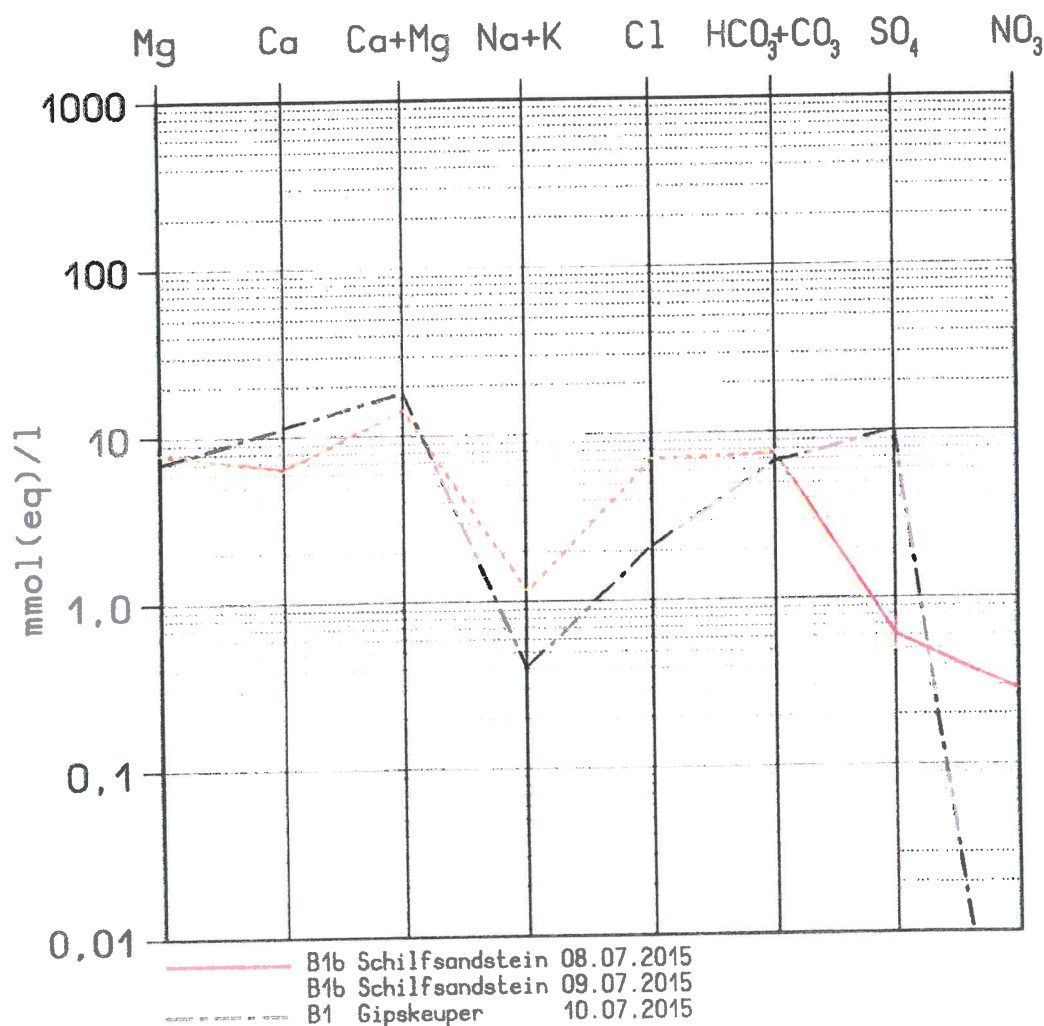
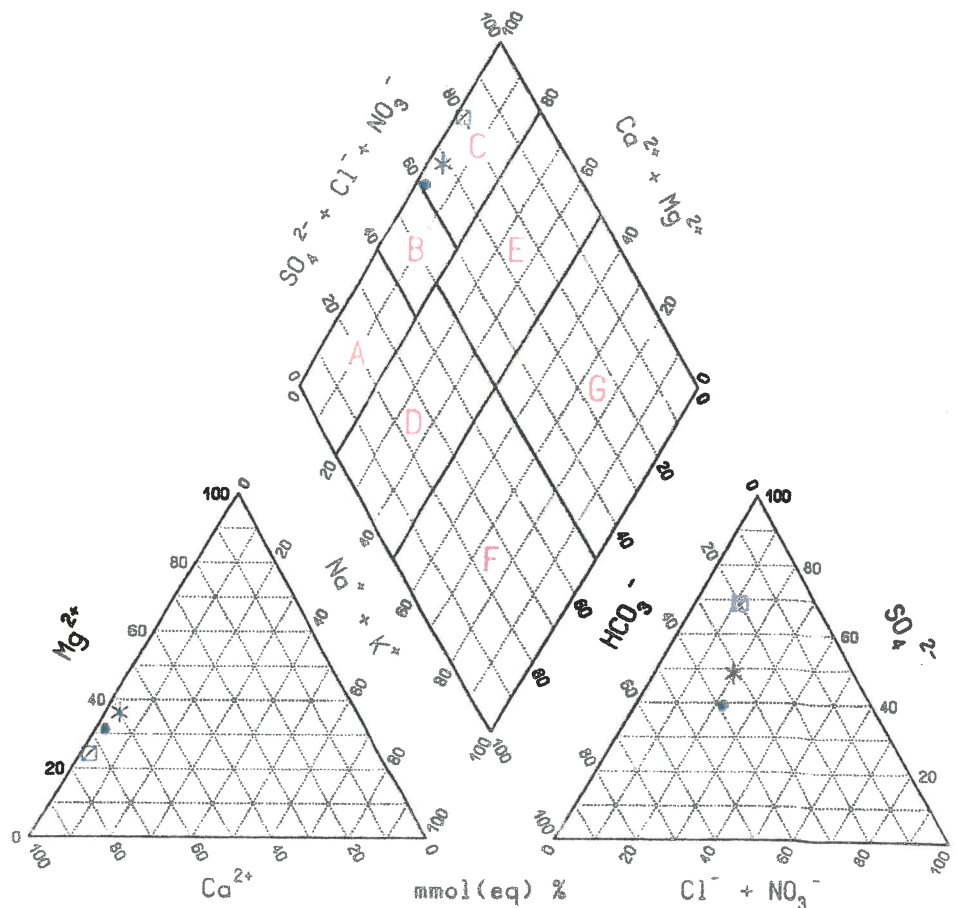


Abb. 7.4: Schoeller-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Schilfsandstein- und Gipskeuper-Grundwässern in der GWM B1b und GWM B1

Im Hebungsgebiet "Süd" wurde an den drei Grundwasseraufschlüssen B3, B4 und B2a das Grundwasser im Gipskeuper-Stockwerk beprobt und analysiert.

Die Mineralisierung der GWM B3 ist mit rund 1243 mg/l relativ hoch. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit 1451 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bestimmt. Etwas erhöht ist der Chloridgehalt mit 102 mg/l sowie der Nitratgehalt mit 44,3 mg/l. Erwartungsgemäß erhöht sind die Calcium- (214 mg/l) und Sulfatgehalte (421 mg/l), die zum Großteil aus der Lösung von Sulfatmineralen (Gipslösung) stammen. Das Grundwasser im Bereich der GWM B3

ist ein normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser (Abb. 7.5, Feld C im PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTA & LANGGUTH, 1967). Nach der für Mineralwässer üblichen Typisierung ist das Gipskeuper-Grundwasser vom Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ (UDLUFT-Diagramm, Abb. 7.6).



Ionenverhältnisse und Grundwassertypen (PIPER-Diagramm) Typisierung nach FURTA & LANGGUTH (1967)

Normal erdalkalische Wässer

- A überwiegend hydrogenkarbonatisch
- B hydrogenkarbonatisch-sulfatisch
- C überwiegend sulfatisch

Erdalkalische Wässer mit höherem Alkaliegehalt

- D überwiegend hydrogenkarbonatisch
- E überwiegend sulfatisch (Chlorid < 20 mmol(eq) %)
- überwiegend chloridisch (Chlorid > 50 mmol(eq) %)

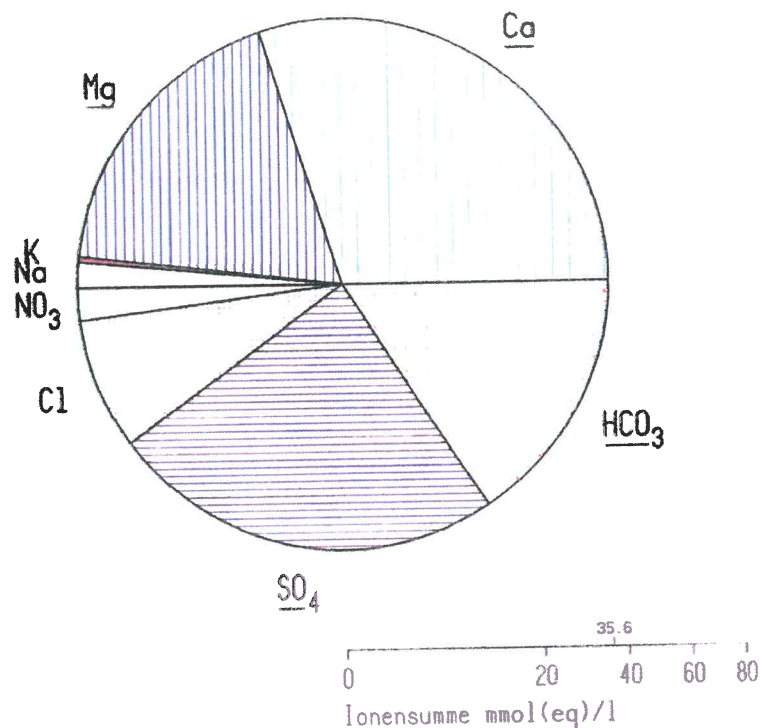
Alkalische Wässer

- F überwiegend (hydrogen-) karbonatisch
- G überwiegend sulfatisch-chloridisch
(Hydrogenkarbonat < 50, Chlorid > 50 mmol(eq) %)
- überwiegend chloridisch
(Hydrogenkarbonat < 20, Chlorid > 70 mmol(eq) %)

- * B 3 Böblingen Gipskeuper 11.04.2016
- B 4 Böblingen Gipskeuper 04.04.2016
- B2a Böblingen Gipskeuper 26.05.2015

Abb. 7.5: Piper-Diagramm: Hydrochemische Typisierung von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B2a, der GWM B3 und der GWM B4

Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ

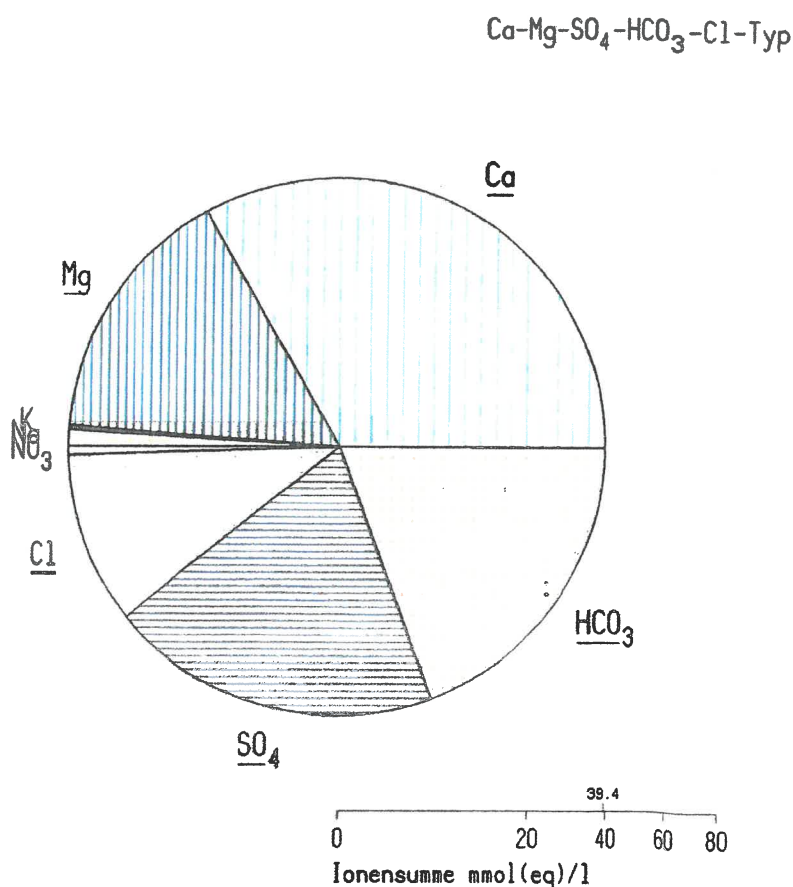


B 3 Böblingen Gipskeuper 11.04.2016

Abb. 7.6: Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B3 (11.04.2016, Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ)

Die Mineralisierung der GWM B4 ist mit rund 1378 mg/l relativ hoch. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit 1630 µS/cm bestimmt. Deutlich erhöht ist der Chloridgehalt mit 149 mg/l, der Nitratgehalt ist mit 13 mg/l dagegen deutlich geringer als in der GWM B3. Erwartungsgemäß erhöht sind die Calcium- (261 mg/l) und Sulfatgehalte

(377 mg/l), die zum Großteil aus der Lösung von Sulfatmineralen stammen. Das Grundwasser im Bereich der GWM B4 ist wie in der GWM B3 ein normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser (Abb. 7.5, Feld C im PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTA & LANGGUTH, 1967). Nach der für Mineralwässer üblichen Typisierung ist das Gipskeuper-Grundwasser der GWM B4 aufgrund des höheren Chloridgehalts vom Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Cl-Typ (UDLUFT-Diagramm, Abb. 7.7).

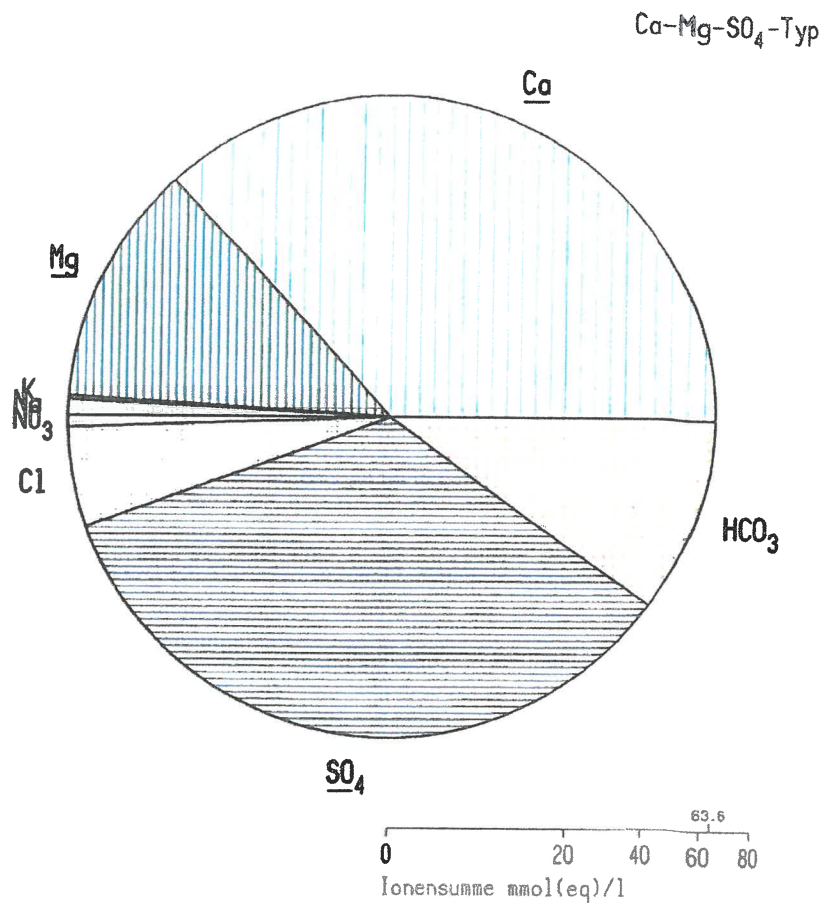


B 4 Böblingen Gipskeuper 04.04.2016

Abb. 7.7: Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B4 (04.04.2016, Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Cl-Typ)



Die Mineralisierung des Grundwassers im Gipskeuper-Stockwerk im Bereich der GWM B2a, das während eines Pumptests beprobt wurde, ist mit rund 2177 mg/l relativ hoch. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bestimmt. Erhöht ist der Chloridgehalt mit 114 mg/l, der Nitratgehalt liegt mit 23,3 mg/l zwischen den Gehalten der Messstellen B3 und B4. Erwartungsgemäß hoch sind die Calcium- (471 mg/l) und Sulfatgehalte (1060 mg/l), die ganz überwiegend aus der Lösung von Sulfatmineralen stammen. Das Gipskeuper-Grundwasser im Bereich der GWM B2a ist ebenfalls ein normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser (Abb. 7.5, Feld C im PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH, 1967). Nach der für Mineralwässer üblichen Typisierung ist das Gipskeuper-Grundwasser der GWM B2a aufgrund des hohen Gehalts an gelöstem Calciumsulfat-Mineralen vom Ca-Mg-SO₄-Typ (UDLUFT-Diagramm, Abb. 7.8).



B2a Böblingen Gipskeuper 26.05.2015

Abb. 7.8: Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwasser in der GWM B2a (26.05.2015, Ca-Mg-SO₄-Typ)

Aus dem Schoeller-Diagramm (Abb. 7.9) sind die geringen Unterschiede in der hydrochemischen Zusammensetzung der beprobten Gipskeuper-Grundwässer direkt ersichtlich. Das Gipskeuper-Grundwasserstockwerk ist deutlich gekennzeichnet durch die Lösung von Sulfatmineralen, am deutlichsten im Bereich der GWM B2a.

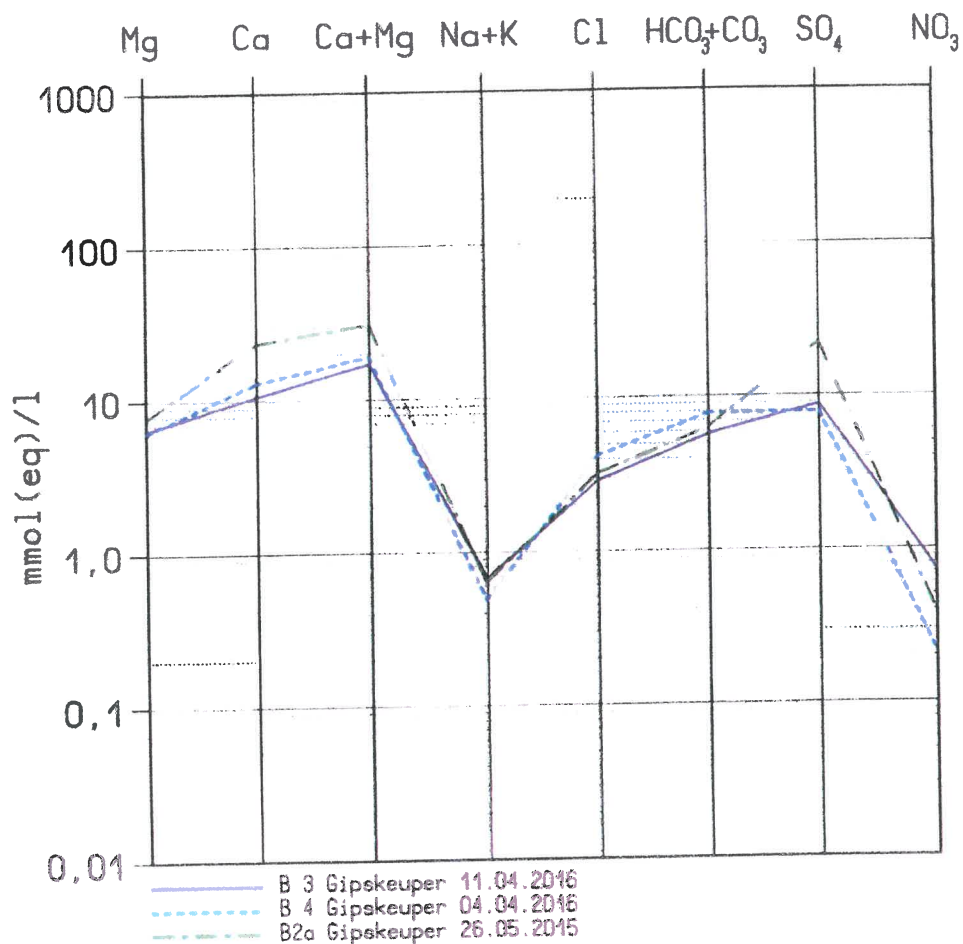


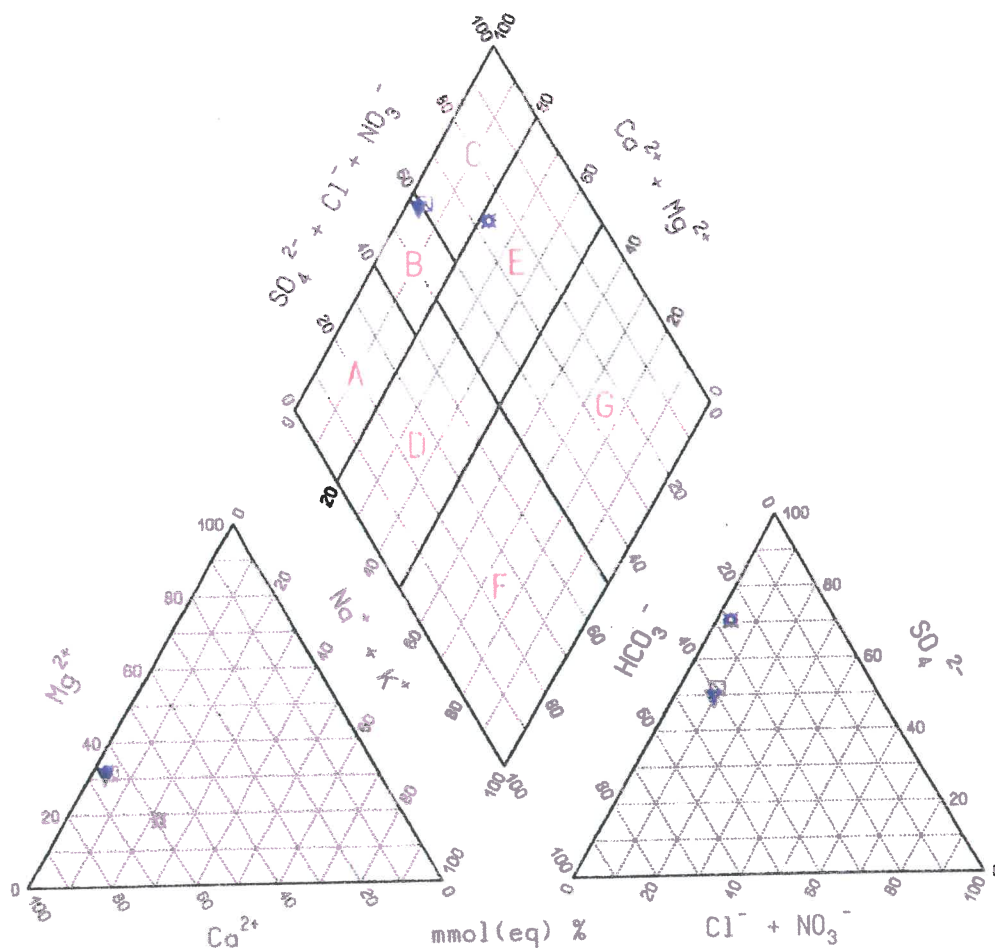
Abb. 7.9: Schoeller-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Gipskeuper-Grundwässern in der GWM B2a, GWM B3 und GWM B4



7.2.3 Grundwasserstockwerk in der Erfurt-Formation (Unterkeuper)

Im Gegensatz zur Bohrung B1a, bei der in der Schichtenfolge des Unterkeupers kein Grundwasser vorhanden war, wurde in der Bohrung B2a im Unterkeuper Grundwasser angetroffen und hydraulisch getestet. Das Grundwasser in dieser kompakten Schichtfolge hat eine große Ähnlichkeit mit dem tieferen Grundwasser im Oberen Muschelkalk. Möglicherweise handelt es sich hier um Grundwasser des Oberen Muschelkalks, das über Klüfte hydraulisch an den unteren Abschnitt des Unterkeupers angeschlossen ist.

Die Mineralisierung des Grundwassers im Unterkeuper-Grundwasserstockwerk ist mit rund 1160 mg/l geringer als im Gipskeuper-Grundwasserstockwerk. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit 1280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bestimmt. Der Chloridgehalt ist mit 53,5 mg/l relativ gering, der Nitratgehalt lag unter der Nachweisgrenze. Der erhöhte Sulfatgehalt (410 mg/l) dürfte zum Großteil aus der Lösung von Sulfatmineralen stammen. Das Unterkeuper-Grundwasser im Bereich der GWM B2a ein normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser (Abb. 7.10, Feld C im PIPER-Diagramm, (Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH, 1967). Nach der für Mineralwässer üblichen Typisierung ist das Unterkeuper-Grundwasser der GWM B2a vom $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ -Typ (UDLUFT-Diagramm, Abb. 7.11).



