

Technischer Bericht Geothermie-Sondierbohrung Otterbach 2, Basel

Von

Dr. Markus O. Häring, Im untern Tollacher 2, 8162 Steinmaur

Lokation:	Freiburgerstrasse 42-44, 4057 Basel
Koordinaten:	612 430 / 269 685
Kote:	252.61 m ü.M (Oberkante Bohrkeller)
Endteufe:	2'755 m
Bohrbeginn:	15. März 2001
Endtiefe erreicht:	10. Juni 2001
Bohrplatz geräumt:	4. Juli 2001
Zustand:	mit Brunnenkopf verschlossen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ziel und Zweck.....	5
1.2	Vorgeschichte	6
1.3	Organisation.....	6
1.3.1	Geldgeber.....	6
1.3.2	Projektleitung	6
1.3.3	Stab.....	6
1.3.4	Ausführende	7
1.4	Projektablauf	7
2	Bohrung.....	9
2.1	Prognose	9
2.2	Bohrprogramm	9
2.3	Lage	10
2.4	Verrohrung	10
3	Datenerfassung / Vermessung.....	11
3.1	Sampling.....	11
3.2	Gasmessungen.....	11
3.3	Bohrfortschritt.....	11
3.4	Ablenkungsmessungen.....	12
3.5	Weitere Datenaufzeichnungen.....	12
3.6	Bohrkerne	12
	Kernmarsch von bis Gewinn von bis Gewinn Formation.....	12
3.7	Wireline logging	13
3.7.1	Logging für Dritte.....	13
3.7.2	Kaliberlog im Salz	13
3.7.3	DHM Logging Programm.....	13
3.8	Temperaturlogs.....	14
4	Auswertung / Resultate.....	15
4.1	Schichtenverzeichnis.....	15
4.2	Strukturgeologie.....	21
4.3	Temperaturen.....	22
4.4	Spannungsfeld	23
4.5	Hydrogeologie	23
5	Geplante Arbeiten an der Bohrung.....	24
5.1	Messungen.....	24
5.2	Ausbau.....	24
5.3	Instrumentierung.....	24
6	Weitere Berichte / Dokumentationen zur Bohrung Otterbach 2	25

Figuren

1. Situation: Sondierbohrung-Standort
2. Geplanter und effektiver Bohrfortschritt
3. Bohrprognose vs. Effektiv
4. Profil- und Planspur Otterbach 2
5. Plansicht der Bohrspuren Otterbach 1 und 2
6. Übersicht Bohrprofil 1:5'000
7. Übersicht der Bohrlochvermessungen und Verrohrung
8. Kaliberlog im Bereich des Salzlagers
9. STAR-CBIL image logs und Interpretation
10. Temperaturprofile Otterbach 2
11. Klassifikation der Kristallin-Kernproben
12. Kenntnisstand vor / nach der Bohrung
13. Gemessenes und extrapoliertes Temperaturprofil
14. Pegelstände Juli – November 2001
15. Kern 1: Rotliegend 2083 – 2088 m
16. Kern 1: Rotliegend 2086 – 2092 m
17. Kern 2: Kristallin 2706.00 – 2706.92 m
18. Kern 3: Kristallin 2707.02 – 2707.49 m
19. Kern 4: Kristallin 2723.50 – 2724.50 m
20. Kern 4: Kristallin 2724.50 – 2725.32 m
21. Kern 5: Kristallin 2725.60 – 2726.03 m
22. Kern 5: Kristallin 2726.03 – 2726.98 m
23. Kern 5: Kristallin 2726.98 – 2727.79 m
24. Kern 5: Kristallin 2727.79 – 2728.61 m
25. Kern 5: Kristallin 2728.61 – 2729.44 m

Tabellen

1. Abweichungsmessungen
2. Schichtenverzeichnis

Beilage

1. Sampler Log 1:500

Zusammenfassung

Zweck der Bohrung war im Rahmen des Projekts DEEP HEAT MINING die geologische Standorteignung für die Entwicklung eines geothermischen Heiz-Kraftwerks nach dem Hot-Dry-Rock Verfahren geologisch abzuklären. Die Bohrung soll zu einem späteren Zeitpunkt als Horchbohrung zur Überwachung des geothermischen Reservoirs dienen.

Die Ziele, das Dach des kristallinen Grundgebirges zu eruieren, die Temperaturverhältnisse bis dorthin und die Spannungsverhältnisse im Grundgebirge zu ermitteln, wurden vollumfänglich erreicht.

Die Bohrung wurde erfolgreich tiefer als die geplanten 2'500 m bis auf 2'755 m ausgeführt. Überraschend war die unerwartet grosse Mächtigkeit des Salzlagers im Mittleren Muschelkalk und eine über 800 m mächtige bis anhin unbekannte Rotliegend-Sequenz.

Die Temperaturverhältnisse zeigen an, dass die Chancen auf 5'000 Metern Tiefe Formationstemperaturen von mindestens 200°C anzutreffen sehr gut sind. Die Spannungsverhältnisse im Kristallin zeigen keine signifikante Abweichung von den bisher bekannten oberflächennahen Daten. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Spannungsverhältnisse auch auf 5'000 m Tiefe angetroffen werden.

Die Bohrung ist mit einem Brunnenkopf verschlossen und für weitere Messungen und Untersuchungen zugänglich. Der Ausbau der Bohrung mit einer zusätzlichen Hilfsverrohrung im untersten Bereich, sowie die Instrumentierung mit geophysikalischen Messgeräten wird vorbereitet.

1 Einleitung

1.1 Ziel und Zweck

Zweck der Bohrung war die geologische Standorteignung zur Entwicklung eines geothermischen Heiz-Kraftwerks nach dem Hot-Dry-Rock Verfahren abzuklären. Für das DEEP HEAT MINING genannte Projekt wurde Basel nicht in erster Linie aufgrund der geologischen Verhältnisse, sondern aufgrund der günstigen Abnehmerstruktur (Fernwärmenetz) gewählt.

Im Raum Basel existieren weder eine Tiefbohrung die bis ins kristalline Grundgebirge reicht, noch reflexionsseismische Daten, welche die Tiefenstruktur abbilden. Es fehlen somit grundlegende Kenntnisse über die geologische Eignung des Standortes Basel für DEEP HEAT MINING. Allerdings deuten regionale Daten auf einen erhöhten Temperaturgradienten im südlichen Rheingraben.

Die Sondierbohrung hatte die Abklärung folgender Punkte zur Aufgabe:

- Verschaffen von Kenntnis über Tiefe der Kristallinoberfläche und Kenntnis der Schichtenfolge im Sedimentstapel.
- Verschaffen von Kenntnis zum Spannungsfeld im Dach des kristallinen Grundgebirges.
- Verschaffen von Kenntnis zu Temperatur, Wasserverhältnisse, Geochemie und Klüftung im kristallinen Grundgebirge.
- Kenntnis des Isolationseffekts des Sedimentstapels.
- Kenntnis der Laufgeschwindigkeit akustischer Signale im Sedimentstapel.
- Schaffung einer Horchbohrung zur späteren akustischen Überwachung der Reservoirentwicklung.

Der Sondierstandort beim Zoll Otterbach (Fig. 1) wurde so gewählt, dass er in günstiger Distanz zu den beiden möglichen Anlagestandorten Voltapplatz respektive Kleinhüningen liegt. Dies ist für die spätere Aufzeichnung mikroseismischer Signale von Bedeutung.

Im Pflichtenheft der Bohrung stand die Erreichung folgender Ziele:

1. Kenntnis der Schichtenfolge bis ins Kristallin.
2. Kenntnis der Wasserführung der Fluide in den Sedimenten.
3. Kenntnis von Kohlewasserstoff-Vorkommen, anderen Gasen, Über- und Unterdrücken.
4. Kenntnis des bohrtechnischen Gesteinsverhaltens.
5. Kenntnis des Spannungsfeldes im Dach des Kristallin.
6. Petrographie des Kristallin und Einfluss auf die Klüftung.
7. Häufigkeit, Orientierung und Charakterisierung der Klüftung.
8. Wasserführung im Kristallin und Kenntnis der Fluide.
9. Kenntnis des Temperaturgradienten in den einzelnen Formationen.
10. Kenntnis der Formationstemperatur im Kristallin.
11. Messung der Wärmeleitfähigkeit kristalliner Lithologien.
12. Kenntnis der geophysikalischen Eigenschaften: z.B. Laufzeitgeschwindigkeiten (p- und s-Wellen) für Geschwindigkeitsmodell zur Eichung reflexionsseismischer Daten und Information für Mikrozonierungs-Projekt (Kanton BS; Uni Basel - ETHZ).
13. Langzeitbeobachtung von Druckspiegelschwankungen im Kristallin.
14. Langzeitbeobachtung der Temperaturentwicklung auf Sohle.
15. Langzeitmonitoring seismischer Aktivität mit Messsonden im Kristallin.

Es kann hier vorweggenommen werden, dass sämtliche dieser Kenntnisse gewonnen werden konnten und die Bohrung damit ihr Ziel voll erreicht hat.

1.2 Vorgeschichte

Die Sondierbohrung Otterbach 2 ist die Fortsetzung einer 1999 begonnenen Sondierbohrung. Die Bohrung Otterbach 1 musste wegen einer technischen Havarie (Gestängebruch) auf einer Tiefe von 1535 m aufgegeben werden. Um eine solche Havarie beim zweiten (und letzten) Versuch auszuschliessen, wurde ein aufwändigeres Bohrkonzzept entwickelt, das grössere Bohrdurchmesser vorsah und damit auch auf ein wesentlich grösseres Bohrgerät angewiesen war.

Die Bohrung wurde um 6 m versetzt von Otterbach 1 neu angesetzt.

Auf eine seismische Erkundung wurde verzichtet, da keinerlei Referenzbohrungen und Daten für ein Geschwindigkeitsmodell im Sedimentstapel existieren. Seismische Untersuchungen hätten wohl zusätzliche Information zu strukturellen Fragen liefern können, wichtige Antworten zum Spannungsfeld und Temperaturfeld wären aber keine gewonnen worden. Die Kosten einer Seismikkampagne standen in keinem Verhältnis zum Nutzen. Die daraus gewonnene Information hätte im besten Falle zu einer genaueren Planung der Verrohrungstiefen genutzt werden können.

1.3 Organisation

1.3.1 Geldgeber

Die Bohrung wurde durch Beiträge folgender Geldgeber finanziert:

- **Industrielle Werke Basel**, federführender Förderer des Projekts, vertreten durch Herrn E. Schumacher, Vorsitzender der Geschäftsleitung und Herrn Dr. H. Schwendener, Mitglied der Geschäftsleitung, Leiter Marketing und Verkauf.
- **Kanton Basel-Stadt**, Energiefachstelle des Baudepartements, vertreten durch Herrn R. Jegge.
- **Schweizerische Eidgenossenschaft**, Bundesamt für Energie, vertreten durch die Herren H.U. Schärer und M. Geissmann.
- **Elektra Baselland**, vertreten durch Herrn Dr. K.-P. Schäffer, Vorsitzender der Geschäftsleitung.
- **G.H. Endress Stiftung**, vertreten durch Herrn Dr. G.H. Endress.

1.3.2 Projektleitung

- Geothermal Explorers Ltd, c/o Welinvest AG, Petersgraben 35, 4003 Basel, Dr. Markus O. Häring.

1.3.3 Stab

Für die Bauleitung, sowie die Logistik um die Bohrarbeiten zur Verfügung stand die

- Häring Gruppe, Pratteln.

Für die bohrtechnischen Aspekte wurde die Projektleitung ergänzt durch das Büro

- GeoWell GmbH, Untersiggenthal, Herrn A. Macek;

und bei der Planung des wissenschaftlichen Programms durch die Herren

- Dr. R.J. Hopkirk und Prof. Dr. L. Rybach aus der Arbeitsgemeinschaft DEEP HEAT MINING.

1.3.4 Ausführende

- Bohrarbeiten: UGS GmbH, Mittenwalde / Mark, Deutschland
- Mud Engineering: MI Drilling, Celle, Deutschland
- Bohrplatzbau: Rofra AG, Aesch
Meier + Jäggi, Basel
- Gasüberwachung: SJ GeoTec AG, Wolfwil
- Bohrstellengeologie: H. Stang, Tübingen, Deutschland
- Bohrlochvermessung: Baker Atlas, Den Helder, Niederlande
BLM GmbH, Gommern, Deutschland
GGA, Hannover, Deutschland
Geotest AG, Zollikofen

1.4 Projektablauf

Eine Baubewilligung lag noch von der ersten Bohrung vor, so dass mit den Erweiterungsarbeiten des Bohrplatzes für die grössere Bohranlage ohne weiteres Bewilligungsverfahren bereits Ende Dezember 2000 begonnen werden konnte. Anfangs Januar 2001 wurde das 500 mm Standrohr bis auf eine Tiefe von 18 Metern eingebaut, sodass die grundwasserführenden Rheinschotter von den weiteren Bohrarbeiten abgedichtet waren. Der Bohrplatz wurde vollständig asphaltiert und mit einem eigenen Drainagesystem an der Kanalisation angeschlossen. Während des Bohrbetriebes wurde die gesamte Entwässerung über einen mobilen 50 m³ Schlamm- und Ölabscheider geführt.

Die 70 Tonnen schwere selbstfahrende Bohranlage fuhr am 5. März 2001 vor und war 14. März mit allen Installationen bohrbereit.

Die eigentlichen Bohrarbeiten im Dreischichtbetrieb begannen am 15. März 2001 (Fig. 2). Die Bohrung verlief ohne grössere technische Probleme weitgehend programmgemäss. Da in den Sedimenten, insbesondere im Muschelkalk mit schwierigen Bohrverhältnissen (Spülungsverlusten, Wasserzuflüssen) gerechnet werden musste, war während der gesamten Bohrphase ein Spülungsingenieur der Firma MI Drilling vor Ort und kontrollierte die Spülungswerte laufend vor Ort im eigenen Labor. Bis zur Endtiefe wurden jedoch keine Spülungsverluste oder Zuflüsse registriert.

Eine Änderung des Bohrprogramms ergab sich durch die unerwartet grosse Mächtigkeit des Rotliegenden. Bei 2008 Metern wurde eine Kristallinbrekzie angefahren, welche vorerst als Dach des Kristallin interpretiert wurde. Die 7" Verrohrung wurde in dieser Schicht abgesetzt. Beim Weiterbohren erwies sich diese Brekzie jedoch als eine rund 35 Meter mächtige Schicht grobkörniger kristalliner Gesteinsbruchstücke innerhalb des Rotliegenden. Das Rotliegende ist weitaus mächtiger als angenommen, sodass bei einer Bohrtiefe von 2'300 Metern klar wurde, dass ein erfolgreicher Abschluss der Bohrung nur möglich wird, wenn über die budgetierte Tiefe hinaus gebohrt werden darf. Die Bohrung befand sich zu diesem Zeitpunkt in einem technisch stabilen Zustand und eine Vertiefung bis über 3'000 Meter war möglich. Mit Zusage der IWB, dass die notwendigen Mehrkosten finanziert würden, konnte die Bohrung über die geplanten 2'500 Meter hinausgeführt werden. Das kristalline Grundgebirge wurde schliesslich auf 2649 Meter Tiefe angetroffen. Die Bohrung stiess noch 100 Meter in das granitische Grundgebirge vor, wobei 4

Kerne von insgesamt 7.15 Metern gewonnen wurden. Die Endtiefe von 2'755 Meter wurde am 10. Juni 2001 nach 87 Bohrtagen erreicht. Daraufhin folgte die geophysikalische Vermessung des Bohrloches.

Da keinerlei Anzeichen vom Verfluten oder Zuflüssen bestanden, wurde auf ein Pumpstest nach dem Lufthebeverfahren verzichtet. Im weiteren wurde auch kein Austausch der Bohrspülung vorgenommen, um die offene Bohrstrecke im Rotliegend nicht zu destabilisieren.

Die Bohrung wurde Anfangs Juli mit einem Brunnenkopf mit Schieber abgeschlossen. Die Bohrung ist so für weitere Messungen zugänglich und gegen äussere Einflüsse geschützt.

Das Bohrgelände wurde am 4. Juli 2001 verlassen. Das Bohrgelände steht seither für die weitere Benutzung der Stadtgärtnerei als Holzschnitzelplatz zur Verfügung.

2 Bohrung

2.1 Prognose (Figur 3)

Die Bohrung befindet sich im südöstlichsten Teil des Rheingrabens. Charakterisiert wird dies durch eine beinahe 500 m mächtige Tertiärsequenz (Oligozän) über der mesozoischen Schichtenreihe. Sedimente Permokarbonischen Alters waren zu erwarten, sind in der Umgebung jedoch schlecht dokumentiert.

