

Die Geothermie-Tiefbohrung St. Gallen GT-1

Autor(en): **Naef, Henry**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology**

Band (Jahr): **20 (2015)**

Heft 1

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-632515>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Geothermie-Tiefbohrung St. Gallen GT-1 Henry Naef¹

Stichworte: Tiefengeothermie, Ostschweizer Molasse, Malmkalk-Aquifer, St. Gallen-Verwerfungszone, Dreieckzone, Tiefbohrung, Bohrlochgeophysik, Mikrofazies, Gas-Wasser-Test, Seitenkerne.

Inhalt

Zusammenfassung	3
Abstract	3
1 Einleitung	4
2 Planung der Tiefbohrungen.....	5
3 Ausführung der Bohrung St. Gallen GT-1 vom März bis Juli 2013	9
4 Die wichtigsten geologischen Resultate der Bohrung GT-1	15
4.1 Die Schichtabfolge von GT-1 im Überblick.....	15
4.2 Molasse: 4 – 3'992 m MD	15
4.3 Mesozoikum: 3'992 – 4'450 m MD	18
4.4 Weitergehende Auswertung der Malm-Dogger-Strecke	23
5 Die Test- und Sicherungsarbeiten im Malmkalk-Aquifer	24
5.1 Erste Phase mit Gasausbruch und seismischem Ereignis	24
5.2 Zweite Phase mit Verrohrung und Gas-Wasser-Test.....	26
6 Ausblick.....	29
Literaturverzeichnis.....	30

Zusammenfassung

Die Stadt St. Gallen hat ein Energiekonzept erarbeitet, in welchem die Tiefengeothermie eine wichtige Rolle spielen sollte. Aufwendige Vorabklärungen inklusive 3D-Seismik zeigten die Machbarkeit eines hydrogeothermalen Doublettensystems im Zusammenhang mit einer regionalen Störungszone im Bereich der potenziellen Tiefenaquifere des Mesozoikums.

Die Bohrung GT-1 wurde von März bis Juli 2013 abgeteuft und erreichte eine Tiefe von 4'250 m unter Terrain respektive 4'450 m Länge. Dabei wurden eine knapp 4 km lange Molassestrecke durchbohrt und dann der ca. 400 m mächtige Malm sowie 50 m Dogger erschlossen.

Um vom Bohrplatz im Sittertobel aus die Störungszone zu erreichen, musste der Bohrfad ab ca. 950 m Tiefe abgelenkt und mit gut 20° nach NW geführt werden. Die Ausführung erfolgte in 4 Bohrlochsektionen, wobei ab Beginn der Ablenkung in der obersten USM im PDC-Verfahren und mit auf-

Abstract

According to the 2008 energy concept of the city of St. Gallen deep geothermal energy should play a major role. Therefore the city commissioned a feasibility study including a regional 3D-Seismics survey. This study identified potential aquifer-units within the mesozoic sediments and in combination with a regional fault zone.

The well GT-1 has been drilled between March and July 2013 and reached a final depth of 4.250 m below ground level or 4.450 m along hole respectively. Below almost 4 km of Tertiary Molasse sediments the Top Mesozoic was reached, followed by 400 m of Malm and 50 m of Dogger formations.

In order to reach the fault zone from the drill site near the Sitter it was necessary to deflect the borehole. In a depth of 950 m the borehole was deflected by about 20° heading NW. The final borehole consists of four sections that have been accomplished mainly with PDC-bits and modern directional drilling equipment. Possible high pressure areas within the triangle zone or gas kicks have been postulated but could not be found.

The Malm formations consist of typical swabian facies with spongiol limestones, that show partly fractured sections. The fractured sections are

¹ geosfer AG, Teufener Strasse 3, 9000 St. Gallen

wendiger Richtbohrtechnik gebohrt wurde. Die befürchteten Überdrücke im Bereich der Dreieckzone oder plötzliche Gaseinbrüche wurden nicht angetroffen.

Der Malm ist in schwäbischer Schwammkalk-Fazies ausgebildet und weist tektonisch gestörte Zonen auf, welche als Teil der St. Gallen-Verwerfungszone interpretiert werden. Diese Bereiche wurden erfolgreich stimuliert, wobei es zu einem Gasausbruch und aufgrund der nachfolgenden Bekämpfungsmassnahmen zu Mikroseismizität mit einem spürbaren Erdbeben der Magnitude 3.5 kam. Nach einer mehrwöchigen Phase der Bohrlochkontrolle wurde die Ergiebigkeit des Malm mit einem Gas-Wasser-Test ermittelt. Die Resultate zeigen, dass wohl ein nicht genauer quantifiziertes Erdgas-Vorkommen erschlossen wurde, die erzielbare Wasser-Förderrate mit < 5 Liter/Sekunde aber nicht ausreicht, um das Geothermieprojekt weiter zu verfolgen.

interpreted as part of the St. Gallen Fault Zone. These have been stimulated successfully, causing a sudden gas blowout, accompanied by microseismic activity and a distinct seismic event of magnitude 3.5, urging rigorous well control activity. After several weeks of controlling and securing the borehole, aquifer testing was carried out. The extent of the gas reservoir is unknown and the tests could not detect an aquifer zone with sufficient productivity to realize a geothermal power plant.

1 Einleitung

Im Energiekonzept 2050 der Stadt St. Gallen spielt die Geothermie eine wichtige Rolle. Neben den zahlreichen Erdwärmesonden sollte dabei ein Tiefengeothermie-Projekt nachhaltig zur Reduktion der CO₂-Bilanz und einer autarken Energieversorgung der Stadt beitragen.

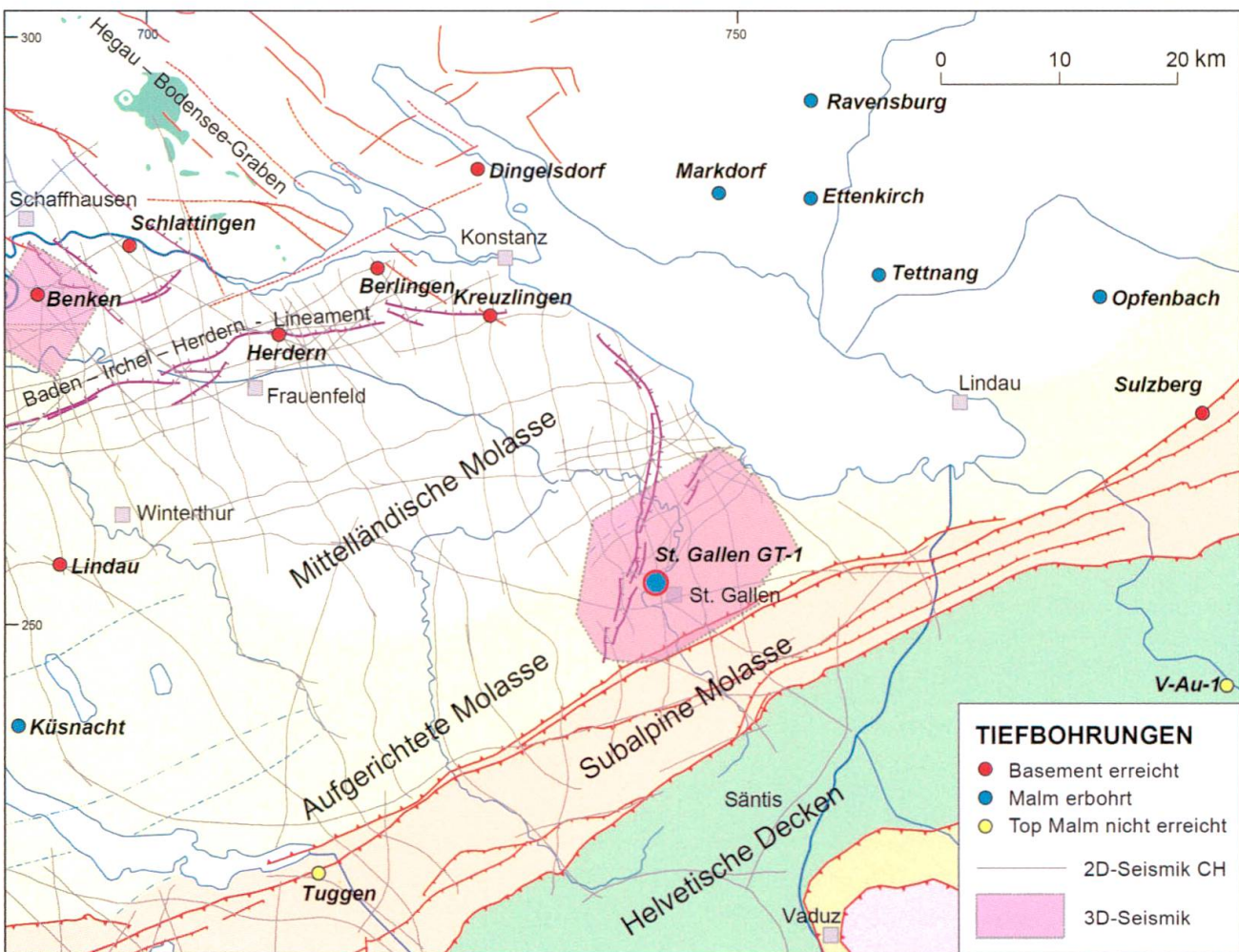


Fig. 1: Überblick der verfügbaren Tiefbohrungen und Seismikdaten im Raum Nordostschweiz – Bodensee.

Aus regionalgeologischen Überlegungen und früheren Explorationen der Erdölindustrie, insbesondere Reflexionsseismik (Fig. 1), war zu vermuten, dass unter der Stadt St. Gallen mesozoische Gesteinsschichten in geeigneter Tiefe vorhanden sind, welche als Tiefenwasser-Aquifere für die Nutzung mit hydrothermalen Systemen in Frage kommen (vgl. auch HADES).

Eine vom Stadtrat 2008 in Auftrag gegebene Machbarkeitsstudie kam zum Ergebnis, dass das vermutete Potenzial grundsätzlich vorhanden ist, das heisst, die Schichten des Malms und dann auch des Oberen Muschelkalks in Tiefen von über 4 km liegen und die erforderlichen Gesteinstemperaturen von deutlich über 120 °C aufweisen dürften (Geowatt et al. 2009). Über die lokale Ausbildung dieser Karbonat-Aquifer-Formationen unter St. Gallen gab es allerdings keine konkreten Daten; auf Grund regionalgeologischer Vergleiche (z. B. Tiefbohrungen östlich des Bodensees und weiter östlich am Alpenrand, Fig. 1) musste eher bezweifelt werden, dass sie generell ausreichende Durchlässigkeiten aufweisen, um ein erfolgreiches hydrothermales Projekt zu realisieren (Quintnerkalkfazies; z. B. Schneider 1962, Bachmann et al. 1987, Bertleff et al. 2005, Bayerisches Geologisches Landesamt 2010). Aus Beispielen in anderen Regionen, besonders auch dem Raum München, war aber bekannt, dass tektonische Verwerfungszonen, wie sie auch unter St. Gallen vermutet wurden, die Aquifer-Eigenschaften von Kalkstein-Formationen deutlich verbessern können.