Ionenverhältnisse und Grundwassertypen (PIPER-Diagramm) Typisierung nach FURTA & LANGGUTH (1967)

Normal erdalkalische Wässer

- A überwiegend hydrogenkarbonatisch
- B hydrogenkarbonatisch-sulfatisch
- C überwiegend sulfatisch

Erdalkalische Wässer mit höherem Alkaligehalt

- D überwiegend hydrogenkarbonatisch
- E überwiegend sulfatisch (Chlorid < 20 mmol(eq) %)
- überwiegend chloridisch (Chlorid > 50 mmol(eq) %)

Alkalische Wässer

- F überwiegend (hydrogen-) karbonatisch
- G überwiegend sulfatisch-chloridisch
(Hydrogenkarbonat < 50, Chlorid > 50 mmol(eq) %)
- überwiegend chloridisch
(Hydrogenkarbonat < 20, Chlorid > 70 mmol(eq) %)

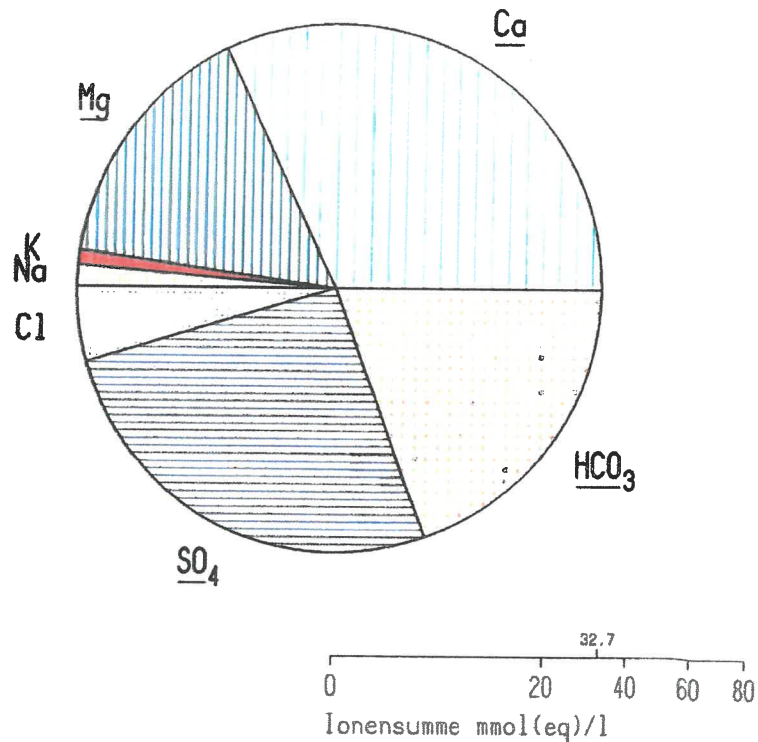
□ B2a Böblingen Unterkeuper 06.08.2015

✕ B2a Böblingen Oberer Muschelkalk 10.08.2015

▼ B2a Böblingen Oberer Muschelkalk 24.09.2015

Abb. 7.10: Piper-Diagramm: Hydrochemische Typisierung von Unterkeuper-Grundwasser und Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B2a

Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ



B2a Böblingen Unterkeuper 06.08.2015

Abb. 7.11: Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Unterkeuper-Grundwasser in der GWM B2a (06.08.2015, Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ)

7.2.4 Grundwasserstockwerk im Oberen Muschelkalk

Die 144,80 m tiefe **Bohrung B1a** erschließt den Oberen Muschelkalk von 133,89 m bis zur Endteufe. Die Bohrung wurde als temporäre Grundwassermessstelle mit 125 mm Durchmesser im Oberen Muschelkalk ausgebaut. Der Rückbau erfolgte nach Abschluss der Untersuchungen ab dem 07.04.2015. Der Ruhewasserstand des er-



schlossenen, gespannten Grundwassers schwankt nur geringfügig um ca. 85,4 m unter Gelände.

Das Muschelkalk-Grundwasser der B1a ist ein normal erdalkalisches, überwiegend hydrogenkarbonatisches Wasser (PIPER-Diagramm, Typisierung nach FURTA & LANGGUTH, 1967, Abb. 7.12).

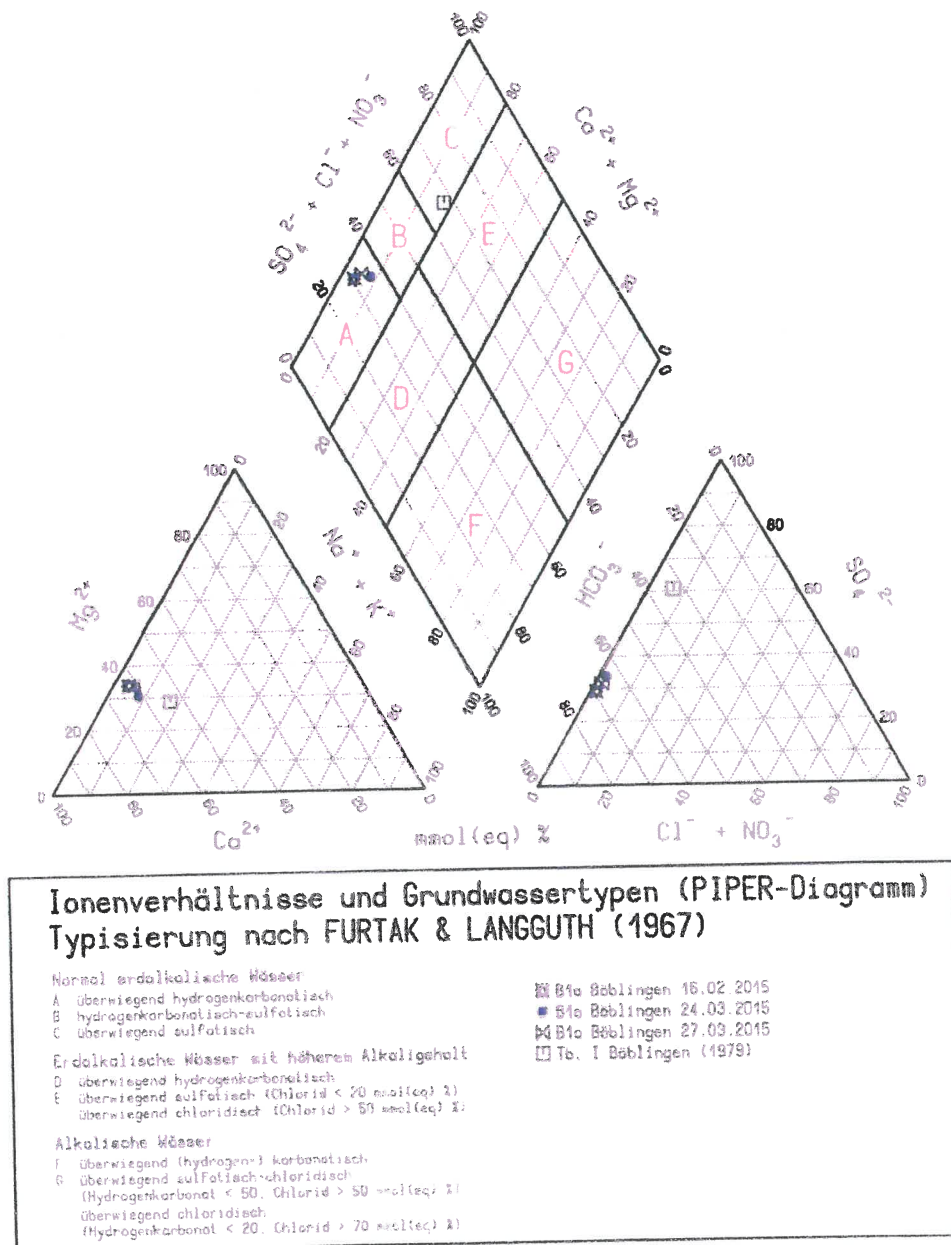
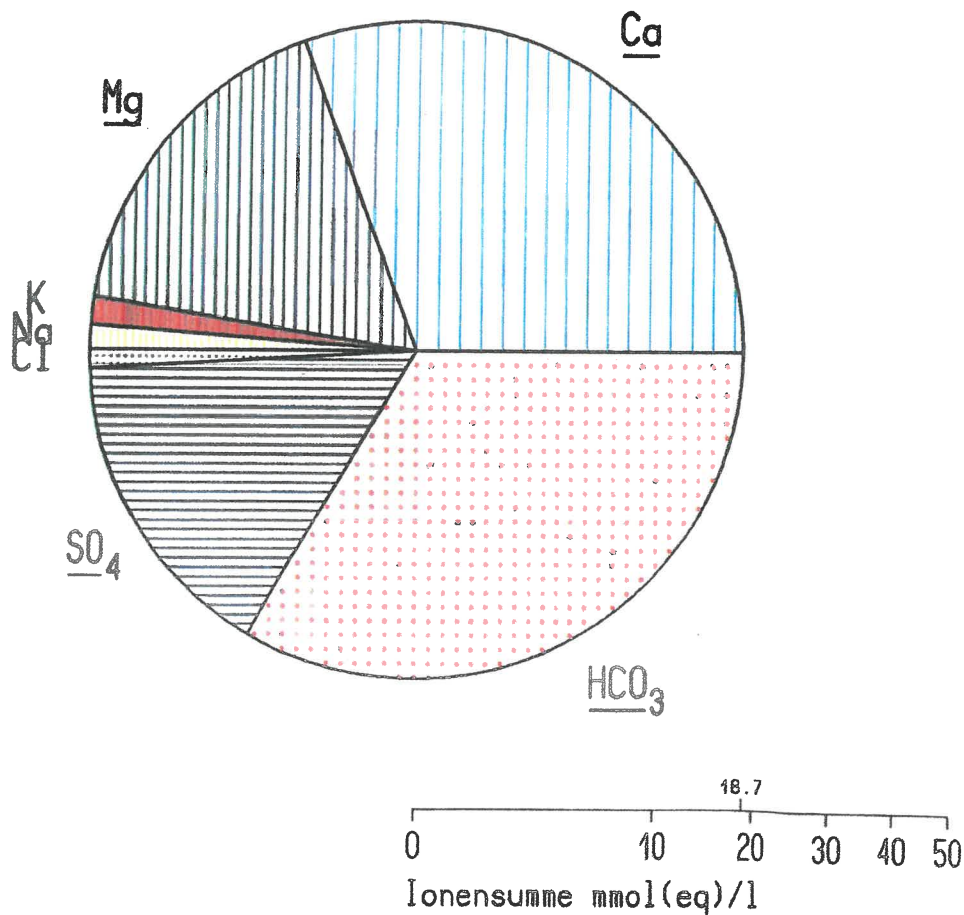


Abb. 7.12: Piper-Diagramm: Hydrochemische Typisierung von Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B1a und im Tiefbrunnen I

Nach der für Mineralwässer üblichen Typisierung ist es vom $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ -Typ (UDLUFT-Diagramm, Abb. 7.13). Es handelt sich um ein Wasser, das deutlich geringer mineralisiert ist ($850 - 1110 \mu\text{S/cm}$ (25°C)) als das Grundwasser im höheren Gipskeuper-Grundwasserstockwerk. Der Gehalt an gelösten Stoffen resultiert im Wesentlichen aus der Lösung von Calcit und Dolomit.

$\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ -Typ



B1a Böblingen Oberer Muschelkalk 27.03.2015

Abb. 7.13: Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B1a (27.03.2015, $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ -Typ)

Aus dem SCHOELLER-Diagramm (Abb. 7.14) ist ersichtlich, dass die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe bis auf den Gehalt an Alkalien ($\Sigma \text{Na}+\text{K}$) gut übereinstimmen. Der Kaliumgehalt, der den Natriumgehalt in allen drei Analysen übersteigt, lässt darauf schließen, dass noch geringe Mengen an inhibierter (kaliumreicher) Spülung im geförderten Wasser enthalten waren.

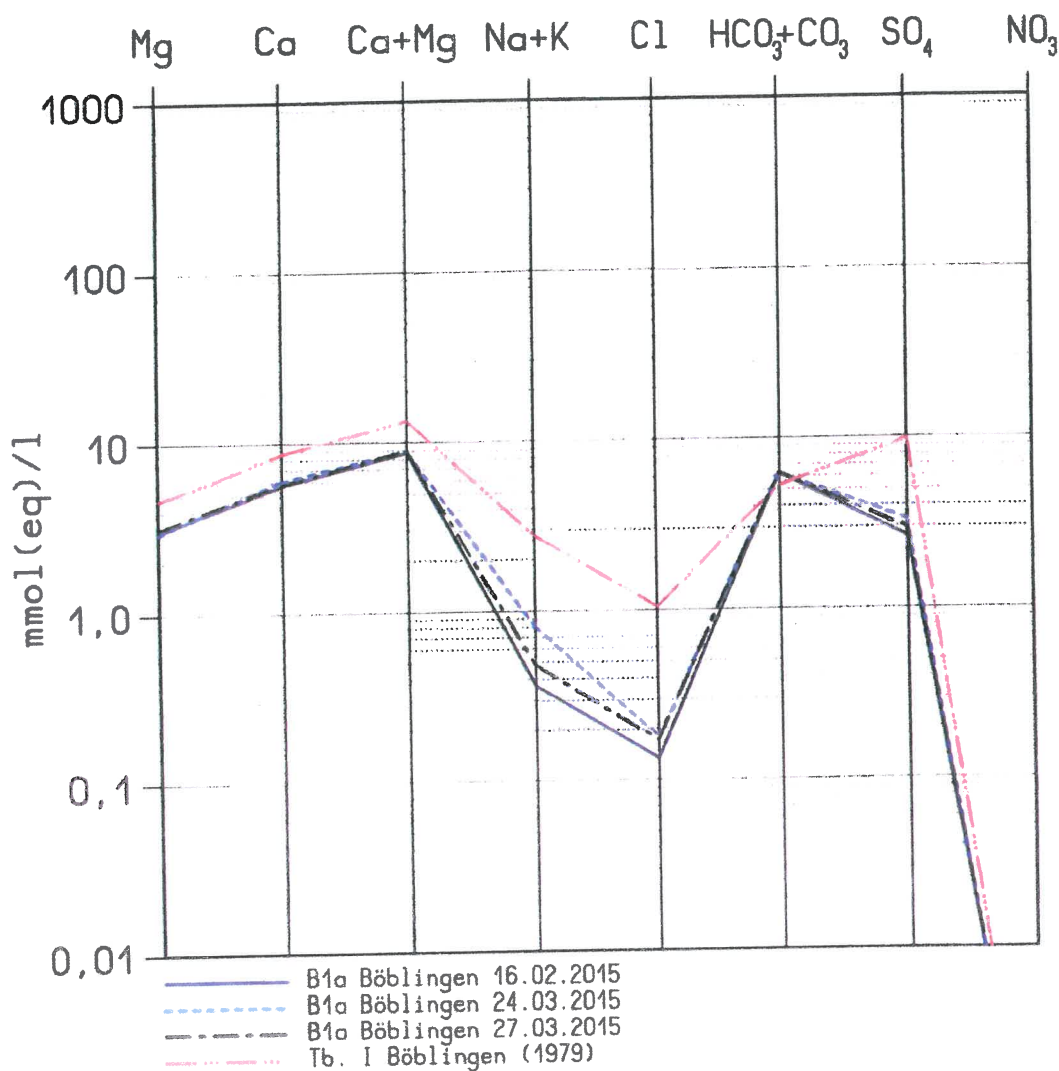
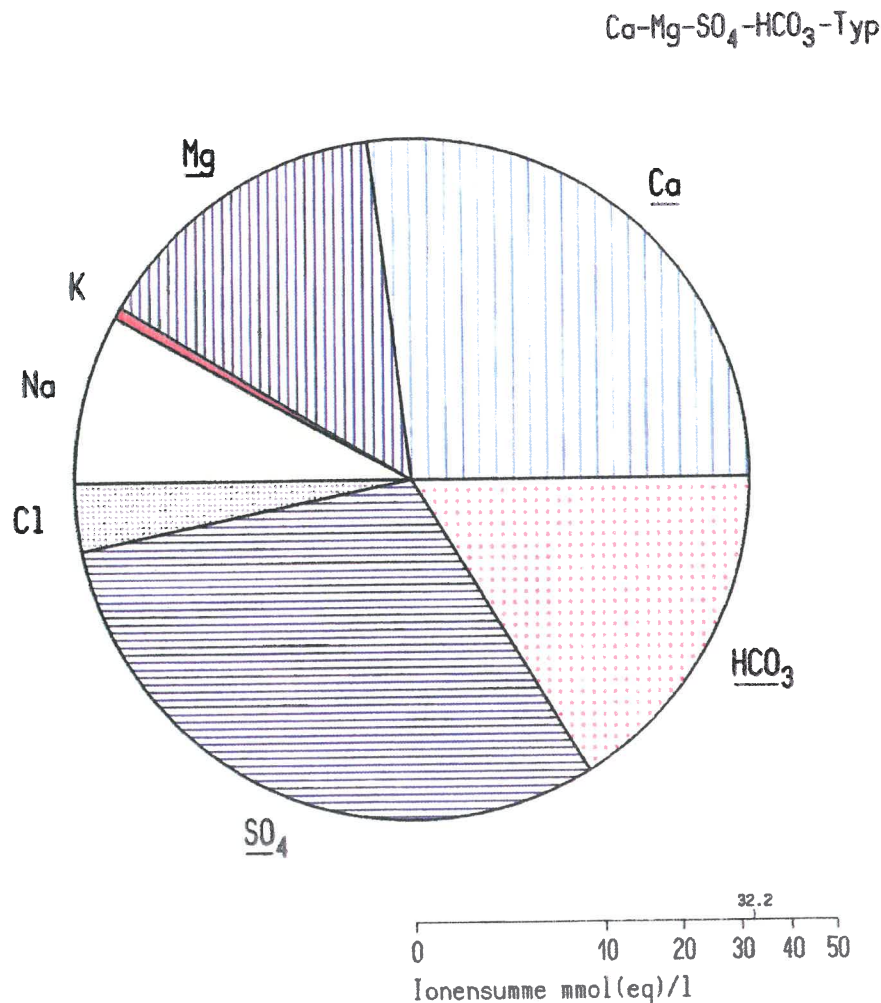


Abb. 7.14: Schoeller-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B1a und im Tiefbrunnen I



Zu Vergleichszwecken wurde auch der im Jahr 1979 abgeteufte Tiefbrunnen I (Tb I) herangezogen, der sich [REDACTED] nordnordöstlich der B1a befindet. Die Bohrung für diesen ursprünglich wesentlich tiefer geplanten Thermalwasserbrunnen musste im Oberen Muschelkalk wegen der sehr starken Verkarstung bereits bei einer Bohrtiefe von 148,50 m (149,50 m laut Ausbauplan des Ingenieurbüros Brunnenbau und Tiefbohrungen Scheuerle, Stuttgart, vom 04.07.1989) aufgegeben werden. Nach der vorliegenden hydrochemischen Analyse von 1979 (BRUNNER, H. (1986): Erläuterungen zu Blatt 7320 Böblingen, Geologische Karte 1:25000 von Baden-Württemberg; Beilage 4) hat das Grundwasser im Oberen Muschelkalk beim Böblinger Thermalbad (Böblinger Therme GmbH) eine deutlich abweichende Zusammensetzung. Der Gehalt an gelösten Stoffen resultiert im Wesentlichen aus der Lösung von Calcit und Dolomit sowie Gips und untergeordnet auch Steinsalz (Natriumchlorid). Der Gehalt an gelösten Feststoffen (1128 mg/l) übersteigt denjenigen der B1a (708,7 mg/l, 27.03.2015) deutlich. Der Sulfatgehalt (470 mg/l) ist dreifach höher als im Grundwasser der B1a, der Chloridgehalt (37 mg/l) sechsfach höher. Ebenso liegt die Wassertemperatur von 17 °C über derjenigen der B1a (16,0 °C, 24.03.2015). Nach der Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) ist das Muschelkalk-Wasser der Tb I ein normal erdalkalisches, überwiegend sulfatisches Wasser (PIPER-Diagramm, Abb. 7.12). Nach der für Mineralwässer üblichen Typisierung ist es vom Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ (UDLUFT-Diagramm, Abb. 7.15).



Tb. Böblingen I Oberer Muschelkalk 1979

Abb. 7.15: Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Oberer Muschelkalk-Grundwasser im Tiefbrunnen I (1979, $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Typ}$)

Der abweichende Chemismus des Muschelkalk-Wassers der Tb I lässt sich mit der tektonischen Lage begründen. Die Tb I liegt innerhalb des Fildergrabens (Mittelscholle) und ist durch mehrere Verwerfungen (Sindelfingen-Waldenbucher Störungszone) getrennt von der B1a, die sich auf der Grabenschulter (Hochscholle) befindet. Obwohl die Muschelkalk-Oberfläche bei der Bohrung B1a mit 342,55 m NN nur 4,90 m über der Muschelkalk-Oberfläche des Tiefbrunnens I (337,65 m NN) liegt, sind die Grundwasservorkommen im Oberen Muschelkalk in der Hoch- und in der Mittelscholle (Mittelscholle: zwischen der Sindelfingen-Waldenbucher Störungszone und der weiter östlich verlaufenden Vaihinger Verwerfung) durch das Verwerfungssystem

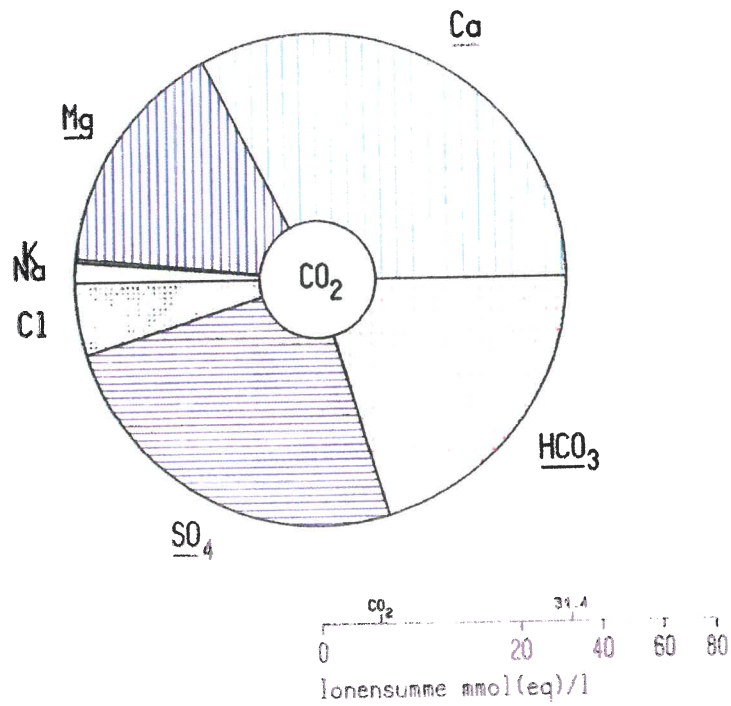


mit einem relativ schmalen Grabenbruch mit über 100 m Schichtenversatz (BRUNNER, H. (1986): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25000, Blatt 7320 Böblingen, S. 50, Beilage 3) hydraulisch voneinander getrennt.

Die Bohrung B2a wurde als temporäre Grundwassermessstelle mit 125 mm Durchmesser im Oberen Muschelkalk ausgebaut. Die Mineralisierung des Grundwassers im Oberer Muschelkalk-Grundwasserstockwerk ist mit rund 1118 mg/l nahezu übereinstimmend (bei unterschiedlicher Ionenzusammensetzung) mit dem Unterkeuper-Stockwerk und geringer als im Gipskeuper-Grundwasserstockwerk. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit 1240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bestimmt. Der Chloridgehalt ist mit 53,5 mg/l relativ gering, der Nitratgehalt lag unter der Nachweisgrenze. Der erhöhte Sulfatgehalt (379 mg/l) dürfte zum Großteil aus der Lösung von Sulfatmineralen stammen. Das Muschelkalk-Grundwasser im Bereich der GWM B2a ist ein normal erdalkalisches, überwiegend hydrogenkarbonatisch-sulfatisches Wasser (Abb. 7.10, Feld B im PIPER-Diagramm, (Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH, 1967). Nach der für Mineralwässer üblichen Typisierung ist das Unterkeuper-Grundwasser der GWM B2a vom Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ (UDLUFT-Diagramm, Abb. 7.16).



Ca-Mg-SO₄-HCO₃-Typ



B2a Böblingen Oberer Muschelkalk 24.09.2015

Abb. 7.16: Udluft-Diagramm: Äquivalentkonzentrationen von Oberer Muschelkalk-Grundwasser in der GWM B2a (24.09.2015, Ca-Mg-HCO₃-Typ)

7.3 Mineral-Sättigungszustände

Die mit dem hydrochemischen Programm PHREEQC (Version 3) des United States Geological Survey (USGS) berechneten Mineral-Sättigungszustände (Tab. 7.2) zeigen folgendes Bild: alle Wasserproben aus dem oberflächennahen Grundwasserstockwerk Gipskeuper (B3, B4 und B2a) sind bei den gemessenen pH-Werten an Calcit und Dolomit gesättigt bis übersättigt (positiver Sättigungsindex), an Gips und an Anhydrit deutlich untersättigt (negativer Sättigungsindex). Dementsprechend könnte im Untergrund in diesen Grundwasserstockwerken sowohl Anhydrit als auch Gips gelöst werden.

Die Übersättigungen an Calcit und Dolomit sind möglicherweise auf den erst im Labor gemessenen pH-Wert zurückzuführen, der für die Berechnung der Mineral-Sättigungszustände eine wichtige Grundlage darstellt. Trotz dieser Unsicherheit ist festzuhalten, dass die beprobten oberflächennahen Grundwässer ein hohes Lösungspotential für Anhydrit und Gips aufweisen.

Die Wasserprobe aus dem Unterkeuper-Stockwerk (B2a) ist bei dem gemessenen pH-Wert an Calcit und Dolomit übersättigt (positiver Sättigungsindex), an Gips und an Anhydrit deutlich untersättigt (negativer Sättigungsindex). Dementsprechend könnte in diesem Grundwasserstockwerk sowohl Anhydrit als auch Gips gelöst werden.

Zur Tiefe hin wurde im Oberen Muschelkalk gespanntes Grundwasser angetroffen. Dieses ist an Calcit und Dolomit bei den gemessenen pH-Werten übersättigt, an Gips und Anhydrit stark untersättigt. Dementsprechend könnte in diesem Grundwasserstockwerk sowohl Anhydrit als auch Gips gelöst werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle untersuchten Grundwässer in den verschiedenen Grundwasserstockwerken sowohl Anhydrit als auch Gips lösen können.

Tab. 7.2: Mineral-Sättigungszustände von Grundwässern in Böblingen

Entnahmestelle	Probenahmedatum	Analysendatum	pH-Wert	Sättigungsindex SI log (IAP / KT)			
				Gips	Anhydrit	Calcit	Dolomit
B3 (km1)	14.04.2016	18.04.2016	7,01 (L)	-0,78	-1,22	0,13	-0,01
B4 (km1)	04.04.2016	18.04.2016	7,01 (L)	-0,75	-1,20	0,34	0,29
B2a (km1)	26.05.2015	14.09.2015	7,20 (L)	-0,20	-0,67	0,55	0,52
B2a (ku)	06.08.2015	14.09.2015	7,16 (L)	-0,78	-1,19	0,37	0,43
B2a (mo)	10.08.2015	14.09.2015	7,10 (L)	-0,43	-0,84	0,37	0,23
B2a (mo)	24.09.2015	30.09.2015	7,05 (L)	-0,81	-1,22	0,27	0,21

(L = pH-Wert-Messung im Labor)



8 Untersuchungen im Bohrloch der B2a

Zur Erkundung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse wurden neben der lithologischen Bohrkernansprache (Kap. 6) sowie der mineralogisch-petrographischen Bohrkernanalyse (Kap. 9) geophysikalische Verfahren eingesetzt, deren Methodik und Zielsetzungen im Folgenden beschrieben werden.

8.1 Geophysikalische Bohrlochmessungen

Geophysikalische Bohrlochmessungen dienen der Gewinnung quantitativer und qualitativer in-situ-Aussagen in einer Bohrung. Die in Böblingen eingesetzten Untersuchungsmethoden in der B2a sind in unten stehender Tab. 8.1 zusammengestellt, die Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochmessungen (vgl. Bericht der Fa. terratec, Heitersheim) können der Anl. 4.1.1 entnommen werden. Die Ergebnisse zur Messung der natürlichen Gamma-Strahlung (vgl. Bericht Büro Voutta, Herrenberg) sind in der Anlage 4.1.2 enthalten.

Die eingesetzten geophysikalischen Untersuchungsmethoden sind nachfolgend beschrieben.