Bis auf eine Tiefe von 1535 m war die Schichtenfolge durch die Bohrung Otterbach 1 bekannt. Änderungen in der Tiefe der Schichtgrenzen ergaben sich aus der besseren Bohrgut-Kontrolle in der neuen Bohrung und die erst mit den Logs durchführbare Festlegung der Grenzen.

Wasser- und Gasführung in einigen kritischen Formationen musste schon aus sicherheitstechnischen Gründen antizipiert werden. Im Muschelkalk wurde eine Wasserführung sogar als wahrscheinlich angenommen, da dies dem thermalwasserproduzierenden Horizont in der zwei Kilometer entfernten Geothermiebohrung Riehen 1 entspricht.

Gebohrt wurde mit einer relativ schweren Spülung von gemittelt 1.3 g/ccm, was ein Eindringen von Gas in die Spülungssäule weitgehend unterdrücken würde. Andererseits ist bei dieser Spüldichte in wasserführenden Schichten mit Spülungsverlusten zu rechnen. Beides trat nicht ein. Eine Änderung der Spülung zur Behandlung von Zu- oder Abflüssen wurde nie notwendig.

Abweichend von der Prognose war besonders die Mächtigkeit des Salvorkommens. Die Prognose stützte sich auf die 7 Kilometer südöstlich liegenden Vorkommen bei Schweizerhalle, dem Salzsohlungsgebiet der Schweizerischen Rheinsalinen.

Auf kein vollständiges Profil bezieht sich die Prognose der Mächtigkeit des Permokarbons, respektive des Rotliegenden. Auf der östlich angrenzenden Dinkelbergscholle gibt es kein durchgehendes Profil des Rotliegend. Aus diesen Aufschlüssen lässt sich eine minimale Mächtigkeit von 150 Metern ableiten. Ein vollständiges aber schlecht dokumentiertes Profil liegt aus der Bohrung Knoeringen 15 Kilometer westlich vor. Dort beträgt das Permokarbon 600 Meter. Bei der Bohrung Weiherfeld in Rheinfelden beträgt die Mächtigkeit des gesamten Rotliegenden 283 Meter und in der Bohrung Wintersingen rund 400 Meter. Aus keiner dieser Referenzpunkte könnte auf die hier gefundene Mächtigkeit von mehr als 800 Meter geschlossen werden.

2.2 Bohrprogramm

Das Bohrprogramm war so ausgelegt, dass in einem ersten Bohrabschnitt die tonreichen Tertiärschichten sowie die Oxford-Mergel und die dazugehörigen Renggeritone durchbohrt und durch eine 13 3/8“ Verrohrung gesichert werden. Dieser Abschnitt konnte entsprechend der Planung ausgeführt werden.

Der nächste Bohrabschnitt durchteuft die wenig standfesten Formationen des Opalinuston und Gipskeupers. Diese Abschnitte wurden mit einer 9 5/8“ Verrohrung bis direkt über das Salzlager im mittleren Muschelkalk gesichert. Bis auf diese Tiefe konnte mit einer Süsswasserspülung gebohrt werden. Auch dieser Abschnitt wurde entsprechend der Planung ausgeführt.

Im nächsten Abschnitt war geplant das Salzlager und die darunterliegenden Schichten bis zum Dach des Kristallin zu durchteufen. Gemäss Bohrprogramm sollte diese Strecke bis ins Kristallin hängend verrohrt werden. Mit der grösseren Mächtigkeit des Salzes wurde die offene Bohrlochstrecke jedoch länger als vorgesehen. Die Identifikation der Kristallinbrekzien-Serie als Top Kristallin gab den Ausschlag die 7 1/2“ Verrohrung in dieser Tiefe abzusetzen.

Die darunter folgende Rotliegend-Sequenz erwies sich als sehr standfest, wodurch vorerst auf eine zusätzliche Hilfsverrohrung verzichtet werden kann. Die Bohrlochvermessung zeigt aber an, dass durch die vorhandene Gebirgsspannungen Bohrlochausbrüche stattfinden und den Zugang zur Sohle zunehmend versperren.

2.3 Lage

Der Bohrlochverlauf zeigt im oberen Bereich bis ca. 1'300 m eine leichte Korkenzieherähnliche Drehung in Gegenuhrzeigerrichtung, gefolgt von einer gleichgerichteten Ablenkung nach NNE. Die maximale Ablenkung des Bohrloches aus der Vertikalen wurde mit 7.3° auf Sohle erreicht.

Die Abweichung auf Sohle beträgt 166 Meter in Richtung Azimut 21° Nord. In einem leicht einfallenden Schichtenpaket tendiert der Bohrmeissel sich senkrecht zu den Schichtflächen aufzustellen. Wenn dies auch hier der Fall sein sollte, könnte daraus ein generelles Einfallen der Schichten nach SSE abgeleitet werden. Dies deckt sich im untersten Bereich im Perm erstaunlich gut mit dem gemessenen Schichteinfallen (siehe 4.2. Strukturgeologie)

Die Daten mit den resultierenden Tiefenkorrekturen sind in Tabelle1 aufgelistet. Die Profil- und Planspur ist in Figur 4 dargestellt und auf Figur 5 in Beziehung zum Gelände in einer Planansicht dargestellt.

2.4 Verrohrung

Das Verrohrungsschema ist auf den Figuren 6 und 7 dargestellt.

Das 500 mm Standrohr bis auf eine Tiefe von 25 m wurde bereits im Januar eingebaut. Damit sind die grundwasserführenden Rheinschotter Unterkante: 18 m) von der Bohrung abgeschottet.

Die 13 3/8“ Verrohrung (Wanddicke 9.65 mm; Gütegrad K55) ist auf einer Tiefe von 841.5 m in Kalken des Oberen Hauptrogenstein abgestellt und bis zur Oberfläche einzementiert.

Die 9 5/8“ Verrohrung (Wanddicke 9.9 mm; Gütegrad K55) ist auf einer Tiefe von 1'541,0 m im Anhydrit der Oberen Sulfatzone des mittleren Muschelkalkes abgestellt und bis zur Oberfläche einzementiert.

Der 7“ Liner ist auf einer Tiefe von 2031.0 m in der Kristallinbrekzien-Serie des Ober-Rotliegenden abgestellt und bis auf 1454 m, also 87 m in die 9 5/8“ Verrohrung hinein eingebaut. Die Zementation reicht bis zum Rohrschuh der 9 5/8“ Verrohrung. Wegen des erhöhten Gebirgsdrucks im Bereich des Salzlagers (1551 – 1727 m) wurden von 1514 – 1818 m Tiefe Rohre mit einer Wanddicke von 10.36 , Gütegrad N80 eingebaut, über die restliche Strecke Rohre mit der Wanddicke 8.05 mm und dem Gütegrad K55.

Von 2031 bis 2755 m (Endtiefe) ist das Bohrloch zur Zeit unverbohrt. Der Einbau einer Hilfsverrohrung zu einem späteren Zeitpunkt wird erwogen (siehe Kap. 5.2).

3 Datenerfassung / Vermessung

3.1 Sampling (Beilage 1)

Über die gesamte Bohrstrecke wurde alle 5 Bohrmeter beim Schüttelsieb eine Probe des Bohrgutes genommen. Eine Fraktion der Proben wurde vor Ort gewaschen, untersucht und beschrieben. Von jeder Probe wird ein gewaschenes sample in den Fraktionen 0.063 mm – 0.25 mm, und <0.25 mm archiviert. Das Resultat dieser Untersuchung ist im Schichtenverzeichnis (Kapitel 4.1) wiedergegeben.

Die ungewaschene Fraktion der Proben wurden den wissenschaftlichen Institutionen per Publikation im Internet für weitere Studien angeboten.

Eine unabhängige lithologische und zum Teil mikropaläontologische Untersuchung der Rückstellproben wird vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) durchgeführt.

3.2 Gasmessungen (Beilage 1)

Während der gesamten Bohrzeit wurde der Gasgehalt der Spülung kontinuierlich mit einem Gaschromatographen geprüft und aufgezeichnet. Gemessen wurde die Konzentration von Schwefelwasserstoff (H_2S) im ppm Bereich, sowie der Methan-Gehalt (CH_4) auf dem Drillers Log als C1 gekennzeichnet, und höhere Kohlenwasserstoffe (C2, C3).

Vor allem im Keuper und im Muschelkalk wurde das Auftreten von H_2S erwartet. Tatsächlich traten erste Anzeichen von H_2S mit einem peak von 17 ppm im Bereich von 1254 – 1274 m in den Bunten Mergeln des Keupers auf.

Hohe Werte bis 100 ppm H_2S traten von 1320 – 1365 m im Gipskeuper auf mit Spitzenwerten über 100 ppm im Bereich 1356 – 1358 m auf. Das Gas wurde in der Spülung mit Ätznatron neutralisiert.

Im weiteren Verlauf wurde kein H_2S mehr registriert. Anzeichen von Kohlenwasserstoffen gab es keine.

3.3 Bohrfortschritt (Beilage 1)

Als einziger bohrtechnischer Parameter wurde der Bohrfortschritt unabhängig vom Bohrunternehmer erfasst. Drehzahl, Hakenlast, Stranggewicht, Drehmoment, Pumpendruck und Spülmenge in/out wurden vom Bohrunternehmer aufgezeichnet.

Der Bohrfortschritt ist von all den obengenannten Parametern, zudem von der Qualität des Meissels und schliesslich vom Gestein abhängig. Die Beobachtung des Bohrfortschritts erlaubt deshalb keine direkte Aussage über die durchbohrte Lithologie, sondern eignet sich bloss als qualitativer Indikator zum Erkennen von Schichtgrenzen, vorausgesetzt alle andern Parameter bleiben gleich.

Ausgeprägt zeigt sich dieses Verhalten im Salzlager, wo der Bohrfortschritt im Salz gegenüber den Anhydritlagen sprunghaft zunimmt.

Leider konnte die Schichtgrenze vom Rotliegend zum Kristallin auf diese Weise nicht erkannt werden. Die Festigkeit des Rotliegenden und des (verwitterten) Kristallins scheint ähnlich zu sein und äusserte sich nicht in einer Abnahme des Bohrfortschrittes.

3.4 Ablenkungsmessungen

Der räumliche Verlauf der Bohrstrecke wurde während der Bohrphase im Abstand von rund 100 Metern vermessen. Dies geschah mit einer optischen Sperry-Sun single shot Sonde, die meist vor einem Gestängewechsel durch das Bohrgestänge auf Sohle gefahren wurde. Am Ende der Gestängegarnitur befand sich eine antimagnetische Stange um auf Sohle das Azimut der Abweichung messen zu können. Die Daten sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Profil- und Planspur ist in Figur 4 dargestellt und auf Figur 5 in Beziehung zum Gelände in einer Planansicht dargestellt.

3.5 Weitere Datenaufzeichnungen

Die Überwachung der Spülungsparameter erfolgte durch die Spülungstechniker von MI Drilling. In regelmässigen Abständen analysiert wurden die Dichte, Temperatur, Viskosität, pH, Salzkonzentration und Sandgehalt der Spülung.

3.6 Bohrkerne

Die Bohrkerne sind auf den Figuren 15 bis 25 abgebildet.

Kernmarsch	von	bis	Gewinn von	bis	Gewinn	Formation
1	2083.00 m –	2092.13 m	2038.00 m –	2092.13 m	100%	Rotliegend
2	2706.00 m –	2707.20 m	2706.00 m –	2707.02 m	85%	Kristallin
3	2707.02 m –	2713.30 m	2707.02 m –	2707.49 m	7%	Kristallin
4	2723.50 m –	2725.60 m	2723.50 m –	2725.32 m	87%	Kristallin
5	2725.60 m –	2729.44 m	2725.60 m –	2729.44 m	100%	Kristallin

Insgesamt liegen damit Kerne von 9.23 m im Rotliegenden und von total 7.15 m im Kristallin vor. Der erste Kern wurde nach Absetzen des 7“ Liners genommen, als beim Bohren mit 6 1/4“ keine identifizierbaren Spülproben mehr gewonnen wurden.

Auch der zweite Kern wurde erst genommen, als eine Identifikation der Formation aus den Spülproben nicht mehr möglich war. Aufgrund des langsamen Bohrfortschritts und der mahlenden Wirkung des Warzenmeissels und des Bohrgestänges fielen nur noch feinste Spülproben an. Es war nicht mehr erkenntlich ob unreife Sandsteine, verwittertes oder unverwittertes Kristallin gebohrt wurde. Die Identifikation der Kristallinoberfläche war erst später mit den geophysikalischen Logs möglich.

Beim dritten Kernmarsch blieb ein Grossteil der Kernstrecke zurück. Aufgrund der glatten Oberfläche des Kristallins griff der core catcher ungenügend und verlor den grössten Teil.

Es kam jeweils nur ein einfaches Kernrohr von 9 Meter Länge gekoppelt mit einem Bohrmotor zum Einsatz. Wie die wesentlich kürzeren Kernstrecken im Kristallin anzeigen, verklemmte sich das Kernrohr leicht und musste vorzeitig wieder gezogen werden.

3.7 Wireline logging (Figur 7)

3.7.1 Logging für Dritte

Ausserhalb des ursprünglichen Logging-Programms wurde im Rahmen der Erdbebenrisiko-Studien des Kanton Basel-Stadt eine zusätzliche Vermessung im unverrohrten 17 1/2“ Bohrloch von der Oberfläche bis 730 m durchgeführt.

Ziel dieser Messkampagne war die Erfassung gesteinsmechanischer Parameter als Grundlagen für die Erdbebenforschung. Gemessen wurde in drei Messtouren:

Run 1 4-arm Kaliber

Run 2 Density

Run 3 Gamma Ray, Sonic: Kompressionswellen-Geschwindigkeit und Scherwellen-Geschwindigkeit.

Es gelang nicht mit den Sonden bis zur Absetzteufe von 841 m vorzudringen, sie standen bei 733 m auf. Die Density-Sonde stand selbst schon bei 499 m auf.

3.7.2 Kaliberlog im Salz

Trotz Aufsatzung der Spülung bis zur Löslichkeitsgrenze während des Bohrens im Bereich des Salzlagers konnte nicht davon ausgegangen werden, dass keine grössere Auskesselungen stattgefunden haben. Zur Berechnung der Zementationsmenge für den 7“ Liner wurde vorgängig zur Verrohrung vorsichtshalber ein Kaliberlog von 1'800 – 1540 m gefahren. Die Salzschieben heben sich darin deutlich von den Anhydrit- und Anhydrit/Gips- und Tonlagen ab (Fig. 8).

3.7.3 DHM Logging Programm

Das Schwergewicht des Interesses liegt im kristallinen Bereich. Wichtigstes Kriterium ist die Erkennung von Klüften und ein detailliertes Bild der Bohrlochgeometrie als Grundlage zur Abschätzung der Spannungsverhältnisse. Das STAR/CBIL- Logging Tool von Baker Atlas (STAR: Simultaneous Acoustic and Resistivity Imager; CBIL: Circumferential Borehole Imaging Log) bot sich für diese Aufgabe an (Fig. 8).

Zur Feststellung akustischer Anisotropie, ebenfalls ein Indiz der Spannungsverhältnisse kam versuchsweise auch ein Full wave Sonic Tool zum Einsatz. Die Sonde mit einer Länge von annähernd 40 m Länge und einem Durchmesser von 5 1/2“ stand im 6 1/4“ Loch wiederholt im Bereich von 2570 m, also noch im Rotliegenden, auf, sodass keine Geschwindigkeitsmessung im Kristallinbereich zustande kam.

Die Sonicmessung lieferte allerdings verwertbare Geschwindigkeitsinformation (DT compressional wave) sowie Gamma Ray Daten über den open hole und den verrohrten Bereich bis 800 m hinauf.

Als willkommenes Nebenprodukt des STAR/CBIL Tools konnte ein erster Temperaturlog über die offene Bohrlochstrecke aufgenommen werden.

3.8 Temperaturlogs

Der erste Temperaturlog nur ein Tag nach Erreichen der Endtiefe wurde mit dem STAR/CBIL Tool über den Bereich 2'000 – 2'555 m aufgenommen werden (Fig. 9).

Ein reiner Temperaturlog wurde 15 Tage später am 27.6. 01 von der GGA (Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover) gefahren. Die Sonde erreichte ebenfalls nur eine Tiefe von 2'588 m und stand dort auf. Eine dritte Messung erfolgte durch GGA weitere 13 Tage später. Die Sonde stand diesmal bei 2401 m auf. Die drei Messprofile ermöglichen trotz der beschränkten Tiefe eine sinnvolle Auswertung der Temperaturgradienten und erlaubt auch eine Extrapolation des Gradienten bis auf Endtiefe. Auf eine weitere Temperaturmessung kann vorerst verzichtet werden. Eine solche ist erst bei einer erneuten Befahrung des Bohrloches für weitere Tests vorgesehen.