Aufgrund der 2010 ausgeführten 3D-Seismik konnten dann die Kenntnisse über die lokale Geologie entscheidend verbessert werden (Fig. 2). Das resultierende 3D-Modell zeigt eine differenziert ausgebildete, NNE-SSW-streichende Verwerfungszone im Westen des Stadtgebietes, deren Analyse auf eine mehrphasige Entstehungsgeschichte mit vorwiegend extensivem Charakter hinweist. Die zahlreichen Aufschiebungen belegen jedoch auch kompressive Bewegungen, welche Ausdruck einer späten, transpressiven

Überprägung sein könnten (Heuberger & Kuhn 2014). Diese als St. Gallen-Verwerfungszone (SVZ) bezeichnete regionale Struktur im Mesozoikum sollte nun an geeigneter Stelle mit einer geothermischen Doublette erschlossen werden.

2 Planung der Tiefbohrungen

Aufgrund eines differenzierten Auswahlverfahrens wurde der Standort Au im Sittertobel als Bohrplatz ausgewählt. Das Gelände war bereits im Besitz der Stadt und direkt anschliessend an weitere technische Betriebe (ARA, KVA und Fernwärmenetz), gut erschlossen und doch soweit abseits von Wohngebieten, dass die Lärmentwicklung durch den 24-Stunden-Bohrbetrieb nur geringfügige zusätzliche Massnahmen erforderte.

Als wichtigste Planungsgrundlage wurde eine geologische Bohrprognose erstellt (Naef 2012). Trotz guter Strukturdaten aus der 3D-Seismik musste aber sowohl im Hinblick auf die lithostratigrafische Abfolge, wie auch die Tiefenlage der einzelnen Schichten, mit grösseren Unsicherheiten gerechnet werden, denn die nächsten Tiefbohrungen, welche das Mesozoikum erreicht haben und deshalb als Referenzbohrungen verwendet werden konnten, liegen in einer Entfernung von 25 und mehr Kilometern, einerseits am Thurgauer Seerücken und andererseits östlich des Bodensees im proximalen Alpenvorland (Fig. 1).

Fig. 2 zeigt eine geologische Karte von St. Gallen und Umgebung inkl. Verlauf der Bruchstrukturen im Mesozoikum, wie sie sich aus der 3D-Seismik ergeben haben. An der Oberfläche sind nur Molasse-Einheiten aufgeschlossen, die sich von Nordwest nach Südost mit änderndem Schichtfallen aneinander reihen: Von der flachliegenden mittelländischen Molasse über deren aufgerichteten Südrand bis in die Subalpine Molasse folgen sich tektonisch unterschiedliche Abschnitte (Fig. 3).

Daraus wird ersichtlich, dass sich die Unsicherheiten der geologischen Bohrprognose vor allem auf den tieferen Teil des Bohrprofils unterhalb der Randunterschiebung beziehen, während die Schichtabfolge über der Randunterschiebung durch eine direkte Projektion der Oberflächengeologie auf den geplanten Bohrfad gut abgeschätzt werden konnte.

Wichtig ist auch der Vorbehalt, dass sich aus guten Seismikdaten zwar eine detaillierte

tektonische Geometrie rekonstruieren lässt, für exakte Tiefenangaben aber die Kalibration der seismischen Geschwindigkeiten durch eine lokale Tiefbohrung notwendig ist. Deshalb musste bei der Planung, obwohl in der Seismik gut sichtbar, auch für die Tiefe des wichtigsten Zielhorizontes am Top Malm, mit einer Unsicherheit von ca. ± 200 m gerechnet werden.

Zudem ist es nicht möglich, mit den 3D-Seismik-Daten direkt etwas über die Wasserfüh-

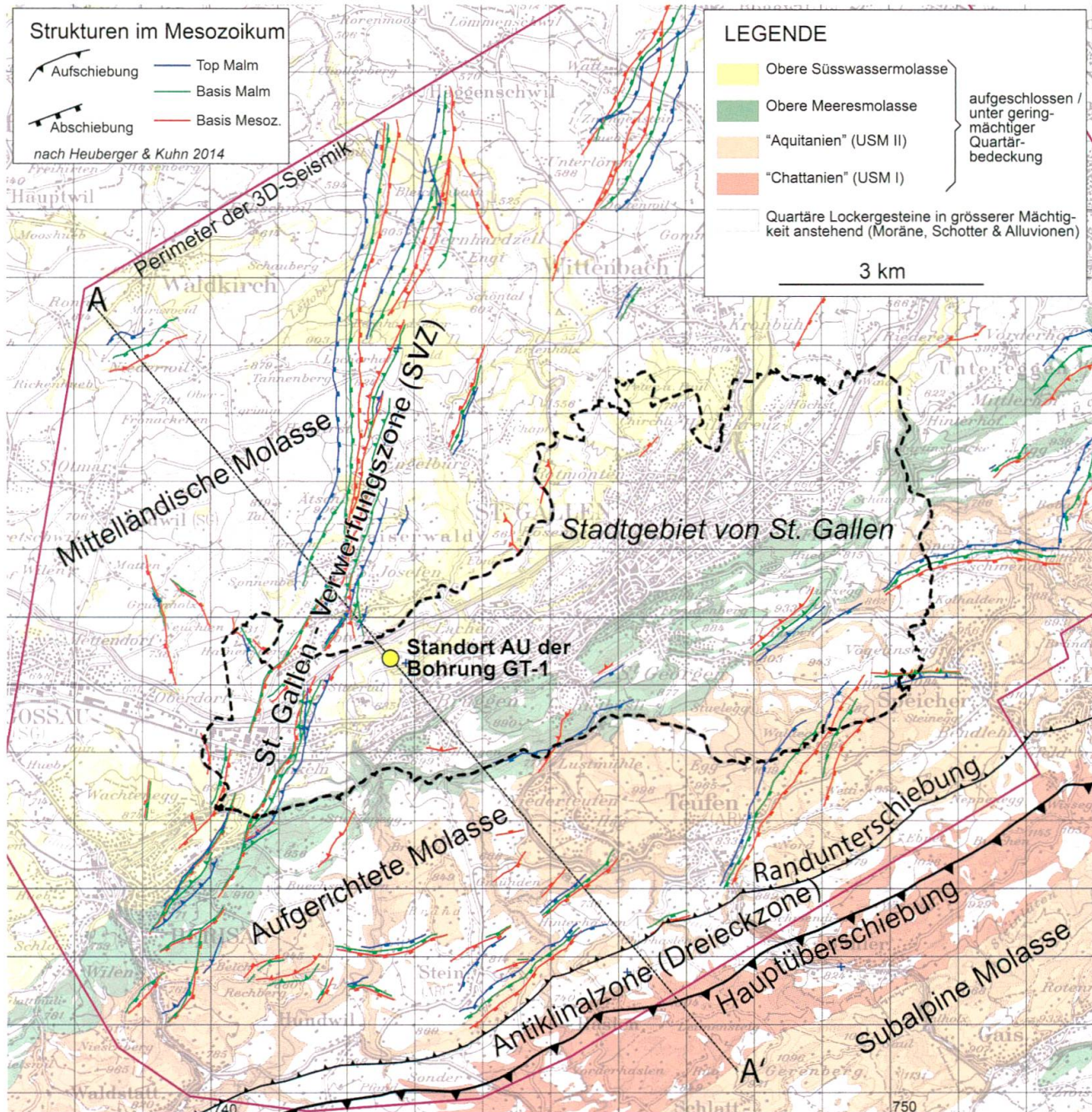


Fig. 2: Geologische Übersicht Stadtgebiet St. Gallen und Umgebung mit Perimeter der 3D-Seismik. Darstellung der kartierten Verwerfungen im Mesozoikum mit der St. Gallen-Verwerfungszone als vorrangiges Zielgebiet. Geologischer Profilschnitt A – A' siehe Fig. 3.

rung im Bereich der St. Gallen-Verwerfungszone auszusagen. Auch allfällige Gasvorkommen können mit Seismikdaten nur in Ausnahmefällen nachgewiesen werden. So war man für die entsprechenden Prognosen auf die Erfahrungen aus den weiter entfernten Referenzbohrungen sowie plausible Modelle angewiesen. In Bezug auf die Wasserführung kann der Hydrologische Atlas (HADES) der Schweiz angeführt werden, wo ein Modell der Tiefenwasserzirkulation vom Infiltrationsgebiet im Autochthon der Zentralmassive über das Molassebecken bis zu den Exfiltrationsgebieten am Hochrhein vorgeschlagen wird. In Bezug auf die Gasführung im Mesozoikum und der tieferen Molasse gibt es aus Tiefbohrungen am Alpennordrand zahlreiche Hinweise (z. B. Müller & Niederding 1996) und letztlich war die Bohrung Entlebuch, geologisch in ähnlicher Position im Bereich der Dreieckzone, die einzige fründige Gasbohrung der Schweiz (Vollmayr & Wendt 1987).

Die konkrete Planung der Bohrungen begann Ende 2010 aufgrund der 3D-Seismik-Auswer-

tung und der Vorgabe, dass die erste Bohrung so dimensioniert sein sollte, dass sie später auch als Produktions- oder Injektionsbohrung der angestrebten Doublette genutzt werden konnte.

Als Zielgebiet auf Aquifertiefe wurde ein von zwei Verwerfungen begrenzter Block der SVZ bestimmt, welcher ca. 1 km nordwestlich des Bohrplatzes unter dem Zentrum von Abtwil, also deutlich ausserhalb des Stadtgebietes liegt. Die Bohrung musste deshalb aus einer anfänglich senkrechten Lage abgelenkt und schräg nach NW geführt werden (Fig. 3).