8.1.1 Optischer Bohrlochscanner (ETIBS)

Die Messungen mit dem optischen Bohrlochscanner (Anl. 4.1.1) 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.

8.1.2 Akustischer Scanner (BHTV)

Die Messungen mit dem akustischen Scanner (Anl. 4.1.1) 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) und die *Amplitude* (linke Spur) als abgerollte 360° Bohrlochinnenwandabtastung dargestellt. 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:

-  Schieferung/Schichtung
-  Kluft

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 Schmidt'schen 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.

8.1.3 Kalibermessung

Kalibermessungen wurden in B2a eigens nicht vorgenommen.

8.1.4 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.



8.1.5 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.



8.2 Ergebnisse der geophysikalische Bohrlochmessungen

Zur Ermittlung des Bohrlochverlaufs sowie der strukturellen Verhältnisse erfolgten in B2a insgesamt vier Einsätze am 10.06.2015, 12.06.2015, 15.07.2015 und am 07.08.2015 geophysikalische Bohrlochmessungen. Diese Messungen wurden von der Fa. terratec, Heitersheim, ausgeführt. Die natürliche Gamma-Strahlung wurde ebenfalls an vier Einsätzen (27.05.2015, 10.06.2015, 15.07.2015 und 12.08.2015) vom Büro Voutta, Herrenberg gemessen.

In den Tagesberichten der Fa. Burkhardt sowie im Bericht der Fa. terratec, Heitersheim (Anl. 4.1.1) sind die Randbedingungen der Messungen wie folgt beschrieben:

Tab. 8.1: Übersicht über die eingesetzten geophysikalischen Untersuchungsmethoden in B2a

Messeinsatz	Bohrtiefe	Messiefe	Ausbau	Verfahren
27.05.2015	45,40 m	32,51 m	Stahlvollrohr -1,6–5,8 m, Ø 178 mm darunter offenes Bohrloch Ø 152 mm	natürl. Gamma- strahlung
10.06.2015	63,00 m	62,09 m, 62,52 m	Stahlvollrohr -1,6–5,6 m, Ø 178 mm darunter offenes Bohrloch Ø 152 mm	akustischer Scan, natürl. Gamma- strahlung
12.06.2015	62,09 m; Bohrung bis 30,6 m offen	29,43 m	Stahlvollrohr -1,6–5,6 m, Ø 178 mm darunter offenes Bohrloch Ø 152 mm	optischer Scan
15.07.2015	131,60 m	131,55 m 131,44 m	Stahlvollrohr -1,6–57,0 m, Ø 178 mm darunter offenes Bohrloch Ø 152 mm	akustischer Scan, natürl. Gamma- strahlung
07.08.2015	162,80 m	160,34 m	Stahlvollrohr -1,6–127,5 m, Ø 178 mm darunter offenes Bohrloch Ø 146 mm	akustischer Scan
12.08.2015	162,80 m	162,50 m	Stahlvollrohr -1,6–127,5 m, Ø 178 mm darunter offenes Bohrloch Ø 146 mm	natürl. Gamma- strahlung



8.2.1 Bohrlochverlauf

Wie die in B2a ausgeführten Azimut- und Neigungsmessungen belegen, sind die Abweichungen des Bohrlochverlaufs aus der Vertikalen insgesamt nur gering. Der Endpunkt der 159,11 m tief ausgeführten Bohrung liegt 0,04 m in östlicher und 0,34 m in nördlicher Richtung vom Bohransatzpunkt entfernt. Die wahre Tiefe (TVD) unter dem Bohransatzpunkt beträgt 159,10 m (vgl. Anl. 4.1.1).

8.2.2 Natürliche Gamma-Strahlung

Die Messung der natürlichen Gamma-Strahlung erfolgte profildeckend, wobei die Absolutwerte wie üblich gewissen Dämpfungseinflüssen vorhandener Stahlrohrstrecken und den Messungen ohne/mit Wasser unterworfen sind.

Im Bohrloch der B2a wurden absolute Gammaaktivitäten bis 142 cps gemessen. Das Gamma-log 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 10 cps und 119 cps treten im Bereich der Erfurt-Formation (Unterkeuper) zwischen 125 m und 145 m unter GOK auf. Der Obere Muschelkalk ist durch eine durchweg geringe Strahlungsintensität gekennzeichnet.

Die gewonnenen Gamma-logs lassen sich gut mit dem lithologischen Befund, insbesondere den Grenzen Grabfeld-/Erfurt-Formation wie auch Erfurt-Formation/Oberer Muschelkalk korrelieren (vgl. Anlage 4.1.2).

8.2.3 Optischer und akustische Bohrlochscans

Akustische Scans liegen für das gesamte Bohrloch, optische Scans bis in 29,43 m Tiefe vor. Nach den im offenen Bohrloch ausgeführten optischen und akustischen Scans wurden in allen Messeinsätzen insgesamt 327 Trennflächen ermittelt. Davon sind 227 Flächen flach geneigten Strukturen zuzuordnen, die im Wesentlichen als sedimentäre Flächen (Schichtflächen oder fazielle Grenzflächen) zu bezeichnen sind. Die übrigen 100 Flächen wurden als geöffnete oder geschlossene Klüfte erkannt. Der Vergleich der Schichtenverzeichnisse, der Bohrkernfotos sowie die Auswertung des Trennflächeninventars in den optischen und akustischen Scans zeigt, dass häufig



zumeist (nahezu) senkrechte Klüfte in den Bohrlochscans zu flach eingemessen wurden oder unberücksichtigt blieben, weshalb der tatsächliche Anteil an sehr steilen bis senkrechten Klüften größer ist. Auch können mit Gips verfüllte Klüfte in den akustischen Scans nicht erkannt werden und bleiben daher bei der Auswertung unberücksichtigt.

In Abb. 8.1 und Abb. 8.2 sind die Polpunkte der mittels der optischen und akustischen Bohrlochscans erfassten Trennflächen dargestellt. Abb. 8.1 enthält die als offene/geschlossene Schichtflächen eingestufteten Trennflächen. In Abb. 8.2 sind die als offene oder geschlossene Kluftflächen interpretierten Trennflächen dargestellt.

In Anl. 4.1.1 ist der Bericht der Fa. terratec enthalten. Dieser beinhaltet die optischen bzw. akustischen Aufnahmen der Bohrlochwandung einschließlich der als Trennflächen erkannten Strukturen.

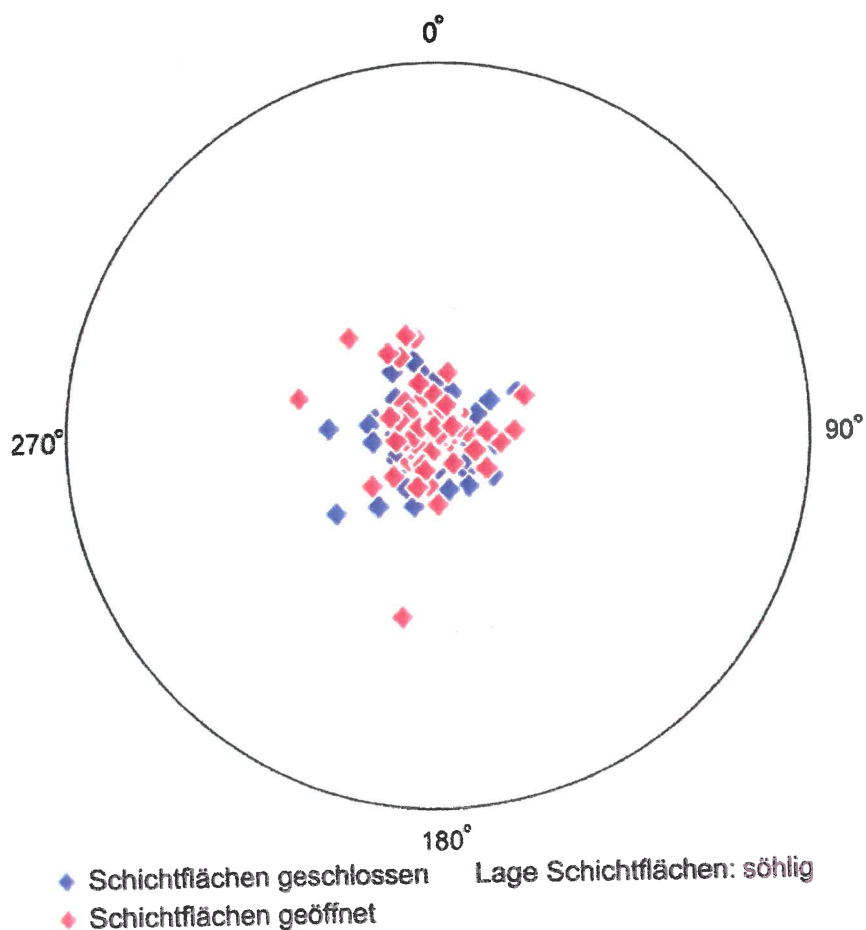


Abb. 8.1: Polpunkte (Projektion untere Halbkugel) der mittels optischer und akustischer Bohrloch-scans in B2a gemessenen sedimentären Flächen (Schichtflächen, fazielle Grenzflächen)

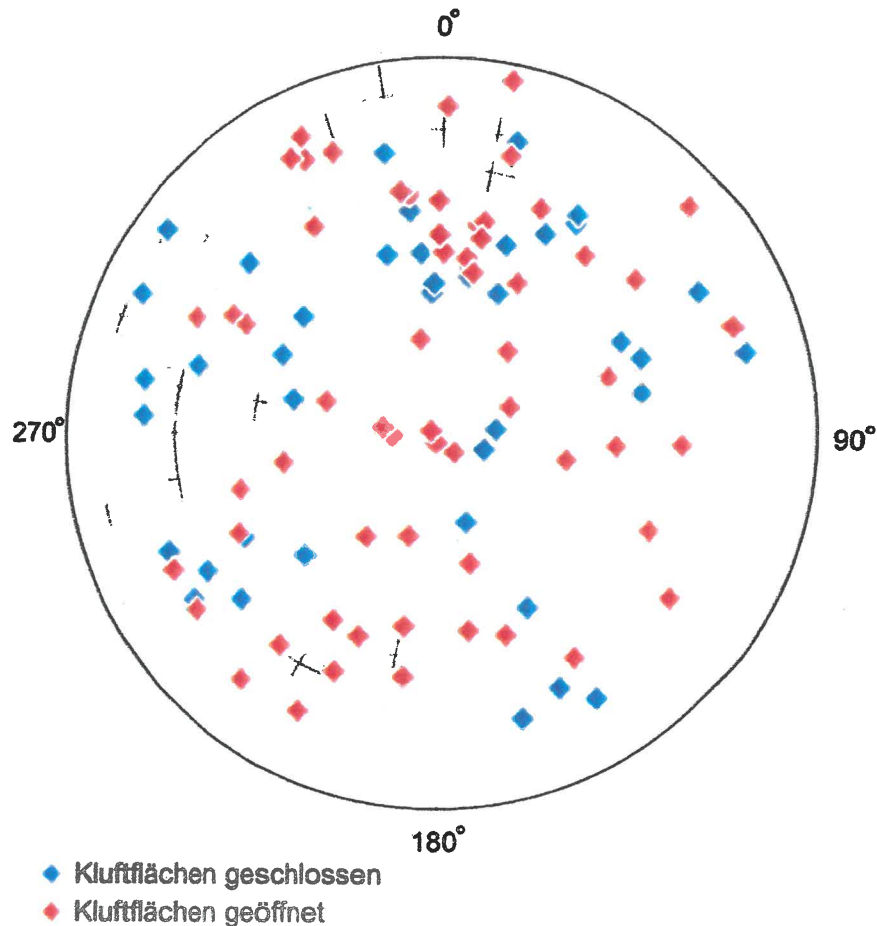


Abb. 8.2: Polpunkte (Projektion untere Halbkugel) der mittels optischer und akustischer Bohrloch-scans in B2a gemessenen Kluftflächen

Offene Schichtflächen finden sich in weiten Teilen der Bohrung wieder. Ein gehäuftes Auftreten ist in der Mittleren Grabfeld-Formation (Mittlerer Gipshorizont), insbesondere an dessen Basis sowie in den Grundgipsschichten (Basis der Grabfeld-Formation) zwischen ca. 114 m u. A. und ca. 120 m u. A. vorzufinden. Auch in größerer Tiefe kommen offene Schichtflächen, insbesondere nahe der Basis der Erfurt-Formation (im Bereich des Estherientons und der Basisschichten) sowie im Bereich des Oberen Muschelkalks vor. Insgesamt kann auf eine annähernd söhlige Schichtlagerung (Schichtneigungen zwischen 0° bis 5° mit leichter Tendenz nach SE) geschlossen werden.



Die 100 identifizierten Klüfte sind i. d. R. deutlich geneigte Flächen (meist zwischen 20° und 70°) und mehrheitlich geöffnet ausgebildet. Die geöffneten Klüfte konzentrieren sich vor allem auf den obersten Bohrungsabschnitt (bis in rund 42 m Tiefe; Steigerwald-Formation bis zu den Unteren Bunten Esterienschichten), im oberen Bereich (ca. 48 m u. A. bis ca. 62 m u. A.) der Mittleren Grabfeld-Formation sowie im untersten Bohrabschnitt (ca. 132 m u. A. bis Endteufe; Anoplophoradolomite bis Künzelsauschichten). Geschlossene Klüfte sind neben einem schmalen Bereich (ca. 44 m u. A. bis 48 m u. A.) innerhalb der Mittleren Grabfeld-Formation vor allem im anhydritführenden Bereich zwischen 62 m u. A. und 118 m u. A. ausgebildet. Deutlich ausgebildete Kluftsysteme (Kluftscharen) lassen sich nicht erkennen. Vielmehr sind nahezu alle Einfallsrichtungen gleichmäßig vertreten. Einzig nach Süden bis Südsüdwesten orientierte Kluftflächen sind etwas häufiger vertreten (vgl. Abb. 8.2).

Der Grund für ein weitgehend unregelmäßiges Einfallen der Kluftflächen ist vermutlich in der Überprägung des tektonischen Trennflächensystems durch sekundäre Prozesse zu sehen, die weitere Trennflächen erzeugten. Diese sekundär entstandenen, vom tektonischen Rahmen unabhängigen Trennflächen sind auf Verformungen (Hebungen und Senkungen) infolge der Umwandlung von Anhydrit in Gips und dem Auflösen von Gips zurückzuführen. Diese "Gipstektonik" erfasste weite Teile des Bohrabschnitts. Um das ursprüngliche, von der "Gipstektonik" nicht überprägte tektonische Trennflächeninventar zu erhalten, wurden daher die erkannten Trennflächen im Bohrabschnitt unterhalb des unteren Gipsspiegels (Bohrabschnitt zwischen 130,5 m u. A. und Endteufe) innerhalb der Gesteine der Erfurt-Formation und des Oberen Muschelkalks separat ausgewertet (vgl. Abb. 8.3).

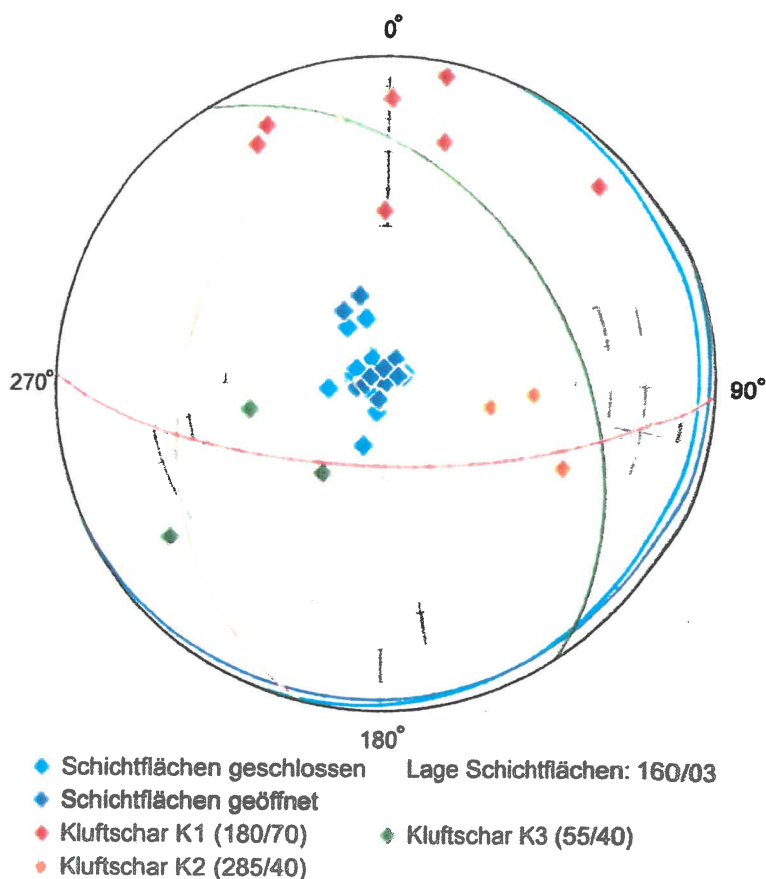


Abb. 8.3: Polpunkte und gemittelte Großkreise (Projektion untere Halbkugel) der mittels optischer und akustischer Bohrlochscans in B2a im Abschnitt unterhalb des Unteren Gipsspiegels (130,5 m u. A. bis Endteufe) gemessenen Trennflächen

Die Auswertung ergab ein durchschnittliches Schichteinfallen nach Südsüdosten mit rund 3°. Die Klufflächen lassen sich drei Kluftsystemen K1 bis K3 zuordnen:

- (Einfallsrichtung/Einfallen)
- Kluftschar K1: 180/70
 - Kluftschar K2: 285/40
 - Kluftschar K3: 55/40

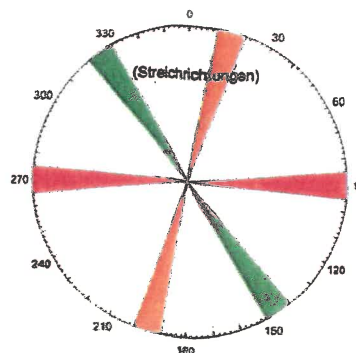


Abb. 8.4: Kluftrosendarstellung der tektonischen Streichrichtungen



Die dominierende Kluftschar K1 weist annähernd ein herzynisches Streichen (entspricht auch dem Verlauf des Fildergrabens) auf. Die Kluftschar K2 ist dem rheinischen System zuzuordnen. Die Klufrichtung K3 entspricht etwa dem eggischen Streichen.

Diese drei Kluftscharen lassen sich zwanglos in der sichelförmigen Ausbildung der Hebungsfigur "Süd" wiedererkennen und geben damit Hinweis auf eine über das vorherrschende Kluftsystem gesteuerte, mitunter weiträumige Wasserzufuhr in den quellfähigen Gebirgsabschnitt.

9 Laborergebnisse an Bohrkernproben der Bohrung B2a

Die Entnahme der Bohrproben erfolgte gemäß den Vorgaben des LGRB durch die Bohrfirma kurz nach der Gewinnung der Bohrkernstücke bzw. des Bohrguts. Die Proben der Bohrung B2a (Bohrkernscheiben bzw. Bohrkernstücke von etwa 5 cm Länge) wurden von der Bohrfirma am Bohrplatz in Folientüten vakuumverschweißt und beschriftet. Nach Probeneingang im mineralogisch-petrographischen Labor des LGRB erfolgte die weitere Bearbeitung der Proben nach dem entsprechend festgelegten Untersuchungsprogramm.

9.1 Bohrkernscheiben / Bohrkernstücke

Je nach Zustand und Festigkeit wurden die zu untersuchenden Bohrkernscheiben vorsichtig in zwei bzw. in drei repräsentative, homogene Teilproben zerlegt. Bei stabilen Proben konnten die Kerne der Länge nach mit der Gesteinssäge **trocken** getrennt werden.

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 ($< 0,02$ mm) gemahlen. Anschließend folgten die festgelegten Untersuchungen (Röntgenbeugung, Bestimmung des Karbonatgehalts).

Die **zweite Teilprobe** wurde paraffiniert, um die Trocken- und Reindichte mittels Tauchwägung zu bestimmen. Falls von dem ursprünglichen Bohrkernstück keine drit-



te Teilprobe erhalten werden konnte, diente die paraffinierte, in Folie eingeschweißte Teilprobe parallel als Rückstellprobe.

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

9.2 Durchgeführte Laboruntersuchungen (Indexversuche)

Bei den im Labor des LGRB untersuchten Gesteins- und Bodenproben handelt es sich nach DIN 4021 um Proben der Güteklassen 2 und 3.

Eine Übersicht über Art und Anzahl der durchgeführten Laboruntersuchungen gibt Tab. 9.1. Die Versuchsergebnisse der Bohrung B2a wurden nach einer Plausibilitätsprüfung jeweils in eine Tabelle (Probentabelle, Anl. 8.1) übertragen und graphisch ausgewertet (Probenspiegel, Anl. 8.2).

Tab. 9.1: Übersicht über Art und Anzahl der durchgeführten Laboruntersuchungen

Bohrung	Anzahl der Gesamtproben	Bestimmung des Wassergehalts	Bestimmung der Trockendichte	Bestimmung der Reindichte	Bestimmung des Karbonatgehalts (n. Müller)	Bestimmung der Calciumsulfatführung RDA
B2a	147	147	146*	147	147	147

* Versuchsdurchführung nicht möglich, da Probenmaterial zu kleinstückig

9.2.1 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 105 °C verdampft, zur Masse m_d der trockenen Probe:

$$w = 100 \times (m_w / m_d) \text{ in } \%$$

Methodik:

Die Bestimmung des Wassergehalts ist in DIN 18 121 Teil 1 (1998) geregelt. Von der in der DIN angegebenen Ofentemperatur von 105 °C (Standardofentrocknung) wurde abgewichen, da bei dieser Tem-



peratur 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 röntgenographischen Untersuchungen nicht mehr nachweisbar sein. Ähnliche Strukturänderungen treten beim Mineral Gips auf, das bereits ab 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 immobilisierten Porenwassers im Gestein verdampft. Wasserabscheidende Mineralreaktionen (z. B. Umkristallisationen) werden hierdurch ausgeschlossen.

Ergebnisse:

In der Bohrung B2a schwanken die Wassergehalte zwischen dem Oberen Gips- und dem Oberen Anhydritspiegel zwischen $\leq 6,5 \%$ und $16,4 \%$. Im Bereich des anhydritführenden Sulfatgebirges liegt der Wassergehalt bei wenigen Prozent und im Anhydritbereich unter 1% (z. B. 116–121 m; $< 0,1\text{--}0,5 \%$). In den nicht sulfatführenden Gesteinen unterhalb des Unteren Gipsspiegels steigt der Wassergehalt wieder an (z. B. 148,5 m; $8,8 \%$).

9.2.2 Bestimmung der Trockendichte und Reindichte

Definition:

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.

$$\rho_d = m_d / V \text{ in g/cm}^3$$

Die Reindichte (ρ_s) des Bodens ist die Masse (m_d) der trockenen Probe (40 °C Ofentrocknung) bezogen auf das Volumen V_k der Probe ausschließlich der mit Wasser und Luft gefüllten Poren.

$$\rho_s = m_d / V_k \text{ in g/cm}^3$$

Methodik:

Die Trockendichte wurde an Gesteinsstücken mit einem Volumen von mindestens 100 cm^3 und festem Zusammenhalt durch Tauchwägung nach DIN 18 125 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 (m_1) und ihr Tauchgewicht (m_2) bei vollständigem Untertauchen in ca. 24 °C temperiertem Wasser bestimmt. Die Differenz zwischen Gewicht in Luft (m_1) und dem Tauchgewicht (m_2) 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.

Die Reindichte wurde an dem Probenmaterial in Feinkorngröße ($< 0,02 \text{ mm}$) mithilfe des Kapillarpyknometers bestimmt. Dazu wurde die getrocknete Probe gewogen und ihr Volumen in dem Kapillarpyknometer gemäß DIN 18 124 bestimmt.



Ergebnisse:

Die in der Bohrung B2a ermittelten Trockendichten betragen zwischen 2,10 g/cm³ und 2,92 g/cm³; die Werte der ermittelten Reindichten liegen zwischen 2,32 g/cm³ und 3,35 g/cm³. Anhand dieser beiden Parameter wurden der Dichtigkeitsgrad und die Porosität bestimmt.

Die Proben mit der gemittelten höchsten Trockendichte und höchsten Reindichte lagen im Abschnitt zwischen 59,74 m und 121,69 m. Bei der Probe mit der gemittelten Tiefe von 37,78 m konnte aufgrund der Kleinstückigkeit des Probenmaterials lediglich die Reindichte bestimmt werden.

Die Trockendichte und die Reindichte wurden zur Charakterisierung von Homogenbereichen (vgl. Kap. 10) herangezogen.

9.2.3 Bestimmung des Karbonatgehaltes nach Müller (Karbonatbombe)

Definition:

Der Karbonatgehalt V_{Ca} eines Bodens/Gesteins ist der durch gasometrische CO₂-Bestimmung ermittelte Massenanteil an Gesamtkarbonaten m_{Ca} bezogen auf die Trockenmasse m_d der Probe.

$$V_{Ca} = 100 \cdot m_{Ca} / m_d \text{ in } \%$$

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 CO₂ (vgl. untere Formel) entstehende maximale Gasdruck wird ermittelt und der Versuch nach 15 Minuten beendet.



Ergebnisse:

Mit diesem Verfahren werden vor allem die häufig vorkommenden Karbonatminerale Calcit (CaCO₃) und Dolomit (CaMg(CO₃)₂) als Gesamtkarbonat erfasst. Die in der Bohrung B2a ermittelten Karbonatgehalte liegen zwischen < 5 % und 98 %. Werte über 90 % treten im Bereich des Oberen Muschelkalks auf. Im Bereich des Gips-/Anhydritspiegels liegen die Werte mit wenigen Ausnahmen deutlich unter 30 %. Werte kleiner 5 % befinden sich unterhalb der Nachweisgrenze und werden in der graphischen Darstellung der Anl. 8.2 als Wert der halben Nachweisgrenze (2,5 %) dargestellt. Aufgrund der verschiedenen Atommassen von Calcium (Ca: 40,1 u) und Magnesium (Mg: 24,3 u) kommt es im Fall von Dolomit bei gleicher Probenmenge zu ei-



ner um 8 % höheren Ausbeute an CO₂ im Vergleich zu reinem Calcit. Dadurch ergeben sich bei Proben mit Dolomit scheinbar überhöhte Karbonatwerte. In den Proben, in denen der labortechnisch bestimmte Karbonatanteil aufgrund des Dolomitgehalts überhöht ist, wurden die Werte für die Darstellung in Anl. 8.2 um 8 % korrigiert.

9.2.4 Röntgen-Pulverdiffraktometrie-Analyse (RDA)

Zur qualitativen und semiquantitativen Bestimmung der Gips- und Anhydritführung der Gesteinsproben wurden **Röntgen-Pulverdiffraktometrie-Analysen (RDA)** durchgeführt.