4 Auswertung / Resultate

4.1 Schichtenverzeichnis (Tabelle 2, Figur 6)

Die Formationsgrenzen und die Formationsmächtigkeiten sind auf Tabelle 1 aufgeführt. Die im folgenden genannten Schichtgrenzen beziehen sich auf die „along hole“ Teufen. Die Beschreibungen beziehen sich auf das Bohrgut, das aufgrund des Rotary Bohrverfahrens nie grössere zusammenhängende Probenstücke als 5 mm, in der Regel jedoch Partikel kleiner als 2 mm lieferte. Dementsprechend ist eine Beschreibung makroskopischer sedimentärer Strukturen schlecht möglich.

Die Schichtgrenzen wurden mit Hilfe des GR- , Sonic- und Kaliberlogs definiert.

QUARTÄR 0 – 18 m

Rheinschotter 0 – 18 m

Alluvialer Kies, Sand und Ton.

TERTIÄR 18 – 499.3 m

Septarienton (Blauer Letten) 18 – 273.6 m

Mergel (Tonmergel?), z.T. feinsandig, siltig, grau-dunkelgrau, fein gebändert, mit kleinen Schuppen (klar, braun) oder hellen Muskoviten. Eingeschaltet: dünne Lagen von feinem bis sehr feinem Sandstein, quarzitisches, mit Hellglimmer, grau-hellgrau, karbonatisch gebunden. Schalenreste von Muscheln, Pflanzenreste, vermutlich Blätter, schwarz, braunrot, bestehend aus sehr feinen Lagen. Oberfläche ist kariert und laminiert, kommt zusammen mit Sandsteinen vor, vereinzelt pyritisiert. Pyritknollen ab 40 m, treten auffällig in Verbindung mit Sandstein auf, Abnahme Pyritanteil unterhalb von 100 m. Wahrscheinlich aus Pflanzen im Sandstein entstanden. Schalenreste in fast allen gesiebten Proben, Abnahme nach unten.. Pflanzen kommen vor allem im oberen Bereich zusammen mit Pyrit vor. Dolomitisierte graue Kalke unterhalb ungefähr 150 m vorkommend, z.T. mit Fischschuppen; kalkhaltige Knauern. Feinsandsteine führen hauptsächlich Hellglimmer, aber auch Biotit.

Allgemein: Abnahme von Pflanzenresten und Pyrit nach unten, sowie wenige Schalenreste; zugleich Zunahme an dolomitisierten (?) Kalkknauern. Zwischen 100 – 150 m fast ausschliesslich Mergel, in diesem Bereich jedoch nur wenige Proben untersucht.

60 – 65 m Pflanzenreste z.T. pyritisiert.

60 – 70 m: Pyrit führend

70 – 80 m Sandstein Pyrit führend

85 – 90 m: hellgrauer Mergel mit blaugrauen feinen Bändern/Lagen.

Ab 155 m: Zunahme des Feinstanteil (0.63 – 0.063 mm) in den gewaschenen Proben. Erstes Auftreten von Kalk zusammen mit Feinsandstein, Pyrit, Pflanzenresten, Muschelschalen.

Ab 215 m: Zunahme des Gesteinsanteils grösser 0.63 mm. Insgesamt geringer Pyritanteil. Dolomitische Kalksteine (Wackestone), dunkelgrau, plattig, z.T. in Verbindung mit Feinsandstein.

265 – 270 m: Fischeschuppen, bräunlich laminiert, „Fischeschieferfacies“, kalkhaltige Knauern, dunkelgrau. Feinsandstein, quarzitisch, mergelig-glimmerig, grau-hellgrau, plattig, kalzitisch gebunden.

Fischeschiefer 273.6 – 281.0 m

Mergel (Mergelton) feinschichtig, schiefrig, dunkelgrau, braun – braungrau, z.T. Foraminiferen und Glimmer; mit feinen weissen Kalklagen wechsellagernd (papierdünne Kalklagen: „Papierschiefer“).

Foraminiferenmergel 281.0 – 290.5 m

Mergel (Tonmergel), hellgrau, siltig, sandig, mit reicher Foraminiferenfauna, Grösse und Anzahl von Top zu Basis (grosswüchsig) zunehmend. Pyrit führend, stengelig, knollig, feine Schichtung.

„Meeressand“ 290.5 – 311.0 m

Kalksandstein, fein – grobkörnig (Kalkarenit), weiss, beige, gelb-braun – rötlich. Algenkalk, oolithisch hell weiss – beige. Mergel, siltig-sandig, gelb-bräunlich, unterhalb 305 m rötlicher. Kalkstein und Mergel verzahnen sich, Foraminiferen führend. Unterhalb 300 m Mergelkalk, gelblich-bräunlich. Basal oolithischer bzw. konglomeratischer Kalkstein, gelblich-bräunlich, z.T. pyritisiert.

Bunte Mergel (Sannoisien) 311.0 – 465.0 m

Kalkmergel, sandig-siltig, gelb, bräunlich, weiss-rötlich; rötlicher im unteren Bereich. Kalksandstein, mergelig, hellbeige bis rötlich, fein bis grobkörnig, z.T. grüne Anteile, z.T. pyritisiert. Foraminiferen führend im oberen Bereich. Muschelschalenreste führend im unteren Bereich; Quarzkörner führend. Kalkkonglomerat aus z.T. abgerundeten, weiss-gelblichen Malmkalken bestehend, selten pyritisiert.

340 – 354 m: Kalkkonglomerat.

415 – 465 m: Süsswasserkalk, bunt, grau-rot, gefleckt, hellgrün, weiss – beige, rötlich, gelblich-bräunlich. Gegen Basis zu bräunlicher, rötlicher, mit z.T. glatter Oberfläche. Bunte Mergel, Schalenreste führend (Planorbis?). Gips, knollig und faserig, z.T. im Verband mit roten Mergeln.

Siderolithikum (Eozän) 4650.0 – 499.3 m

Kalkmergel, rotbraun bis rostrot, sandig. Basis: Mergel mit Bohnerz, mittel- bis grobkörnig, rotbraun bis dunkelbraun. Gips, weiss, z.T. faserig. Im unteren Bereich Schalenreste (Planorbis?).

MALM 499.3 – 819.5 m

Verena-Schichten („Séquanien“) 499.3 – 523.7 m

Kalkstein (Mudstone, teilweise Wackestone), weisslich bis blassbeige, gräulich, sehr hell. Mit Kalzitkristallen in Hohlräumen und Klüften oder in Fossil-Hohlräumen. Sehr hart mit muscheligen Bruch und wenig Quarzdetritus.

Humeralis- und Natica-Schichten 523.7 – 551.2 m

Wechselagerung: Kalkstein (Lime-wackestone), hellgrau, grau, braun, hellbraun, bioklastisch (fossilreich), mit Quarzdetritus, mergelig, oolithisch. Mergelkalk, gelblich, grau. Pyrit. Tonstein, dunkelgrau, plattig. Quarzdetritus unterhalb 530 m abnehmend, Quarzkörner, klar, gerundet. Kalkarenit, feinkörnig, hellgrau. Algenknollen, dunkelgrau.

Vorbourg-Kalke / Rauracien Korallenkalke 551.2 – 662.7 m

Korallenkalk, weissliche Oolithe, kreidige Kalke und Kalkarenit. Überwiegend Wackestone. z.T. Mudstone, hell – weiss, kreidig, z.T. Oolith, z.T. mit Kalzitkristallen und kristallisierten Fossilhohlräumen, spätig, zur Basis zunehmend. Stylolithen, braune Kruste. Vereinzelt Korallenbruchstücke. An der Basis: Kalkstein, grau, mergelig, z.T. mit Pyrit. Grainstone, gelb-braun.

Liesberg-Schichten 662.7 – 699.3 m

Kalk, bioklastisch, dunkel- bis hellgrau. Mergel, sandig. Kalkarenit. Grainstone mit Pyrit, Kieselknollen, hell klar bis milchigtrüb; Crinoiden.

Oxford-Mergel 699.3 – 742.0 m

„Terrain à chailles“: Mergel, dunkelgrau, mit Fossilresten (schwarz), Pyrit. Kalkknauern. Crinoiden, Schalenresten.

Renggeri-Ton 742.0 – 819.5 m

Tonmergel, dunkelgrau, pyritisierte Ammoniten, z.T. glimmerhaltig, reiche Mikrofauna: Schalenreste, Crinoiden.

DOGGER 819.5 – 1179.4 mDalle nacrée 819.5 – 825.6 m

Echinodermenbrekzie, hellgrau, mergelig, z.T. pyritisiert.

Callovien-Ton 825.6 – 831.7 m

Mergel, grau, mit Knauern, Foraminiferen.

Macrocephalus- /Varians-Schichten 831.7 – 837.5 m

Mergelkalk, grau, hellgrau-gelblich, knollig. Kalkknollen, hell-gelblich, mit Austernschalenbruchstücken und Crinoiden.

Mergelkalk, gelblich – bräunlich. Kalk, weiss-gelblich, fossilführend.

Ferrugineus-Oolith 837.5 – 841.4 m

Oolith, grau-bräunlich, grob, z.T. limonitisch.

Oberer Hauptrogenstein 841.4 – 869.3 m

Kalkoolith, hellbeige – grau, z.T. spätig, hellbraun – beige, fossilführend.

Homomyen-Mergel 869.3 – 875.7 mUnterer Hauptrogenstein 875.7 – 944.1 m

Oolith, hell gräulich, grau-blau, fein bis grob oolithisch, z.T. spätig, z.T. mit Kieselknollen.

„Unterer Dogger“ 944.1 – 1025.9 m

Blagdeni-Schichten 944.1 – 966.4 m: Mergel und Kalk, sandig, z.T. glimmerführend, grau, z.T. mit Knauern.

Humphriesi-Schichten 966.4 – 999.5 m: Kalk, spätig, eisenoolithisch, grau bis rostbraun. Mergel, fossilführend (Crinoiden)

Sowerbyi – und Sauzei-Schichten 999.5 – 1019.0 m: Mergel und Tone, dunkel-grau, glimmerreich, z.T. sehr sandig, unterer Bereich toniger.

Murchisonae-Schichten 1019.0 – 1025.9 m: Kalk (Grainstone), gelbbraun bis grau, spätig, fossilreich

Opalinuston 1025.9 – 1179.4 m

Tonmergel, dunkel, blaugrau, hellglimmer führend, z.T. geschichtet und sandig mit Sandstein, hellgrau, kalzitisch, glimmerhaltig. Kalkgehalt nimmt zu Basis hin ab. Mergelton, dunkel, blaugrau, geschichtet, glimmerführend, mit Pyrit. Pyritisierte Ammoniten und Brachiopoden im unteren Bereich.

LIAS 1179.4 – 1208.4 m

Jurensis-Mergel / Obtususton 1179.4 – 1194.1 m

Graue Mergel.

Arietenkalk 1194.1 – 1200.0 m

Kalk, weiss-grau, zu Basis hin ockerfarben (eisenhaltig), bioklastisch und spätig, fossilführend, pyrithaltig.

Héttangien 1200.0 – 1208.4 m

Tonstein, braun-rötlich, im unteren Bereich zusätzlich Tonstein, grün.

KEUPER 1208.4 – 1427.4 m

Rhät 1208.4 – 1211.8 m

Quarzsandstein, weisslich, feinkörnig, glimmerführend (Muscovit).

Obere Bunte Mergel 1211.8 – 1240.0 m

Mergel, rotbraun, (bunt), z.T. sandig. Ton, Dolomit.

Gansinger-Dolomit 1240.0 – 1252.1 m

Dolomit, hell, beige bis rötlich, grünlich, dicht, z.T. körnig, porös, z.T. mergelig.

Untere Bunte Mergel 1252.1 – 1264.1 m

Mergel, bunt, dunkel, gipsführend.

Schilfsandstein-Gruppe 1264.1 – 1297.3 m

Sandstein, feinkörnig, hellgrau, mit grünen, braunen und schwarzen Komponenten. Komponenten sind kantig, glimmerführend, z.T. mit dunklen Pflanzenresten.

Gipskeuper 1297.3 – 1417.3 m

Mergel, bunt (rötlich, grau), mit Lagen/Linsen von: Gips, grau und weiss, Knollen. Anhydrit, weiss bis gräulich-braun, körnig, Knollen. Dolomit, hell beige-bräunlich, z.T. körnig. Tonstein, bunt, dunkel (schwarz, grün), z.T. mergelig.

Lettenkohle 1417.3 – 1422.1 m

Dolomit, hellbeige-grau, bräunlich, dunkelbraun gefleckt.

Estherienschiefer 1422.1 – 1427.4 m

Ton, dunkel blaugrau, bituminös, geschiefert, z.T. siltig, sandig.

MUSCHELKALK 1427.4 – 1777.6 mTrigonodus- Dolomit 1427.4 – 1448.7 m

Dolomit, hellgrau-beige bis bräunlich, z.T. porös, fein bis mittelkörnig, im unteren Bereich spätig mit Lagen / Knollen von: Silex (Kiesel), klar milchig.

Am Top: feinkörnig, porös; in der Mitte: kompakt, feinkörnig mit Kieselknollen; an der Basis: grobkörnig, stark porös.

Nodosuskalk (Plattenkalk) 1448.7 – 14774.0 m

Kalk, feinkörnig, hellgrau-beige, plattig, Top dolomitisch.

Trochitenkalk 1474.0 – 1510.0 m

Sehr ähnlich Nodosuskalk: Kalk, hellbraun bis weiss, körnig, z.T. mit brauner Kruste, dolomitisch, mit Stylolithen, (keine Seelilienbruchstücke gefunden).

Dolomit der Anhydritgruppe 1510.0 – 1543.7 m

Dolomit, dunkel, beige-braun, grau, plattig, dünne Schichten mit Hornsteinlagen, dunkel, grau und weiss, mit Anhydrit, mit Gips.

Obere Sulfatzone 1543.7 – 1550.9 m

Mergel, grau bis grünlich, siltig. Mit Gips (weiss-grau). Im untern Bereich mit Karneolen (gelblich bis blutrot).

Salzlager 1550.9 – 1726. 9 m

Kristallines Steinsalz (NaCl); Bohrklein besteht aus Anhydrit 30 – 40%, Dolomit, Tonstein, Mergel 20 – 30%, Gips 10 – 20%. Steinsalz weitgehend gelöst. Anhydrit, körnig, grau-weiss, bräunlich, knotige Schnüre, Kristalldrüsen. Gips, weiss-grau. Steinsalz, farblos, durchsichtig z.T. rötlich. Tonstein, dunkelgrau, z.T. glimmerhaltig, z.T. pyritartig, mergelig. Dolomit, grau, mit Rissen, Abdrücken und kantigen Formen.

1586.8 – 1597.0 m: Gips und Anhydrit

1620.1 – 1649.6 m: Gips und Anhydrit

1652.2 – 1666.9: m: Gips und Anhydrit

Orbicularis Mergel 1726.9 – 1734.1 m

Mergel, graubraun bis Kalkmergel, z.T. feinsedimentäre Strukturen, mit Kalk.

Wellenmergel 1734.1 – 1767.3 m

Mergel und Mergelkalk, dunkelgrau, z.T. mit Pyrit, sandig-siltig, auch hellgrau, z.T. plattig, mit hellen Kalken, mit Schalenresten von Muscheln.

Wellendolomit 1767.3 – 1777.6 m

Im Top bleiglanzführende Dolomitbank, hell-weiss, grau, braun, spätig. Mergeliger Dolomit, dunkelgrau, grau, bräunlich, grobdetritisch, mit zwischengelagerten Dolomitbänken.

BUNTSANDSTEIN 1777.6 – 1939.8 mOberer Buntsandstein / Rötton 1777.6 – 1779.9 m

Ton, rot-violett, z.T. feinsandig-sandig, mit Gipslinsen, weiss.

Plattensandstein 1779.7 – 1795.9 m

Sandstein, rot-violett, feinkörnig, quarzitisch, glimmerhaltig, tonhaltig. Im oberen Abschnitt höherer Glimmer- und Tongehalt.

Karneolhorizont 1795.9 – 1799.0 m

Im oberen Bereich: Mergel, hell grün-weiss, sandig (gerundete Quarzkörner), mit Quarzsandstein, hell weiss-grünlich, fraglich Kaolinit.

Im unteren Bereich: Ton, ziegelrot, sandig mit Quarzkörnern und Gips Spuren.

Mittlerer / Unterer Buntsandstein 1799.0 – 1839.8 m

„Diagonalschichtiger Sandstein“: Sandstein, fein bis grobkörnig, quarzitisch, gerundet, von weiss-grau bis hellrot, karbonatisch gebunden. Wird von Top zu Basis grobkörniger und rötlicher. An der Basis: Dolomit, weiss, spätig, lagig, mit schwarzen Flecken.