So bot die Platzierung der Bohrung zwischen den zwei ca. 500 m auseinanderliegenden Störungsästen die Möglichkeit, nach Abteufen eines sauberen Bohrlochs bis Basis Malm mit Hilfe von Stimulationsmassnahmen an die nahen Verwerfungen und deren Kluftsysteme anzudocken. Falls dies nicht oder nur mit ungenügenden Resultaten möglich sein sollte, war geplant, die Bohrung weiter zu vertiefen und den Muschelkalk sowie allenfalls auch den obersten So-

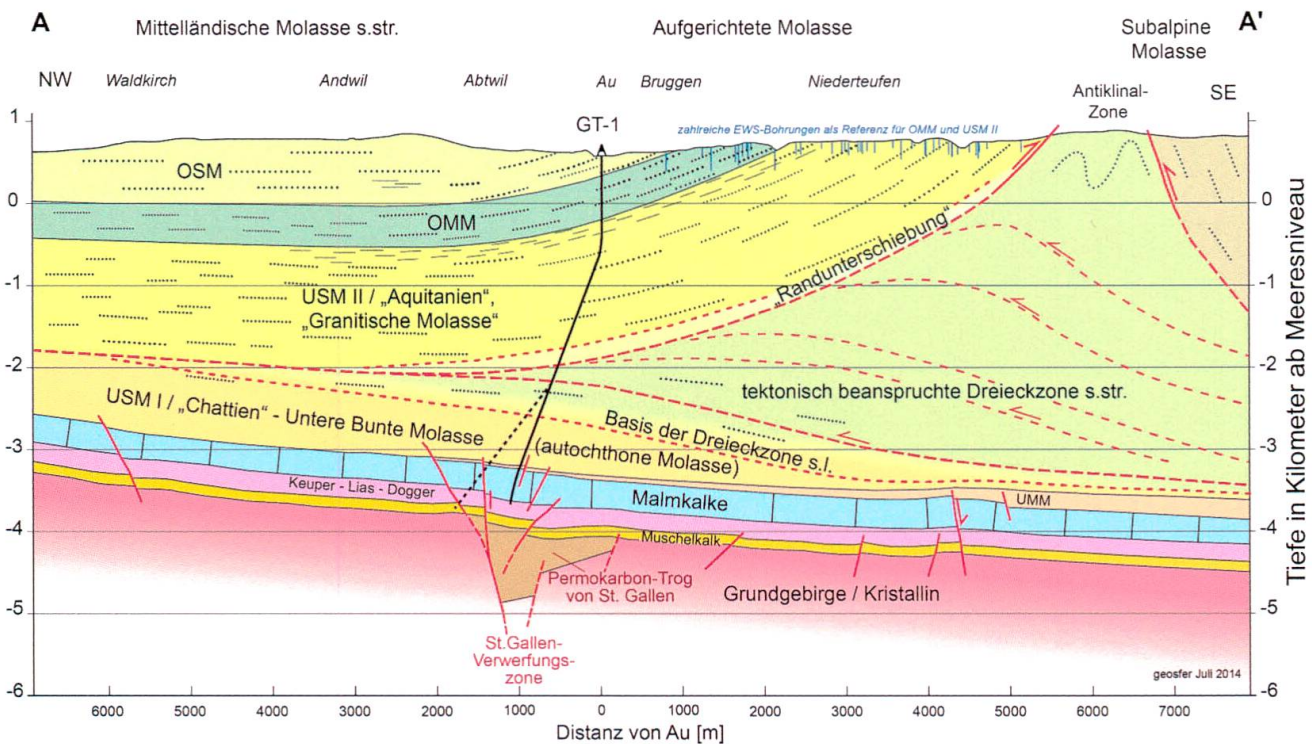


Fig. 3: Geologisches NW – SE-Profil durch den Bohrstandort Au im Sittertobel mit dem ausgeführten, abgelenkten Bohrpfad von GT-1 (gepunktet: potenzieller Sidetrack); Profilspur siehe Fig. 2. Definitive Version 2014 nach Kalibrierung der 3D-Seismik mit den Bohrungsdaten gemäss Heuberger & Kuhn 2014.

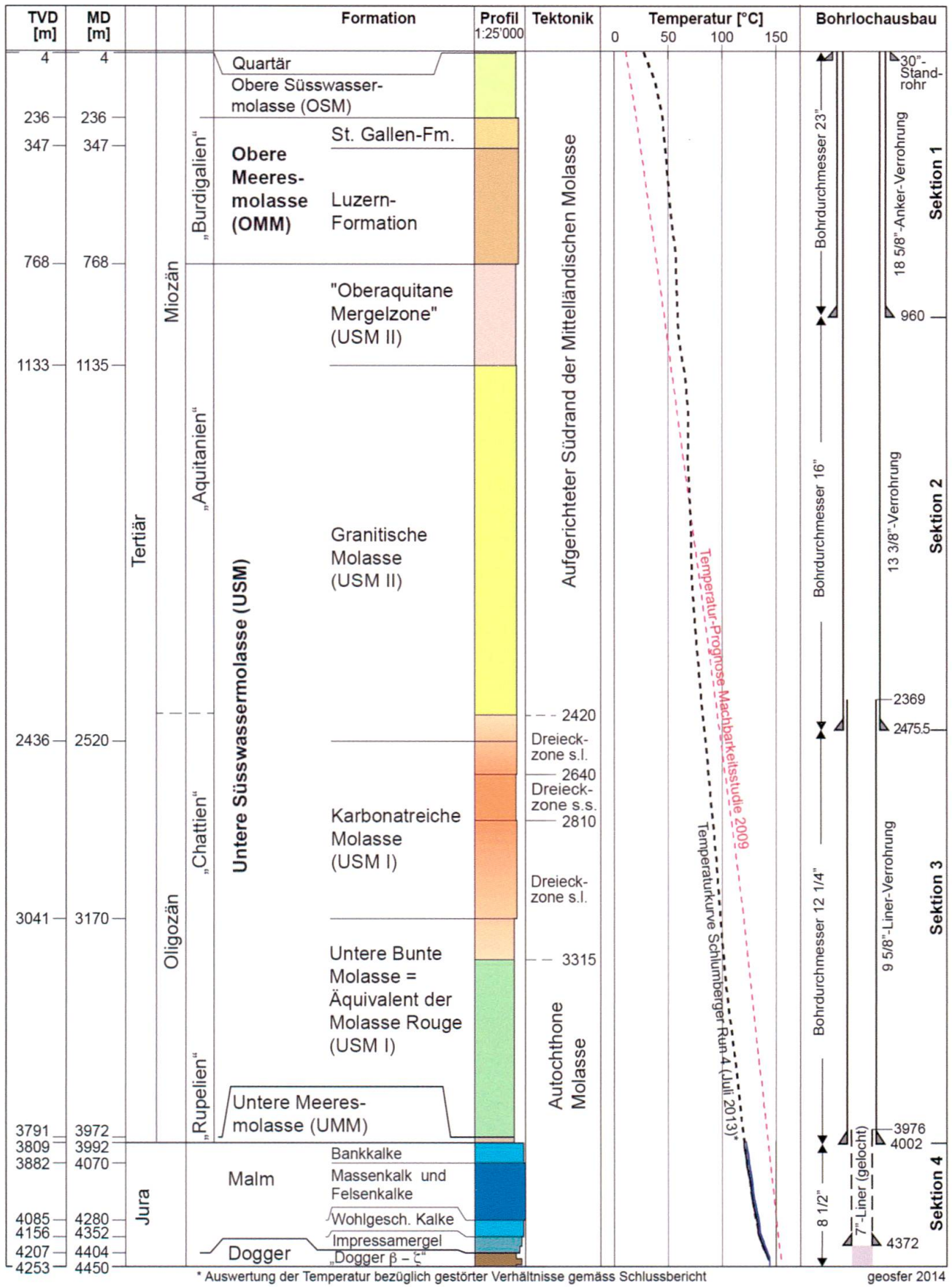


Fig. 4: Die Bohrung St. Gallen GT-1 im Überblick.

ckel (Kristallin oder Perm?) in analoger Weise zu erschliessen. Wäre auch danach noch keine ausreichende Ergiebigkeit erreicht, so hätte man immer noch die Möglichkeit, mit einem Sidetrack einen weiter entfernten Störungsast anzufahren und zu betesten (gestrichelte Linie in Fig. 3).

3 Ausführung der Bohrung St. Gallen GT-1 vom März bis Juli 2013

Als Bohransatz-Niveau für St. Gallen GT-1 gilt OK Betonplatte des Bohrplatzes auf 579.2 m ü. M. («Ackersohle») mit den Schweizerischen Landeskoordinaten (CH 1903/LV03) 742'631.80 / 253'318.64. Gebohrt wurde durch die deutsche Traditionsfirma ITAG Tiefbohr GmbH aus Celle mit der Anlage Rig 23.

Die Bohrarbeiten dauerten vom 4. März 2013 (Spud-In zur 23"-Bohrstrecke) bis zum 6. Juli 2013 (Spud-In zur 23"-Bohrstrecke) bis zum 6. Juli 2013, als die Endteufe von 4'450 m MD (measured depth), gemessen entlang dem Bohrfpfad, erreicht wurde. Danach erfolgten auf-

wändige und umfangreiche Testarbeiten, welche infolge Gaszutritts auch eine zeitweilige Verschlüssung des Testintervalls unterhalb von ca. 4'000 m bedingten. Diese unterste Bohrlochstrecke wurde in der Folge wieder aufgebohrt und ebenfalls verrohrt, wobei die aktuelle Endtiefe der erschlossenen Bohrstrecke (= Basis der gelochten 7"-Verrohrung) bei 4'372 m MD liegt. Fig. 4 gibt einen Überblick über die stratigrafische Abfolge und den Ausbau der Bohrung.

Das Zeit/Teufen-Diagramm in Fig. 5 zeigt den chronologischen Ablauf der Bohrarbeiten. Gemäss Planung wurde die Bohrung bis zum Erreichen der Zieltiefe im Bereich Basis Malm in 4 Sektionen mit den Bohrdurchmessern 23", 16", 12¼" und 8½" abgeteuft und mit Verrohrungen ausgebaut (Fig. 4).