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 °C getrocknete Probenpulver wird auf einem Probenträger 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. 2Θ , aus dem der Basisabstand d einer Kristallebene bzw. Netzebene über die **Gleichung nach Bragg** (n = natürliche Zahl der Beugungsordnung) ermittelt wird:

$$d = n \times \lambda / (2 \times \sin \Theta)$$

Das Ergebnis einer RDA ist ein Röntgen-Diffraktogramm, bei dem die gemessene Intensität auf der Ordinate und der zugehörige Glanzwinkel (2Θ) auf der Abszisse abgetragen werden. Aus der Lage und Intensität der Röntgenreflexe (Peaks) kann durch Vergleich mit internationalen Standardtabellen auf die Mineralart und mittels Eichkurven auf den semiquantitativen Mineralbestand geschlossen werden. Die RDA wurde an einem texturarmen Pulverpräparat des Gesamtgesteins im Winkelbereich von 2° bis 40° (2Θ) durchgeführt, bei der die am Gesteinsaufbau beteiligten Sulfatminerale sicher bestimmt werden. Als Messgerät wurde das D8 Advance der Firma Bruker mit einer Cu-Anode ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$) verwendet.

Ergebnisse:

Bei den röntgenographischen Untersuchungen an Proben der Bohrung B2a wurde das Vorkommen der Minerale Gips (CaSO₄ x 2 H₂O) und Anhydrit (CaSO₄) in Gesteinen der Grabfeld-Formation und Gips in einzelnen Schichten der Erfurt-Formation (Unterkeuper) nachgewiesen. Die Nachweisgrenze des RDA-Verfahrens liegt bei ca. 1 %. Aus den erhaltenen Röntgendiffraktogrammen wurde der qualitative Anteil von Gips und Anhydrit bestimmt und auf einen Sulfatgehalt von 100 % bezogen (Gips-Anhydrit-Verhältnis). Anhand der Sulfatbestimmung und des Gips-Anhydrit-



Verhältnisses ist eine Abgrenzung von sulfatfreien, gipsführenden, gips- und anhydritführenden sowie rein anhydritführenden Gebirgsabschnitten möglich¹. Sulfatgehalte unterhalb der Nachweisgrenze wurden nicht graphisch dargestellt. Die Festlegung der jeweiligen Oberen und Unteren Gips- bzw. Anhydritspiegel erfolgte anhand der RDA-Ergebnisse sowie den Angaben des Schichtenverzeichnisses der Bohrung B2a.

In der Bohrung B2a tritt Gips in einer Zone zwischen 17,5 m (Oberer Gipsspiegel) und 130,5 m (Unterer Gipsspiegel) auf. Anhydrit kommt zwischen 58,5 m (Oberer Anhydritspiegel) und 121,7 m (Unterer Anhydritspiegel) vor. Es gibt innerhalb der anhydritführenden Zone zwei Bereiche in denen das Calciumsulfat fast vollständig als Anhydrit vorliegt (Anhydritkerne), diese liegen zwischen 60,9 m und 63,4 m sowie zwischen 116,6 m und 121,7 m. Zwischen dem Oberen und Unteren Anhydritspiegel treten wiederholt einzelne Lagen mit Gipsgehalten von bis zu 85 % auf.

Da in der Bohrung B1a (siehe Sachstandsbericht zum Hebungsgebiet "Nord", LGRB-Az.: 95-4764//15-07202 vom 22.12.2018) in den röntgenographischen Untersuchungen der Bohrkernproben keine quellfähigen Mixed-Layer-Tonminerale (Corrensit) nachgewiesen wurden, erfolgte die analytische Untersuchung der Tonminerale nur stichprobenhaft in einem Abschnitt zwischen 95,65 m und 99,84 m. In den untersuchten Proben der B2a wurde kein Corrensit nachgewiesen.

10 Gliederung der Erkundungsbohrung B2a in lithologische Homogenbereiche

Es wird darauf hingewiesen, dass sich der in diesem Sachstandsbericht verwendete Begriff der Homogenbereiche lediglich auf lithologische Homogenbereiche bezieht. Diese sind nicht gleichzusetzen mit den nach der VOB Teil C (2015) definierten Homogenbereichen. Es handelt sich lediglich um eine Zusammenfassung von Gesteinsbereichen nach lithologischen und mineralogischen Aspekten.

Die lithologischen Homogenbereiche sind Zonen innerhalb des Gebirgsverbandes, deren mechanische und hydraulische Gesteinseigenschaften relativ einheitlich sind

¹ Die Tiefenlage der Gips- und Anhydritspiegelgrenzen wurden anhand der unteren Entnahmetiefe der Probe vor dem ersten Auftreten bzw. dem Ausbleiben von Gips/Anhydrit festgelegt.



und innerhalb einer gewissen Bandbreite liegen. Gewöhnlich werden Homogenbereiche hinsichtlich Lithologie, Tektonik, Trennflächengefüge, Auflockerungsgrad, Verwitterungszustand, Durchlässigkeit und Grundwasserführung zusammengefasst. Die Charakterisierung der Homogenbereiche der Erkundungsbohrung B2a erfolgte hier nach der Lithologie, der Sulfatführung, dem Gips- und Anhydrit-Verhältnis sowie den Durchschnittswerten der Dichten und dem natürlichen Wassergehalt. Soweit möglich, wurden die Laborkennwerte und relativen Mineralgehalte innerhalb der jeweiligen Homogenbereiche einer einfachen Mittelwertbildung unterzogen. Die Homogenbereiche der Bohrung B2a sind in Tab. 10.1 aufgelistet und farblich unterschieden. Die Zahlen in Klammern geben die gemessenen minimalen und maximalen Werte an (vgl. Anl. 8.1). Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurde die Farbgebung der Homogenbereiche auch in den Anl. 8.1 und 8.2 angewendet.

Tab. 10.1: Gliederung der Bohrung B2a in lithologische Homogenbereiche

Teufe [m]	Mächtigkeit [m]	Lithologischer Homogenbereich	Wassergehalt [%]	Porenanteil [%]	Trockendichte [g/cm³]	Reindichte [g/cm³]	Gipsgehalt [%]	Anhydritgehalt [%]	Karbonatgehalt [%]***	Lithologie
-2,00	2,00	Verschachtung (KA)	-	-	-	-	-	-	-	Unbekannt
-4,20	2,20	Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (kmSw)	-	-	-	-	-	-	-	Tonsteine, teilw. aufgelockert und aufgewittert
-6,00	1,80	GAR-Zone (kmSw)	-	-	-	-	-	-	-	Auslaugungsrückstände, lockergesteinsartige, brecciose Ton-/Schluffsteine
-17,54	11,54	Primär nicht/gering sulfatführendes Gebirge (kmSw – kmGr)	-	-	-	-	-	-	-	Sandsteine, Tonsteine teilw. dolomitisch, Dolomitsteine, geringe GAR-Lagen
-58,52	40,98	Zone zwischen Oberem Gips- und Oberem Anhydritspiegel (kmGr)	2,4 (0,2–16,4)	8,2 (0,4–23,8)	2,36 (2,15–2,70)	2,57 (2,32–3,02)	61,3 (3,0–98,0)	-	11,7 (2,5**–74,5)	Gipssteine, Tonsteine teilw. dolomitisch, Dolomitsteine
-59,77	1,25	Zone zwischen Oberem und Unterem Anhydritspiegel (kmGr)	1,3 (0,1–3,7)	9,6 (0,4–22,7)	2,58 (2,16–2,83)	2,83 (2,45–3,18)	13,5 (1,0–85,0)	27,5 (2,0–73,0)	14,1 (2,3**–38,6)	Tonsteine teilw. dolomitisch, Gips- und Anhydritgesteine
-63,44	3,67	Oberer Anhydritkern (kmGr)	0,4 ($< 0,1$ –1,6)	7,3 (1,1–13,6)	2,79 (2,53–2,92)	3,01 (2,84–3,34)	4,0 (1,0–7,0)	63,5 (1,0–96,0)	15,5 (2,3**–72,7)	Tonsteine teilw. dolomitisch, Anhydritsteine, Wenig Gipssteine
-115,89	52,45	Zone zwischen Oberem und Unterem Anhydritspiegel (kmGr)	1,3 (0,1–3,7)	9,6 (0,4–22,7)	2,56 (2,16–2,83)	2,83 (2,45–3,18)	13,5 (1,0–85,0)	27,5 (2,0–73,0)	14,1 (2,3**–38,6)	Tonsteine teilw. dolomitisch, Gips- und Anhydritgesteine
-121,72	5,83	Unterer Anhydritkern (kmGr)	0,4 ($< 0,1$ –1,6)	7,3 (1,1–13,6)	2,79 (2,53–2,92)	3,01 (2,84–3,34)	4,0 (1,0–7,0)	63,5 (1,0–96,0)	15,4 (2,3**–72,7)	Tonsteine teilw. dolomitisch, Anhydritsteine, wenig Gipssteine
-130,47	8,75	Zone zwischen Unterem Anhydritspiegel und Unterem Gipsspiegel (kmGr – km)	0,9 ($< 0,1$ –3,3)	6,4 (0,7–16,0)	2,53 (2,32–2,75)	2,71 (2,34–3,15)	38,1 (2,0–98,0)	< 1	41,6 (7,4–81,0)	Gipssteine, Tonsteine dolomitisch, Dolomitsteine
-144,50	14,03	Gipsstein, bzw. Sulfatknollen (kmE)	2,3 (0,4–4,5)	11,5 (2,2–18,2)	2,54 (2,41–2,83)	2,88 (2,61–3,13)	2,0	< 1	22,6 (2,5**–76,0)	Tonsteine, Dolomitstein, Feinsandsteine, Gipsstein und stellenweise Sulfatknollen
-162,20	17,70	Primär nicht sulfatführendes Gebirge (mo)	3,0 (0,1–8,8)	14,9 (2,1–36,8)	2,50 (2,10–2,71)	2,95 (2,73–3,35)	< 1	< 1	89,8 (64,7–98,4)	Dolomitstein, Tonsteine, bioklastischer Kalkstein

keine Proben/Analysen vorhanden
Wert der ½ Nachweisgrenze
Karbonatwerte der Anlage 8.1, die aufgrund des Dolomitgehalts überhöht sind, wurden um 8 % abgemindert



10.1 Vorschachtungen (KA, evtl. q) 0,00–2,00 m

Den obersten Homogenbereich der Bohrung B2a bilden vermutlich Quartäre Sedimente. Da bis in die Tiefe von 2,00 m eine Vorschachtung erfolgte, liegen über die Mächtigkeit und die Zusammensetzung etwaiger Quartärer Ablagerungen keine Erkenntnisse vor.

10.2 Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (kmSw) 2,00–4,20 m

Die ersten durch die Bohrung B2a aufgeschlossenen Gesteine, sind die der Roten Wand der Steigerwald-Formation. Bis 4,20 m unter Bohransatzpunkt sind bröckelige, schluffige Tonsteine anstehend. Die Tonsteine sind teilweise zerbohrt. Es ist davon auszugehen, dass die Gesteine verwittert bis stark verwittert sind. In diesem Bereich der Bohrung wurden keine Proben genommen, bzw. Laboruntersuchungen durchgeführt.

10.3 GAR-Zone (kmSw) 4,20–6,00 m

In einer Zone zwischen 4,20 m und 6,00 m finden sich zwischen Tonstein der Roten Wand Lagen von Gipsauslaugungsresiduen (GAR). In diesem Bereich der Bohrung wurden keine Proben genommen, bzw. Laboruntersuchungen durchgeführt.

10.4 Primär nicht oder nur gering sulfatführendes Gebirge (kmSw–kmGr) 6,00–17,54 m

Unter der GAR-Zone folgt bis zum Oberen Gipsspiegel (17,54 m Tiefe) eine 11,54 m mächtige Zone aus Tonsteinen sowie Schlufftonsteinen. Die Gesteine umfassen die Restmächtigkeit der Steigerwald-Formation, die gesamte Stuttgart-Formation und reichen bis in die oberen Einheiten der Grabfeld-Formation (Graue Estherienschichten). Die Tonsteine sind teilweise stark zerlegt und kleinstückig. In diesem Bereich der Bohrung wurden keine Proben genommen, bzw. Laboruntersuchungen durchgeführt.

10.5 Zone zwischen Oberem Gips- und Oberem Anhydritspiegel (kmGr) 17,54–58,52 m

Diese 40,94 m mächtige Zone aus plattigen Tonsteinen (stellenweise dolomitisch) mit eingeschalteten knolligen, linsigen, faserigen und schichtigen Gipslagen beginnt mit dem ersten Auftreten von nachweisbarem Gips (Oberer Gipsspiegel: 17,54 m Tiefe)



und endet mit dem ersten Auftreten von Anhydrit (Oberer Anhydritspiegel: 58,52 m Tiefe). Dieser gipsführende Homogenbereich liegt innerhalb der Estherienschichten (kmGES, kmUBE) und der Mittleren Grabfeld-Formation (kmGm). Der mittlere Gipsgehalt liegt bei 31,3 %, der mittlere Wassergehalt bei 2,4 %. Die Reindichte beträgt wegen des hohen Gipsanteils (Reindichte von Gips: $\sim 2,3 \text{ g/cm}^3$) im Durchschnitt $2,57 \text{ g/cm}^3$. Einzelne erhöhte Wassergehalte (bis zu 16,4 %) und geringe Gipsgehalte im Bereich der Estherienschichten weisen auf Wasserführung hin.

10.6 Zone zwischen Oberem und Unterem Anhydritspiegel (kmGR) 58,52–121,72 m

Dieser Homogenbereich beginnt unterhalb des Oberen Anhydritspiegels (58,52 m Tiefe) und besteht aus Gesteinen der Mittleren Grabfeld-Formation (kmGm), der Dunkelroten Mergel (kmDRM), des Bochingen-Horizonts und einem großen Teil der Grundgipsschichten (kmGI). Der Homogenbereich endet mit dem Beginn der Zone zwischen dem Unteren Anhydritspiegel und dem Unteren Gipsspiegel in 121,72 m Tiefe. Zwischen dem Oberen und Unteren Anhydritspiegel liegen zudem noch zwei Bereiche, die aufgrund ihres hohen Anhydritgehalts als „Anhydritkerne“ (Kap. 10.7) separat betrachtet werden. Lithologisch besteht diese 53,70 m mächtige Zone (Mächtigkeit ohne Anhydritkerne) aus einer plattigen, dünnbankigen Wechselfolge aus dolomitischen Tonsteinen sowie Anhydrit- und Gipssteinen. Im Vergleich zum vorherigen Homogenbereich nimmt der Gipsanteil im Mittel von über 60 % auf unter 20 % ab. Parallel erhöht sich der Anhydritanteil von weniger als 1 % (unterhalb der Nachweisgrenze) auf 27,5 %. Aufgrund der hohen Reindichte (bis zu $2,97 \text{ g/cm}^3$) des Anhydrits erhöht sich die Reindichte der Gesteine im Mittel auf $2,83 \text{ g/cm}^3$. Der Wassergehalt sinkt entsprechend auf 1,3 % ab. Anhand des Bohrbefundes (vgl. Bohrkernfotos Anl. 2.1) wie auch nach den durchgeführten Bohrlochscans (vgl. Anl. 4.1.1) erscheint das erbohrte Gebirge unterhalb des Oberen Anhydritspiegels insgesamt als relativ kompakt.

10.7 Anhydritkern, Oberer und Unterer (kmGr) 59,77–63,44 m und 115,89–121,72 m

Diese als „Anhydritkerne“ bezeichneten Gebirgsabschnitte wurden wegen des dort oft nur in Spuren (Nachweisgrenze) auftretenden Gipses und des hohen Anteils von Anhydrit (> 60 %) ausgeschieden. Das im Gestein vorkommende Calciumsulfat liegt fast vollständig als Anhydrit vor. Der Obere Anhydritkern liegt zwischen 59,77 m und 63,44 m in der Mittleren Grabfeld-Formation (kmGm). Der Untere Anhydritkern liegt zwischen 115,89 m und 121,72 m in den Grundgipsschichten (kmGI). Die Bohrkern-

strecke in der Mittleren Grabfeld-Formation ist von Wechsellagerungen aus Tonsteinlagen und Anhydritgesteinsbereichen geprägt. Im Bereich der Grundgipsschichten wurden dünnbankige Anhydritsteine sowie untergeordnet plattige, dolomitische Ton- und Dolomitsteine erbohrt. Im Mittel lagen die sehr hohen Reindichten bei $3,01 \text{ g/cm}^3$ und die Wassergehalte bei 0,4 %.

10.8 Zone zwischen Anhydritkern und Unterem Gipsspiegel (kmGr–ku) 121,72–130,47 m

Dieser 8,75 m mächtige Homogenbereich befindet sich zwischen dem unteren Ende des Unteren Anhydritkerns als Unterer Anhydritspiegel (121,72 m Tiefe) und dem Unteren Gipsspiegel (130,47 m Tiefe). Er ist aus plattigen bis dünnbankigen Gipssteinen sowie dolomitischen Tonsteinen der Grundgipsschichten (kmGI) aufgebaut. Die Grenze des Unteren Gipsspiegels reicht über die Gesteine des Grenzdolomits (kuD), den Grünen Mergeln (kuGRM) bis in die Schichten des Linguladolomits (kuLd). Es fehlen im unteren Bereich des Gipsspiegels typische Gipsauslaugungszonen (GAR), wie sie andernorts (z. B. Staufen) beobachtet wurden. Der Wassergehalt liegt im Mittel bei 0,9 % und damit relativ niedrig. Der mittlere Gipsgehalt liegt bei 33,1 %. Anhydrit konnte nicht nachgewiesen werden.

10.9 Unterkeuper teilweise mit Gipsstein, bzw. Sulfatknollen (kuE) 130,47–144,50 m

Dieser 14,03 m mächtige Homogenbereich befindet sich unter dem Unteren Gipsspiegel (130,47 m Tiefe). Er wird aus Tonsteinen, Dolomitsteinen, Schluff- und Feinsandsteinen sowie sekundär gebildeten Fasergipsen im Bereich der Unteren Grauen Mergel aufgebaut. Der Anhydritgehalt liegt unterhalb der Nachweisgrenze. Der ermittelte Wert der Reindichte ist im Vergleich zu den gipsführenden Homogenbereichen der Grabfeld-Formation (kmGr) größer und liegt bei $2,88 \text{ g/cm}^3$. Der Wassergehalt liegt im Mittel bei 2,3 %.

10.10 Primär nicht sulfatführendes Gebirge (mo) 144,50–162,20 m

Bis zur Endteufe von 162,20 m wurden Dolomitsteine, Kalksteine, Tonsteine des Oberen Muschelkalks (Trigonodusdolomit, moD; Künzelsau-Schichten, moK) erbohrt und als ein gemeinsamer Homogenbereich zusammengefasst. Der untere Homogenbereich zeichnet sich durch einen hohen Porenanteil (14,86 %) und einen sehr hohen Karbonatanteil (89,8 %) aus. Der Wassergehalt liegt bei 3,0 % und die Reindichte bei $2,95 \text{ g/cm}^3$. Calciumsulfat konnte nicht nachgewiesen werden.



11 Geologische und technische Angaben sowie Raumlagen (Inklination und Azimut) der Erdwärmesonden im Hebungsgebiet "Süd"

Die nachstehenden Angaben sind den Bohrmeisterprotokollen entnommen.

[REDACTED]

Die Erdwärmesondenbohrungen im [REDACTED] wurden laut Dokumentation der Bohrfirma im Imlochhammer-Bohrverfahren mit einem Meißel-Durchmesser von Ø 127 mm abgeteuft. Die obersten ca. 13 m wurden (vermutlich gerammt gebohrt) mit einer Hilfsverrohrung (Ø 152 mm) gesichert. Der technische Ablauf der Bohrungen wurde als "gut", die angetroffene Wasserführung als "mittel" und die angetroffene Klüftigkeit als "wenig" charakterisiert. Inwieweit diese Angaben sich tatsächlich auf jede der Bohrungen [REDACTED] beziehen (siehe Hinweis zu den vorliegenden Bohrprotokollen), bleibt ungewiss.

[REDACTED]

[REDACTED] wurden die Erdwärmesondenbohrungen im Imlochhammer-Bohrverfahren mit einem Meißel-Durchmesser von Ø 152 mm abgeteuft. Die Hilfsverrohrung (Ø 178 mm, vermutlich gerammt gebohrt) reicht jeweils bis 33 m unter Bohransatz.

[REDACTED]

Die Erdwärmesondenbohrungen im [REDACTED] wurden laut Bohrdokumentation im Imlochhammer-Bohrverfahren mit einem Meißel-Durchmesser von Ø 152 mm abgeteuft. Die obersten ca. 27 m wurden (vermutlich gerammt gebohrt) mit einer Hilfsverrohrung (Ø 178 mm) gesichert und - vermutlich wegen des im Bohrprotokoll beschriebenen Nachfalls bei 27 m–30 m – die Hilfsverrohrung auf 32 m vertieft.

[REDACTED]

Für die Erdwärmesondenbohrungen [REDACTED] kamen das Imlochhammer-Bohrverfahren mit einem Meißel-Durchmesser von Ø 127 mm mit einer Hilfsverrohrung (Ø 152 mm, vermutlich gerammt gebohrt) bis 15 m unter Bohransatz zur Anwendung. Der technische Ablauf der Bohrungen wurde als "gut", die angetroffene Wasserführung als "viel" und die angetroffene Klüftigkeit als "wenig" charakterisiert. Inwieweit diese Angaben sich tatsächlich auf jede der Bohrungen [REDACTED] beziehen (siehe Hinweis zu den vorliegenden Bohrprotokollen), bleibt ungewiss.

Was die Abdichtung/Hinterfüllung der Ringräume der Erdwärmesonden betrifft, wird auf die nachstehende Tab. 11.1 verwiesen, die auf Grundlage der verfügbaren Bohrprotokolle der Bohrfirma aufgestellt wurde.

Tab. 11.1: Zusammenstellung der Ringraumabdichtung (Soll- und Ist-Volumina) der Erdwärmesonden

Lage	EWS	Tiefe (m) nach Firmen- angabe	Soll-Volumen (Liter) nach Fir- menangabe	Ist-Volumen (Liter) nach Firmenangabe
	EWS1	80	828	1013
	EWS2	80	828	1021
	EWS1	80	828	1010
	EWS2	80	828	1020
	EWS1	80	828	1029
	EWS2	80	828	1026
	EWS1	80	828	1024
	EWS2	80	828	1034
	EWS1	99 ^{*)}	1665	2430
	EWS2	99 ^{*)}	1677	2565
	EWS3	99 ^{*)}	1677	2767
	EWS1	80 ^{*)}	1398	1999
	EWS2	80 ^{*)}	1398	2180
	EWS1	80 ^{*)}	1398	2278
	EWS2	80 ^{*)}	1398	2222
	EWS1	90	934	1147
	EWS2	90	934	1166
	EWS3	90 ^{*)}	934	1126

^{*)} nach den geophysikalischen Messungen müssen die Sonden mindestens 133 m tief gebohrt worden sein

^{**)} nach den geophysikalischen Messungen dürften die Sonden ca. 0,6 m – 2 m tiefer gebohrt worden sein

Lage	EWS	Firmenangabe zum Ringraumzement
	EWS1	Zement ^{**)} -Bentonit-Suspension,
	EWS2	Verfüllmaterial sulfatbeständig
	EWS1	Zement ^{**)} -Bentonit-Suspension,
	EWS2	Verfüllmaterial sulfatbeständig
	EWS1	Zement ^{**)} -Bentonit-Suspension,
	EWS2	Verfüllmaterial sulfatbeständig
	EWS1	Zement ^{**)} -Bentonit-Suspension,
	EWS2	Verfüllmaterial sulfatbeständig
	EWS1	keine Angaben
	EWS2	keine Angaben
	EWS3	keine Angaben
	EWS1	keine Angaben
	EWS2	keine Angaben
	EWS1	Zement ^{**)} -Bentonit-Suspension,
	EWS2	Verfüllmaterial sulfatbeständig
	EWS3	

^{**) ohne Produktangabe}



Zieht man die Erkundungsergebnisse aus der Erkundungsbohrung B2a als Referenzprofil heran, haben die Erdwärmesondenbohrungen im [REDACTED] wie auch im [REDACTED] die **Steigerwald-Formation** in Restmächtigkeit und die **Stuttgart-Formation** durchörtert und enden im Mittleren Gipshorizont der **Grabfeld-Formation**. Bezogen auf das Referenzprofil der B2a unterschneiden die Erdwärmesondenbohrungen [REDACTED] den Anhydritspiegel um ca. 21 m und [REDACTED] um ca. 13 m. Die Bohrungen [REDACTED] erreichen bei 133 m tatsächlicher Bohrtiefe nach Referenzprofil der B2a die **Erfurt-Formation** und unterschneiden damit den gesamten Anhydritbereich innerhalb der **Grabfeld-Formation**.

Keine Erdwärmesondenbohrung hat den unterlagernden **Oberen Muschelkalk** erreicht.

Aus der Bohrdokumentation der Bohrfirma geht hervor, dass das Schichtenprofil im [REDACTED] 05. März 2009 (d. h. drei Monate nach Abschluss der Bohrungen) und [REDACTED] am 27.11.2008 (d. h. drei Wochen nach Abschluss der Bohrungen) vom betreuenden Geologen aufgenommen wurde. Es ist unklar, ob dieser zur Zeit der Bohrausführung auf der Baustelle anwesend war.

11.1 Raumlagemessungen der Erdwärmesonden

Erdwärmesondenbohrungen, die im Imlochhammer-Bohrverfahren hergestellt werden, weichen tendenziell vom Bohransatzpunkt bis zum Bohrendpunkt mehr oder weniger stark ab. Die Sondenschläuche selbst weisen die übliche ausgeprägte Spiralität auf, welche aus den von der Haspel abgerollten und in das Bohrloch z. T. unter mechanischem Druck eingeführten EWS-Schläuchen resultiert (mit mehrfachen Anliegestellen an die Bohrlochwandung) bei einer "Wellenlänge" von größenordnungsmäßig 2–4 m. Dies entspricht den Erfahrungen anderer Messungen bei sonstigen EWS-Schadensfällen.

Für eine Planung eines geordneten Rückbaues von Erdwärmesonden, wie z. B. durch eine Vertikalüberbohrung mit großem Bohrkaliber, Beräumung des Sondenbaus und anschließender Bohrlochabdichtung, ist die Kenntnis der Raumlage ihrer Bohrspuren unabdingbare Voraussetzung. Denn bei größeren Bohrlochabwei-



chungen aus der Vertikalen besteht immer die große Gefahr, beim Überbohren das vorhandene Bohrloch der Erdwärmesonden zu verlieren. Inwieweit bei dem gewählten Bohrverfahren die Vertikalität der Bohrungen als gewährleistet gelten durfte, war zunächst unbekannt und erforderte daher eine entsprechende messtechnische Überprüfung der Raumlage, welche in den Erdwärmesonden am Heinrich-Heine-Weg, am Schliffkopfweg und am Herdweg zum Einsatz kamen.