„Unterer Buntsandstein“: Sandstein, überwiegend mittel bis grobkörnig, z.T. karbonatisch gebunden, mit Feldspat. Arkosesandstein, quarzitisch, am Top hell, zu Basis hin leicht rot (blassrot) mit Tönen und karbonatischen Einschaltungen.

Im Grenzbereich Buntsandstein – Rotliegendes: spätiger Dolomit, weiss-beige, feinkörnig, z.T. quarzitisch, mit Karneol, orange-rot.

ROTLIEGEND 1839.8 – 2648.5 mOberes Ober-Rotliegend 1839.8 – 2008.5 m

Arkosesandstein, fein - sehr fein, siltig, tonig, braun-rot.

Kristallinbrekzien-Serie 2008.5 – 2043.3 m

Granitbruchstücke, stark verwittert: Quarz, Feldspat, Glimmer teilweise im Kornverband, meist als Einzelaggregate. Arkosesandstein, grob bis fein, rötlich-braun.

Mittleres Ober-Rotliegend (Playa) 2043.3 – 2312.3 m

Tonstein, siltig, braun-rot mit Gipsknollen, –konkretionen und –schnüren, grau-dunkelgrüne Reduktionshöfe. Karbonatfrei.

Kern 1: 2083.0 – 2092.13 m: rotbrauner, sandiger Ton und Siltstein mit grünlichen Reduktionshöfen. Gipskonkretionen mm – dm gross, unregelmässige und wolkige

Formen, verbunden mit gipsgefüllten Klüften. Höfe mit Erzmineralen als feine Partikel im Zentrum.

Unteres Ober-Rotliegendes 2312.3 – 2648.5 m

Sandstein, fein – mittel, vorwiegend lose Quarzkörner, gerundet, Matrix rötlich-braun. Ton rot-braun. Sandsteinanteil zu Basis hin zunehmend. Sandstein nach unten hin gröber werdend („overall fining upward“) Quarzkörner zunehmend idiomorph.. Ab 2600 m bis Basis zunehmend verwitterte Feldspäte.

KRISTALLINES GRUNDGEBIRGE 2648.5 m -

Verwitterungszone Kristallin 2648.5 m – 2657.4 m

In den Spülproben nicht von Basis des unteren Ober-Rotliegenden zu unterscheiden. Ausschliesslich aufgrund von Logs und borehole image erkennbar: GR im Rotliegenden erratisch, im Kristallin rel. stabil. Kaliber in Verwitterungszone leicht ausgeweitet, im unverwitterten Kristallin kaliberhaltig.

Kristallines Grundgebirge 2657.4 – 2755.0 m (Endtiefe)

Granit, mittel- bis grobkörnig, massiv, rötlich, grau dunkel, zeigt vereinzelt verheilte, konjugierte Störungszonen. Teilweise leichte Anatexis, mit silbrigen Erzmineralien, horizontale Anordnung der Minerale erkennbar. Karbonatische Kluftfüllungen. Mit Aplit / Lamprophyrgängen. Feldspäte rötlich verwittert. In den unteren Kernen kaum rötlich verwitterte Feldspäte.

Klassifizierung der Kerne nach Streckeisen siehe Fig. 11.

4.2 Strukturgeologie

Die Bohrung liegt am südöstlichen Rand des südlichen Rheingrabens. Die örtlich an der Oberfläche verfolgbare Rheingrabenflexur verläuft 3.5 km östlich der Bohrstellen mit Streichrichtung NNE. Eine Grabenrandsynklinale ist in den Tertiären Ablagerungen bei Tüllingen zu erkennen (Mulde von St. Jakob Tüllingen). Gemäss der Strukturkarte auf Niveau Basis Meeressand (Gürler et al. 1987) befindet sich die Bohrstelle am Westrand dieser Synklinale.

Die Strukturkarte basiert auf Oberflächenbeobachtungen. Tiefbohrungen oder Seismik welche diese These untermauern gibt es keine. Figur 12 (oben) bezieht sich auf das entsprechende geologische Profil aus Gürler et al. Es wird in dieser Arbeit darauf hingewiesen, dass das Permokarbon im Grundgebirge eingeschlossen ist.

Die erbohrten Mächtigkeiten in der Mesozoischen Schichtenfolge sind durchwegs geringfügig grösser als prognostiziert. Dies kann mit einem durchschnittlichen Einfallen von 15 – 20° erklärt werden, das in einer 4% grösseren vermeintlichen Mächtigkeit resultieren würde.

Gemäss der Strukturkarte aus Gürler et al. ist von einem Einfallen in der Grössenordnung von 15% in Richtung 100° Ost auszugehen.

Die Dipmeter Messungen im Rotliegendes von 2550 bis 2647 m deuten tatsächlich ein mittleres Einfallen von 16.4° in Richtung 147° Ost an. Diese Beobachtung steht durchaus im Einklang mit den bekannten Strukturdaten, wobei einzig die Fallrichtung 147° Ost auf noch eine stärkere NE-SW Orientierung der St. Jakob- Tüllinger Mulde hinweisen.

Aufgrund der durchteuften stratigraphischen Abfolge wurde weder im Tertiär, dem Mesozoikum noch in der triadischen Sequenz eine Abschiebung durchfahren, die stratigraphische Abfolge ist

vollständig vorhanden. Es ist auch keine Verdoppelung einer Sequenz, also kein Anzeichen für eine Überschiebung respektive kompressive Strukturen vorhanden.

Einzig im unteren Ober-Rotliegenden wird bei 2593 m aufgrund der Dipmeter Interpretation ein Bruch postuliert. Da jedoch für diese Sequenz die ungestörte Gesamtmächtigkeit unbekannt ist, und sowohl darüber wie darunter keine lithologische Änderung festzustellen ist, kann die Existenz dieses Bruches nicht bestätigt werden, noch kann über den Bewegungssinn eine Aussage gemacht werden.

4.3 Temperaturen (Figur 13)

Die drei zeitlich gestaffelten Temperaturmessungen zeigen konsistente Messwerte. Wie erwartet lässt sich eine Angleichung der Temperaturen an ungestörte Verhältnisse vor der Bohrung erkennen. Gemessen wird die Temperatur der Spülung im Bohrloch, welche durch den Spülungsumlauf während der Bohrphase im unteren Bereich der Bohrung kühlend und im oberen Bereich der Bohrung erwärmend wirkte.

Im Bereich von 0 bis 1'400 m nehmen die Temperaturen nach Stillstand der Zirkulation deshalb tendenziell ab und im Bereich von 1'400 m bis Endtiefe tendenziell zu.

Zur Berechnung der Gradienten wurde die letzte Messung vom 10.7. durch GGA, also 28 Tage nach Einstellen der Zirkulation, genommen.

Der Verlauf der Temperaturzunahme kann grob in 5 Bereiche unterteilt werden:

Bereich 1: 0 – 170 m	Oberflächennaher Bereich. Beeinflusst durch aktuelles Klima und Pegelschwankungen, resp. Pegelabsenkung. Unzuverlässige Daten.
Bereich 2: 170 – 1'000 m	Mergel und Kalke des Tertiär, Malm und Hauptrogenstein. Gradient: 3.32°/100 m.
Bereich 3: 1'000 – 1'400 m	Tone und Mergel des Opalinuston und Keuper Gradient: 4.52°/100 m.
Bereich 4: 1'400 – 1'800 m	Evaporite (Salz, Anhydrit) und Karbonate (Kalk, Dolomit) des Muschelkalkes Gradient: 2.54°/100 m.
Bereich 5: 1'800 – 2'400 m	Klastika des Buntsandstein und Rotliegenden. Gradient: 4.50°/100 m.

Diese stark unterschiedlichen Temperaturgradienten widerspiegeln deutlich die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten bestimmter Lithologien: Eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit in Kalken, vermutlich noch begünstigt durch Wasserführung mit einer konvektiven Komponente. Eine geringe Wärmeleitfähigkeit in den Tonen und eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit in den Evaporiten.

Die geringe Leitfähigkeit im Rotliegenden unterstreicht den hohen Tonanteil der Formation und deutet auch eine geringe Wasserführung an.

Die stark variablen Gradienten machen deutlich, dass eine lineare Extrapolation der Temperaturzunahme in ein Reservoir auf 5'000 m unzulässig ist, insbesondere da aus dem Wirtgestein, dem kristallinen Grundgebirge keine direkten Messungen vorliegen.

Immerhin kann mit einer Temperatur von 107°C auf 2'400 m geschlossen werden, dass zur Erreichung einer Formationstemperatur von 200°C auf 5'000 m ab 2'400 m nur noch ein Gradient von 3.56°/100 m nötig ist.

Rybach (April 1999) hat mit einem Datensatz aller Temperaturen im Kristallin aus Nagra Bohrungen einen Gradienten für das Kristallin von $4.25^{\circ}/100$ m eruieren können. Allerdings beschränkt sich dieser Datensatz auf Messungen bis maximal 2'500 m Tiefe.

Angesichts dieser Vorgaben können die Resultate der Temperaturmessungen als positiv gewertet werden. Die Chancen in Reservoirtiefe von 5'000 Metern Formationstemperaturen von mindestens 200°C anzutreffen haben sich mit diesen Resultaten massiv erhöht.

4.4 Spannungsfeld (Figur 9)

Die wichtigsten Informationen zum Spannungsfeld im Grundgebirge stammen aus den STAR/CBIL Logs. Daraus sind vorerst keine quantitativen Aussagen, sondern ausschliesslich Aussagen über die Orientierung der horizontalen Hauptspannungsrichtung möglich. Diese äussert sich in der Bohrlochgeometrie, dokumentiert durch

- a) den Bohrlochquerschnitt, als Resultat von
- b) Bohrlochwand-Ausbrüchen (induced break-outs), und
- c) Bohrungs-induzierte Klüfte (induced fractures)

Diese Messungen sind in Figur 9 in Form von Querschnittgraphiken (hole shape) und Rosettendiagrammen (induced fracs-breakout) abgebildet.

Generell ist eine horizontale Hauptspannung ($Sh_{\max}$) in Richtung NW-SE erkennbar, wobei Unterschiede in der Rotliegend- und der Kristallin-Sequenz auffallen.

In der Rotliegend Sektion fällt eine grössere Störungszone um 2'592 m herum auf. Aufgrund der starken Abweichung von $Sh_{\max}$ in Richtung NE-SW in deren Nähe wird diese als aktiv interpretiert.

Von Interesse für das Projekt ist die Richtung von $Sh_{\max}$ im unverwitterten Teil des Kristallin ab 2'657 m: $Sh_{\max}$ rotiert von oben (2'657 m) nach unten (2'740 m) leicht von NNW-SSE nach NW-SE und wiederum zurück nach NNW-SSE. Diese Richtung stimmt sehr gut mit dem regionalen Spannungsfeld überein, das jedoch bisher nur auf oberflächennahen Daten beruhte. Weil hier weitgehend übereinstimmende Resultate vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass auch das Spannungsfeld in 5'000 m Tiefe nicht grundsätzlich anders gestaltet sein wird.

In einer ersten Annahme kann deshalb bei einer Kluftstimulation in 5'000 m Tiefe auch von einer Ausbreitungsrichtung der Klüfte in NW-SE Richtung ausgegangen werden.

Ausstehend ist noch eine Aussage über die Kräfte, resp. Drücke welche zur Erzeugung offener Klüfte aufgewendet werden muss. Dies soll mit weiteren Untersuchungen in Form von Drucktests mit einem Doppelpacker (siehe Kap. 5.1) erreicht werden.

4.5 Hydrogeologie

Hydrogeologische Tests wurden aufgrund fehlender Anzeichen von Spülungsverlusten resp. –gewinnen, dh. vermutlich geringen Durchlässigkeiten keine durchgeführt. Im weiteren will man vermeiden mit Veränderungen der Druckverhältnisse die Stabilität im offenen Bohrlochbereich, der immerhin 724 m lang ist, zu gefährden.

Seit Abschluss der Bohrarbeiten hat sich der Spiegel der Spülung im Bohrloch kontinuierlich gesenkt (Fig. 14). Die Messungen zeigen nach 140 Tagen eine asymptotisch abnehmende Absenkung, welche ein Gleichgewicht der Spülungssäule bei einem Spiegel von – 125 m abschätzen lässt.

Solange die Dichte der Formationswässer auf Niveau der offenen Bohrlochstrecke nicht bekannt ist, lassen sich aus diesem Druckspiegel die natürlichen Druckverhältnisse nur abschätzen. Unter der Annahme, dass die mittlere Dichte der Formationswässer 1.17 g/cm^3 ist, lägen mit dem gegenwärtigen Spiegel ausgeglichene hydrostatische Verhältnisse vor, d.h. der Ruhewasserspiegel unveränderter Formationswässer läge bei OKT.

5 Geplante Arbeiten an der Bohrung

5.1 Messungen

Zur Zeit liegen noch keine quantifizierbaren Daten zur Berechnung der Druckverhältnisse im Kristallinbereich vor. Dazu braucht es Doppelpackertests in diskreten Bereichen der Kristallinstrecke. In abgeschlossenen Bereichen wird der Druck bis zum Bruch einer Kluft erhöht. Dieser Grenzdruck liefert den Wert der Minimalspannung, sagt aber noch nichts über die Richtung aus. Idealerweise muss über den beprobten Bereich vorgängig zum Test und nachträglich eine Aufnahme der Bohrlochwand gemacht werden um die Veränderungen festzuhalten. Zur Zeit werden verschiedene Methoden evaluiert, welche von diversen Forschungsinstituten für solche Messungen angeboten werden.

5.2 Ausbau

Die Vermessung mit den Sonden hat gezeigt, dass der unterste Bohrlochbereich nicht mehr befahrbar ist. Für eine langfristige Zugänglichkeit braucht es deshalb noch eine Hilfsverrohrung von 2031 m bis auf ca. 2660 m in den Kristallinbereich. Der Durchmesser der Hilfsverrohrung wäre maximal 5“, was für die Einfahrt eines Doppelpackers zu eng ist. Ein Doppelpackertest muss deshalb unmittelbar nach einer Räumungsfahrt ausgeführt werden.

Es ist deshalb geplant die Befahrung des Bohrloches, den Doppelpackertest und den Einbau einer Hilfsverrohrung in einer konzertierten Aktion durchzuführen. Zur Zeit wird abgeklärt, ob diese Arbeiten im coiled tubing Verfahren oder mit einer work-over Anlage bewerkstelligt werden soll.