Die erste Sektion wurde bis in 960 m Tiefe mit dem Rollen- respektive Zahnmeissel unter Verwendung einer Bentonit-Polymer-Spülung mit einer mittleren Dichte von 1.1 gebohrt. Dabei ergaben sich bereits zu Beginn unerwartete Probleme, indem die

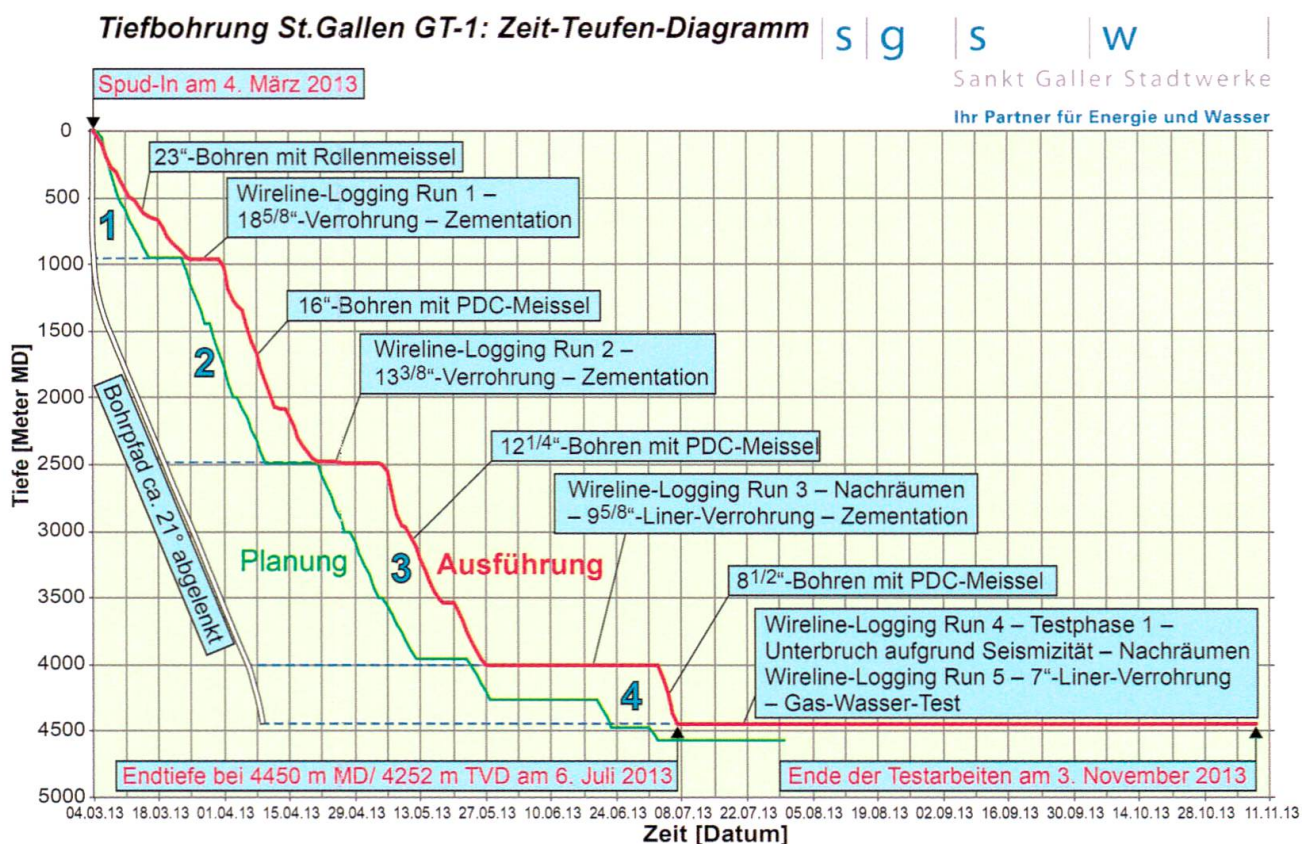


Fig. 5: Zeit/Teufen-Diagramm der Bohrung St. Gallen GT-1, mit Darstellung der wichtigsten Arbeitsphasen in den Bohrloch-Sektionen 1 bis 4 (grün = Planung, rot = Realisierung).

relativ weichen, tonreichen Mergel der OSM (Obere Süsswassermolasse) für nachhaltiges Verkleben der Bohrgarnitur und damit zeitliche Verzögerungen sorgten. Ab Top OMM (Obere Meeresmolasse) sorgten die bis zu 25 m mächtigen Konglomerat-Abschnitte für weitere Erschwernisse, weil diese Nagelfluhbänke unerwartet abrasiv waren und damit einen enormen Meisselverschleiss bewirkten.

In Sektion 2 wurde nach Azimut ca. 322° Neigung aufgebaut und bei ca. 21° stabil gehalten. Die Sektion sollte bis kurz vor die Dreieckzone reichen, wo der nächste Rohrschuh zu setzen war, um die Bohrung vor dem Durchteufen dieser vermuteten Risikozone zu sichern. Gebohrt wurde nun mit selbststeuernder Richtbohrtechnik und einem PDC-Bit, was teilweise sehr gute Bohrfortschritte von bis zu 25 m/h und eine Meterleistung des ersten Meissels von 1'170 m ergab. Auch die erzielte Bohrlochgeometrie muss – zumindest theoretisch – als sehr gut bezeichnet werden.

Nach Erreichen der Sektionstiefe bei 2'475 m MD zeigte sich aber, dass das über gut 1'500 m offene Bohrloch diverse Problemzonen aufwies, welche mit mehrmaligem Befahren und Säubern des Bohrlochs nachgearbeitet werden mussten. Dennoch war es in der Folge nicht möglich, das geplante Wireline-Logging durchzuführen, weil die Messsonden auch nach mehrmaligen Versuchen mit unterschiedlichen Sonden-Kombinationen eine Problemzone in 1'081 m Bohrlochtiefe nicht passieren konnten. Die geophysikalischen Daten zu Sektion 2 beschränkten sich deshalb auf ein während des Bohrens aufgenommenes Gamma-Log sowie die später durch die Verrohrung aufgenommenen akustischen Messungen (Sonic- und Zementbond-Logs). Die bis zu Tage reichende 13^{3/8}"-Verrohrung von Sektion 2 musste in der Folge ohne detaillierte Kaliberinformationen zementiert werden. Dabei traten unregelmässige Druckverhältnisse und erhebliche Zementverluste auf. Mit den

abschliessenden USIT-Messungen (Fig. 6) konnte später festgestellt werden, dass der Zementkopf hinter der 13^{3/8}"-Verrohrung in einer Tiefe von ca. 520 m steht, die Zementation also nicht wie vorgesehen bis an die Oberfläche reicht.

Die nochmals ca. 1'500 m lange Sektion 3 wurde wieder mit steuerbarer Richbohrgarnitur und PDC-Meissel gebohrt, wobei wieder gute bis sehr gute Bohrfortschritte und eine stabile Bohrlochgeometrie erreicht wurden. Die tektonisch überprägte Dreieckzone, wo mit bedeutenden hydrostatischen Überdrücken und allenfalls grösseren Gasvorkommen gerechnet wurde, erwies sich als praktisch problemlos. Es ergaben sich allerdings zunehmende Probleme (hohe Drehmomente) mit der langen, offen stehenden Bohrstrecke, sodass die einmal erbohrten Abschnitte ein immer aufwändigeres Nachräumen erforderten.

Die Zieltiefe am Top Malm wurde nach nur 85 Tagen Bohrzeit bei 3'992 m MD mit hoher Präzision erreicht (Prognose = 3'940 m, Fig. 5). Das Bohrloch erwies sich bei den notwendigen Räumarbeiten als sehr widerpenstig und musste deshalb mehrfach und mit Spezialwerkzeugen nachgebohrt werden (lithologische Kontraste, Deformation durch Differentialspannungen).

Das Wireline-Logging konnte wiederum nicht über die ganze Tiefe durchgeführt werden, denn bei 2'916 m Tiefe standen die Messsonden auch nach mehrfachen Versuchen auf. Infolge dieser offensichtlich schwierigen geometrischen Bohrlochverhältnisse wurde beschlossen, bei einem weiteren Räumtrip ein LWD (Logging While Drilling)-System einzusetzen, um so doch noch einen minimalen geophysikalischen Datensatz zu erhalten. Damit konnten für die gesamte Sektion 3 wenigstens ein brauchbares Gamma- und ein Widerstandslog aufgenommen werden.

In den Sektionen 2 und 3 kam eine Kaliumkarbonat-Spülung zum Einsatz, deren spezifisches Gewicht von anfänglich 1.07 mit zunehmender Tiefe sukzessive bis auf maxi-

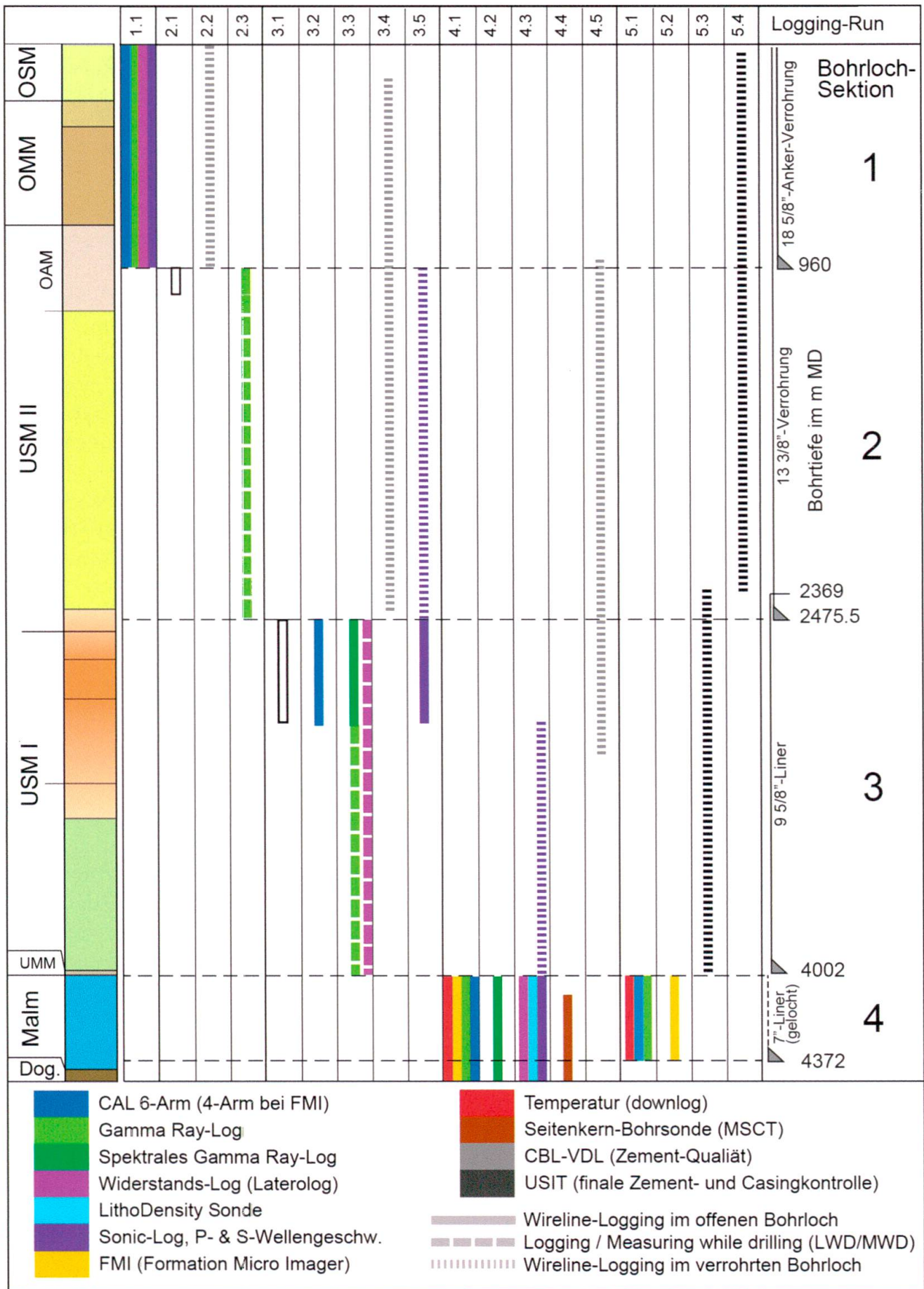


Fig. 6: St. Gallen GT-1: Übersicht über das ausgeführte geophysikalische Logging-Programm. Durchgezogene Balken = Wireline Logging; gestrichelte Linien = MWD-Logging; gepunktete Linien = durch die Verrohrung aufgenommene Messung.