Für Messungen zur Raumlagebestimmung (Azimut, Inklination) von Erdwärmesonden bedarf es derzeit eines frei befahrbaren Mindest-Innendurchmessers der SONDENschläuche von > 15 mm.

Dabei wird, wie bereits an der Siemensstraße praktiziert, ein EWS-Schlauch mit der Mini-Verlaufssonde befahren. In der Mini-Verlaufssonde (miniDEV) befinden sich ein 3-achs Accelerometer und ein 3-achs Magnetometer. Mit dem Accelerometer wird die Neigung zur Vertikalen ermittelt, mit dem Magnetometer die Richtung im Erdmagnetfeld. Die Richtung wird als Azimut angegeben, welcher der Abweichung gegen magnetisch Nord entspricht. Die Präzision der Sensoren beträgt $\pm 1^\circ$ für die Neigung und $\pm 2^\circ$ für den Azimut (Beschreibung der Fa. terratec).

Für die Erdwärmesondenbohrungen [REDACTED] sind die Abweichungen der EWS-Bohrachsen aus der Vertikalen (terratec) in nachstehender Tab. 11.2 aufgeführt. Für die Erdwärmesonden im Gansseeweg liegen indes keine derartigen Untersuchungen vor.

Tab. 11.2: Abweichungen (ca.-Werte) der EWS-Bohrachsen aus der Vertikalen (nach terratec, bullseye-Darstellungen)

EWS-Bohrung	EWS	Abweichungsrichtung	max. Abweichungsbe- trag
[REDACTED]	EWS1-S2	W	0,6 m
[REDACTED]	EWS1-S4	SW	0,5 m
[REDACTED]	EWS2-S2	WNW	0,9 m
[REDACTED]	EWS2-S1	WSW	0,5 m
[REDACTED]	EWS1-S3	WSW	2,25 m
[REDACTED]	EWS2-S2	WSW	2,8 m
[REDACTED]	EWS2-S1	WNW	2,8 m
[REDACTED]	EWS2-S2	WNW	2,8 m
[REDACTED]	EWS1-S4	WNW	0,5 m
[REDACTED]	EWS1-S2	WNW	0,8 m
[REDACTED]	EWS2-S1	SW	3,4 m
[REDACTED]	EWS2-S2	SW	2,5 m
[REDACTED]	EWS1-S1	SW	3,3 m
[REDACTED]	EWS1-S4	SW	1,8 m
[REDACTED]	EWS2-S4	SW	1,1 m
[REDACTED]	EWS2-S2	SW	3,0 m
[REDACTED]	EWS 1 gesamt	bis 25 m NE, dann W	bis 1,7 m

EWS-Bohrung	EWS	Abweichungsrichtung	max. Abweichungsbe- trag
[REDACTED]	EWS 2 gesamt	bis 25 m NE, dann W	bis 1,1 m
[REDACTED]	EWS 1 gesamt	bis 20 m NW, dann W	bis 1,5 m
[REDACTED]	EWS 2 gesamt	SW	bis 1,8 m
[REDACTED]	EWS1 gesamt	NW bis SW	bis 0,6 m
	EWS2 gesamt	W	bis 1,8 m
	EWS3 gesamt	W bis NW	bis 0,6 m

Variationen im maximalen Abweichungsbetrag innerhalb ein und desselben Bohrloches dürften auf Messbeträgen aus der Spiralität der Erdwärmesondenschläuche zurückzuführen sein. Die einzelnen Messergebnisse sind in Anl. 7 beigelegt.

11.2 Ruhetemperaturprofile in den Erdwärmesonden im Hebungsgebiet "Süd"

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 auch für die nachträgliche Überprüfung der Qualität von Erdwärmesonden eingesetzt.

11.2.1 Vorbemerkungen zu Temperaturmessungen in Erdwärmesonden

Die Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden im Hebungsgebiet "Süd" hatten folgende Zielsetzungen:

- Messung der vertikalen Temperaturverteilung
- Nachweis von Temperaturanomalien, die auf mögliche Undichtigkeiten in Ringraumverfüllungen hinweisen
- Nachweis positiver Temperaturanomalien als Folge exothermer Umwandlung von Anhydrit in Gips
- Nachweis von Hydratationswärme zur Lokalisierung von nachträglich eingebrachtem Injektionszement im Zuge von Sanierungsarbeiten

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 örtliche geothermische Gradient.

Um die in den Erdwärmesondenschläuchen gemessenen Ruhetemperaturprofile sachgerecht interpretieren zu können, ist es eine Grundvoraussetzung, den im Untersuchungsgebiet zutreffenden geothermischen Gradienten zu kennen. Hierfür wurde das in der Erkundungsbohrung B2a ausgeführte Temperaturlog ausgewertet. In Abb. 11.1 ist neben der Leitfähigkeit des grundwassererfüllten Bohrloches die in der Bohrung B2a gemessene Gebirgs-/Grundwassertemperatur aufgetragen.

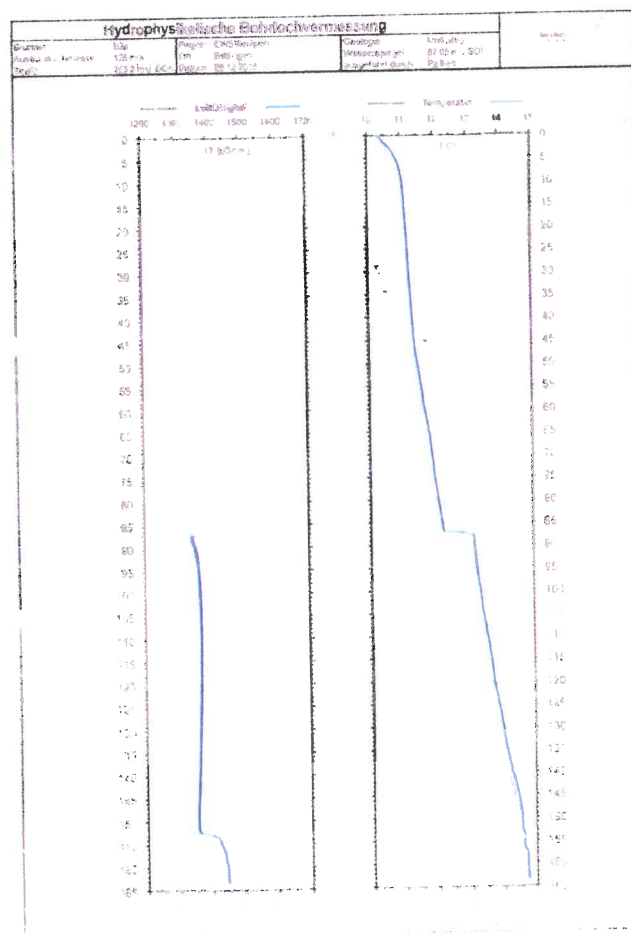


Abb. 11.1: Ermittlung des geothermischen Gradienten in der Erkundungsbohrung B2a



Nach Analyse des Logverlaufs ist der kleine, rot markierte Bereich im Grenzbereich Keuper/Muschelkalk als natürliche Gebirgstemperatur zutreffend. Die Verlängerung dieses Temperaturverlaufes bis zur Erdoberfläche ergibt eine realistisch erscheinende mittlere Jahrestemperatur von 9 °C. Hieraus ergibt sich ein ebenfalls realistisch erscheinender geothermischer Gradient von 3,78 °C/100 m. Unter Einbezug der Analysen vieler geothermischer Profile im Hebungsgebiet "Süd" wird daher dieser geothermische Gradient zu Grunde gelegt (mit Startpunkt 9 °C an der Erdoberfläche).

Im Muschelkalk verläuft die Messkurve stufig etwas kälter mit teilweise fehlendem Gradienten. In Zusammenschau mit dem Leitfähigkeitslog scheint höher mineralisiertes und kälteres Grundwasser im oberen Abschnitt des Oberen Muschelkalks und im Bereich der Filterstrecke zu strömen. Dies könnte u. U. ein Hinweis darauf sein, dass höher mineralisiertes Grundwasser aus dem Gipskeuper in den Oberen Muschelkalk gelangt und dort lateral abströmt.

Bei den Temperaturprofilmessungen kamen sowohl eine mobile, kabelgebundene Temperaturmesssonde als auch Messungen über stationär eingebaute Glasfaserkabel (s. u.) zum Einsatz.

Mit der kabelgebundenen Sonde wird die Temperatur in den Erdwärmesondenrohren ortsgenau mit einer vertikalen Auflösung von 1 cm mittels Platinsensoren gemessen. Die kabelgebundenen Temperaturmessungen wurden durch das Büro Voutta, Herrenberg, durchgeführt.

Die kabelgebundenen Messungen haben eine höhere Sensorgenauigkeit, die faseroptischen Messungen dagegen eine bessere vertikale Auflösung. Im Zuge der Erdwärmesondensanierung wurde in jeweils einen Rohrschenkel ein Glasfaserkabel über die gesamte Länge eingebaut, welches erlaubte, die langfristigen Temperaturentwicklungen im Ringraum der Erdwärmesonde faseroptisch und im online-Betrieb überwachen zu können. Der Einbau der Glasfaserkabel erfolgte durch die Fa. GTC, Karlsruhe. Es handelt sich um ein Hybridkabel, welches zusätzlich zu den optischen Fasern auch Kupferleiter enthalten, die es ermöglichen, gegebenenfalls sogenannten Kurz-Enhanced-Geothermal-Response-Test (EGRT) auszuführen.

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

Die räumliche Zuordnung des Messwertes erfolgt anhand einer sehr genauen Zeitmessung, unter Berücksichtigung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in der Glasfaser. In einer nur wenige Minuten dauernden Messung erhält man das Temperaturprofil entlang der gesamten Glasfaserleitung.



Die Methode erlaubt die Messung mit einer Ortsauflösung von ca. 0,5 m bei einer Absolutgenauigkeit der Messung bis zu $\pm 0,1$ K (http://www.gtc-info.de/_downloads/Faseroptik.pdf (Zugriff: Dez. 2011)).

Die Dokumentation der im Zuge der Nachverpressung der EWS-Ringräume eintretenden Abbindewärme (vgl. Kap. 12) erfolgte über die stationär in je einem Schlauchschenkel der Erdwärmesonden eingebauten Glasfaserkabel. Die Temperaturprofile konnten so in online-Betrieb abgefragt und in Diagrammform aufgetragen werden.

Bei der kabelgebundenen Messung erfolgt dagegen die Messung mit einer Sonde, die eine gewisse Zeit zur thermischen Anpassung an die Umgebungstemperatur benötigt. In der Regel ist dies - trotz der angewandten niedrigen Fahrgeschwindigkeit der Messsonde - nicht vollständig gewährleistet.

In den Erdwärmesonden am [REDACTED] hat das Büro Voutta Temperaturprofil-Messungen, Kurz-Thermal-Response-Tests sowie Dichteanomalie-Messungen vorgenommen und in einem Bericht zusammengefasst (Anl. 6.1). In den nachstehenden Abbildungen (Abb. 11.2 bis Abb. 11.5) sind daraus die Ruhetemperaturprofile der Erdwärmesonden [REDACTED] nach Außerbetriebnahme der Sonden und vor Beginn der nachträglichen Abdichtungsmaßnahmen zusammen mit dem zu erwartenden geothermischen Gradienten dargestellt. Die Messdaten wurden dem LGRB durch das Büro Voutta zur Verfügung gestellt.

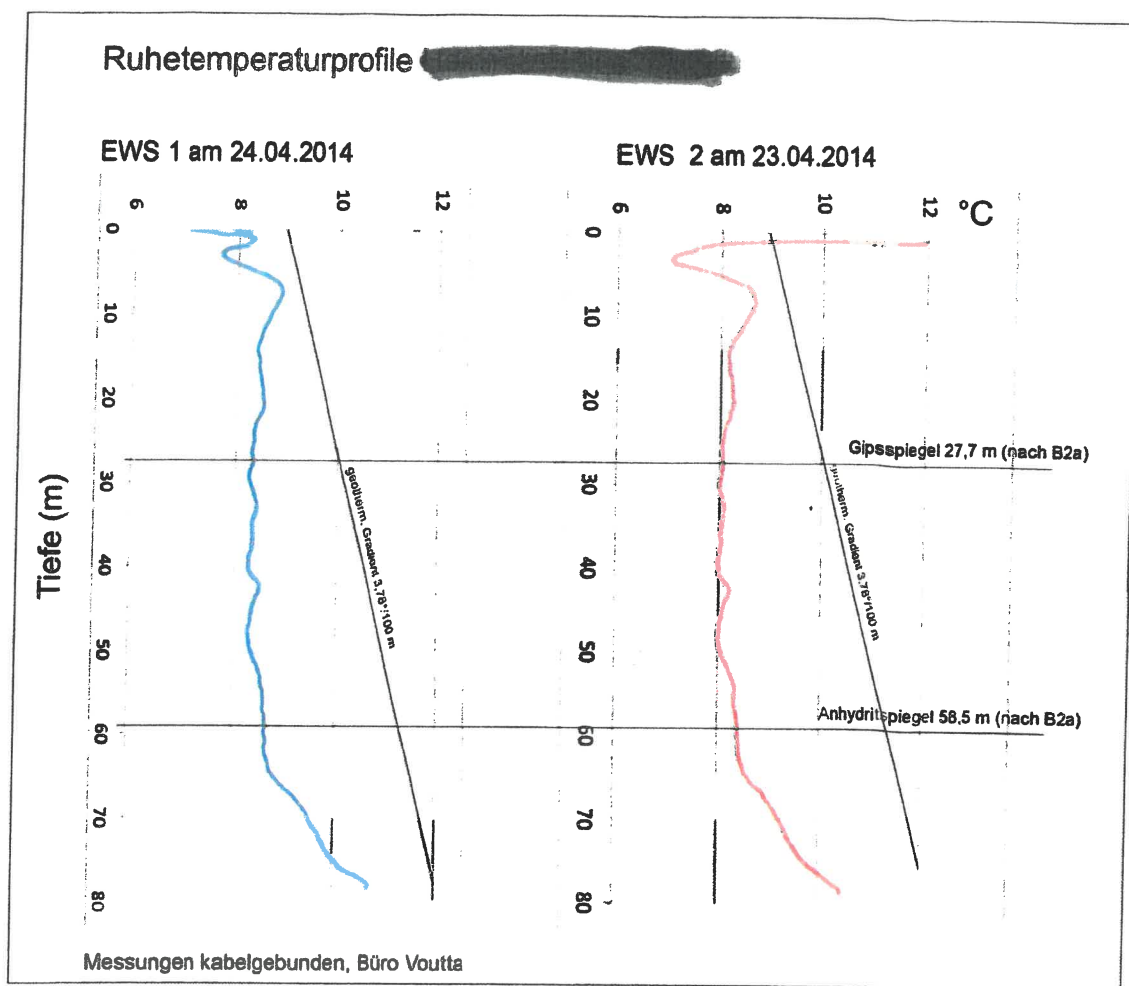


Abb. 11.2: Ruhetemperaturprofile (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungsmaßnahmen; Außerbetriebnahme: 02.04.2014

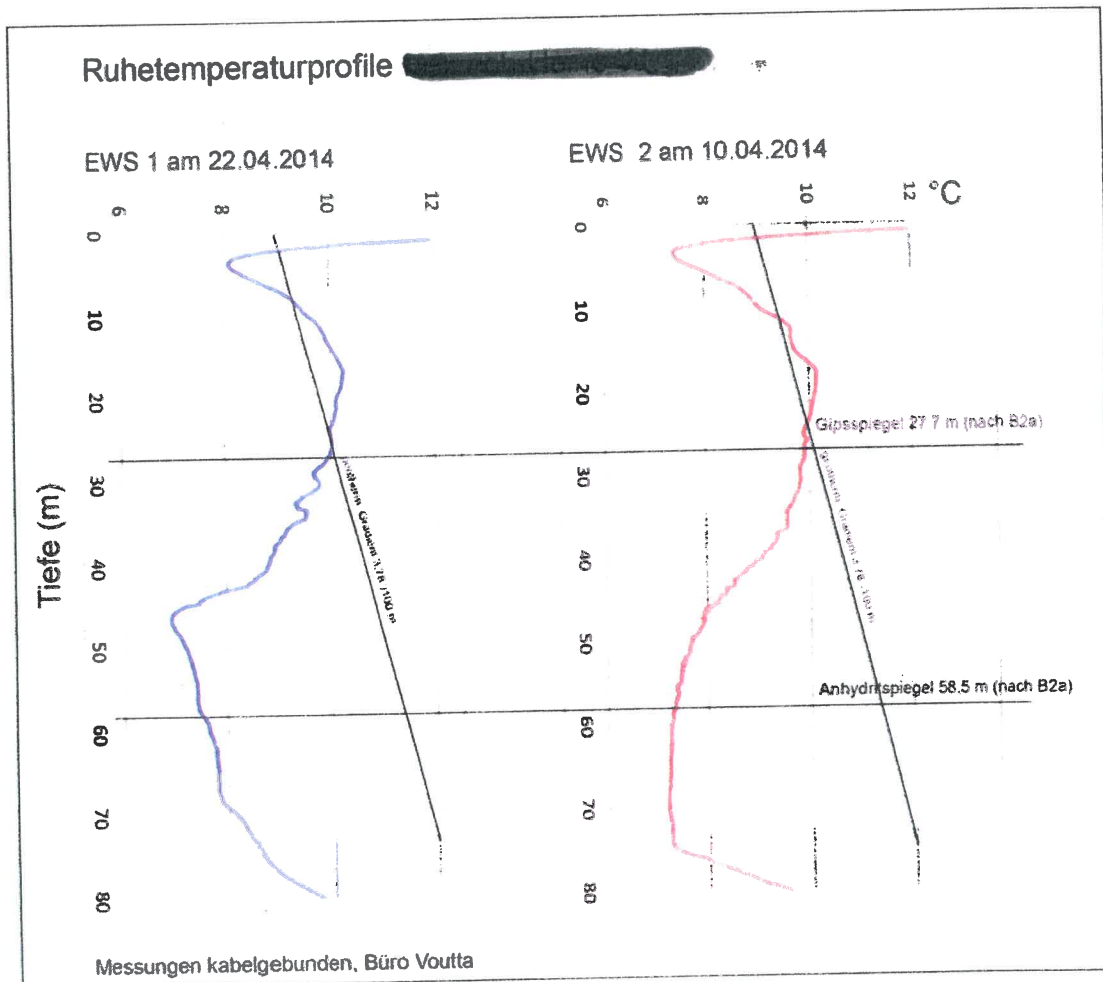


Abb. 11.3: Ruhetemperaturprofile (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungs-
Maßnahmen; Außerbetriebnahme: 02.04.2014

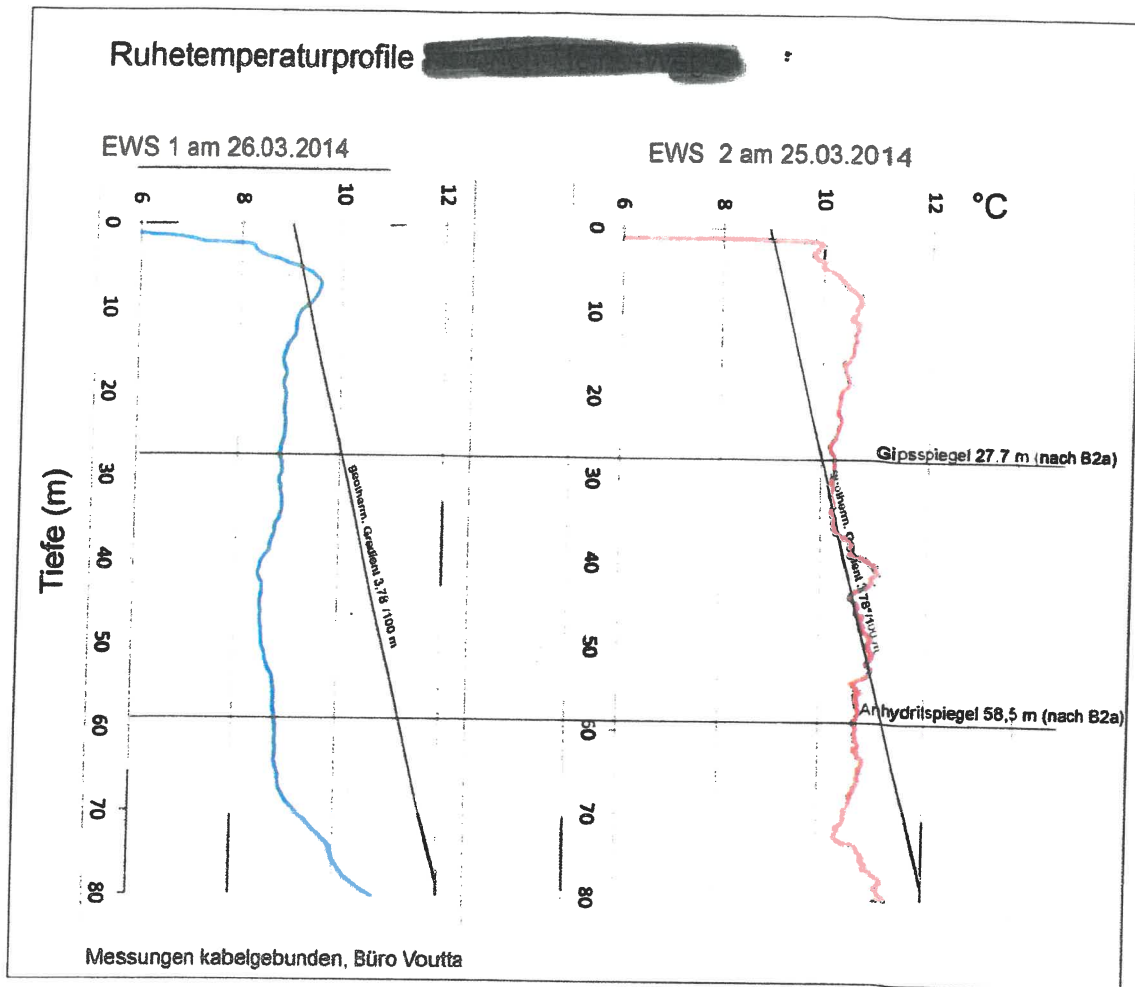


Abb. 11.4: Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungsmaßnahmen; Außerbetriebnahme: 12.03.2014

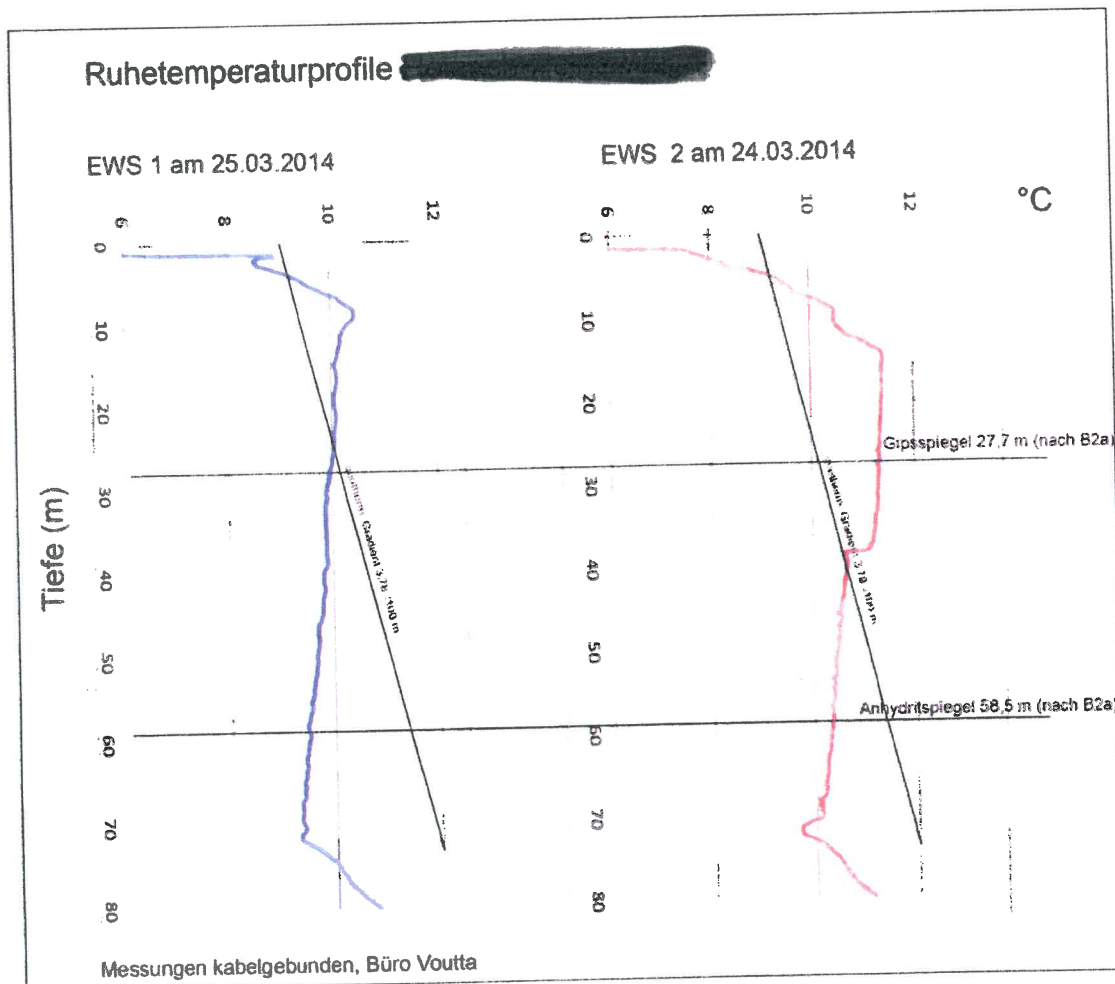


Abb. 11.5: Ruhetemperaturprofile (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungsmaßnahmen; Außerbetriebnahme: 11.03.2014

Die gemessenen Ruhetemperaturprofile im sind alle noch durch die vor der Außerbetriebnahme vorangegangene thermische Nutzung (Wärmeentzug) beeinflusst und liegen demzufolge im Vergleich zu dem zu erwartenden geothermischen Gradienten teilweise um bis zu 2 °C auf der „kühleren Seite“. Die Temperaturprofile lassen einen bis in ca. 15 m Tiefe unter Gelände reichenden jahreszeitlichen Schwankungsbereich erkennen. Bei 40 m unter Gelände zeichnet sich in einigen Temperaturprofilen (HH1: EWS 1 und 2; HH5: EWS 2) ein lateraler Grundwasserfluss ab, der in einer lateralen "Kälteabfuhr" der langen vorangegangenen Nutzung zum Ausdruck kommt (Grundwasserbewegung im Niveau des Gipskarstes).