5.3 Instrumentierung

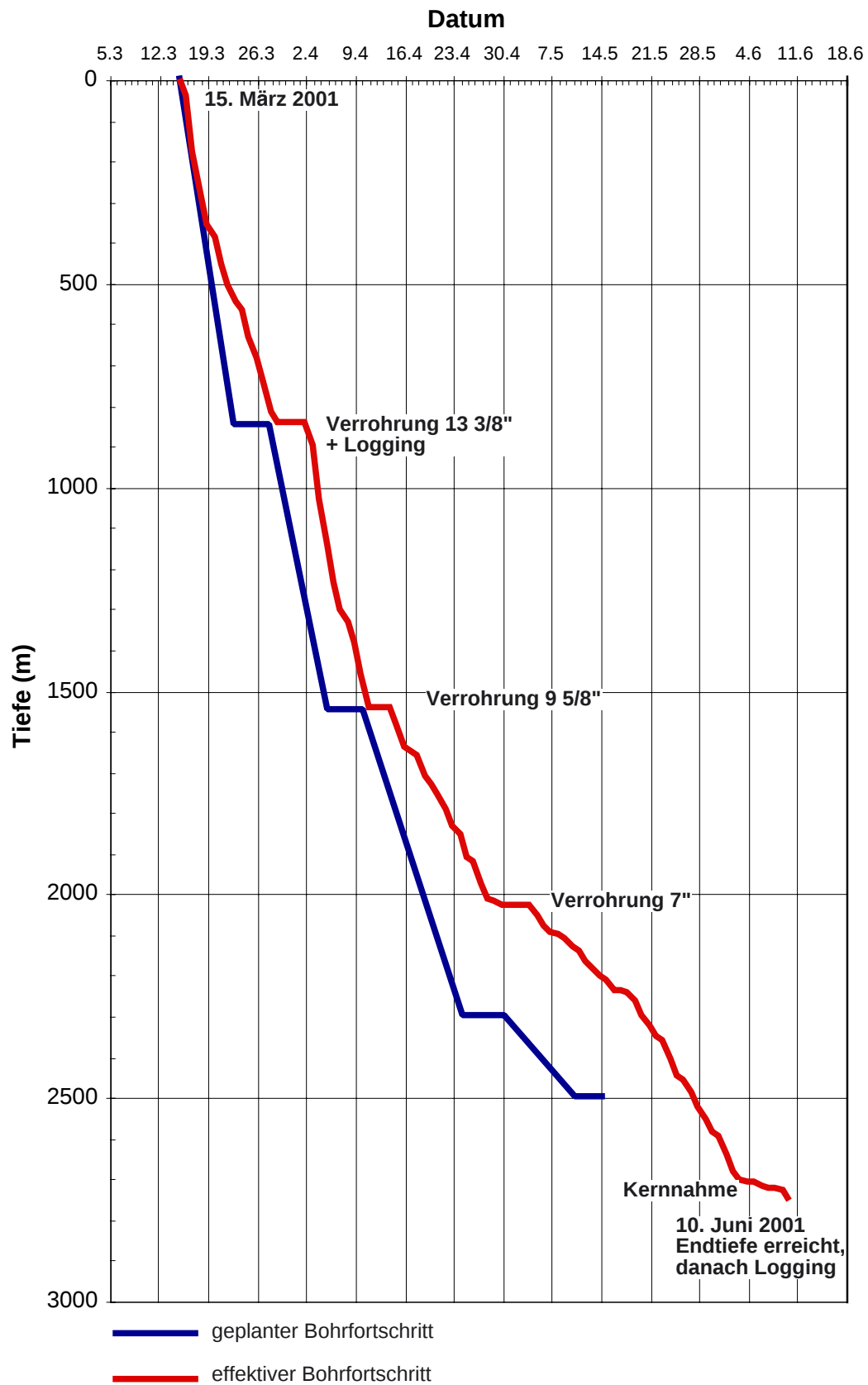
Für die Reservoiridentifikation ist die Instrumentierung der Bohrung erst mit dem Bau der anderen Horchbohrungen notwendig. Allerdings sollte zur Dokumentation der natürlichen seismischen Aktivität vor Ausführung der Tiefbohrungen und Injektionstests eine Untertage-Seismikstation schon operativ sein. Zur Zeit wird in Zusammenarbeit mit dem schweizerischen Erdbebendienst abgeklärt, welche Instrumentierung sich für diese Aufzeichnungen am besten eignet. Die Instrumentierung muss allerdings für dieses Vorhaben schon so gewählt sein, dass sie mit der Instrumentierung der weiteren Horchbohrungen kompatibel ist und auch zur Lokalisierung mikroseismischer Herdlösungen geeignet ist.

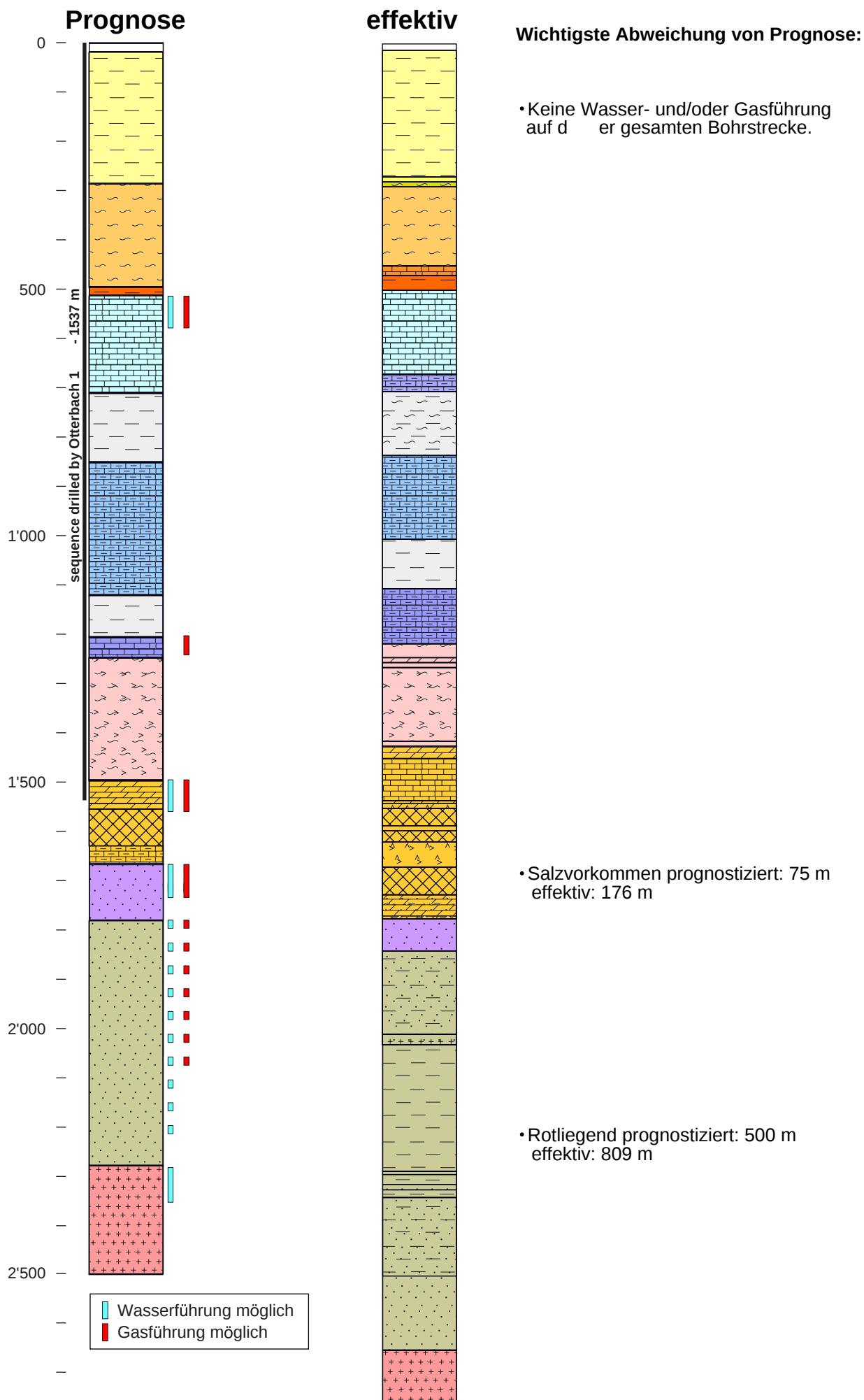
6 Weitere Berichte / Dokumentationen zur Bohrung Otterbach 2

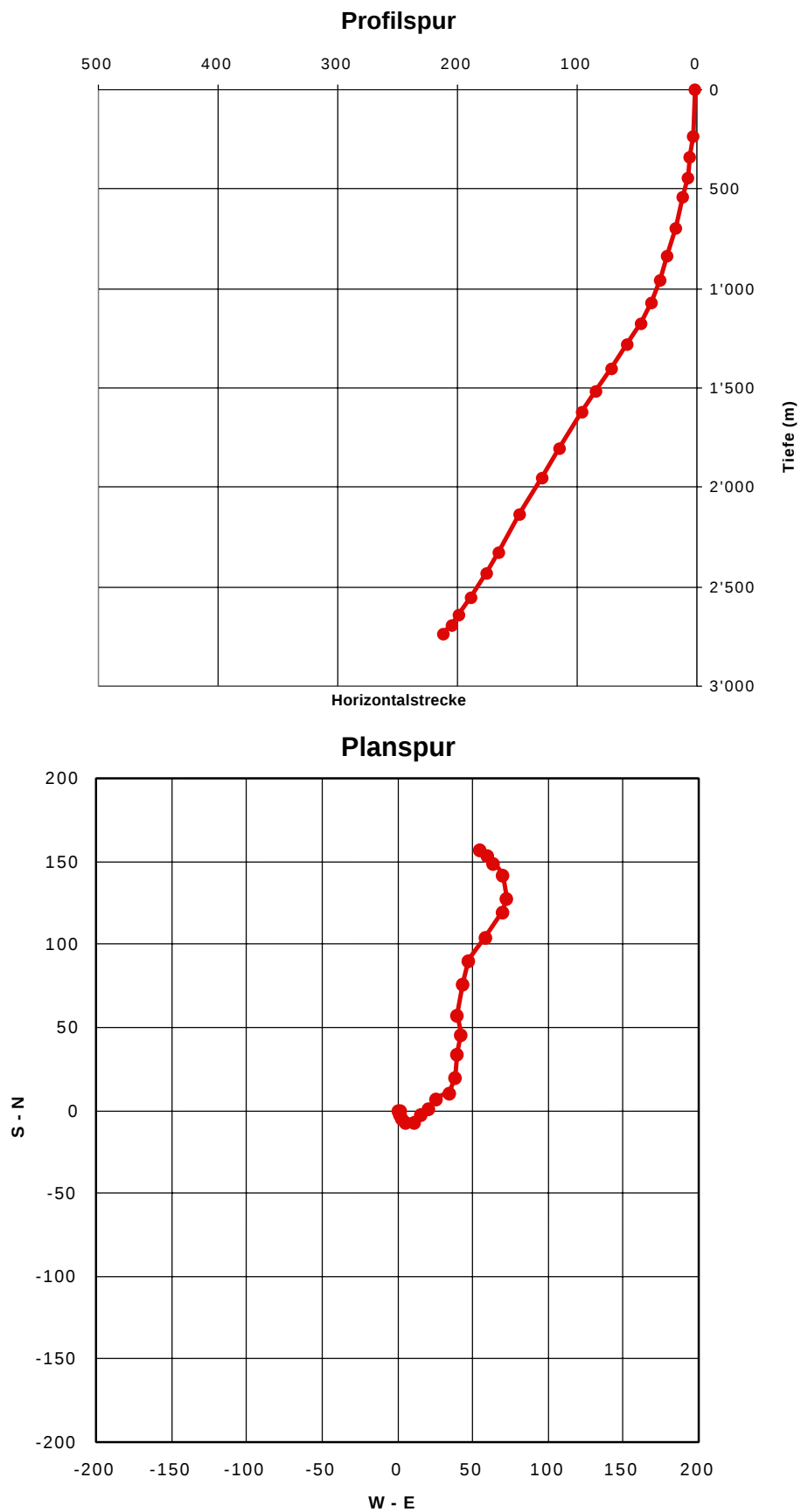
- Bohrlochdokumentation des Bohrunternehmers UGS enthaltend
 - Orientierungsmessungen
 - Rohreinbauprotokolle
 - Zementlabortests
 - Zementationsverlauf
 - Rohratteste
 - Meisselberichte
 - Ausrüstung Bohrlochabschluss
 - Tagesberichte
- Spülungsbericht der Firma MI Drilling Fluids.
- Bericht zu den Bohrlochmessungen vom 29.3.01 0 – 845 m der Firma BLM.
- Geological Analysis of STAR-CBIL Borehole Image Logs der Firma Geoscience, Baker Atlas.
- Acoustic XMAC Processing Report der Firma Baker Atlas.

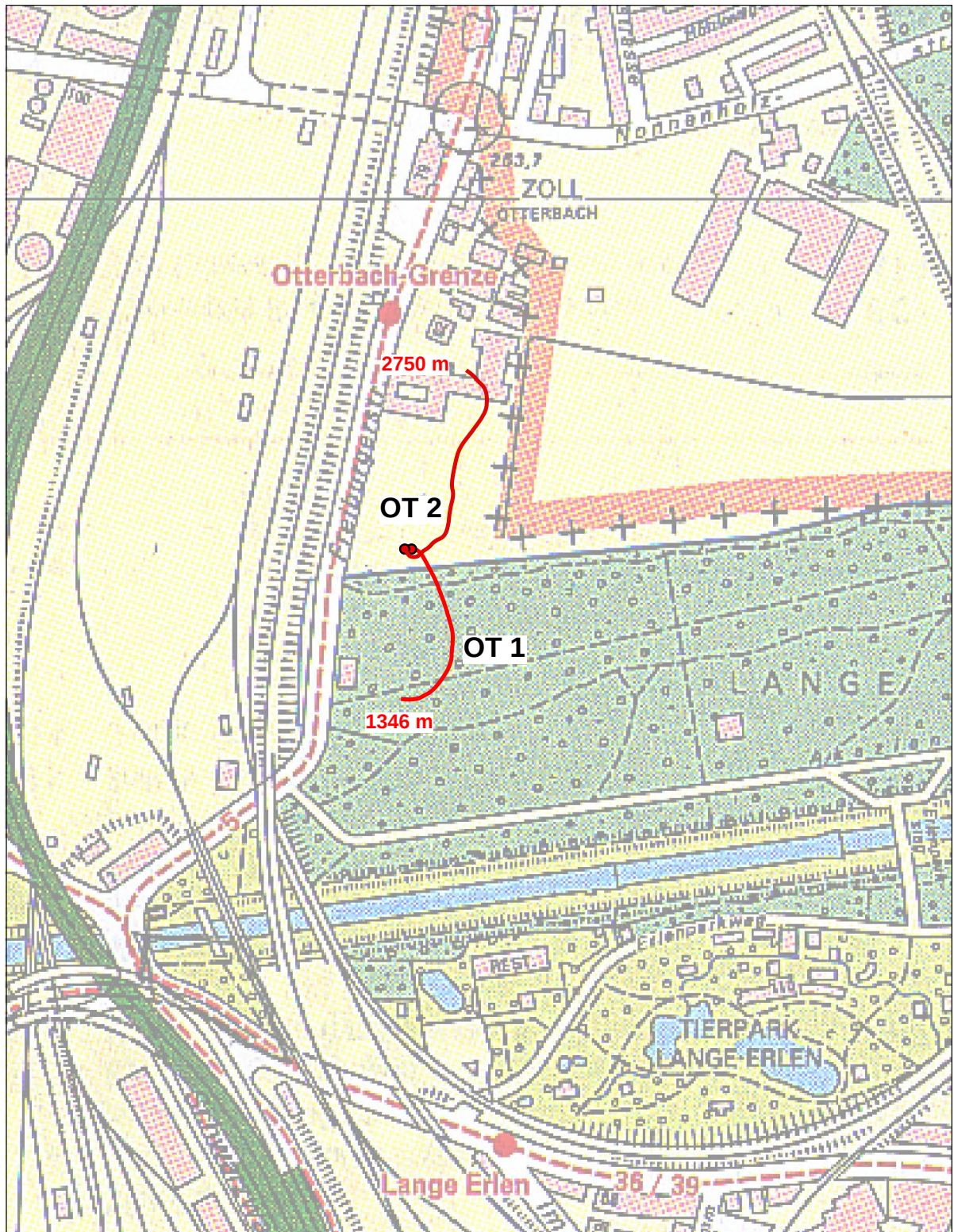
In Bearbeitung:

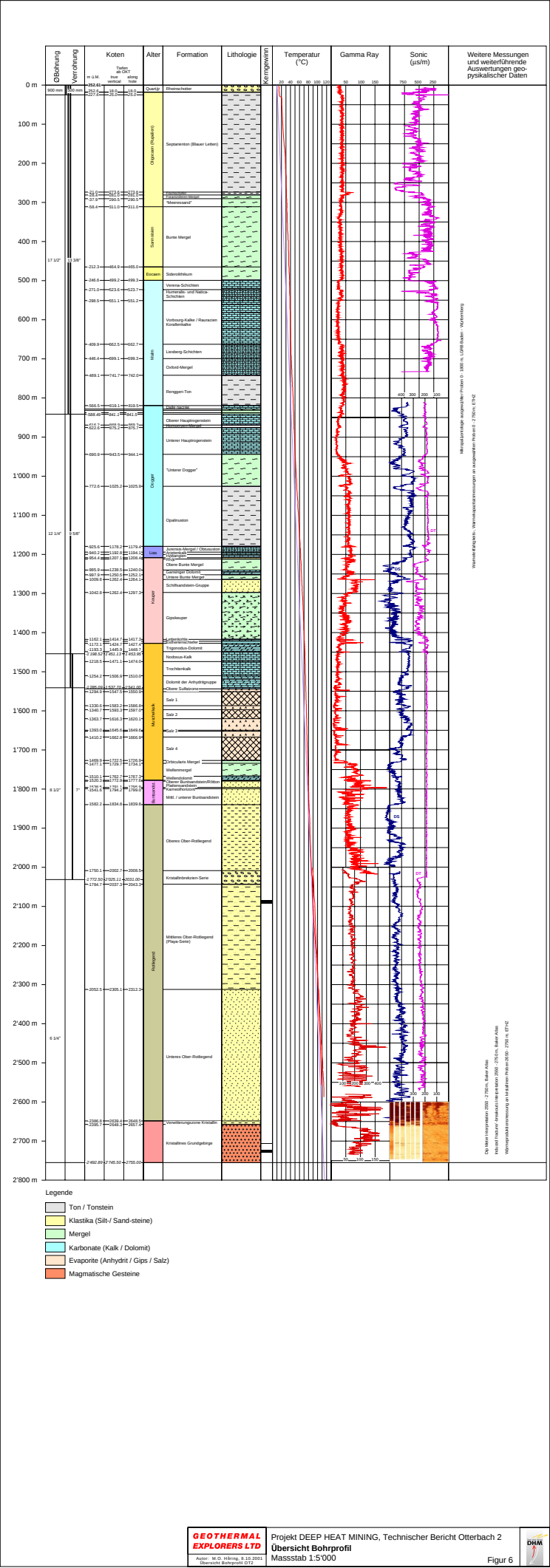
- Messung der Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Wärmeproduktion ausgewählter Bohrproben. – U. Schärli, ETHZ.
- Lithologische und mikropaläontologische Untersuchungen an ausgewählten Bohrproben. Kalibrierung mit Tiefbohrungen im südlichen Rheingraben.- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB).