mal 1.35 erhöht wurde. Die für die Bohrprognose abgeschätzten hydrostatischen Überdrucke von 1.6 bis 1.8 konnten aber nicht bestätigt werden. Dagegen erreichte die Temperatur mit 85 °C für die eingesetzte Spülung kritische Werte, was mit zusätzlichen Massnahmen jedoch ohne externe Kühlung unter Kontrolle gehalten werden konnte.

Der Ausbau von Sektion 3 erfolgte als Liner, eine nicht mehr bis zutage reichende Verrohrung, welche ca. 100 m über dem Rohrschuh im bestehenden 13^{3/8}"-Casing aufgehängt wurde (Fig. 4). Dafür musste das Bohrloch ein weiteres Mal geräumt werden, wonach das Setzen der 9^{5/8}"-Verrohrung mit viel Aufwand verbunden und erst beim zweiten Versuch erfolgreich war. Wegen der wiederum fehlenden Kaliberinformation musste bei der nachfolgenden Zementation mit viel Reserve gefahren werden. Insgesamt verstrichen so vom Erreichen der Zieltiefe am Top Malm über 5 Wochen bis weitergebohrt werden konnte (Fig. 5).

Die Bohrarbeiten für die Sektion 4 erfolgten wiederum im Richtbohrverfahren mit einem PDC-Bit. Dabei wurde die Neigung von 22° auf 8° abgebaut, um gemäss einer geologischen Neubeurteilung die Bohrspur näher an der östlichen Verwerfungszone verlaufen zu lassen. Die ca. 450 m lange Malm-Dogger-Strecke wurde mit einem Run in drei Tagen und ohne Probleme abgeteuft, wobei weder Spülungsverluste noch namhafte Fluid- oder Gas-Zuflüsse registriert wurden. Fürs Erste musste die Strecke im potenziellen Aquifer deshalb als «trocken» beurteilt werden. In der Malm-Dogger-Strecke (Sektion 4) wurde eine Kreidespülung von annähernd Normalgewicht (1.0 - 1.07) eingesetzt, und für die Testphase musste dann auf Klarwasser umgestellt werden.

Die Befunde der Bohrung GT-1 ergaben für die gesamte Bohrstrecke keinerlei während des Bohrbetriebs deutlich spürbare Zufluss- oder Verlustzonen (nur eine Sandsteinschicht der OSM in ca. 65 m Bohrtiefe führte kurzfristig zu geringen Verlusten). Auch im

Malm wurden bis zum Erreichen der Endtiefe bei 4'450 m MD keine hydraulischen Anomalien festgestellt, weshalb zuerst einmal angenommen werden musste, dass die erwartete Aquiferzone im Bereich der St. Gallen-Störung zumindest nicht erreicht wurde.

Die Gasführung der durchbohrten Schichten stellt ein erstrangiges Sicherheitsrisiko dar und erscheint deshalb als Parameter der kontinuierlichen Spülungsüberwachung. Auch hier konnten über die gesamte Bohrstrecke keinerlei auffallende Maxima beobachtet werden. Ein geringer Methangehalt im ppm bis Promille-Bereich war zwar durchgehend vorhanden, mit einigen lokalen Peaks von maximal 2% im tieferen Teil der Bohrung. Diese Kohlenwasserstoff-Führung gehört aber sozusagen zum «Hintergrundrauschen» und bildet noch keine konkreten Hinweise auf eine signifikante Tiefengasmigration oder gar ein nutzbares Erdgasvorkommen.

Erst die Stimulations- und Testarbeiten, welche nach dem Abteufen der Bohrung in zwei Phasen durchgeführt wurden, erbrachten den Nachweis, dass das geplante Erschliessungskonzept grundsätzlich erfolgreich war. Diese Arbeiten werden im nächsten Kapitel erläutert.

In der Malm-Dogger-Strecke wurden zwei Logging-Programme durchgeführt, das erste unmittelbar nach Erreichen der Endtiefe (Run 4) und dann ein zweites nach dem Räumen des temporär verschlossenen Bohrlochs und unmittelbar vor der Verrohrung mit dem 7"-Lochliner (Kap. 5). Neben den Standard-Logs wurden dabei auch eine hochauflösende Abbildung der Bohrlochwand aufgenommen, die Seitenkerne entnommen und eine Bohrlochseismik (Checkshot) ausgeführt. Fig. 6 zeigt eine Übersicht der ausgeführten Wireline- und MWD-Messungen.

Mit dem im Raum orientierten, widerstandsbasierten Abbild der Bohrlochwand (Formation Micro Imager = FMI) können vor allem Strukturelemente (Schichtlage, Klüfte, tekto-

nische Störungen) erkannt respektive ermittelt werden, und es ist möglich – zusammen mit den Kaliber-Messungen – anhand des Zustands der Bohrlochwand Rückschlüsse auf die im Untergrund herrschenden Differenzialspannungen zu ziehen (Fig. 10).

Eine erste Messung der Bohrlochtemperatur erfolgte mit dem Wireline-Logging in Sektion 4. Die Messung wurde ca. 24 Stunden nach der letzten Spülungszirkulation als Downlog über die gesamte Bohrlochstrecke ausgeführt, wobei noch keine ausgeglichenen Verhältnisse geherrscht haben (siehe T-Kurve in Fig. 4). Über die offene Malm-Dogger-Bohrlochstrecke wurde eine von ca. 125 °C ziem-

lich kontinuierlich auf 145 °C ansteigende Temperatur gemessen.

Mit Run 4 des Schlumberger-Loggings wurde auch eine Bohrlochseismik (Checkshot) durchgeführt, welche insbesondere für die korrekte Tiefenkalibration des 3D-Modells benötigt wurde. Die Auswertung dieser Messreihe hat ergeben, dass die für die Bohrprognose verwendeten Formationsgeschwindigkeiten des aus dem Processing der 3D-Seismik abgeleiteten PSTM-Geschwindigkeits-Modells z. T. erheblich von den tatsächlichen Werten abweichen (siehe auch Kuhn 2014). In Fig. 7 ist das aus dem Check Shot abgeleitete Geschwindigkeitsprofil der Bohrung GT-1 dargestellt und mit dem 3D-

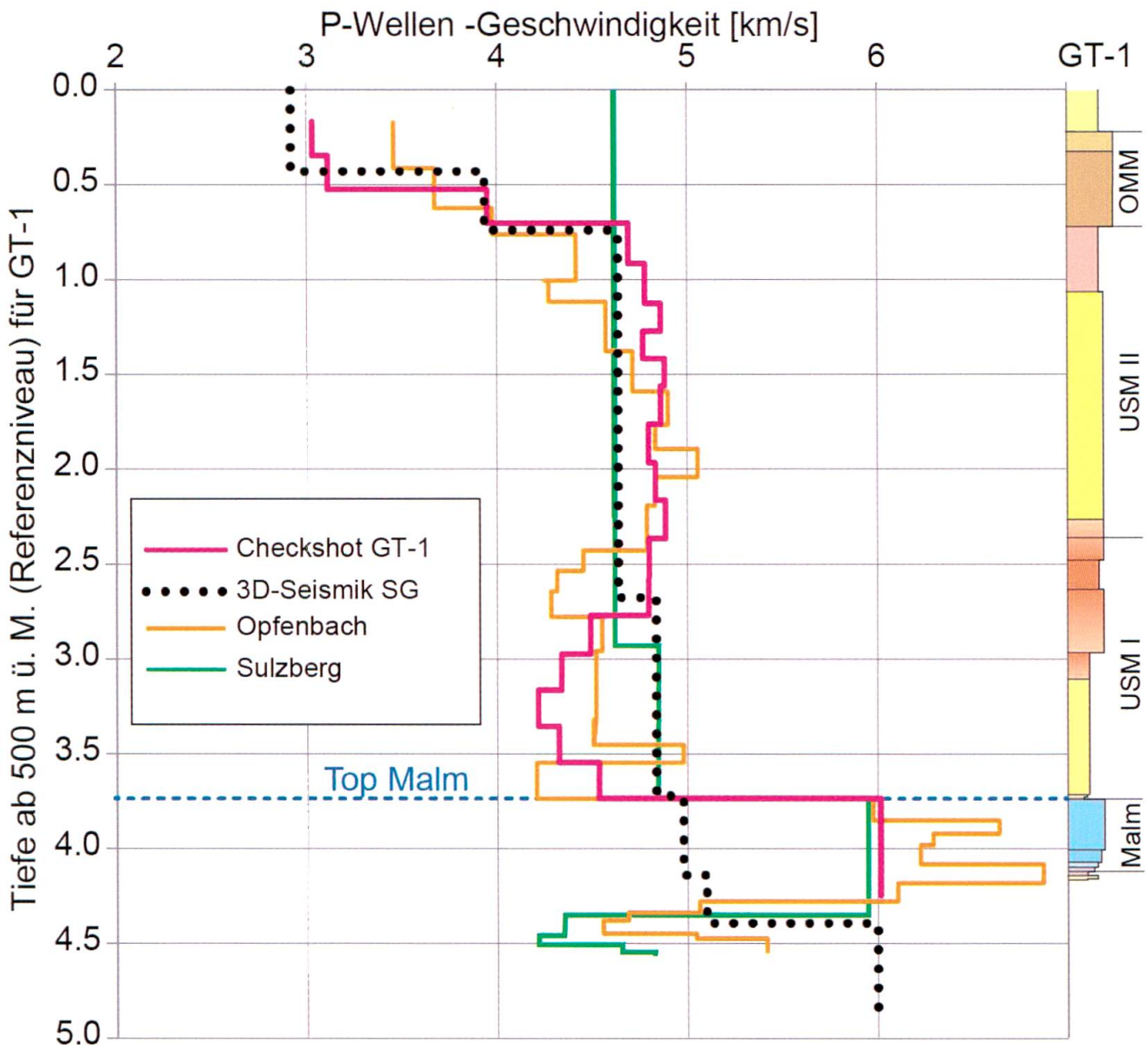


Fig. 7: P-Wellen-Formationsgeschwindigkeiten in GT-1 und Vergleich mit anderen Tiefbohrungen der NE-Schweiz und SW-Deutschlands.