Vertikale, z.T. auch unter negativem Gradient (Wärmeverlust des absteigenden Grundwassers in Folge des Kontakts mit dem ausgekühlten Gebirge) verlaufende Kurvenabschnitte deuten auf vertikale Fließbewegungen in den Erdwärmesonden hin. Der negative Temperaturgradient lässt sich in den Erdwärmesonden bis mindestens 70 m unter Gelände nachvollziehen.

Ab etwa 70 m deutet sich in den Temperaturprofilen eine positive Temperaturanomalie an, die als Auswirkung einer exothermen Reaktion interpretiert wird und sich bis zur Endteufe der Erdwärmesonden erstreckt.

Diese Temperaturanomalie lässt sich durch eine exotherme Reaktion bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips ($\Delta_r H^\circ = \Delta_f H^\circ_{\text{(Gips)}} - \Delta_f H^\circ_{\text{(Anhydrit)}} - \Delta_f H^\circ_{\text{(Wasser)}}$) erklären, bei der eine Energie von $\Delta_r H^\circ = -16.86 \text{ kJ/mol}$ freigesetzt wird. Der oberhalb gemessene steile Gradient ist die Folge der betrieblichen Vornutzung.

Aus dem Bericht des Büros Voutta (Anl. 6.2) entnommen sind die nachstehenden Ruhetemperaturprofile der Erdwärmesondenanlagen [REDACTED] (EWS 1-3), im [REDACTED]. Die Daten wurden dem LGRB vom Büro Voutta übermittelt. Die Ruhetemperaturkurven sind dem o.g. geothermischen Gradienten gegenübergestellt (Abb. 11.6 bis Abb. 11.8). Auch bei diesen Ruhetemperaturkurven ist zu berücksichtigen, dass der Zeitraum zwischen Außerbetriebnahme und den Temperaturprofilmessungen vergleichsweise gering ist und die Messungen insbesondere [REDACTED] noch von der vorangegangene thermische Nutzung (Wärmeentzug) beeinflusst sind.

In den Ruhetemperaturprofilen der Erdwärmesondenanlagen [REDACTED] (EWS 1-3), [REDACTED] gibt es Hinweise auf laterale Kälteabfuhr durch fließendes Wasser im Niveau des Gipskarstes. Ferner zeigen folgende Erdwärmesonden Abschnitte mit positiver Temperaturanomalie, die als Hinweis auf die Umwandlung von Anhydrit in Gips gewertet werden:

- [REDACTED] EWS 1 und EWS 3 (im Niveau des Anhydritspiegels)
- [REDACTED] EWS 1 und 2 (unterhalb des Anhydritspiegels)
- [REDACTED] EWS 1 und 2 (unterhalb des Anhydritspiegels)

Vertikale, z.T. auch unter negativem Gradient (Wärmeverlust des absteigenden Grundwassers in Folge des Kontakts mit dem ausgekühlten Gebirge) verlaufende

Kurvenabschnitte deuten auf vertikale Fließbewegungen in den Erdwärmesonden hin. Der negative Temperaturgradient lässt sich in den Erdwärmesonden bis nahezu zur Endteufe nachvollziehen.

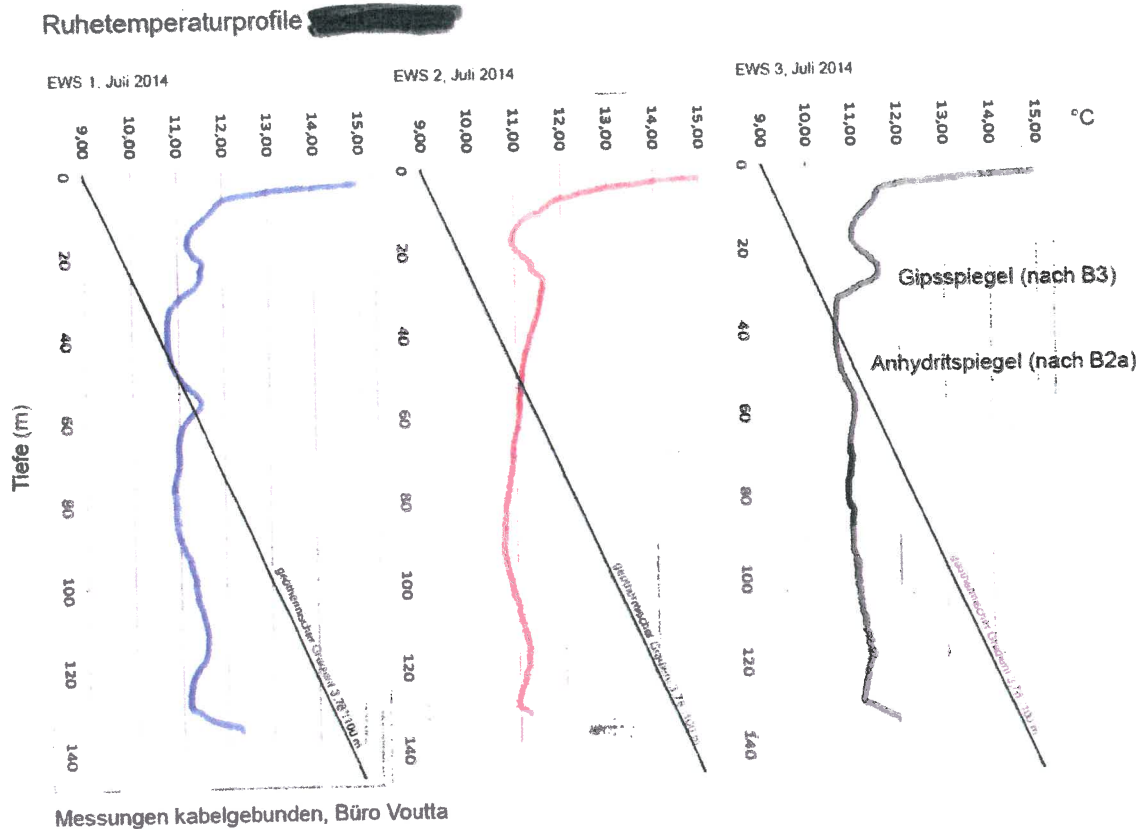


Abb. 11.6: Ruhetemperaturprofile (EWS 1, 2 und 3) vor den Abdichtungs-Maßnahmen;
Außerbetriebnahme: 05.06.2014

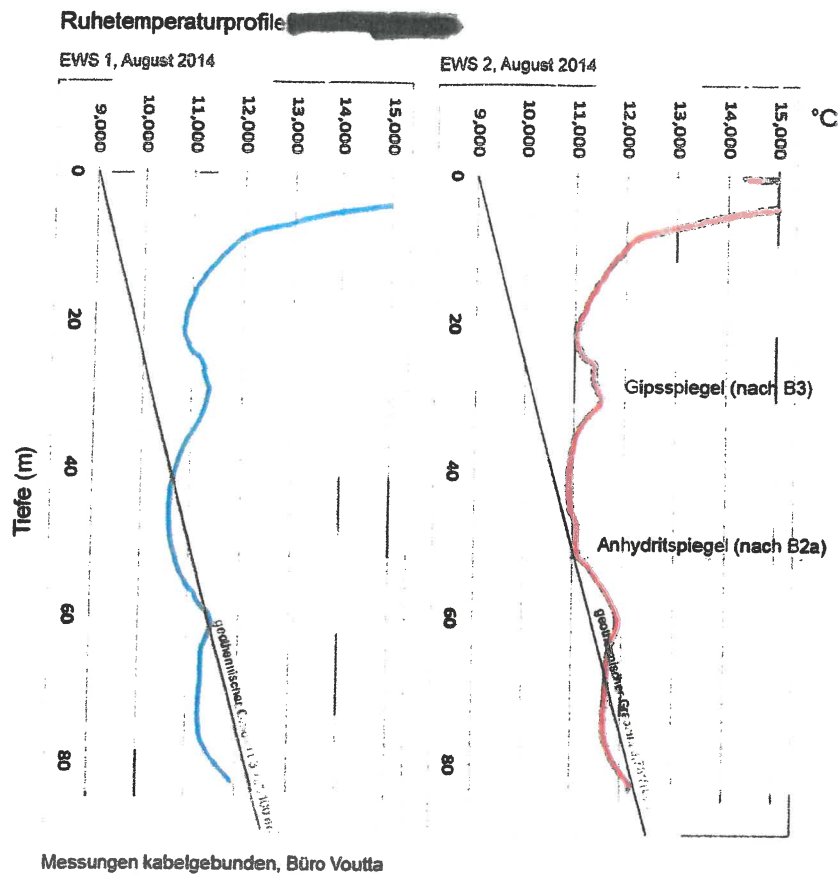


Abb. 11.7: Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungs-
Maßnahmen; Außerbetriebnahme: 26.06.2014

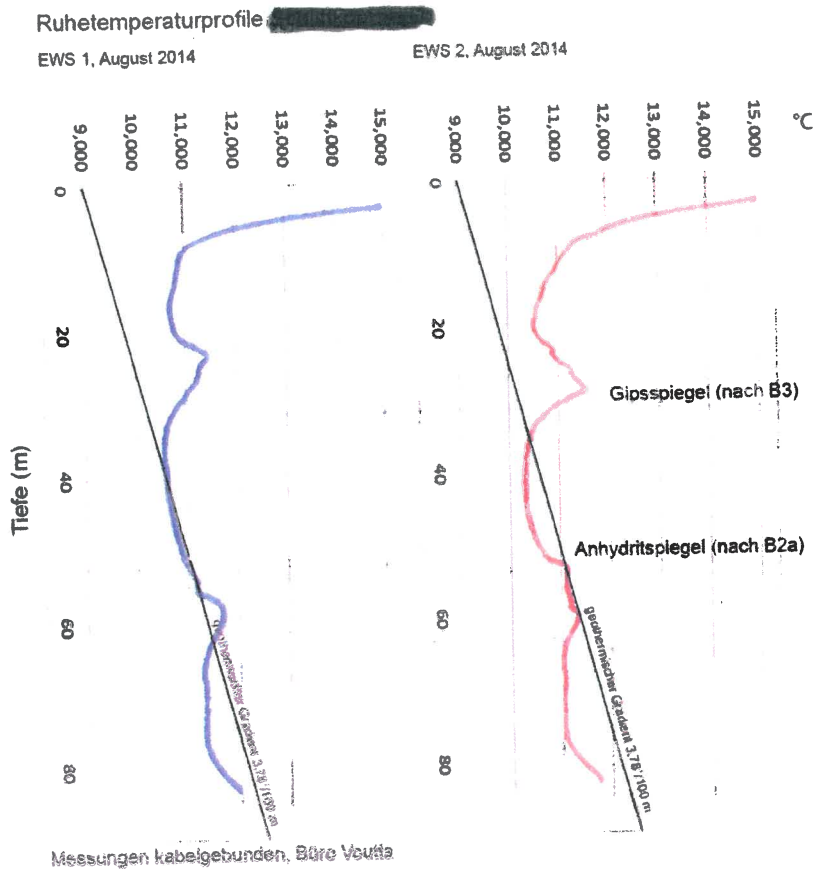


Abb. 11.8: Ruhetemperaturprofile [REDACTED] (EWS 1 und 2) vor den Abdichtungsmaßnahmen; Außerbetriebnahme: 26.06.2014

Die Ruhetemperaturprofile in den EWS [REDACTED] folgen im Vergleich zu den EWS [REDACTED] in ihrer unteren Hälfte insgesamt eher dem lokalen geothermischen Gradienten.

In der Gesamtbetrachtung ergeben die Ruhetemperaturprofile eindeutige, jedoch nicht näher quantifizierbare Hinweise auf vertikale Fließvorgänge im Bereich der Erdwärmesonden-Ringräume. Nachdem bereits geringe Wasserzutritte in den quellfähigen Gebirgsabschnitt ausreichen, den Umwandlungsprozess von Anhydrit in Gips auszulösen, ist es zwingend erforderlich, vorhandene Fließpfade abzudichten. Daher wurde im Arbeitskreis beschlossen, sämtliche Erdwärmesonden in den Quartieren II und III analog zum Hebungsgebiet "Nord" durch Zementinjektion nachträglich abzudichten.



Wie in Kapitel 4 (s.o.) ausgeführt, gibt es keine Hinweise auf ein eigenes Hebungs-
zentrum im Quartier IV. Daher wurde von weiteren Untersuchungen an den Erdwär-
mesonden im Gansseeweg 4 – wie im Übrigen auch bei dem weiter östlich am Hans-
Watzlik-Weg gelegenen Erdwärmesondenfeld und den zwischen Hebungsgebiet
"Nord" und "Süd" gelegenen Erdwärmesonden – Abstand genommen.

11.2.2 Temperaturprofilmessungen im Zuge der nachträglichen Abdichtung in den Erdwärmesonden [REDACTED] sowie [REDACTED]

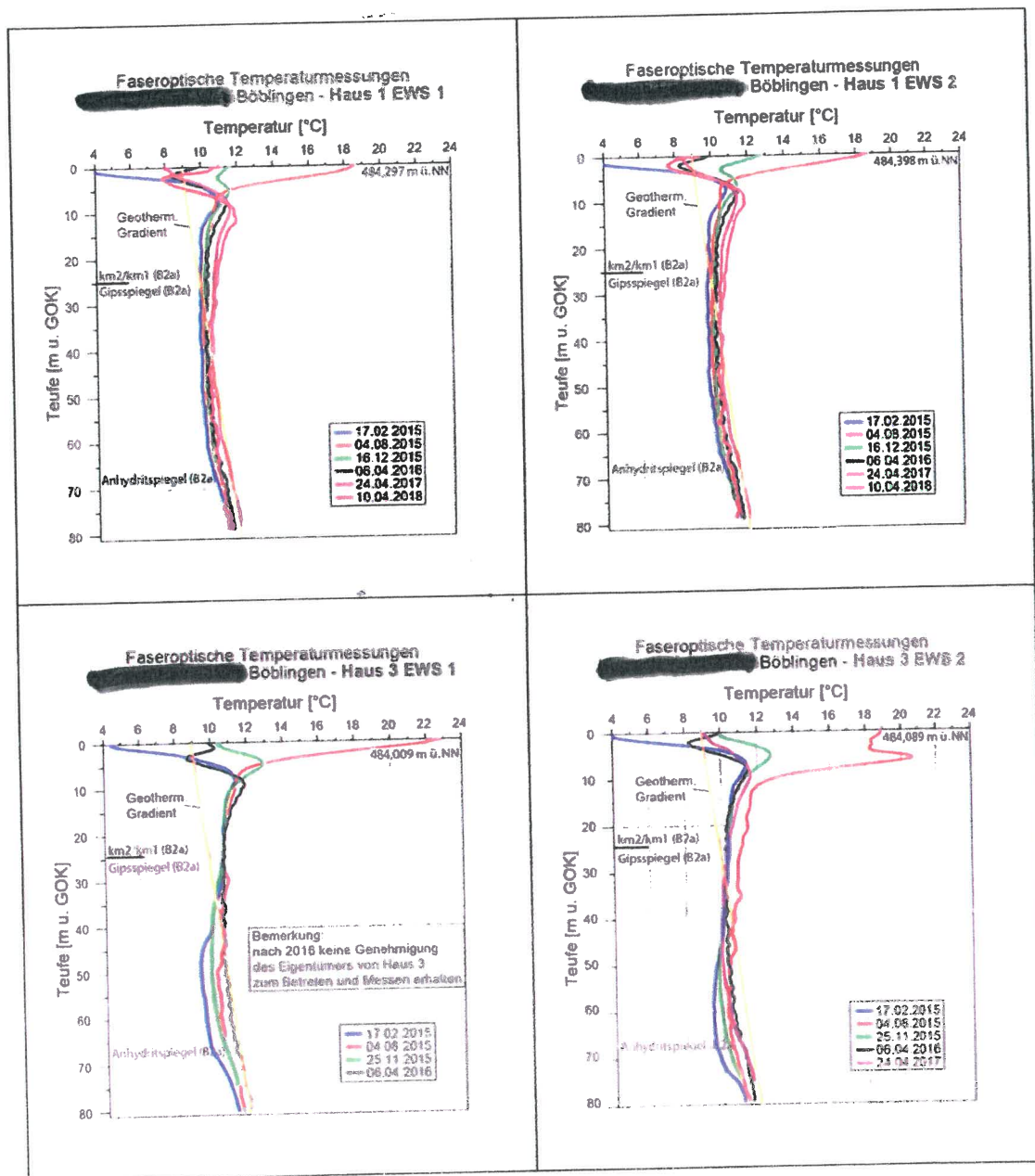
Die Erdwärmesonden am [REDACTED] wurden im Zeitraum Februar
2015 bis Juli 2015, die Erdwärmesonden [REDACTED] im Zeitraum August 2015
bis Dezember 2015 und die Erdwärmesonden [REDACTED] im Zeit-
raum Dezember 2015 bis Februar 2016 sowie August 2017 bis April 2018 nachträg-
lich durch Zementinjektion (siehe Kap. 12.2) abgedichtet.

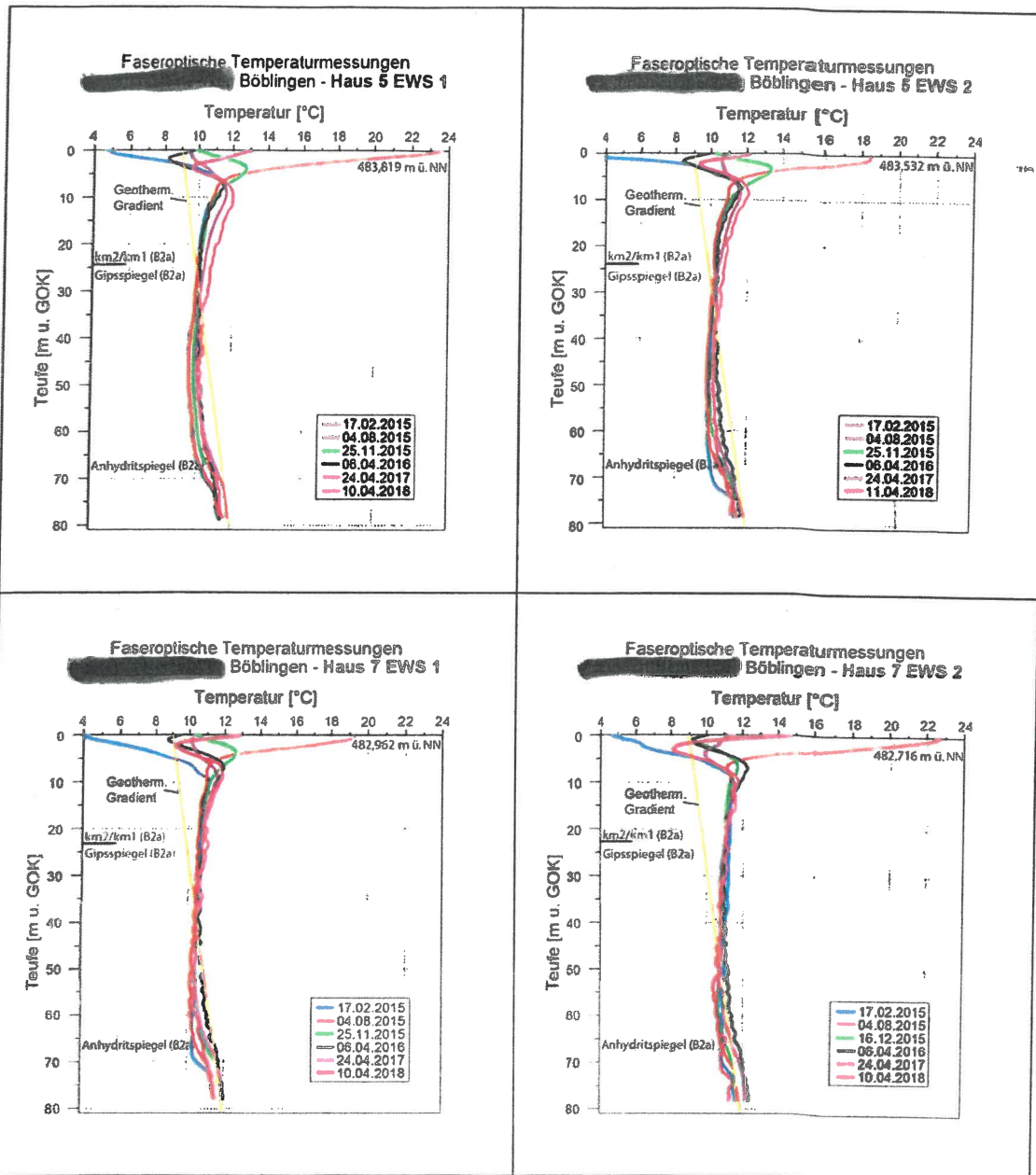
Nachfolgend werden die in Zeitreihe faseroptisch gemessenen Temperaturmessun-
gen für die jeweiligen Erdwärmesonden [REDACTED]
[REDACTED] mit Eintrag des oben ermittelten geothermischen
Gradienten dargestellt (Abb. 11.9). Diese Messungen stellen somit Momentaufnah-
men zur Temperaturentwicklung ab Beginn der Sanierung über Zwischenzustände
am [REDACTED] und für den [REDACTED] wie auch den [REDACTED] über das
Sanierungsende hinaus dar.

Wie die Erfahrungen aus anderen EWS-Schadensfällen zeigt, sind Veränderungen
der Temperaturprofile nach Abschluss der Sondensanierungen i.d.R. nur sehr zeit-
verzögert zu erwarten, da ein Wärmeabtransport im Untergrund in dichtem Gebirge
(d.h. ohne fließendes Wasser) konduktiv und nicht konvektiv stattfindet. Dies ist
auch in den hier betrachteten Erdwärmesonden der Fall, wenngleich sich gegenüber
der Ausgangslage vor Sanierungsbeginn (siehe Kap. 11.2) ein allmähliches Anglei-
chen an den geothermischen Gradienten abzeichnet:



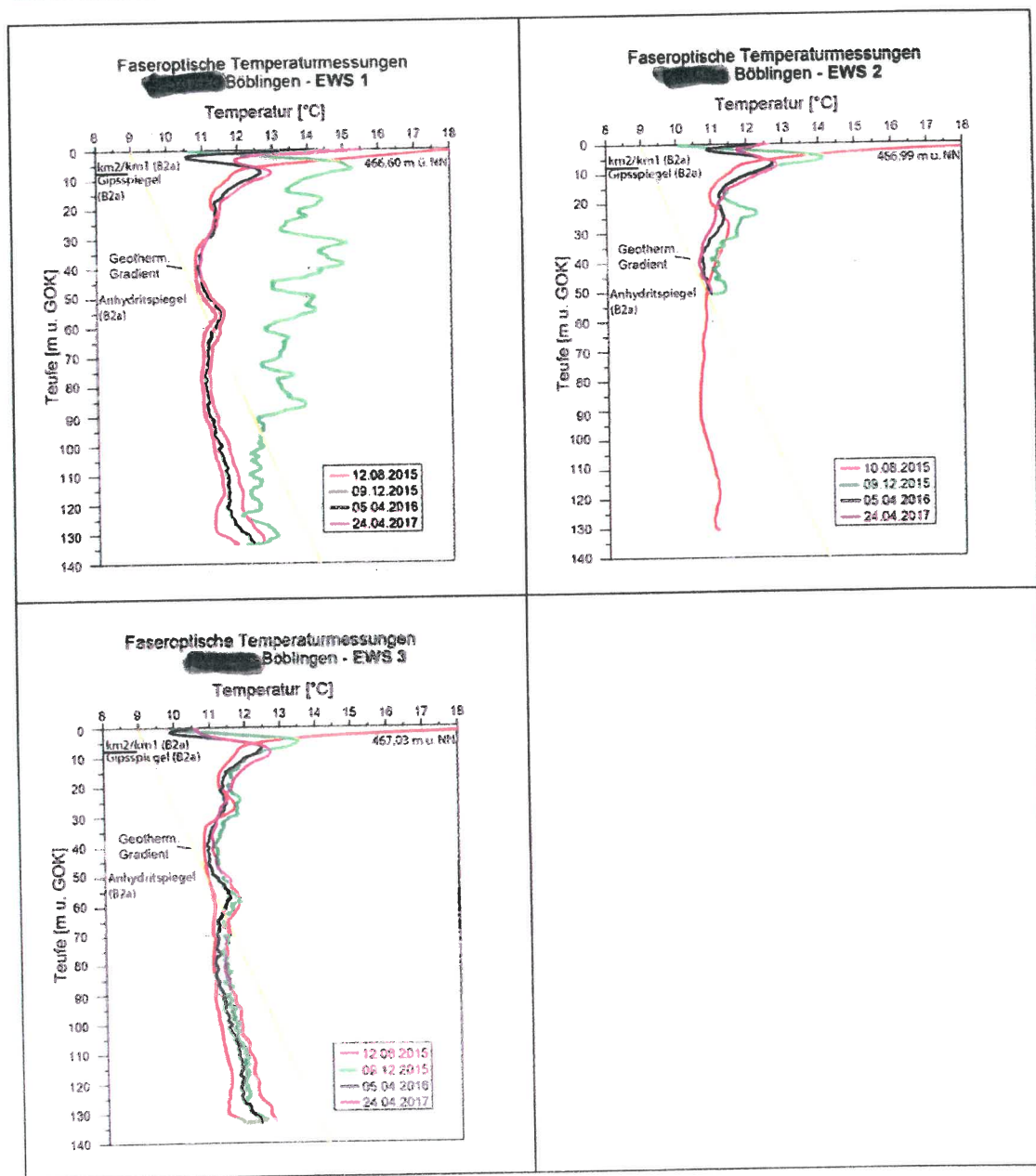
(EWS-Sanierung Februar–Juli 2015)







(EWS-Sanierung August 2015 bis Dezember 2015)



(EWS-Sanierung Dezember 2015 bis Februar 2016 sowie August 2017 bis April 2018)

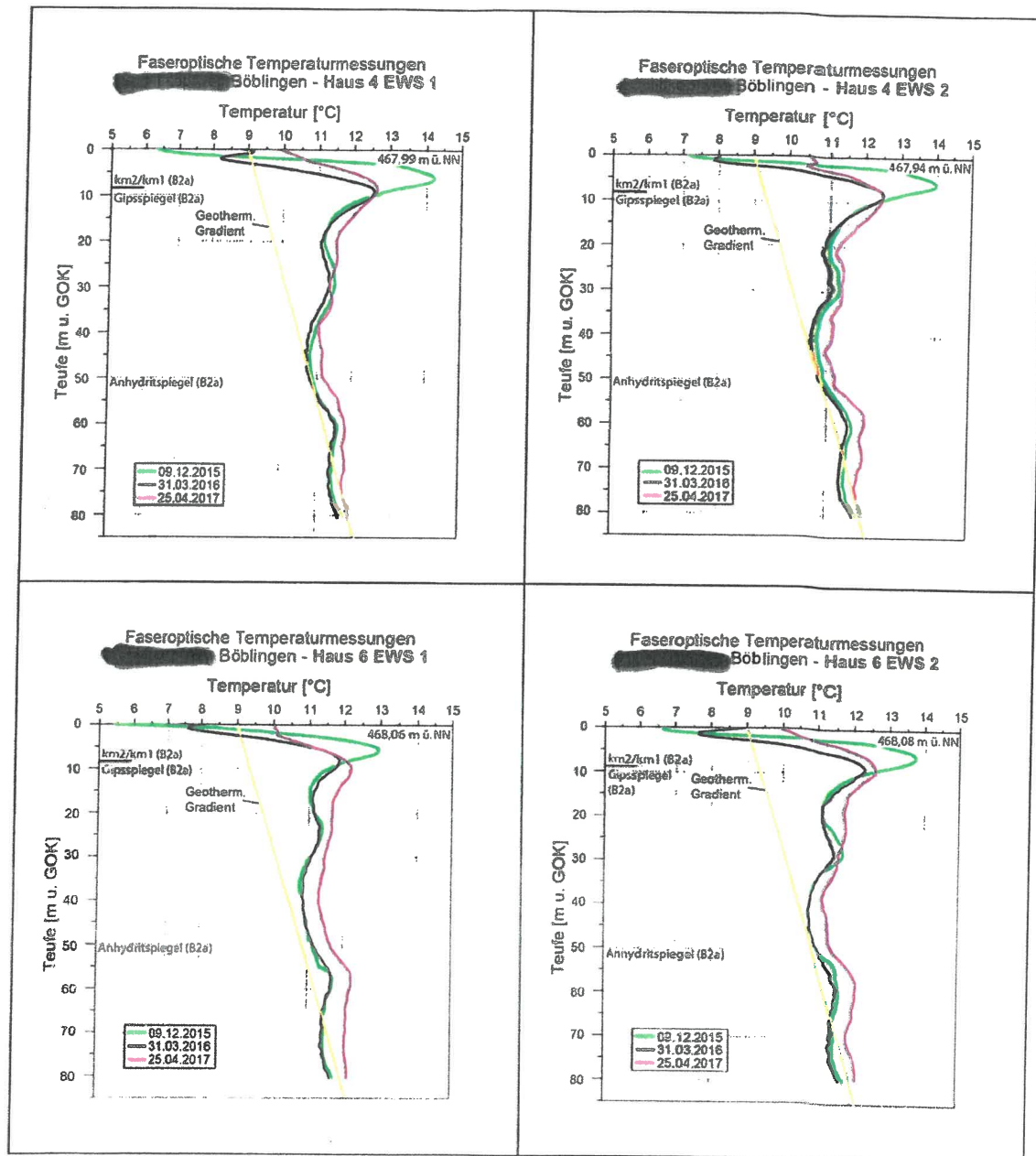


Abb. 11.9: Zeitreihe der faseroptisch gemessenen Temperaturmessungen der Erdwärmesonden (mit Eintrag des geothermischen Gradienten)

11.3 Bohrlochgeophysikalische Messungen in den Erdwärmesonden

11.3.1 Natürliche Gammastrahlung

Es wurde versucht, durch Messung der natürlichen Gamma-Strahlung nachträgliche Informationen über die erbohrte Gesteinsabfolge der Erdwärmesondenbohrungen zu gewinnen. Nachdem die Erdwärmesonden zumeist nur in ihrem oberen Abschnitt befahrbar waren und demzufolge keine größeren, mit dem gamma-log der B2a korrelierbaren Abschnitte gemessen werden konnten, wird auf diesbezügliche Teilinterpretationen verzichtet. Vielmehr wird auf die in Nachbarschaft der Erdwärmesonden niedergebrachten Referenzbohrungen verwiesen.