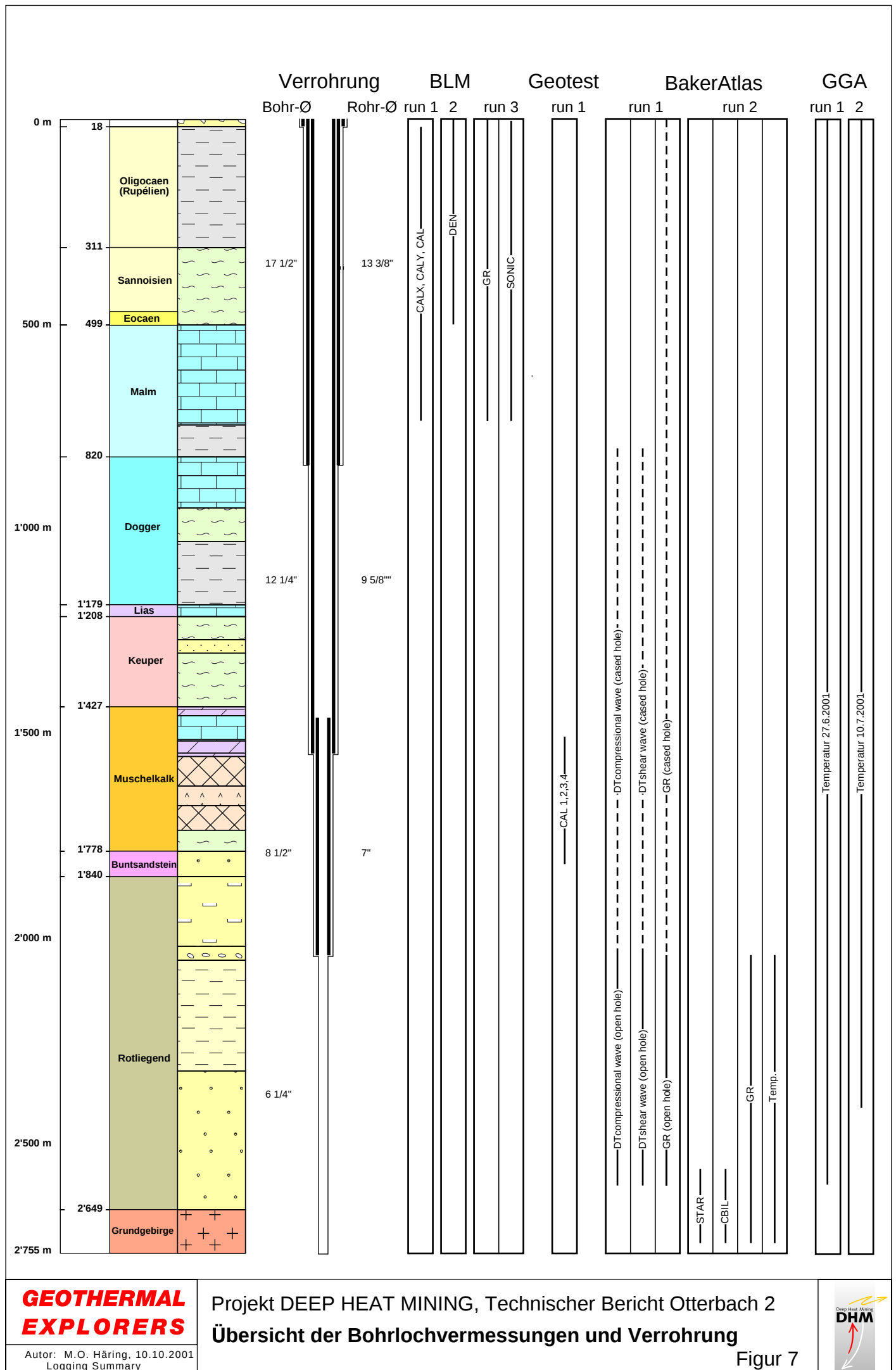


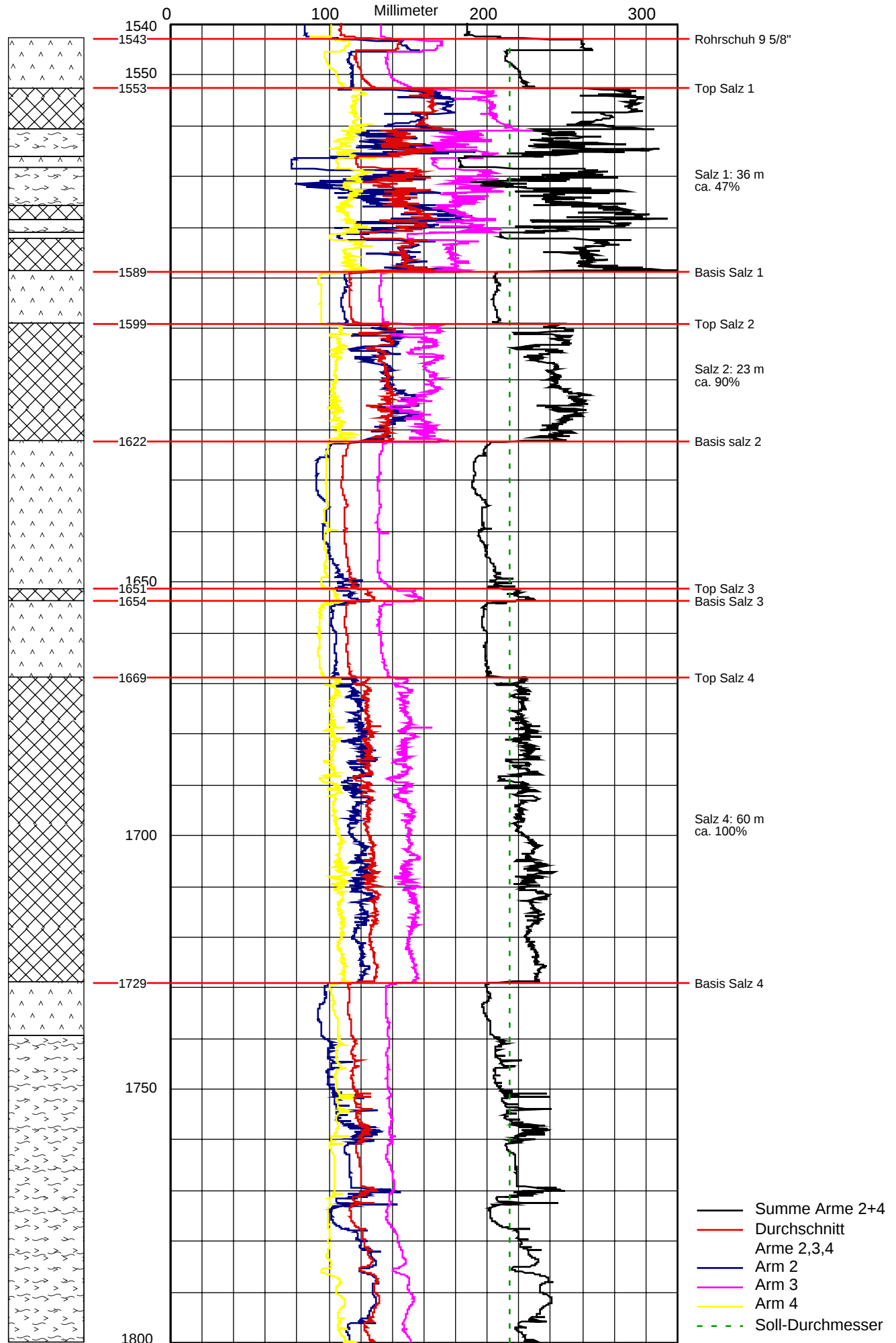












OTTERBACH-2 : STAR-CBIL IMAGE LOGS

SUMMARY LOG PLOT OF DIP RESULTS -- SCALE 1:1'000

DEPTH RANGE: 2550.00-2755.00 METRES

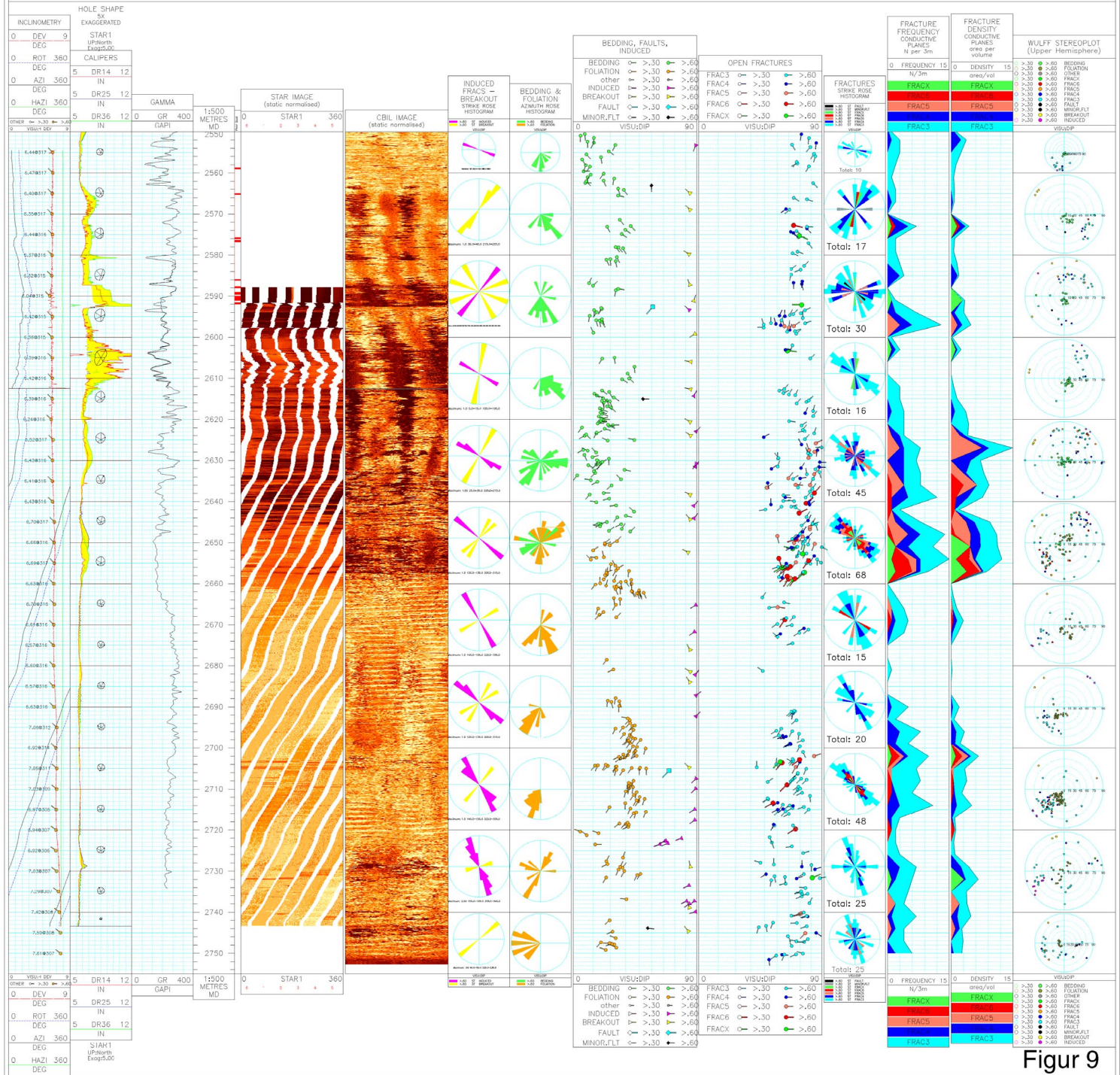
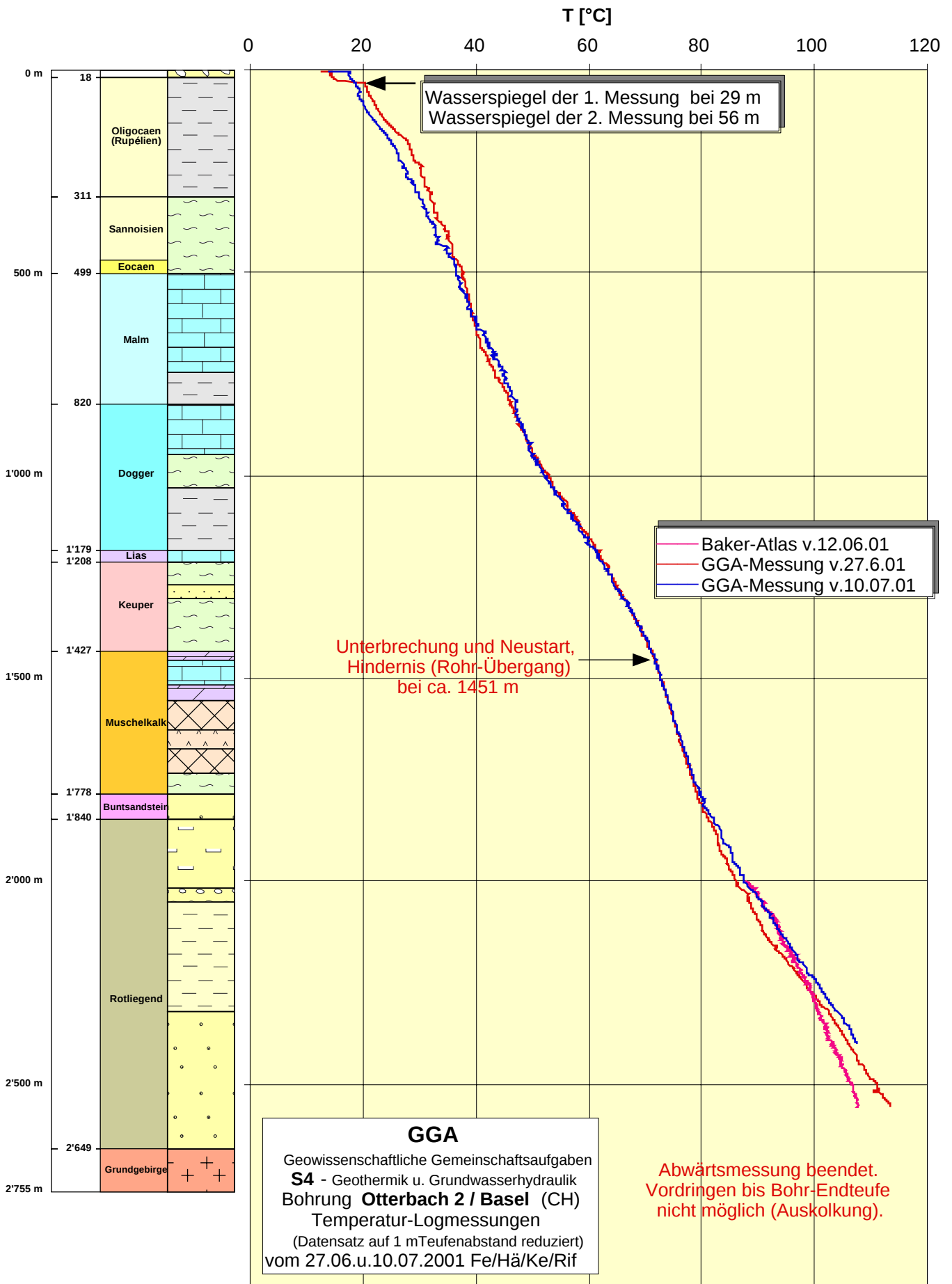
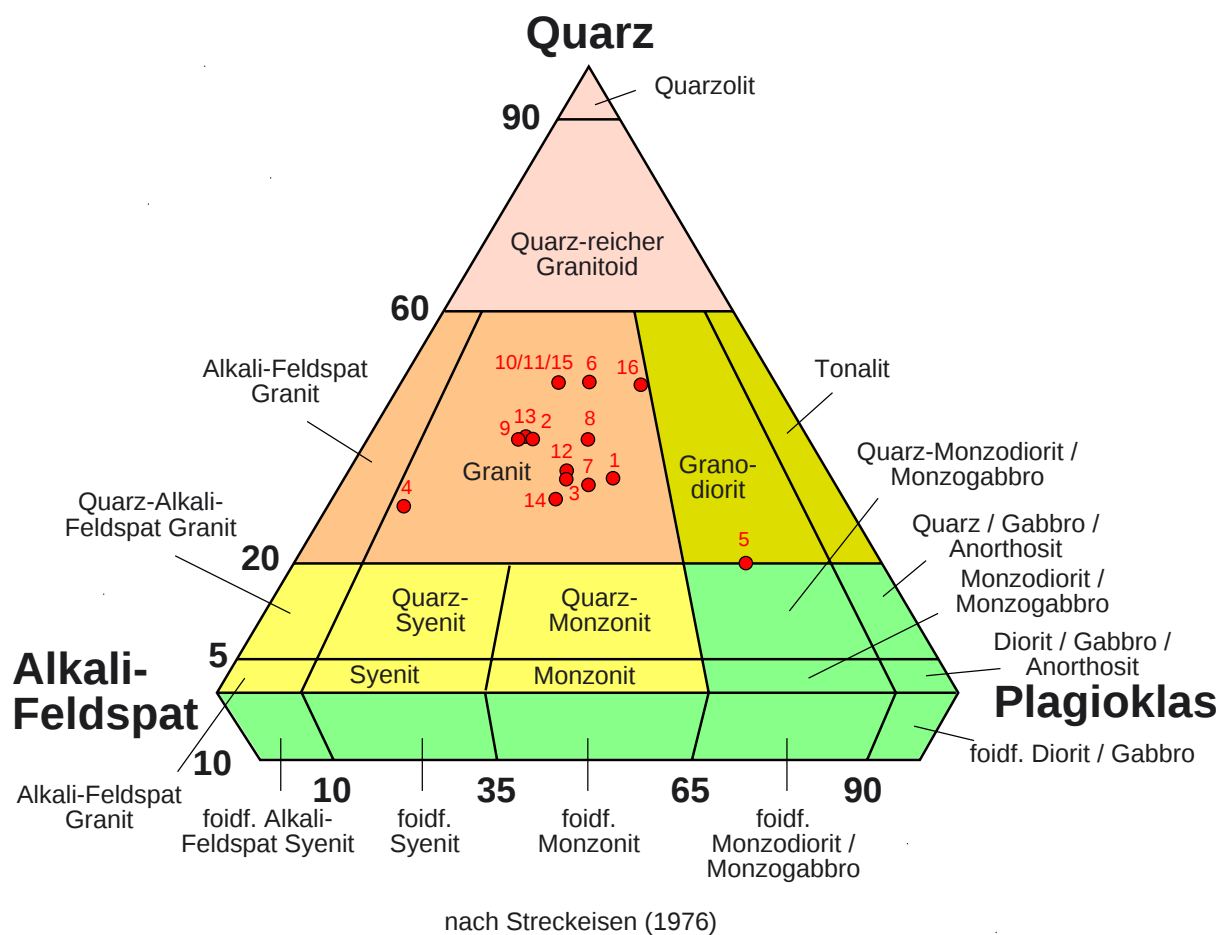