Seismik-V-Modell (schwarz gepunktete Linie) sowie entsprechenden Daten von Referenzbohrungen verglichen. Diese Darstellung zeigt sehr schön, wie gross die Unsicherheiten in Bezug auf die Tiefenumrechnung von Seismikdaten und dann die Prognose von Formationsmächtigkeiten sein können, wenn keine lokalen Bohrdaten verfügbar sind. Besonders die in der tieferen USM I deutlich ausgeprägte Geschwindigkeitsinversion ist ohne lokale Daten kaum prognostizierbar; erstaunlich auch die mit 5 km/sec viel zu niedrige Malm-Geschwindigkeit des 3D-Seismik-V-Modells.

In der Planung wurde vor allem aus Kostengründen darauf verzichtet, Kernstrecken zu realisieren, auch mit dem Hinweis, dass man

durch ein konsequentes Sampling und mit guten geophysikalischen Daten bereits sehr detaillierte lithologische Informationen generieren kann. Um die Gesteinsansprache zumindest in der potenziellen Aquifer-Zone zu optimieren, wurde in Sektion 4 eine Fahrt mit dem Mechanical Sidewall Coring Tool (MSCT) von Schlumberger durchgeführt. Diese Sonde verfügt über ein kleines Bohrggerät, mit welchem aus der Bohrlochwand bis zu 50 horizontale Kerne von ca. 2 × 5 cm entnommen werden können. Die Entnahme erfolgt von unten nach oben, wobei in GT-1 nach dem 36. Kern die Mechanik versagte, sodass der oberste Teil des Malm nicht mehr beprobt werden konnte. Zudem waren von den 36 Proben nur 10 als ganze Kerne

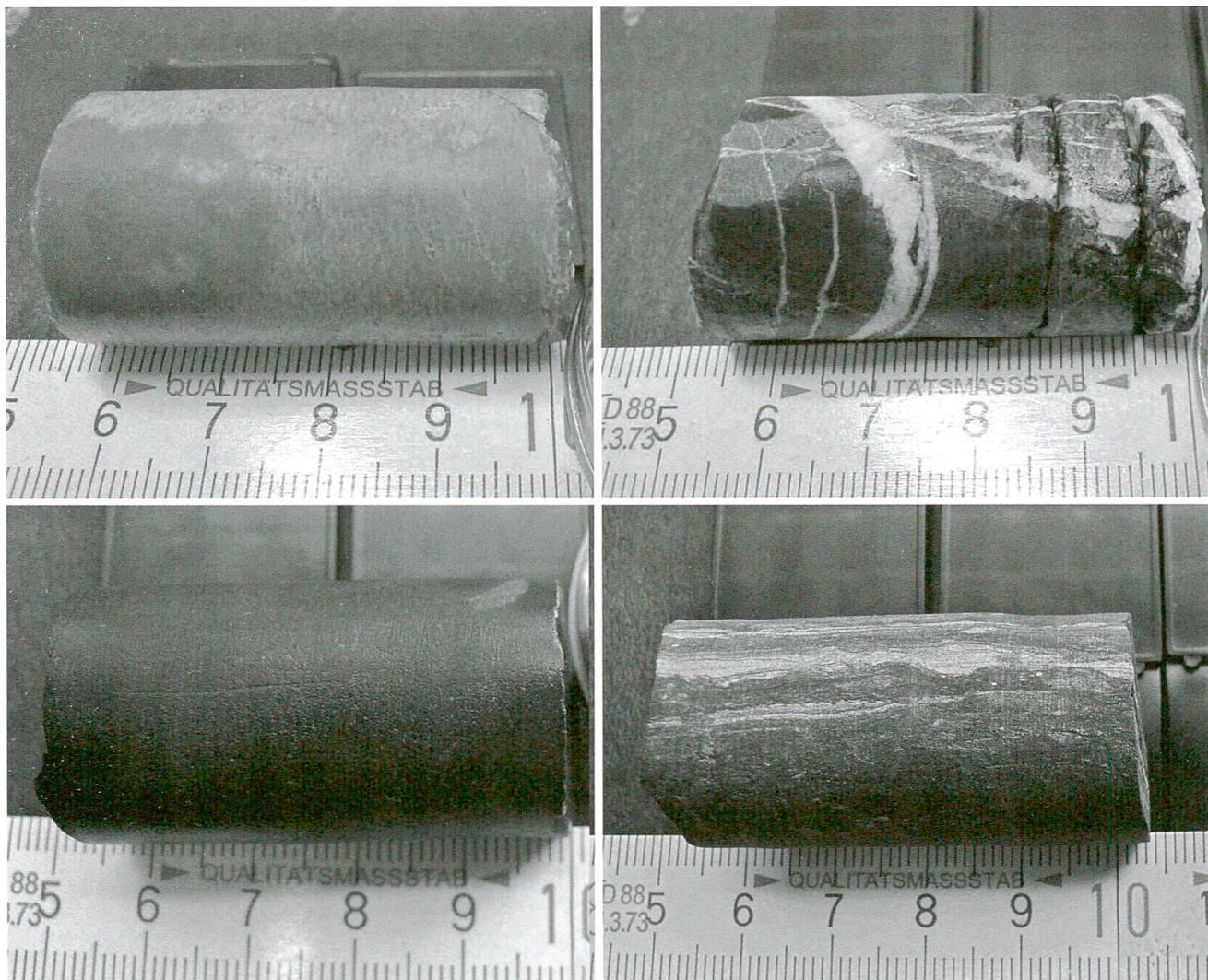


Fig. 8: St. Gallen GT-1: Beispiele von intakten Seitenkernen aus der Malm-Dogger-Strecke. Oben links: heller, mikritischer Kalkstein bei 4'100 m MD. Oben rechts: stark geklüfteter, dunkler Kalkstein aus dem Bereich der Wohlgeschichteten Kalke. Unten links: Dunkler feinsandiger Kalkmergel aus den untersten Impressamergeln. Unten rechts: Laminiertes Feinsandstein aus dem «Oberem Dogger».

erhalten (Beispiele siehe Fig. 8), weitere 11 waren zerbrochen und z. T. unvollständig und bei 15 Proben wurden lediglich Bruchstücke geborgen (Fig. 10). Dennoch stellten diese «Makroproben» eine wertvolle Ergänzung zu den doch sehr kleinen und häufig mechanisch stark deformierten Cuttings dar, welche der Einsatz des PDC-Meissels lieferte. Die Seitenkerne wurden denn auch vielfältig weiter untersucht (Kap. 4.4).

4 Die wichtigsten geologischen Resultate der Bohrung GT-1

4.1 Die Schichtabfolge von GT-1 im Überblick

Fig. 4 zeigt einen Überblick des Bohrprofils mit MD- und TVD-Tiefen der durchteuften Formationsgrenzen, und in Tab. 1 sind die Dimensionen der einzelnen Formationen zusammengestellt. Weil der Bohrfad nur im untersten Abschnitt etwa senkrecht zur Schichtung verläuft (Fig. 3), müssen die wahren Mächtigkeiten berechnet werden (Tab. 1). Daraus ergibt sich, dass mit der 4'450 m langen Bohrung eine Tiefe von 4'252 m unter Terrain erreicht und dabei eine Schichtreihe mit der primären stratigrafischen Gesamtmächtigkeit von ungefähr 4'180 m durchteuft wurde. Gewisse Unsicherheiten verbleiben allerdings für die USM (Untere Süswassermolasse) im Bereich der tektonisch überprägten Dreieckzone, was im Wesentlichen die jüngere USM I (Karbonatreiche Molasse) betrifft (Fig. 3).

Eine ausführliche Beschreibung der Gesteinsabfolge von GT-1 und der weiteren Auswertungen ist im internen Schlussbericht Geologie dokumentiert (Naef & Schlanke 2014) und wurde in Naef (2015), Schlanke (2015) und Steiger (2015) publiziert. Im Folgenden werden diese Daten zusammengefasst.

4.2 Molasse: 4 – 3'992 m MD

Die 4'450 m lange Bohrstrecke (MD) besteht zu 90% aus fluvioterrestrischen und marinen Ablagerungen der Mittelländischen Molasse. Die hier vorgenommene lithostratigrafische Gliederung orientiert sich an den jeweils neuesten Referenzen aus der Literatur, wie sie in der Bohrprognose (Naef 2012) aufgearbeitet und zu einem synthetischen Prognoseprofil zusammengestellt wurden. Wichtig sind dabei vor allem die Erläuterungen zu den neuen Atlasblättern Nesslau (Zaugg & Löpfe 2011) und Ricken (Löpfe et al. 2012), wo die Lithostratigrafie sowohl der Mittelländischen wie auch der angrenzenden Subalpinen Molasse mit Bezug auf den aktuellen Stand des Wissens dargestellt ist.

Für die OSM und die OMM wird auf eine rein lithologische Beschreibung abgestützt, welche dank der grossen Cuttings (Rollenmeissel), der teilweise ausgeprägten Gesteinskontraste und der durchgehend verfügbaren geophysikalischen Logs gut begründet ist. Eine globale Kalibration mit Sedimentpetrografie ist zwar ebenfalls möglich, bleibt aber im Vergleich zur liegenden USM relativ wenig spezifisch.

Die durchwegs in einer distalen, von feinkörnigen Schwemmsedimenten geprägten Vorlandfazies abgelagerten USM-Sequenzen haben über mehr als 3'000 m eine sehr uniforme lithologische Ausbildung und müssen deshalb mit Hilfe von sedimentpetrografischen Kriterien weiter gegliedert werden, wobei die lückenlos verfügbaren Karbonatanalysen (Kalzimetrie) eine tragende Rolle spielen (detailliert in Schlanke 2015).