11.3.2 Weitere geophysikalische Bohrlochmessungen (gamma-gamma, Kurz-TRT)

Gamma-gamma-Dichte-"Anomalie"-messung

Im Rahmen der Integritätsuntersuchung bereits eingebauter Ringraumhinterfüllungen werden durch das Büro Voutta, Herrenberg, gamma-gamma-Dichtemessungen in den Erdwärmesondenschläuchen vorgenommen. Die dabei zum Einsatz kommende gamma-gamma-Dichte-"Anomalie-Messsonde" hat einen Außendurchmesser von Ø 16 mm und eine Länge von < 200 mm. Die radiale Eindringtiefe (Messradius) beträgt 75-120 mm, die vertikale Auflösung 10 cm (alle Angaben aus: www.avoutta.de – Zugriff: 20.12.2015). Das Verfahren wird wie folgt beschrieben:

Bei der gamma-gamma-Dichte-Anomaliemessung handelt es sich um ein 1947 eingeführtes kerngeophysikalisches Rückstreuverfahren: Von einer gamma-Strahlenquelle abgestrahlte gamma-Photonen dringen in eine Materie, erfahren dort Wechselwirkungen mit dieser und werden dabei teilweise zurückgestreut. Die rückgestreuten gamma-Photonen werden an einem Detektor gezählt.

Bei den hier zum Einsatz kommenden gamma-gamma-Dichte-Anomaliemessungen geht es nicht darum, die absolute Dichte in einer bestimmten Materie zu bestimmen. Vielmehr steht im Vordergrund, die Homogenität eines Baustoffes – der Ringraumzementation – nach dessen Einbau im Untergrund zu überprüfen. Ein Dichtehomogenitätsprofil wird über die Befahrung der in jeder Erdwärmesonde zur Verfügung stehenden PE-U-Rohre mit einer verkleinerten gamma-gamma-Dichte-Anomaliemesssonde erstellt. Über die am Detektor registrierte Rückstreuung der von der Quelle ausgesandten gamma-Photonen werden Dichteanomalien im Baustoff des Ringraums aufgespürt.

Eine detaillierte Darstellung zum Messverfahren ist in der Studie zu gamma-gamma-Dichte-Anomaliemessungen im Ringraum von Erdwärmesonden im Technikums-Maßstab enthalten, die im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg bzw. der LUBW im April 2013 erstellt wurde. Diese kann auf der Seite www.avoutta.de eingesehen werden.



Die dem LGRB bislang vorliegenden Erfahrungen mit gamma-gamma-Dichte-"Anomalie"messungen zeigen, dass die damit erzielbaren Profilmessungen zu teils sehr widersprüchlichen Ergebnissen geführt haben. Im Extremfall wurden Ringraumabschnitte als "dicht bzw. homogen hinterfüllt" interpretiert, die sich im Laufe von durchgeführten nachträglichen Ringraumabdichtungen als tatsächlich "undicht bzw. inhomogen hinterfüllt oder auch leer" erwiesen haben. Wie von LUX et.al (2012) beschrieben, könnte die Ursache darin liegen, dass das Messprinzip eine sehr große Empfindlichkeit auf jegliche Änderungen der Umgebungs- und Messgeometrie aufweist. ".....Je nach Lage der U-Sonde im Bohrlochquerschnitt und des Abstandes der Sonde zum Gebirge sowie abhängig von der Ausbruchsneigung der Bohrlochwandung ergeben sich die unterschiedlichsten und grundsätzlich nicht a priori deutbaren Anomalien im Messkurvenverlauf". Da die von der Haspel aus abgerollten und in das Bohrloch eingedrückten PE-Schläuche auf Grund der bleibenden Verformungen des sehr zähen PE-Ausbaumaterials vielfach an der Bohrlochwandung anliegen, ist das oben beschriebene Messprinzip umfangreichen, nicht vorhersehbaren und damit nicht filterbaren Störungen und Einflüssen unterworfen, die eine eindeutige Detektion von kompetenten, inkompetenten oder nicht vorhandenen Ringraumhinterfüllungen unmöglich machen. Aus diesem Grund werden vom LGRB im vorliegenden Sachstandsbericht keine Interpretationen vorliegender gamma-gamma-Dichte-"Anomalie"messungen vorgenommen.

Kurz-TRT-Tests

Bei einem Kurz-TRT-Test wird mittels kurzzeitigem Energieeintrag über die Erdwärmesondenschläuche zuerst die Ringraumhinterfüllung der Erdwärmesonde und in der Folge die Bohrlochwandung sowie deren nächste Umgebung aufgeheizt. Nach Abschalten der Wärmezufuhr werden in bestimmten Zeitintervallen Temperaturprofilmessungen vorgenommen, bis das ursprüngliche und zuvor gemessene Ruhetemperaturprofil wieder nahezu erreicht wird. Hieraus sollen bei der Untersuchung von EWS-Schadensfällen Rückschlüsse über die Existenz einer Ringraumabdichtung sowie über etwaige Fließbewegungen in der unmittelbaren Umgebung der Erdwärmesondenschläuche (Wärmeabtransport) gewonnen werden.

Allerdings führt dieses Verfahren, insbesondere bei mangelhafter oder nicht vorhandener Ringraumabdichtung, zu mehrdeutigen Messergebnissen. Ein Grund hierfür ist, dass die Temperaturübertragung unmittelbar von der Spiralität des zur Messung



bzw. zur Aufheizung verwendeten Sondenschlauches und dessen Anliegen an der Bohrlochwandung beeinflusst wird.

Hier sind unzählige und nicht unterscheidbare Varianten einer Temperaturübertragung durch etwaige Ringraumhinterfüllreste in Zwickellagen, Wasser oder Luft einschüsse mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit etc. denkbar. Derartige Beeinflussungen der Messergebnisse lassen sich aus Sicht des LGRB nicht eindeutig zuordnen und abtrennen.

Auch relativ geringe Wasserfließbewegungen (die jedoch für die Auslösung von weiträumigen Hebungen ausreichen) können mit diesem Verfahren nicht detektiert werden, da die Temperaturabfuhr durch das fließende Wasser zu gering ist, um im Messzeitraum signifikant erkennbar zu sein (wohingegen der Kurz-TRT für die Erkennung von großen Wasserfließmengen im Ringraumbereich wie etwa beim EWS-Schadensfall Schorndorf gut geeignet ist).

Aus diesem Grund werden vom LGRB im vorliegenden Sachstandsbericht keine Detailinterpretationen vorliegender Kurz-TRT-Tests vorgenommen.

12 Prüfung und Einleitung schadensbegrenzender Maßnahmen

12.1 Ausgangslage

Die geologische Erkundung im Bereich des Hebungsgebiets "Süd" in Böblingen, die sich auf die Ergebnisse der Erkundungsbohrung B2a sowie den begleitenden Bohrungen B2, B2b, B3 und B4 wie auch auf die erfolgten bohrlochgeophysikalischen und mineralogischen Begleituntersuchungen stützt, erbrachte einen belastbaren Datensatz hinsichtlich

- des geologischen Baus (Schichtenabfolge, Lage der Gipsauslaugungszone, der Gips- und Anhydritspiegel),
- der hydrogeologischen Stockwerksgliederung,
- der Grundwasserbeschaffenheit,
- der vorhandenen Druckpotenziale sowie
- umfangreiche mineralogische-petrographische Untersuchungsergebnisse an Kernmaterial.



Die in Kap. 2 dargelegte Arbeitshypothese, wonach das "Gipskeuperquellen" als ursächlich für die im Hebungsgebiet "Süd" in Böblingen auftretenden Geländevertiefungen und Baugrundschäden gelten muss, wurde durch die Erkundungsmaßnahme wie folgt verifiziert:

- Die bis in den Oberen Muschelkalk reichende Erkundungsbohrung B2a wie auch die begleitenden Bohrungen B2, B2b, B3 und B4 haben die für die Erdwärmesondenanlagen in Quartier II (), Quartier IIIa () und Quartier IIIb () wie auch in Quartier IV () typische Schichtenabfolge erbohrt.
- In Erkundungsbohrung B2a wurden drei Grundwasserstockwerke angetroffen. Das oberste Grundwasserstockwerk ist in der Stuttgart-Formation entwickelt und weist ein Ruhepotenzial bei ca. 466 m NN auf. Die vorliegenden Grundwasserstandsmessungen widerspiegeln freie Grundwasserverhältnisse im Kluftsysteem der Stuttgart-Formation. Das nächsttiefere Grundwasserstockwerk besteht innerhalb der Grabfeld-Formation. Dessen Grundwasserpotenzial stellt sich bei ca. 447 m NN ein. Die beiden oberen Grundwasserstockwerke werden vom Grundwasserstockwerk des verkarsteten Oberen Muschelkalks unterlagert, dessen Kluft- und Karstgrundwasser unter den nur sehr gering durchlässigen überlagernden Schichten der Erfurt-Formation gespannt ist. Der Druckspiegel im Oberen Muschelkalk stellt sich bei ca. 390 m NN im Bereich des Mittleren Gipshorizonts der Grabfeld-Formation ein.
- Der Nachweis von quelfähigen Gesteinen im Untergrund ist durch das Bohrerergebnis sowie durch die am Bohrgut der B2a vorgenommenen mineralogischen Analysen erbracht.
- Nach Bohrbefund in B2a erstreckt sich der quelfähige Gebirgsabschnitt in der Grabfeld-Formation zwischen 58,5 m (Oberer Anhydritspiegel) bis 121,7 m (Unterer Anhydritspiegel) unter Gelände.
- Aufgrund der in B2a erbohrten Schichtenfolge sowie der erkundeten Grundwasserstockwerke mit den darin festgestellten Grundwasserdruckhöhen erreichen die im Hebungsgebiet "Süd" untersuchten Erdwärmesondenbohrungen das hydraulisch gespannte Grundwasserstockwerk im unterlagernden Oberen

Muschelkalk nicht. Lediglich die Erdwärmesondenbohrungen am Herdweg erreichen die Erfurt-Formation, die übrigen enden in der Grabfeld-Formation.

- Wie die Bohrerkundung belegt, ist die Erfurt-Formation hydraulisch als nahezu dichter Gebirgsabschnitt einzustufen. Dies wird untermauert durch nur sehr geringe bis fehlende Grundwasserzuflüsse aus einer oder mehrerer der zahlreichen Dolomitbänke in der Dolomitregion der Erfurt-Formation, insbesondere auch durch die noch vorhandene Gipsführung im Niveau des Grenzdolomits wie auch durch das unausgelaugt vorhandene Böhrlingen-Sulfat im Niveau der Grünen Mergel in der Erfurt-Formation.
- Bei etwaigen Längsläufigkeiten im Ringraum nicht ordnungsgemäß verfüllter bzw. abgedichteter Erdwärmesonden ist daher von absteigenden Fließverhältnissen auszugehen. Über Fließpfade in den Ringräumen der Erdwärmesondenbohrungen tritt Grundwasser dem quelfähigen Gebirgsabschnitt zu und löst dort Prozesse aus, die zu den an der Geländeoberfläche messbaren Hebungen führen.
- Durch die gemessenen Ruhetemperaturprofile wird absteigendes Grundwasser belegt. Der die Quellhebung verursachende Reaktionsbereich befindet sich nach den gemessenen Ruhetemperaturprofilen ab 70 m unter Gelände. Von den Erdwärmesondenbohrungen in den Quartieren II und III durchhörten lediglich die Erdwärmesondenbohrungen am Herdweg den quelfähigen Gebirgsabschnitt (Endtiefe in der Erfurt-Formation), die übrigen enden im oberen Abschnitt des quelfähigen Gebirgsabschnitts in der Grabfeld-Formation.
- Demzufolge konzentriert sich auch die nachträgliche Abdichtung undichter Erdwärmesondenbohrungen darauf, unerwünschte Grundwasserzuflüsse aus überlagernden Grundwasserstockwerken (Stuttgart-Formation, Gipskarst der Grabfeld-Formation) in den unterliegenden quelfähigen Gebirgsabschnitt (Grabfeld-Formation) zu unterbinden.

Für die Planung von Sanierungsmaßnahmen muss der Verlauf der Erdwärmesonden im Untergrund bekannt sein. Mittels der miniaturisierten Messsonde (mini DEV-Sonde) wurde festgestellt, dass die Erdwärmesondenbohrungen teilweise über 2 m (vgl. Tab. 11.2) aus der Lotrechten abweichen. Somit musste ein Überbohren der Erdwärmesonden mit anschließendem Verpressen als Sanierungsvariante ausgeschlossen werden und es wurde deutlich, dass nur die Erdwärmesondenschläuche



selbst einen zuverlässigen Zugang zu undichten EWS-Ringräumen darstellen. Dies gilt allerdings nur solange die Sondenschläuche durch den Quellvorgang noch nicht zu stark deformiert und zur Tiefe hin befahrbar sind.

Nachdem der Zutritt von Wasser die Ursache des Gipskeuperquellens darstellt, müssen erkannte Fließpfade durch technische Maßnahmen zuverlässig und dauerhaft abgedichtet werden, um die natürliche Grundwasserstockwerkstrennung wiederherzustellen und um den Quellungsvorgängen einen weiteren unerwünschten Wasser-nachschub zu entziehen. Hierzu wurde - wie zuvor bereits im EWS-Schadensfall Staufen sowie in Böblingen im Hebungsgebiet "Nord" praktiziert - eine nachträgliche technische Abdichtung (Nachverpressung) der Erdwärmesonden zum Einsatz gebracht.

Nach einem von der Fa. Keller Grundbau, Renchen, in zahlreichen Vorversuchen entwickelten Verfahren erfolgt der Zugang zu undichten Ringraumabschnitten über horizontiert ausgeführte Perforationsstellen der Sondenschläuche. In einem der beiden U-förmigen EWS-Schläuche werden mit diesem Verfahren mittels 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 unverritz und dient Temperatur-Profilmessungen zur Dokumentation der eintretenden Abbindewärme des Injektionsguts und damit auch des Injektionserfolges.

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.



In Böblingen kam wie schon im Hebungsgebiet "Nord" für die Nachverpressung der Ringräume der Zement Sulfadur® Doppel (Fa. Dyckerhoff AG, Wiesbaden) mit Zusatz Sika® Unterwasser-Compound 11 (Fa. Sika Deutschland GmbH) zum Einsatz. Hierzu hat die Ingenieurgruppe Geotechnik, Kirchzarten, die zur Ringraumabdichtung notwendigen Injektions- und Verarbeitungsparameter bestimmt. Der Zement Sulfadur zeichnet sich durch eine sehr hohe Sulfatresistenz aus.

Seit über 50 Jahren wird Dyckerhoff SULFADUR Doppel aus besonderen Klinkern C₃A-reduziert hergestellt. Er erfüllt damit zuverlässig die Anforderung an Zement mit hohem Sulfatwiderstand. Die Zementnorm DIN EN 197-1:2011-11 fordert von Normalzementen mit hohem Sulfatwiderstand zusätzliche chemische Anforderungen, also eine besondere Klinkerbasis. Die Kombination aus gezielter Zusammensetzung und geeigneter Mahlfeinheit führt zu günstigen Verarbeitungs- und Festigkeitseigenschaften. Dyckerhoff SULFADUR Doppel CEM I 42,5 R-SR 0/NA empfiehlt sich seit einem halben Jahrhundert als Portlandzement für den Einsatz bei Sulfatangriff und hat zusätzlich einen niedrigen wirksamen Alkaligehalt nach DIN 1164:2013-03. Die Betonprismen haben die nunmehr rund 35jährige Auslagerung in der Natriumsulfatlösung unbeschadet überstanden. Formstabilität und Scharfkantigkeit sind nach wie vor gegeben, die Zementsteinhaut ist nahezu vollständig erhalten geblieben, darüber hinaus sind die Probekörper augenscheinlich rissefrei (Fa. Prospekt Dyckerhoff).

Im Anschluss an einzelne Injektionsabschnitte wurde das Temperaturprofil im jeweils unverritzten zweiten U-Sondenschlauch gemessen. Um die eintretenden Temperaturreaktionen sachgerecht zuordnen und bewerten zu können war es zunächst wichtig, den Verlauf der Temperaturentwicklung bei Abbinden des Sulfadur-Zements genügend genau zu kennen. Hierzu wurden am LGRB entsprechende Vorversuche an Zementproben durchgeführt, deren Anmachbedingungen annähernd den Injektions- bzw. Verarbeitungsparametern entsprachen. Die Ergebnisse sind in Abb. 12.1 dargestellt. Nach diesen Versuchen wird das Temperaturmaximum des Sulfadur ca. 14,5 h seit Anmachen der Zementsuspension erreicht.

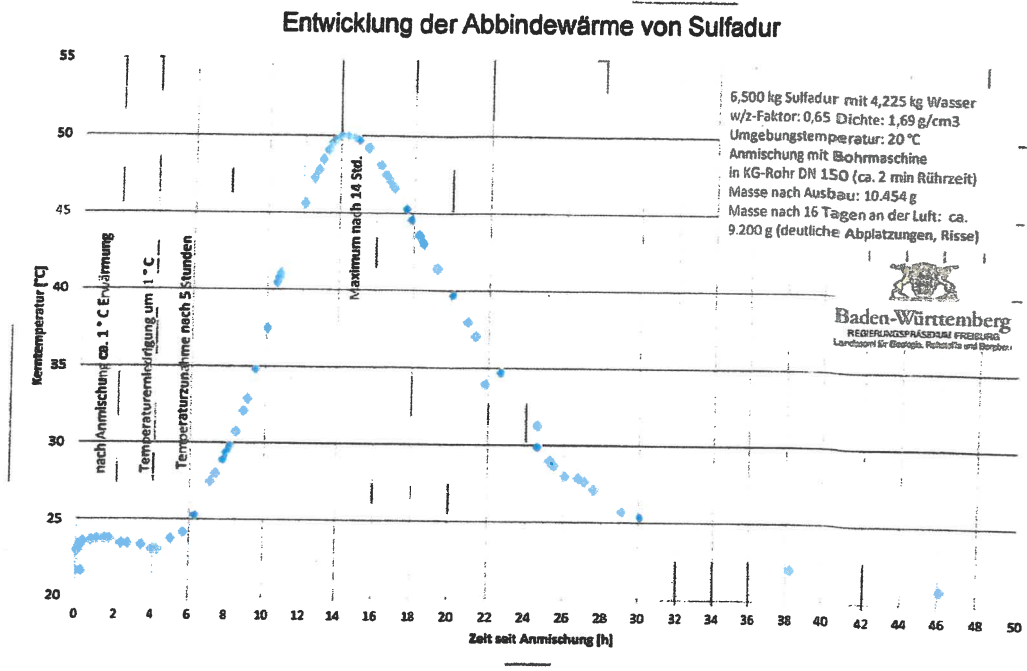


Abb. 12.1: Entwicklung der Hydrationswärme beim Abbinden von Sulfadur

12.2 Nachverpressung der Erdwärmesonden in den Quartieren II, IIIa und IIIb

Die Nachverpressungen der Erdwärmesonden in den Quartieren II, IIIa und IIIb erfolgten durch die Fa. Keller Grundbau, Renchen, in folgenden Zeiträumen:

Quartier II [REDACTED] 11.02.2015 bis 03.08.2015

Quartier IIIa [REDACTED] 11.08.2015 bis 08.12.2015

Quartier IIIb [REDACTED] 08.12.2015 bis 23.03.2016 und
15.08.2017 bis 18.07.2018



Die Arbeiten zur Nachverpressung der Erdwärmesonden fanden unter ständiger fachtechnischer Überwachung des Baugrundinstituts VEES|PARTNER in Abstimmung mit dem LRA Böblingen sowie dem LGRB statt. Die Sanierung folgte einem grundsätzlichen Ablaufschema:

- Perforation des Sondenschlauches mittels Hochdruckwasserstrahl (Schnitt a' 30 cm je Schnittebene mit Schneiddüse DA 7,5 mm),
- Kurz-WD-Test bis max. 10 bar nach Schnitt,
- Zementinjektion nach erwiesener WD-Aufnahmefähigkeit mit max. 10 bar Verpressdruck bis Aufnahme < 1 l/min,
- Reinigen des Rohrpaars mit Spüldüse,
- nächster Schnitt 1,5 m über dem vorangegangenen Schnitt.

Die Vorgehensweise der Nachverpressungen (Arbeitsanweisungen, Berichte der Fa. Keller, die Diagramme zu den einzelnen Sondenverpressungen, Wechselwirkungen zwischen einzelnen Erdwärmesonden etc.) ist den Berichten des Büro VEES|PARTNER zu den Quartieren II und III (Anl. 11) zu entnehmen. Die Schnitt- und Verpresslagen der EWS [REDACTED] sind als Anl. 9.1, der EWS [REDACTED] als Anl. 9.2 und der EWS [REDACTED] als Anl. 9.3 beigelegt.

In den entsprechenden Abbildungen des Büro VEES|PARTNER sind die in den Erdwärmesonden verpressten Zementmengen zusammen mit den begleitenden Angaben zu den einzelnen injektionsgängigen Schnittlagen und sonstiger orientierender Angaben (Gips- und Anhydritspiegel nach Erkundungsbohrung B2a) synoptisch dargestellt. Aus dem Vergleich der vor den Verpressarbeiten gemessenen Ruhetemperaturprofile ergeben sich über die gemessene Abbindewärme des Injektionsguts die Bereiche, in denen die Ringräume der Erdwärmesonden nachträglich verpresst wurden. Die zackenförmigen Temperaturspitzen deuten zudem darauf hin, dass durch die Ringrauminjektion auch Schichtfugen oder Klüfte im Nahbereich der Erdwärmesondenbohrung erreicht wurden. Jedoch bestehen auch hier in der Interpretation der einzelnen Temperatursignale Unsicherheiten in Folge der spiralförmigen Lage der EWS-Schläuche im Bohrloch.

Die Nachverpressungsarbeiten im [REDACTED] gestalteten sich insgesamt als schwierig und besonders zeitaufwändig. Insbesondere war der Verpresserfolg trotz eines auffälligen Längsläufigkeitsbefundes zunächst nur sehr gering. Bei den Schneidearbeiten in den Erdwärmesonden im [REDACTED] wurde im Schneidewasser eine weiße Substanz zu Tage gefördert, die daraufhin im mineralogisch-petrographischen Labor des LGRB mittels Röntgenbeugungsanalyse (Abb. 12.2) untersucht wurde mit folgendem Ergebnis:

Ca. ein Viertel der Probe besteht aus Thaumasit, eine Hälfte Calcit + Dolomit, ein Viertel aus Tonmineralen und Gips. Es handelt sich offenbar um eine Mischung von Thaumasit aus degradierter Zementierung und Nebengesteinsanteilen.

Die Trocknung wurde quantitativ durchgeführt und erbrachte einen Feststoffanteil von 10 Gew.-% in der zugesandten Suspension.