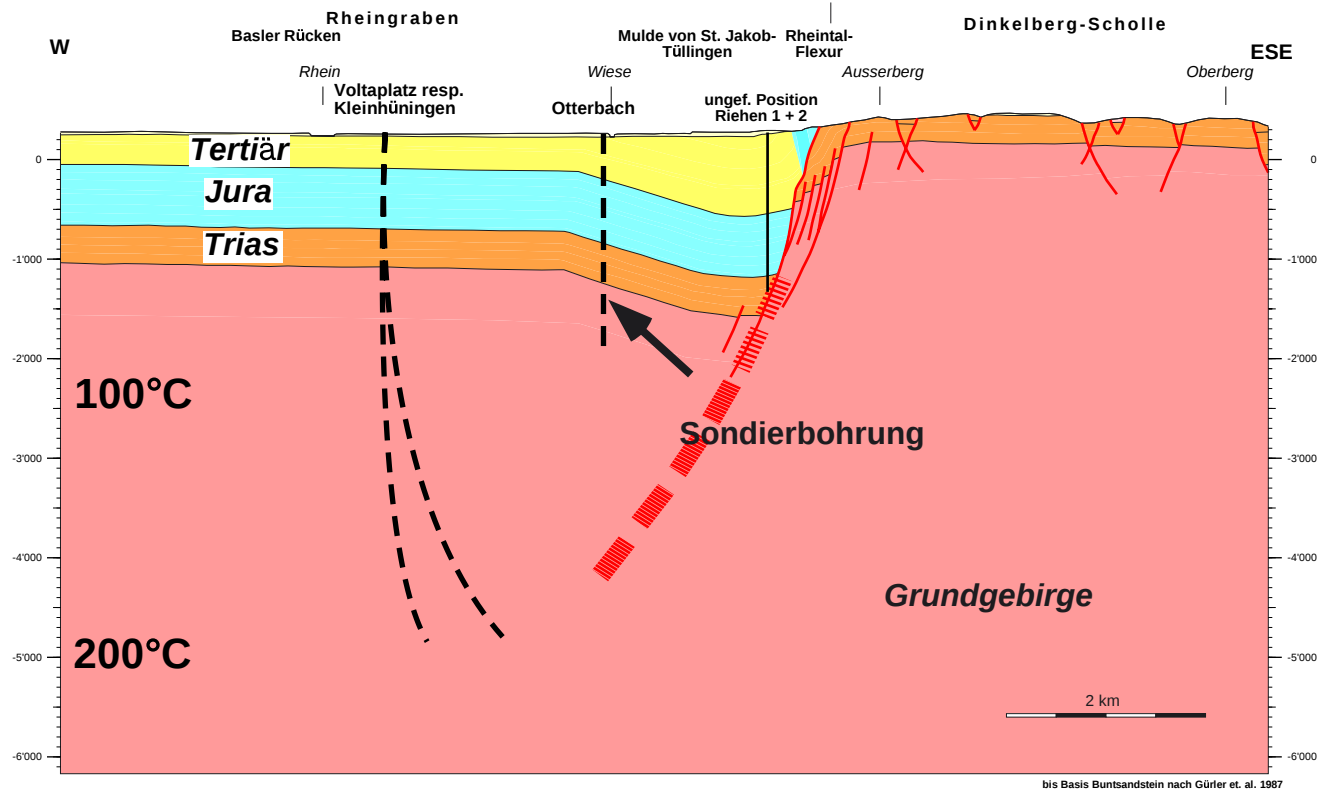
Figure 9



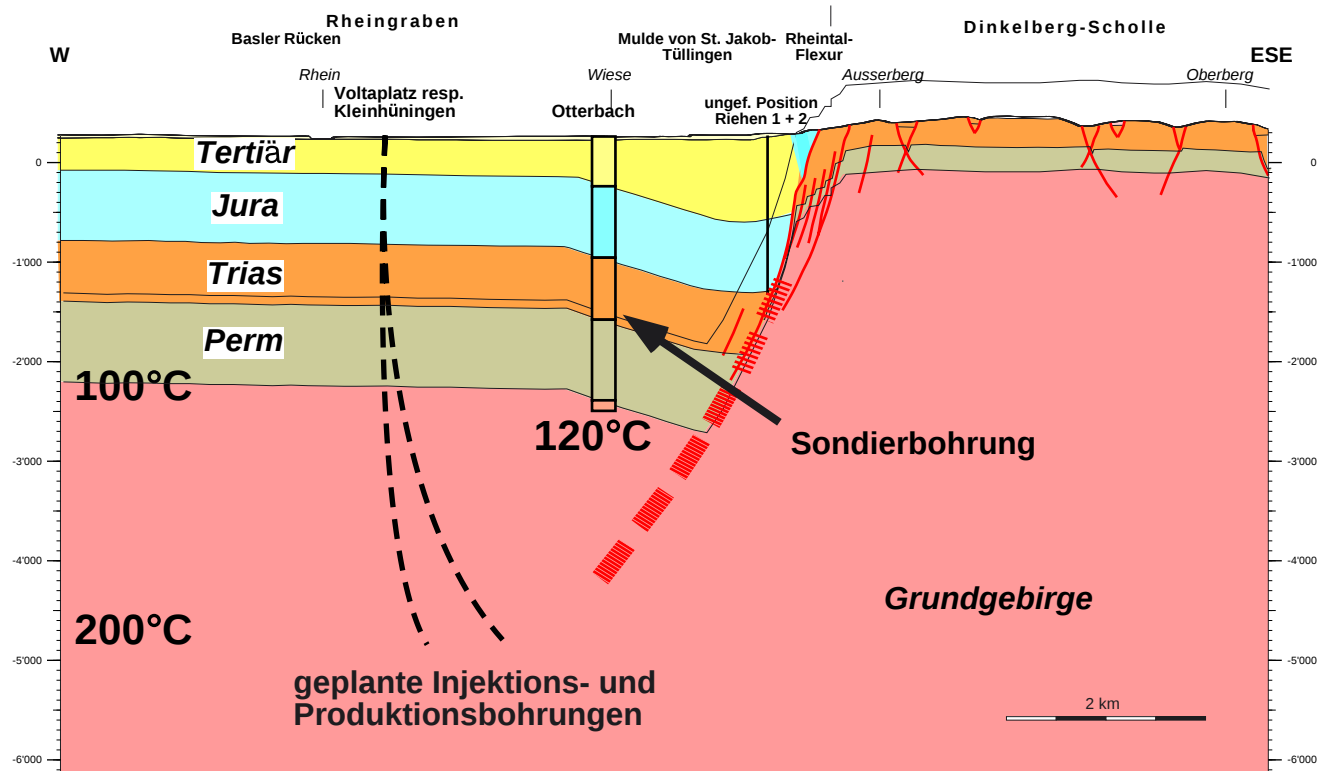


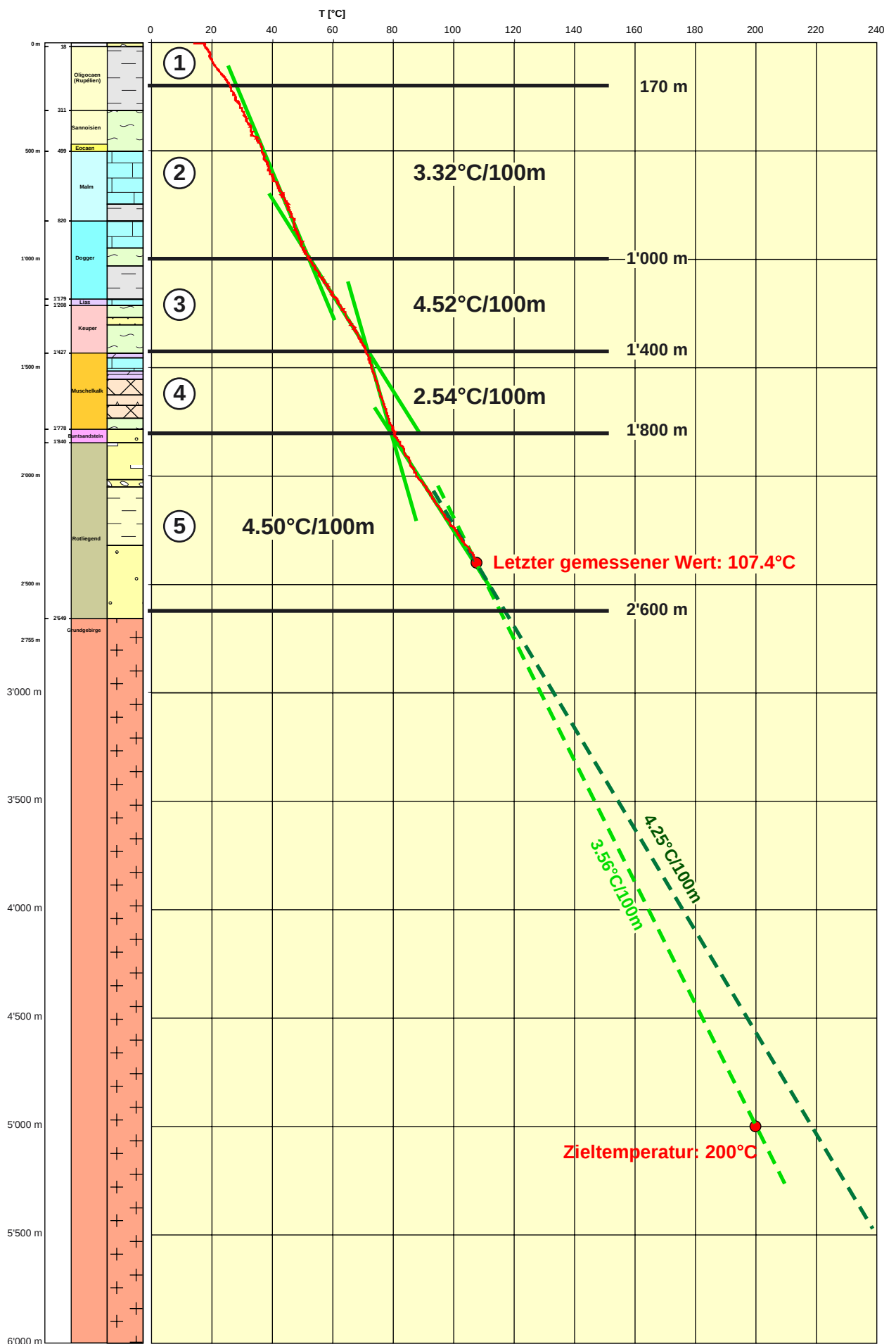
1	2706.0 m	9	2726.0 m
2	2706.5 m	10	2726.5 m
3	2707.0 m	11	2727.0 m
4	2707.5 m	12	2727.5 m
5	2723.5 m	13	2728.0 m
6	2724.0 m	14	2728.5 m
7	2724.5 m	15	2729.0 m
8	2725.0 m	16	2729.4 m

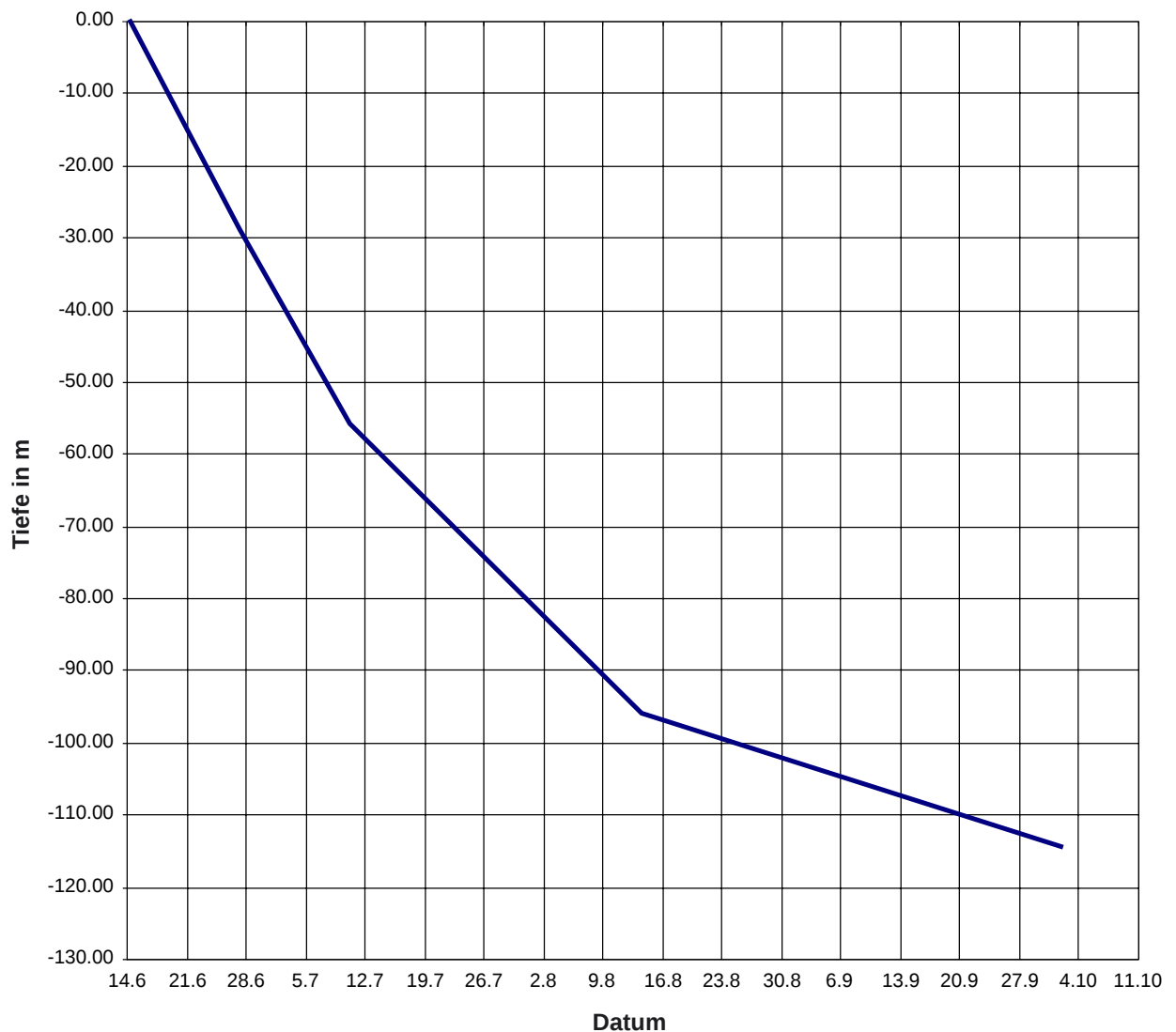
Vermutete Struktur vor der Bohrung Otterbach