Obere Süswassermolasse (OSM):

4 – 236 m MD

Feinkörnige, mergelig-tonige Lithologien dominieren klar, während Sandsteine noch etwa 10% ausmachen und Konglomerate nur selten anzutreffen sind. Typisch sind dunkelgraue bis schwarze, siltig-sandige Mergel, welche pflanzliches Material enthalten («Bituminöse Mergel»).

Die Lage bei der Au entspricht paläogeografisch dem Übergangsbereich vom radialen Hörnli-Schutfächer zur Bodenseeschüttung, wo in diesem Niveau durchwegs feinkörnige Lithologien mit Mergeln, Silt- und Tonsteinen vorherrschen (Büchi 1950, Hofmann 1951). Die Grenze zwischen basaler OSM und oberster OMM ist dabei nicht klar definiert; je nach Kriterium kann sie um mehrere Dekameter variieren. Für das Bohrprofil von GT-1 wurde eine rein lithologische Korrelation mit der von Büchi (1955) vorgenommenen Gliederung für die OMM von St. Gallen umgesetzt. Danach entspricht die Konglomerat-

Abfolge zwischen 236 und 250 m Tiefe der Oberen Grenzmagelfluh und gehört damit bereits zur OMM (Detailprofil in Naef 2015).

**Obere Meeresmolasse (OMM):
236 – 768 m MD**

Für die mittelländische Molasse (inkl. aufgerichtete Molasse) wird heute die von Keller (1989) vorgeschlagene Zweiteilung in eine ältere Luzern-Fm. und eine jüngere St. Gallen-Fm. verwendet; diese ersetzt die frühere Gliederung der OMM in das ältere «Burdigalien» und das jüngere «Helvetien».

Die OMM von St. Gallen ist – im Gegensatz

«Wahre Mächtigkeit» [m]	Formation		von MD [m]	bis MD [m]	Länge [m]	Winkel Bohrfad / Schicht ca.	Basis TVD [m ab OKT]	TVD [mü. M]	
4.0	Quartär		0	4	4	90°	4	575	
222.4	Obere Süsswasser Molasse		4	236	232	73.5°	236	343	
106.4	Obere Meeresmolasse	St Gallen-Formation	236	347	111	73.5°	347	232	
403.7		Luzern-Formation	347	768	421	73.5°	768	-189	
354.5	Untere Süsswassermolasse	USM II	Oberaquitane Mergelzone	768	1135	367	75°	1134	-554
1199.4			Granitische Molasse	1135	2520	1385	60°	2436	-1857
627.9		USM I	Karbonatreiche Molasse	2520	3170	650	75°	3041	-2463
789.8			Untere Bunte Molasse	3170	3972	802	80°	3791	-3212
19.7	UMM		3972	3992	20	80°	3809	-3231	
77.7	Malm	Bankkalke	3992	4070	78	85°	3882	-3303	
159.4		Massenkalke	4070	4230	160	85°	4037	-3458	
49.8		Felsenkalke	4230	4280	50	85°	4086	-3506	
71.7		Wohlgeschichtete Kalke	4280	4352	72	85°	4156	-3577	
52.0		Impressamergel + Glaukonitsandmergel	4352	4404	52	90°	4207	-3628	
20.0		Oberer Dogger	4404	4424	20	90°	4227	-3648	
26.0	Dogger	Wedelsandstein + Eisensandstein	4424	4450	26	90°	4252	-3674	
4184.4					4450				

Tab. 1: Tiefen und Mächtigkeiten der erbohrten Formationen von St. Gallen GT-1 (MD: measured depth, TVD: total vertical depth).

zur hangenden OSM und zur liegenden USM – geprägt von kleinräumigen Lithologie- und Mächtigkeitsschwüngen, welche eine vergleichsweise detaillierte lithostratigraphische Gliederung ermöglichen. Dabei spielen die bis zu 25 m mächtigen Nagelfluh-Abschnitte eine hervorragende Rolle, welche insgesamt fast ¼ des 532 m mächtigen OMM-Profiles ausmachen. Dazwischen liegen – oft mit scharfer Grenze – siltig-sandig-tonige Abschnitte, welche vorwiegend flachmarines bis brackisches Milieu anzeigen (Plattensandsteine, Schiefermergel, kohlige Serien; Büchi 1955).

Paläogeografisch entspricht die ganze Abfolge dem Südrand des OMM-Meeres, wo sich Schuttfächer, Deltas, Lagunen und Küstenebenen sowohl lateral wie vertikal überlagerten.

Im Vergleich zu den lithofaziellen Kriterien sind die Möglichkeiten der sedimentpetrographischen Gliederung mit Hilfe von Kalzimetrie und Schweremineralien beschränkt. Signifikant ist lediglich eine OMM-Karbonatfazies, indem diese einen deutlich höheren Dolomit-Anteil aufweist, als die hangende OSM, der Gesamtkarbonat-Anteil (ohne Konglomerate) aber ebenso deutlich geringer ist, als bei der unmittelbar liegenden USM (Schlanke 2015).

Ähnlich wie der Top ist auch die Basis der OMM nicht eindeutig definiert. Die Kriterien Geröllschüttung («Burdigales Basiskonglomerat») und marine Fazies als Anzeiger für OMM einerseits und fluvioterrestrische Bunte Mergel als Anzeiger für USM andererseits überlagern sich auf einer Strecke von mehreren Dekametern (vgl. Ludwig et al. 1949, Eugster et al. 1960). Auch biostratigraphische Argumente fehlen. Wir schlagen deshalb vor, als weitere Kriterien für die Grenzziehung zwischen OMM und USM auch die Farbe sowie die Kalzimetrie zu verwenden. Hellviolette Farben, welche für die terrestrische USM typisch sind, treten erstmals im Abschnitt ab Cuttingprobe 770 m auf. Der konglomeratreiche Abschnitt zwischen 725 und 768 m Tiefe wird deshalb als «Burdigales

Basiskonglomerat» in Sinne von Büchi (1955) betrachtet.

Untere Süßwassermolasse (USM): 768 – 3'972 m MD

Die relativ monotonen, fluvioterrestrischen Mergel-Siltstein-Sandstein-Serien der USM umfassen eine Bohrlochstrecke von 3'204 m. Gemäss Referenzbohrungen im Bodensee-Raum und den aufgeschlossenen Profilen in der angrenzenden subalpinen Molasse wird grob zwischen der älteren «chattischen» oder karbonatreichen und der jüngeren «aquitanen» respektive granitischen USM unterschieden. Mangels klar definierter Formationen bzw. biostratigraphischer Marker werden diese zwei übergeordneten Abteilungen der USM heute mit den neutraleren Begriffen USM I und USM II bezeichnet. Als Massstab für die zeitliche Gliederung dienen dabei magnetostratigraphische Referenzprofile (Kempf et al. 1999; siehe auch Zaugg & Löpfe 2011, Löpfe et al. 2012).

Eine plausible lithostratigraphische Gliederung der USM-Abfolge von GT-1 gelingt anhand sedimentpetrographischer Kriterien (Schlanke 2015). In Fig. 9 ist eine lückenlose Aufzeichnung der Kalzimetrie-Messungen an Cuttingproben wiedergegeben. Diese zeigt sehr schön den Kontrast zwischen den einzelnen Abteilungen, insbesondere die Grenze zwischen der relativ karbonatarmen Granitischen USM II und der karbonatreichen USM I. Es wurden folgende Abteilungen ausgedehnt:

768–2'260 m	USM II, «Aquitaniens»
–1'135 m	<i>Oberaquitanische Mergelzone</i>
–2'525 m	<i>Granitische Molasse</i>
2'525–3'970 m	USM I, «Chattien»
–3'170 m	Karbonatreiche Molasse
–3'970 m	Untere Bunte Molasse

Eine qualitative Eingrenzung der tektonisch beanspruchten Dreieckzone wird anhand der systematischen Auszählung von weissen Kluftkalziten in den Cutting-Proben vor-

geschlagen (blaue Balken im Profil Fig. 9). Aufgrund dieser Daten wird der Tiefenbereich zwischen 2'420 und 3'320 m MD als Dreieckzone s. l. abgegrenzt; ein zentraler Teil (2'645 – 2'810 m) enthält deutlich mehr, nämlich bis zu 20% Kluftkalzite und wird deshalb als Dreieckzone s. str. bezeichnet, in deren oberstem Bereich die Randunterschiebung lokalisiert werden kann. Dieser Befund ist gut mit der Auswertung der 3D-Seismik korrelierbar, kann aber über das quantitative Ausmass der ± schichtparallelen tektonischen Bewegungen in dieser Zone keine genaueren Angaben machen.

Detailliertere Ausführungen zur Stratigrafie, Sedimentpetrografie und Tektonik der USM findet man in Schlanke (2015).

Untere Meeresmolasse (UMM) / Top Malm: 3'972 – 3'992 m MD

Die UMM ist in der subalpinen Molasse der Ostschweiz aufgeschlossen und wird von Zaugg & Löpfe (2011) beschrieben (siehe auch Diem 1986). Es handelt sich um brackische bis marine Ablagerungen des nach NW transgredierenden Molassemeeres, dessen externe Küstenlinie gemäss bisherigen Interpolationen wenig nördlich von St. Gallen verlaufen dürfte (z. B. Bachmann & Müller 1992). Es wurde deshalb mit bis zu einigen Dekametern dieser sich von den hangenden terrestrischen Mergeln der Bunten Molasse deutlich abhebenden, aber ebenfalls feinkörnigen Siliziklastika gerechnet.

Um diese basalen Molasseschichten und dann den Top Malm möglichst frühzeitig zu erkennen, wurde der Probenahme-Abstand ab 3'750 m Bohrtiefe von 5 auf 2.5 m reduziert. Neben der kontinuierlichen Kalzimetrie wurden von diesen Proben auch laufend vor Ort-Dünnschliffe angefertigt, was mit einem Nachgang von ca. 20 m auf die Position des Bohrkopfs eine detaillierte Beurteilung des Bohrkleins erlaubte.

So konnten die ab der Cuttingprobe bei 3'972.5 m MD erbohrten, hellgrauen Kalksandsteine rasch als UMM erkannt werden (Typ Horwer Sandstein). Ab 3'982.5 m domi-

niert ein z. T. pyritisch imprägnierter, hellgrauer Tonmergelstein, welcher mit Vorbehalt als Grisiger Mergel bezeichnet werden kann.