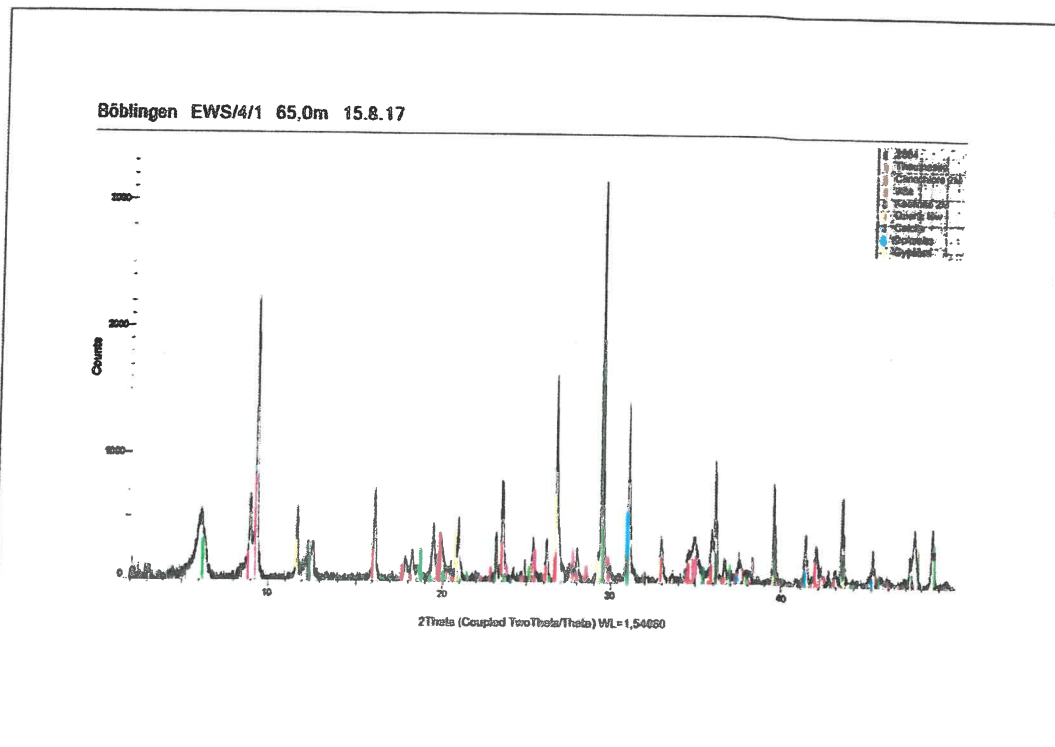


Abb. 12.2: Röntgenbeugungsdiagramm einer Schneidewasserprobe EWS 4/1

Nach der 2. Stellungnahme des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) zum „Sulfatangriff auf Beton“ – Aktualisierter Stand Februar 2012, Anlage A (Stellungnahme des DAfStb zum Sulfatangriff auf Beton aus dem Jahr 2003) – handelt es sich „...Bei Thaumasit ... um ein dem Ettringit verwandtes Mineral mit ähnlicher Kristallstruktur, das kein Aluminium, aber zusätzlich Silicium und Carbonat enthält. Die Thaumasitbildung führt im Unterschied zur Ettringitbildung aber nicht zu einer treibenden Reaktion, sondern zu einer Auflösung der Zementsteinmatrix, so dass sich fester Beton in eine breiige Masse umwandelt. Eine Thaumasitbildung ist nach derzeitigem Erkenntnisstand nur unter folgenden Randbedingungen möglich:



- *Feuchteeinwirkung und herkömmlicher Sulfatangriff (aus sulfathaltigen Wässern und Böden oder sulfidhaltigem Gestein, z. B. Pyrit),*
- *überwiegend niedrige Temperaturen ($t < 15^{\circ}\text{C}$),*
- *carbonathaltige Betonzusätze (z. B. Kalksteinmehl, Kalksteinzuschlag etc.) oder externe Carbonatquellen (Wasser, Luft)."*

Sowohl Ettringit als auch Thaumasit entstehen bei der Alterierung nicht sulfatbeständiger Zemente unter Sulfatexposition bzw. -angriff. Im Gegensatz zu Ettringit, der z.B. im Ringraum einer Erdwärmesonde in Staufen angebohrt und dort als mürbes, „sandkuchenartiges“ Material geborgen wurde, handelt es sich bei dem in den Erdwärmesonden in Böblingen am [REDACTED] angetroffenen Thaumasit um ein pastöses, gallertartiges Zersatzprodukt aus der Zementauflösung. Es zeigte sich, dass mit dem bisher eingesetzten Sanierungsverfahren der Thaumasit nicht verdrängt und anschließend durch Zementsuspension ersetzt werden konnte. Daher mussten die Nachverpressungsarbeiten im März 2016 zunächst eingestellt und ein modifiziertes Verfahren entwickelt werden, welches ermöglichte, vor der Verpressung das Thaumasitmaterial aus dem Ringraum auszuspülen.

Zur Modifizierung des Sanierungsverfahrens waren somit aufwändige Entwicklungsarbeiten erforderlich, ehe im August 2017 die Arbeiten weitergeführt werden konnten.

In den nachstehenden Abb. 12.3 bis Abb. 12.5 sind die Verpressmengen zur nachträglichen Abdichtung der Erdwärmesonden in den Quartieren II, IIIa und IIIb schematisch dargestellt. Neben der Gesamtsumme wurden für die einzelnen Erdwärmesonden auch die Abschnitte angeführt, in denen hohe Einzelaufnahmen an Verpressgut festgestellt wurden.

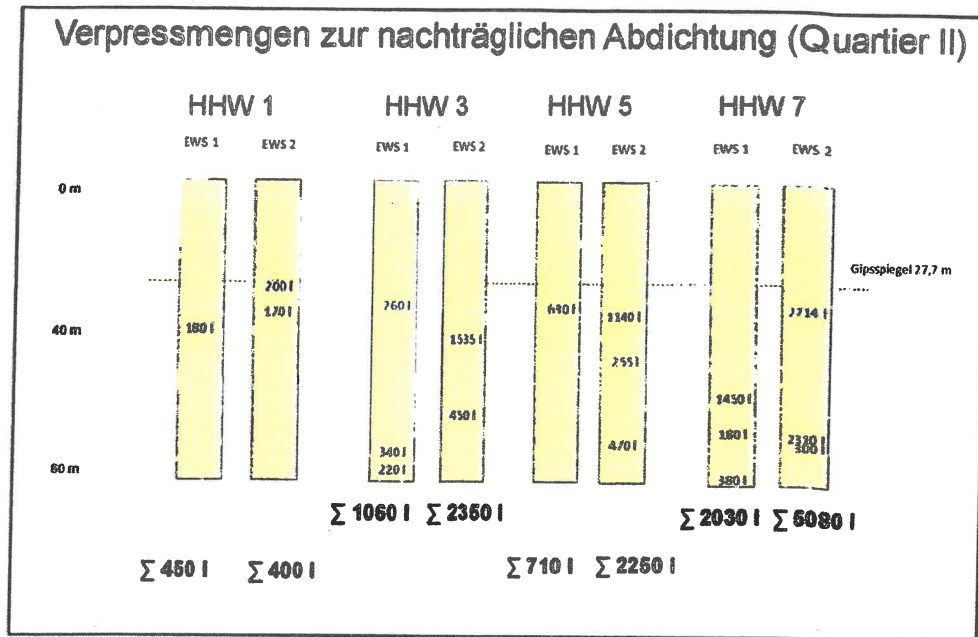


Abb. 12.3: Verpressmengen (Σ = summarisch, z.B. 1450 l = Einzelverpressung) zur nachträglichen Abdichtung der Erdwärmesonden an [REDACTED] (Niveau des Gipspegels nach B2a)

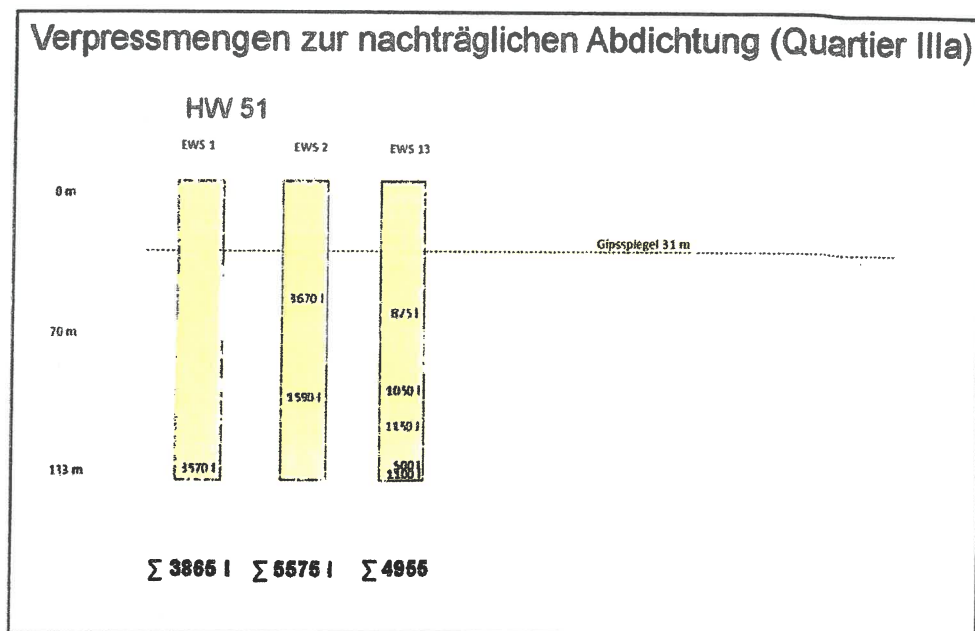


Abb. 12.4: Verpressmengen (Σ = summarisch, z.B. 1590 l = Einzelverpressung) zur nachträglichen Abdichtung der Erdwärmesonden an [REDACTED] (Niveau des Gipspegels nach B3)

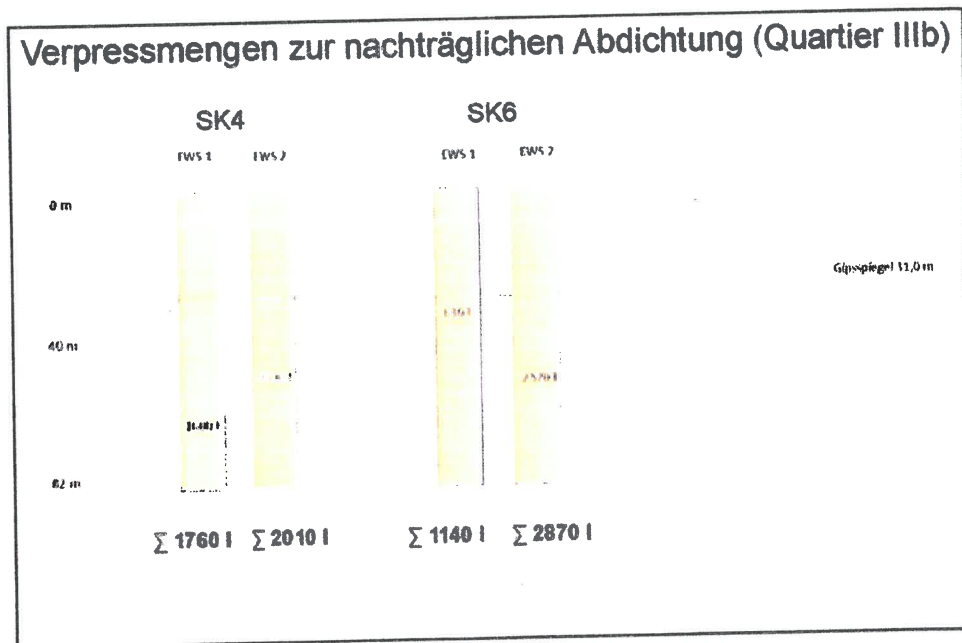


Abb. 12.5: Verpressmengen (Σ = summarisch, z.B. 1600 l = Einzelverpressung) zur nachträglichen Abdichtung der Erdwärmesonden [REDACTED] (Niveau des Gipspegels nach B3)

Ein Großteil der Injektionsmengen in den Erdwärmesonden dürfte dabei auch in das Niveau des oberen Gipskarsts abgewandert sein. Die Tatsache, dass auch unterhalb des Gipskarstes große Injektionsaufnahmemengen belegt sind, zeigt, dass die Ringräume der Erdwärmesonden nicht - wie vorgesehen - zementgefüllt und damit undicht waren.

Es wird davon ausgegangen, dass mit den Injektionen die vorhandenen Wasserwegsamkeiten (Längsläufigkeiten) in den Ringräumen der Erdwärmesonden weitestgehend verschlossen werden konnten. Wie die Ruhetemperaturprofile nach erfolgter Sanierung zeigen, nähern sich diese gegenüber der Ausgangsmessung vor Beginn der Abdichtungsmaßnahmen wieder einem einheitlichen Temperaturgradienten an.

Im Zuge der Nachkontrolle der geschnittenen und verpressten EWS-Rohre wurden die EWS-Rohre bis in Geländehöhe mit Wasser aufgefüllt und sodann die Entwicklung der Wasserstände in den EWS-Rohren beobachtet. Dabei zeigte sich, dass die Wasserstände unterschiedlich variieren bzw. absinken und dabei auf verbleibende Restundichtigkeiten hinweisen.



Die über die EWS-Rohrschenkel verlustig gehenden Wassermengen sind insgesamt nur gering. Um jedoch zu vermeiden, dass über verbliebene, durch das Injektionsgut nicht weiter abdichtbare Wegsamkeiten stockwerksübergreifende Längsläufigkeiten stattfinden und so weiterhin eine - wenn auch nur geringe - Bewässerung des quelfähigen Gebirgsabschnittes verursachen, wurde entschieden, die betroffenen EWS-Rohre mit einer Bentonitsuspension aufzufüllen (sog. „Sondenverwahrung“). Die Bentonitsäule muss in regelmäßigen Abständen erneuert werden und stellt sicher, dass eine stockwerksübergreifende Längsläufigkeit verhindert ist und im Bedarfsfall auch in späteren Zeiten der Zugang zu den EWS-Rohren erhalten bleibt.

Die in Erdwärmesonden stationär zur Temperaturüberwachung eingebauten Glasfaserkabel verbleiben in den nicht geschnittenen EWS-Rohrschenkel. Allein in der EWS 2 [REDACTED] reicht das Glasfaserkabel heute wegen eines Befahrbarkeitsproblems nur noch bis ca. 50 m unter Bohransatz. Zum Zustand der EWS nach der Verpressmaßnahmen, insbesondere zur verbliebenen Befahrbarkeit, wird auf die Dokumentation von VEES|PARTNER (Anlage 11) verwiesen.



13 Zusammenfassung

Befund

Im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen wurden in den Quartieren II, III (i.E. III a und III b) und IV im Auftrag privater Bauherren insgesamt acht Erdwärmesonden-Anlagen hergestellt, um die Wohngebäude mit Erdwärme beheizen zu können. Die Erdwärmesonden-Anlagen bestehen aus i.d.R. 80 m, in einem Falle bis zu 133 m tiefen Bohrungen, die in der Zeit zwischen Oktober 2006 und Dezember 2008 im Imlochbohrhammerverfahren ausgeführt wurden.

Die Erdwärmesonden standen im Verdacht, im Untergrund Prozesse auszulösen, die zu den im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen (Hebungsgebiet "Süd") zunehmenden Geländeverformungen sowie den Verformungen und Schäden an Gebäuden und Infrastruktur führen. Die Geländeverformungen werden auf das sog. „Gipskeuperquellen“ zurückgeführt, einem Vorgang, der aus der Umwandlung von Anhydrit in Gips unter gleichzeitiger Volumenzunahme nach Wasserezutritt resultiert und zu Hebungen an der Geländeoberfläche führt.

Zusammenfassend handelt es sich bei dem Hebungsgebiet "Süd" um einen ca. 950 m in West-Ost und ca. 375 m in Nord-Süd messenden, angenähert sichelförmigen Bereich mit signifikanten Geländehebungen.

Im Hebungsgebiet "Süd" haben sich infolge von Undichtigkeiten an EWS-Anlagen zwei Hebungscentren entwickelt, die sich zeitlich und räumlich überlagern:

Südwestliches Hebungscentrum: EWS-Anlagen [REDACTED]

Zentrales Hebungscentrum: EWS Anlagen [REDACTED]

Die im südwestlichen Hebungscentrum festgestellte Hebungsgeschwindigkeit hat bis zu 1,8 mm/Monat (Radarinterferometrie) und im zentralen Hebungscentrum bis zu 3,1 mm/Monat (Radarinterferometrie) bzw. bis 4,8 mm/Monat (Geodäsie) betragen. Die absoluten Hebungsbeträge erreichen (unter Einbezug sämtlicher verfügbarer Datenquellen) seit Beginn der Hebungen im südwestlichen Hebungscentrum 24 cm – 25 cm und im zentralen Hebungsbereich 25 cm – 35 cm.



Beide Hebungscentren stehen in enger räumlicher Beziehung zu den o.g. EWS-Anlagen.

Es besteht weiterhin eine eindeutige zeitliche Koinzidenz zwischen der Ausführung der Bohrungen und dem Beginn der ersten Hebungen. Eine Detailbetrachtung von Zeit-/Geländeveränderungsdiagrammen aus interferometrischer Zeitserienanalyse hat diesbezüglich ergeben, dass die Hebungen im Nahbereich um die Bohrungen unmittelbar (wenige Tage/Wochen) nach deren Erstellung aufgetreten sind. In weiter entfernten Bereichen des Hebungsgebietes sind sie hingegen erst einige Monate später aufgetreten. Dies lässt die Vermutung zu, dass hier zunächst Wasser von den Erdwärmesondenbohrungen in den quelfähigen Gebirgsabschnitt dieses Bereichs vordringen musste, bevor auch dort eine Umwandlung von Anhydrit in Gips stattfinden konnte. Der geringe räumliche Versatz des jeweiligen Hebungscentrums vom Ort der Bohrungen lässt sich auf Grund vorhandener Inhomogenitäten des Gebirges und der daraus resultierenden unterschiedlichen Wasserverteilung erklären.

Die Hebungen im Hebungsgebiet "Süd" haben sich im Einflussbereich der Erdwärmesonden in den Quartieren II und III entwickelt, während das Quartier IV nur im Einflussbereich der beiden Hebungscentren der Quartiere II und III liegt, jedoch kein eigenes Hebungscentrum aufweist.

Erkundung

Die geologische Erkundung im Bereich des Hebungsgebiets "Süd" in Böblingen, die sich auf die Ergebnisse der Erkundungsbohrung B2a sowie den begleitenden Bohrungen B2, B2b, B3 und B4 wie auch auf die erfolgten bohrlochgeophysikalischen und mineralogischen Begleituntersuchungen stützt, erbrachte einen belastbaren Datensatz hinsichtlich des geologischen Baus (Schichtenabfolge, Lage der Gipsauslau-gungszone, der Gips- und Anhydritspiegel), der hydrogeologischen Stockwerksgliederung, der Grundwasserbeschaffenheit, der vorhandenen Druckpotenziale sowie umfangreiche mineralogisch-petrographische Untersuchungsergebnisse an Kernma-terial.

Demnach setzt die Sulfatführung mit dem Oberen Gipsspiegel in der Erkundungsbohrung B2a bei 17,5 m ein. Der Obere Anhydritspiegel wurde im mineralogisch-petrographischen Labor des LGRB bei 58,5 m analytisch ermittelt. Die Anhydritfüh-



rung ist mit dem Unteren Anhydritspiegel bei 121,7 m und die gesamte Sulfatführung mit dem Unteren Gipsspiegel bei 130,5 m (welcher bereits im Bereich der Erfurt-Formation zu liegen kommt) beendet. In der Bohrung B2a fällt auf, dass an der Basis der Grundgipsschichten keine untere Auslaugungszone entwickelt ist, wie diese andernorts beobachtet werden konnte (z. B. EWS-Schadensfall Staufen). Der quelfähige Gebirgsabschnitt in der Grabfeld-Formation wurde folglich zwischen 58.5 m und 121,7 m unter Gelände identifiziert.

Hebungsursache

Die Hebungen sind auf Quellvorgänge in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper), dem sogenannten "Gipskeuperquellen" zurückzuführen, welches im Bereich der Erdwärmesonden in den nachgewiesenen quelfähigen sulfatführenden Abschnitten (Anhydrit) der Grabfeld-Formation stattfindet.

Die Umwandlung von Anhydrit zu Gips ist ein Lösungs-/Fällungsprozess, der das Vorhandensein von Wasser voraussetzt. Wird Wasser von außen zu- und kein Sulfat weggeführt, erfolgt bei vollständiger Lösung des Anhydrits und Ausfällung als Gips eine erhebliche Volumenzunahme. Die bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips entstehenden Quelldrücke sind in der Lage, auch einen überlagernden Sedimentstapel von mehr als 100 m Mächtigkeit anzuheben.

Im Rahmen der Erkundungsmaßnahme wurden drei hydraulisch und hydrochemisch voneinander getrennte Grundwasserstockwerke ermittelt: Das Kluftgrundwasser im Niveau der Stuttgart-Formation (Schilfsandstein), das Kluft- und Karstgrundwasser in der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) und das Kluft- und Karstgrundwasser im Oberen Muschelkalk. Der Druckspiegel des Grundwassers im Oberen Muschelkalk reicht zwar bis in das Niveau der Grabfeld-Formation und könnte bei entsprechenden Wegsamkeiten im quelfähigen Gebirgsabschnitt zwischen Oberem und Unterm Anhydritspiegel das "Gipskeuperquellen" auslösen. Die Erkundungsergebnisse belegen jedoch eine ausreichende natürliche hydrogeologische Stockwerkstrennung, die sich im Erhalt des Sulfatgebirges bis zur Untergrenze der Grabfeld-Formation und darunter im Erhalt des Böhringen-Sulfats innerhalb der Erfurt-Formation manifestiert. Wären geologisch bedingte Durchlässigkeiten, z. B. über das Kluft- bzw. Karstsystem vorhanden, hätte dies in geologischen Zeiträumen zwangsläufig zur Auflösung des Sulfats innerhalb der Erfurt-Formation und zur Ausbildung einer unteren Auslaugungszone geführt. Hinzu kommt, dass nur die Erdwärmesonden [REDACTED] die



Erfurt-Formation erreicht haben, alle anderen Erdwärmesondenbohrungen enden in der Grabfeld-Formation. Infolge dessen kann kein Aufstieg von Grundwasser aus dem Oberen Muschelkalk über die undichten Ringräume der Erdwärmesonden erfolgt sein.

Das "Gipskeuperquellen" wurde vielmehr durch eine absteigende Wasserzufuhr über undichte Ringräume der Erdwärmesonden verursacht. Eine andere Kausalität, z. B. Zusammenhang mit Mineralwasserbohrungen der Böblinger Mineraltherme oder Erdbeben, kann auf Grundlage aller vorliegenden Erkenntnisse ausgeschlossen werden. Diese Einschätzung wird auch dadurch untermauert, dass die Hebungsprozesse nach Einleiten der schadensbegrenzenden Maßnahme, nämlich der nachträglichen Injektion der Ringräume, nachweislich abklingen. Dies lässt sich aus interferometrischen Zeitserienanalysen von Radarsatellitendaten belastbar belegen.

Untersuchungen der Erdwärmesonden

Messungen der Ruhetemperaturprofile in den Erdwärmesonden mit vertikalen, z.T. auch unter negativem Gradient verlaufenden Profilabschnitten deuten auf vertikale Fließbewegungen in den Erdwärmesonden hin. Der negative Temperaturgradient lässt sich in den Erdwärmesonden bis nahezu zur Endteufe nachvollziehen. In der Gesamtbetrachtung ergeben die Ruhetemperaturprofile eindeutige, wenngleich nicht näher quantifizierbare Hinweise auf vertikale, abwärts gerichtete Fließvorgänge in den Ringräumen der Erdwärmesondenbohrungen.

Sondensanlierung

Bei der nachträglichen Abdichtung durch umfangreiche Ringraum-Injektionsmaßnahmen wurden in den Erdwärmesondenbohrungen große Mengen sulfatbeständige Zementsuspension (min. 410 l, max. 5575 l) verpresst. Auch wenn man davon ausgehen muss, dass ein Anteil an Zementsuspension in den hochdurchlässigen überlagernden Gipskarst abgewandert ist, belegt die hohe Aufnahmemenge unterhalb des Gipskarsts, dass in den Erdwärmesondenbohrungen keine hydraulisch wirksamen Ringraumabdichtungen vorhanden waren.

Es wird davon ausgegangen, dass mit den Injektionen die vorhandenen Wasserwegsamkeiten (Längsläufigkeiten) in den Ringräumen der Erdwärmesondenbohrungen weitestgehend verschlossen werden konnten. Wie die Messungen nach erfolgter Sa-



nierung zeigen, nähern sich die Ruhetemperaturprofile gegenüber der Ausgangsmessung wieder einem einheitlichen Temperaturgradienten an.

Bearbeiter:

Dr. Clemens Ruch
Referat 95 Landesingenieurgeologie

Dr. Rupert Prestel
Referat 94 Landeshydrogeologie
und Geothermie

Dipl.-Geol. Johannes Wiedenmann, Ref. 95

Dipl.-Geol. Ansgar Sage, Ref. 95

Dr. Manfred Martin
Referat 92 Landesgeologie
Leiter Min.-Pet. Labor

M.Sc. Simone Schöpflin, Ref. 95



14 LITERATUR

- ANAGNOSTOU, G. (1992): Untersuchungen zur Statik des Tunnelbaus in quellfähigem Gebirge. – Veröffentlichung des Instituts für Geotechnik der ETH Zürich, Band 201, August 1992.
- 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.
- DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (2012): 2. Stellungnahme des DAfStb zum „Sulfatangriff auf Beton“, Aktualisierter Stand Februar 2012 mit Anlage A: Stellungnahme des DAfStb zum Sulfatangriff auf Beton aus dem Jahr 2003; Berlin
- 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.
- 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.
- LUX, K.-N. et al. (2012) Geothermie und Schutz des Grundwassers – ein Widerspruch? - bbr 10/2012).
- RAUH, F. (2009): Untersuchungen zum Quellverhalten von Anhydrit und Tongesteinen im Tunnelbau. – Münchner Geowiss. Abh., 11, S. 1-110, München.
- ROHNER, E. (2009): TRT in Kombination mit hoch aufgelösten Temperatur-Tiefenprofilen zur Qualitätssicherung. – TRT-Symposium, 16. September 2009, Göttingen
- SAUER, M., GRUNDMANN, E. (2009): Praxiserfahrungen mit der Auswertung des geothermal Response Tests. – Symposium "10 Jahre TRT in Deutschland", Göttingen 16. September 2009.
- UM (2005), Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg., 2005): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 4. überarbeitete Neuauflage, Mai 2005.



-
- WALKER-HERTKORN, S., KÜBERT, M., VOUTTA, A. (2009): Messmethoden bei Erdwärmesondenbohrungen, GtV 3/2009, S. 19 – 23.
- WAMPACH, M., WESTERHAUS, M. (2018): Einsatz der Multi-track SAR-Interferometrie zur Bestimmung von Beginn und Ausgangspunkt des Hebungssignales in Böblingen.-Abschlußbericht Forschungsvorhaben L7515001, Karlsruher Institut für Technologie, Geodätisches Institut
- WITTKE, M., WITTKE-GATTERMANN, P., WAHLEN, R. (2007): Möglichkeiten der Optimierung des Tunnelbaus im quellfähigen Gipskeuper durch Berücksichtigung der Selbstabdichtung. – Zeitschrift Geotechnik 4/2007.