Vermutliche Struktur nach der Bohrung Otterbach







Koord. **612 430 / 269 685**
 OKT **252.61** m ü. M.
 OK Flansch -0.05 m
 Dichte Spülung 1.23 kg/l

Datum / Zeit	Wasserspiegel	Pegel	Messung durch	Methode
14.6.01 12:00	0.00			
27.6.01 12:00	-29.00	223.61	GGA	Temp.log
10.7.01 12:00	-56.00	196.61	GGA	Temp.log
13.8.01 17:40	-96.23	156.33	SJ GeoTec	Lichtlot
2.10.01 8:40	-114.73	137.83	SJ GeoTec	Lichtlot

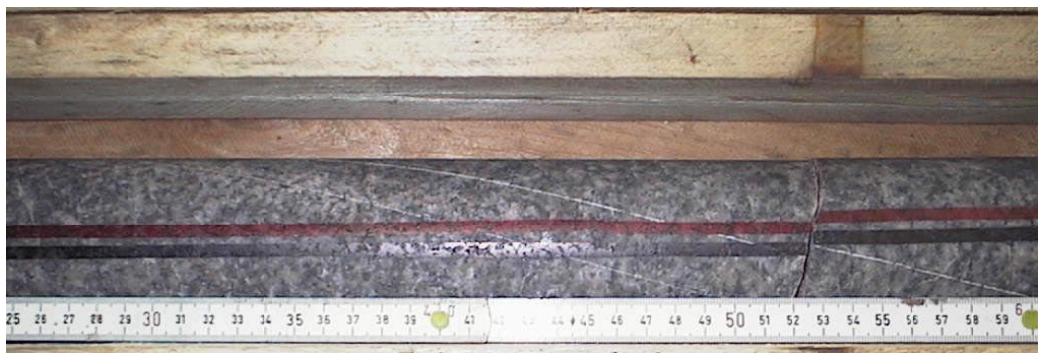














2725.60



2726.03



2726.03



2726.98



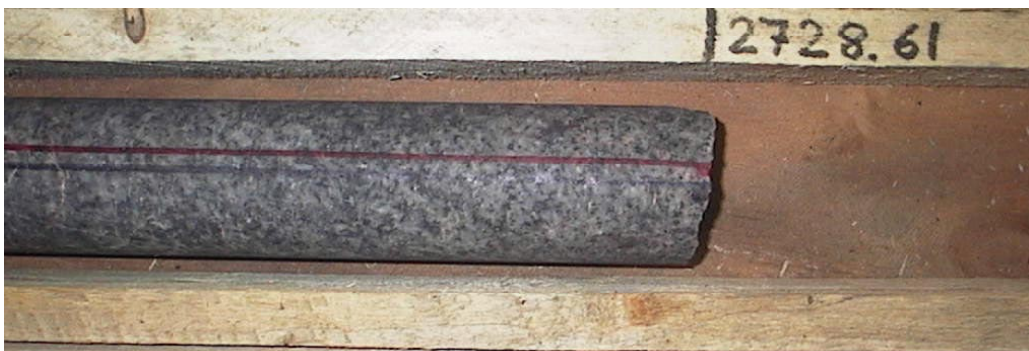
2726.98



2727.79



2727.79



2728.61



2728.61



2729.44

Abweichungsmessung in Bohrung:

DHM Otterbach 2

Messpunkt	Messteufe	Messteufen-differenz	Neigungswinkel			Horizontalstrecke			Vertikalstrecke	wahre Tiefe	Tiefenverlust	Azimuth (Richtung)				Streckenkoordinaten		Koordinatensumme	
Nr.			gemessen	gemittelt								gemessen	gemittelt	N(+); S(-)	O(+); W(-)	N(+); S(-)	O(+); W(-)	N(+); S(-)	O(+); W(-)
	l	Δl	φ	φ	sin φ	Δl * sin φ	ΣΔl * sin φ	cos φ	Δl * cos φ	ΣΔl * cos φ		ψ	ψ	cos ψ	sin ψ	Δl*sinφ*cosψ	Δl*sinφ*sinψ	ΣΔl*sinφ*cosψ	ΣΔl*sinφ*sinψ
	m	m	°	°		m	m		m	m	m	°	°			m	m	m	m
							0.0			0.0	0.0							0.0	0.0
1	233.0	233.0	1.0	0.5	0.01	2.0	2.0	1.00	233.0	233.0	0.0	125.0	125.0	-0.57	0.82	-1.2	1.7	-1.2	1.7
2	337.0	104.0	1.3	1.1	0.02	2.0	4.1	1.00	104.0	337.0	0.0	180.0	150.0	-0.87	0.50	-1.8	1.0	-2.9	2.7
3	445.0	108.0	1.3	1.3	0.02	2.4	6.4	1.00	108.0	444.9	0.1	100.0	140.0	-0.77	0.64	-1.8	1.5	-4.7	4.2
4	545.0	100.0	2.8	2.0	0.04	3.5	10.0	1.00	99.9	544.9	0.1	170.0	135.0	-0.71	0.71	-2.5	2.5	-7.2	6.7
5	696.0	151.0	2.0	2.4	0.04	6.3	16.3	1.00	150.9	695.8	0.2	20.0	95.0	-0.09	1.00	-0.6	6.3	-7.8	13.0
6	835.0	139.0	3.3	2.7	0.05	6.4	22.7	1.00	138.9	834.6	0.4	60.0	40.0	0.77	0.64	4.9	4.1	-2.9	17.1
7	956.0	121.0	2.9	3.1	0.05	6.5	29.3	1.00	120.8	955.4	0.6	50.0	55.0	0.57	0.82	3.8	5.4	0.9	22.5
8	1'074.0	118.0	4.0	3.5	0.06	7.1	36.4	1.00	117.8	1'073.2	0.8	40.0	45.0	0.71	0.71	5.0	5.0	5.9	27.5
9	1'180.0	106.0	6.0	5.0	0.09	9.2	45.6	1.00	105.6	1'178.8	1.2	90.0	65.0	0.42	0.91	3.9	8.4	9.8	35.9
10	1'280.0	100.0	6.2	6.1	0.11	10.6	56.2	0.99	99.4	1'278.2	1.8	310.0	20.0	0.94	0.34	10.0	3.6	19.8	39.5
11	1'405.0	125.0	6.5	6.4	0.11	13.8	70.0	0.99	124.2	1'402.5	2.5	65.0	7.5	0.99	0.13	13.7	1.8	33.5	41.3
12	1'520.0	115.0	6.0	6.3	0.11	12.5	82.6	0.99	114.3	1'516.8	3.2	320.0	12.5	0.98	0.22	12.2	2.7	45.7	44.0
13	1'623.0	103.0	6.5	6.3	0.11	11.2	93.8	0.99	102.4	1'619.2	3.8	10.0	345.0	0.97	-0.26	10.8	-2.9	56.6	41.1
14	1'810.0	187.0	5.5	6.0	0.10	19.5	113.3	0.99	186.0	1'805.2	4.8	15.0	12.5	0.98	0.22	19.1	4.2	75.6	45.4
15	1'955.0	145.0	5.5	5.5	0.10	13.9	127.2	1.00	144.3	1'949.5	5.5	10.0	12.5	0.98	0.22	13.6	3.0	89.2	48.4
16	2'140.0	185.0	6.0	5.8	0.10	18.5	145.8	0.99	184.1	2'133.6	6.4	70.0	40.0	0.77	0.64	14.2	11.9	103.4	60.3
17	2'338.0	198.0	4.8	5.4	0.09	18.6	164.4	1.00	197.1	2'330.7	7.3	0.0	35.0	0.82	0.57	15.3	10.7	118.7	71.0
18	2'438.0	100.0	6.0	5.4	0.09	9.4	173.8	1.00	99.6	2'430.2	7.8	30.0	15.0	0.97	0.26	9.1	2.4	127.8	73.4
19	2'560.0	122.0	6.5	6.2	0.11	13.3	187.1	0.99	121.3	2'551.5	8.5	317.0	353.5	0.99	-0.11	13.2	-1.5	140.9	71.9
20	2'650.0	90.0	6.6	6.5	0.11	10.3	197.3	0.99	89.4	2'640.9	9.1	316.0	316.5	0.73	-0.69	7.4	-7.1	148.4	64.8
21	2'700.0	50.0	6.9	6.8	0.12	5.9	203.2	0.99	49.7	2'690.6	9.4	314.0	315.0	0.71	-0.71	4.2	-4.2	152.5	60.7
22	2'750.0	50.0	7.6	7.3	0.13	6.3	209.5	0.99	49.6	2'740.2	9.8	307.0	310.5	0.65	-0.76	4.1	-4.8	156.6	55.9

Tabelle 1 Abweichungsmessungen

Sondierbohrung Otterbach 2

Schichtenverzeichnis		Koord. OKT		612 430 252.61	269 685	
Top	Basis	AH	TV	KOTE	Mächtigkeit	
Rheinschotter (Quartär)		0.0	0.0	252.6	18.0	Quartär
Septarienton (Blauer Letten)	Rheinschotter (Quartär)	18.0	18.0	234.6	255.6	Tertiär
Fischschiefer	Septarienton (Blauer Letten)	273.6	273.6	-21.0	7.4	
Formaminiferen-Mergel	Fischschiefer	281.0	281.0	-28.4	9.5	481.2
Meeressand	Formaminiferen-Mergel	290.5	290.5	-37.9	20.5	
Bunte Mergel (Sannoisien)	Meeressand	311.0	311.0	-58.4	154.0	
Siderolithikum (Eozän)	Bunte Mergel (Sannoisien)	465.0	464.9	-212.3	34.3	
Verena Schichten ("Séquanien")	Siderolithikum (Eozän)	499.3	499.2	-246.6	24.4	Malm
Humeralis- und Natica-Schichten	Verena Schichten ("Séquanien")	523.7	523.6	-271.0	27.5	
Vorbourg-Kalke/Rauracien Korallenkalke	Humeralis- und Natica-Schichten	551.2	551.1	-298.5	111.4	319.9
Liesberg-Schichten	Vorbourg-Kalke/Rauracien Korallenkalke	662.7	662.5	-409.9	36.6	
Oxford-Mergel	Liesberg-Schichten	699.3	699.1	-446.4	42.7	
Renggeri-Ton	Oxford-Mergel	742.0	741.7	-489.1	77.4	
Dalle nacrée	Renggeri-Ton	819.5	819.1	-566.5	6.1	Dogger
Callovien-Ton	Dalle nacrée	825.6	825.2	-572.6	6.1	
Macrocephalus-/ VariansSchichten	Callovien-Ton	831.7	831.3	-578.7	5.8	
Ferrugineus-Oolith	Macrocephalus-/ VariansSchichten	837.5	837.1	-584.5	3.9	
Oberer Hauptrogenstein	Ferrugineus-Oolith	841.4	841.0	-588.4	27.9	359.1
Homomyen-Mergel	Oberer Hauptrogenstein	869.3	868.9	-616.2	6.4	
Unterer Hauptrogenstein	Homomyen-Mergel	875.7	875.2	-622.6	68.3	
"Unterer Dogger"	Unterer Hauptrogenstein	944.1	943.5	-690.9	81.7	
Opalinuston	"Unterer Dogger"	1'025.9	1'025.2	-772.6	153.0	
Jurensismergel-Obtususton	Opalinuston	1'179.4	1'178.2	-925.6	14.6	Lias
Arietenkalk	Jurensismergel-Obtususton	1'194.1	1'192.8	-940.2	5.9	28.8
Héttangien	Arietenkalk	1'200.0	1'198.7	-946.1	8.4	
Rhät	Héttangien	1'208.4	1'207.1	-954.4	3.4	Keuper
Obere Bunte Mergel	Rhät	1'211.8	1'210.4	-957.8	28.0	
Gansinger-Dolomit	Obere Bunte Mergel	1'240.0	1'238.5	-985.9	12.0	
Untere Bunte Mergel	Gansinger-Dolomit	1'252.1	1'250.5	-997.9	11.9	
Schilfsandstein-Gruppe	Untere Bunte Mergel	1'264.1	1'262.4	-1'009.8	33.0	217.7
Gipskeuper	Schilfsandstein-Gruppe	1'297.3	1'295.4	-1'042.8	119.3	
Lettenkohle	Gipskeuper	1'417.3	1'414.7	-1'162.1	4.8	
Estherienschiefer	Lettenkohle	1'422.1	1'419.5	-1'166.9	5.3	
Trigonodus-Dolomit	Estherienschiefer	1'427.4	1'424.7	-1'172.1	21.2	Muschelkalk
Nodosuskalk	Trigonodus-Dolomit	1'448.7	1'445.9	-1'193.3	25.1	
Trochitenkalk	Nodosuskalk	1'474.0	1'471.1	-1'218.5	35.8	
Dolomit der Anhydritgruppe	Trochitenkalk	1'510.0	1'506.9	-1'254.2	33.5	
Obere Sulfatzone	Dolomit der Anhydritgruppe	1'543.7	1'540.4	-1'287.7	7.2	
Salz1	Obere Sulfatzone	1'550.9	1'547.5	-1'294.9	35.7	
	Salz1	1'586.8	1'583.2	-1'330.6	10.1	
Salz2		1'597.0	1'593.3	-1'340.7	23.0	
	Salz2	1'620.1	1'616.3	-1'363.7	29.3	348.2
Salz3		1'649.6	1'645.6	-1'393.0	2.6	
	Salz3	1'652.2	1'648.2	-1'395.6	14.6	
Salz4		1'666.9	1'662.8	-1'410.2	59.7	
Orbicularis Mergel	Salz4	1'726.9	1'722.5	-1'469.9	7.2	
Wellenmergel	Orbicularis Mergel	1'734.1	1'729.7	-1'477.1	33.0	
Wellendolomit	Wellenmergel	1'767.3	1'762.7	-1'510.1	10.2	
Oberer Buntsandstein / Rötton	Wellendolomit	1'777.6	1'772.9	-1'520.3	2.1	Buntsandstein
Plattensandsteine	Oberer Buntsandstein / Rötton	1'779.7	1'775.0	-1'522.4	16.1	
Karneolhorizont	Plattensandsteine	1'795.9	1'791.1	-1'538.5	3.1	61.9
Mittlerer/ Unterer Buntsandsandstein	Karneolhorizont	1'799.0	1'794.2	-1'541.6	40.6	
Oberes Ober-Rotliegend	Mittlerer/ Unterer Buntsandsandstein	1'839.8	1'834.8	-1'582.2	167.9	Rotliegend
Kristallinbrekzien Serie	Oberes Ober-Rotliegend	2'008.5	2'002.7	-1'750.1	34.6	
Mittleres Ober-Rotliegend (Playa)	Kristallinbrekzien Serie	2'043.3	2'037.3	-1'784.7	267.8	804.6
Unteres Ober-Rotliegend	Mittleres Ober-Rotliegend (Playa)	2'312.3	2'305.1	-2'052.5	334.3	
Verwitterungszone Kristallin	Unteres Ober-Rotliegend	2'648.5	2'639.4	-2'386.8	8.8	Kristallin
Kristallines Grundgebirge	Verwitterungszone Kristallin	2'657.4	2'648.3	-2'395.7	96.9	105.7
Endtiefe	Kristallines Grundgebirge	2'755.0	2'745.2	-2'492.6		

AH = along hole depth (Bohrteufe)

TV = True Vertical: Tiefe unter OKT

OKT = Oberkante Terrain (= Betonrand Bohrkeller)

Kote in m ü. M

Tabelle 2 Schichtenverzeichnis