Ab 3'987.5 m wurde mit stark reduziertem Bohrfortschritt und einem Probenahme-Abstand von 1.25 m gearbeitet, um den bald zu erwartenden Top Malm möglichst rasch zu erkennen und dann die Bohrung in den obersten Metern des Mesozoikums zu stoppen (Absetztiefe für die Verrohrung von Sektion 3).

Die lithofazielle Auswertung ergab, dass erstmals in der Probe bei 3'991.25 m Kalkmergel mesozoischer Provenienz erscheinen und die Probe bei 3'992.5 m bereits den für die folgenden Proben typischen, bioklastischen Pelmikrit der distalen Schwäbischen Schwammfazies aufweist. Die lithostratigrafische Grenze Basis Molasse respektive Top Malm wurde deshalb im Einklang mit dem kalzistratigrafischen Befund bei 3'992 m MD festgelegt. Sie liegt damit 52 m tiefer als prognostiziert, was einem Fehler von lediglich gut 1% entspricht.

Gemäss dem Befund aus den Dünnschliffen enthält die Übergangszone Molasse / Malm vererzte Sand-, Silt- und Tonsteine sowie seltene Mikrobrekzien, in deren Kornbestand bereits aufgearbeitete Juragesteins-Klasten auftreten.

Bemerkenswert ist auch der Befund, dass die Proben der tiefsten Molasse bei 3'990 m auffallend viel Kluftkalzit enthalten, was auf eine mögliche tektonische Überprägung dieses lithologischen Übergangs hinweist.

Die ca. 20 m mächtige Abfolge der UMM von St. Gallen GT-1 kann also in einen hangenden Horwer Sandstein und einen liegenden Grisiger Mergel unterteilt werden, welche beide etwa 10 m mächtig sind. Hinweise auf eine Boluston-Formation wurden nicht gefunden.

4.3 Mesozoikum: 3'992 – 4'450 m MD

Zwischen der Basis der Molasse bei 3'992 m und der Endtiefe bei 4'450 m wurden noch 412 m Malm und 46 m Dogger erbohrt (Fig. 10).

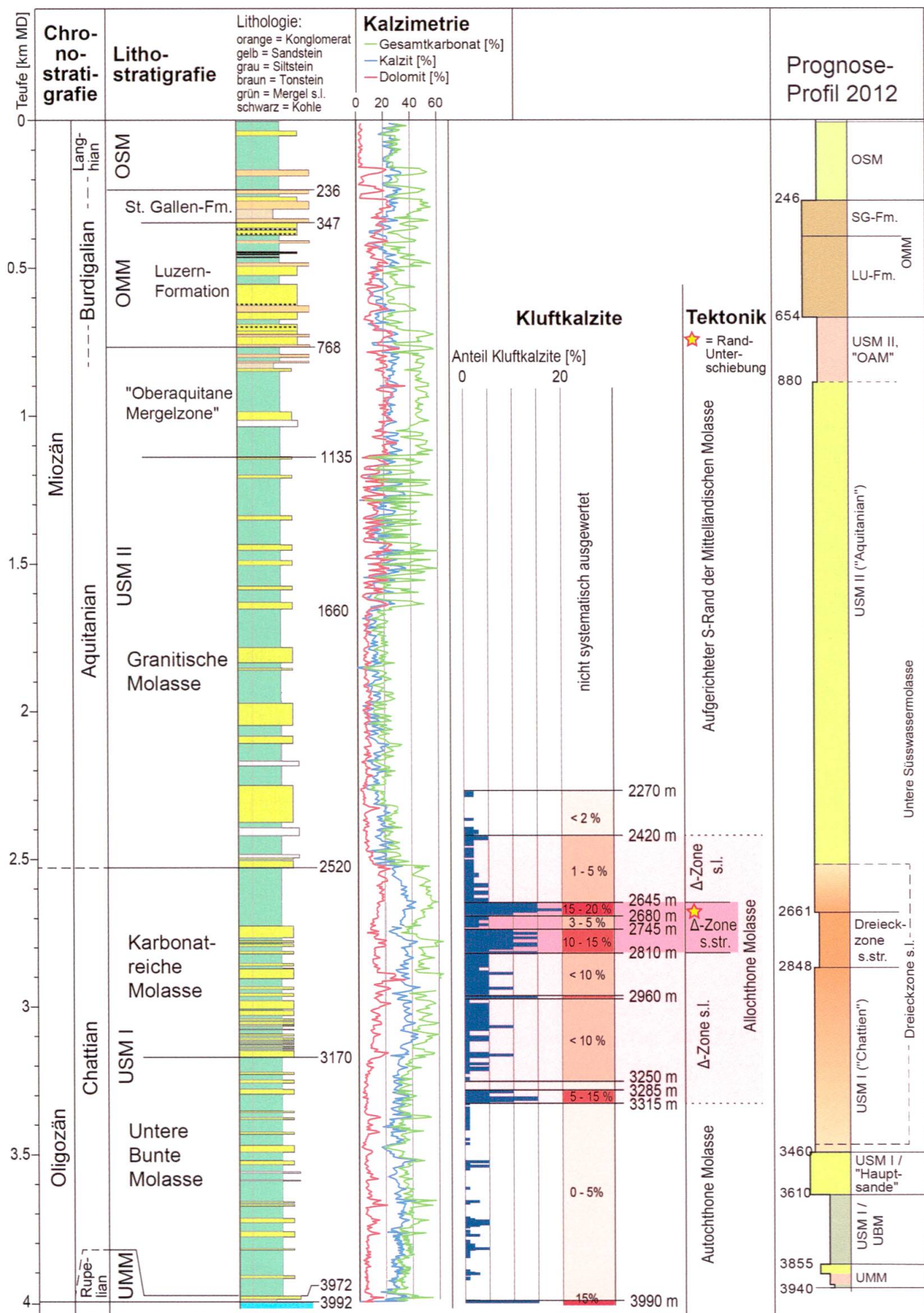


Fig. 9: Vereinfachtes lithostratigrafisches Profil der Molasse von St. Gallen GT-1 mit Kalibration durch Kalzimetrie und Abgrenzung der Dreieckzone aufgrund des relativen Kluftkalzit-Anteils in den Cuttingproben; rechts das Prognoseprofil aus Naef 2012.

Diese 8½"-Bohrstrecke (Sektion 4) wurde intensiv untersucht und getestet, wodurch eine Fülle von Informationen gesichert werden konnte.

Die Beprobung der Malm-Dogger-Strecke erfolgte durchgehend im 2.5 m-Abstand, am Übergang Molasse / Malm teilweise noch enger. Von jeder zweiten Spülprobe wurden vor Ort-Dünnschliffe hergestellt und laufend ausgewertet, sodass die lithofazielle Beschreibung und Gliederung der Malm-Dogger-Abfolge vor allem auf der Auswertung dieser Dünnschliffe beruht (Steiger 2014, 2015). Zusätzliche Informationen lieferten die Seitenkern-Proben, von denen ebenfalls mehrheitlich Dünnschliffe und einige Anschliffe erstellt wurden.

Das lithostratigrafische Prognoseprofil stützte sich auf Referenzbohrungen östlich des Bodensees (Markdorf, Opfenbach, Tettwang, Sulzberg) und für die Mächtigkeiten auf das PSTM-Geschwindigkeitsmodell aus der 3D-Seismik (Naef 2012). Erwartet wurde ein relativ geringmächtiger Malm in helvetischer Ausbildung mit etwa 300 m mächtigen mikritischen Kalken vom Typ Quintnerkalk (vgl. Schneider 1962); angetroffen wurde aber eine gut 350 m mächtige Kalksteinabfolge in schwäbischer Schwammkalk-Fazies gefolgt von 50 m zunehmend tonreichen Impressamergeln als basaler Abschnitt des Malm. Im Liegenden wurden noch 46 m tonig-sandige Dogger-Lithologien erbohrt, die ebenfalls gut mit den Verhältnissen im Bodenseeraum weiter nördlich korreliert werden können (Erdölbohrungen am Thurgauer Seerücken: Kreuzlingen, Berlingen und Herdern). Die im Folgenden umgesetzte Einteilung beruht auf dem Vorschlag von Bläsi (2013), und wird durch die detaillierte Fazies-Auswertung von Steiger (2014, 2015) bestätigt. Fig. 10 fasst die Malm-Dogger-Stratigrafie und wichtige Daten der weiteren Auswertung zusammen.

Malm: 3'992 – 4'404 m MD

Die von 3'992 – 4'280 m angetroffene Kalksteinabfolge kann in drei faziell unterschiedliche Abteilungen gegliedert werden. Bis ca.

4'070 m dominieren hellgraue bis hellbeige, mikritische Kalksteine mit Schwammnadeln, Schälchen und weiteren Bioklasten, Tuberoïden und Peloiden (Fig. 11a); untergeordnet erkennt man Pelsparite mit Einfachhoiden und pelmikritischen Krusten. Dabei handelt es sich um eine Beckenkalk- bis Bankkalk-Fazies im distalen Bereich von Schwammriffen. Darunter folgen bis 4'280 m hellbeige, vorwiegend mikrosparitische Kalksteine als Pelloosparite mit Intraklasten und daneben Intramikrite mit Peloiden, Schwammnadeln und Tuberoïden. Bei diesem gut 200 m mächtigen Abschnitt dürfte es sich um Bankkalk- bis Massenkalkfazies im proximalen Bereich von Schwammriffen (Fig. 11b,c) handeln. Eine genauere zeitliche Einteilung ist nicht möglich, es dürfte sich um ein Äquivalent der schwäbischen Massenkalk-Formation handeln (Geyer et al. 2011).

Von 4'280 bis 4'352 m folgen graue bis dunkelgraue mikritische Kalksteine mit tonigen Styolithen und Tonflasern. Es dominiert Kieleschwamm-Fazies (Fig. 11d) vorwiegend als Intramikrite bis Pelmikrite, untergeordnet Pelloosparite. Auffallend ist reichlich feinverteilter Pyrit, viel Klufthalzit und z. T. eine mikrobrekziöse Ausbildung. Die auffallenden millimeterdünnen Mergelfugen und tonigen Styolithen sind typisch für distale Schwammkalk- bis Beckenkalk-Fazies; sie werden von ihrer Ausbildung und Lage im Liegenden des Massenkalks den Wohlgeschichteten Kalken zugeordnet.

Von 4'352 m bis zur Basis Malm bei 4'402 m zeigen die Proben dunkelgraue, mikritische Kalksteine im Wechsel mit dunkelgrauen, siltigen, teilweise dolomitischen Kalkmergeln in Schwammfazies mit feinverteiltem Pyrit. Ab ca. 4'380 m folgen dann dunkelgraue bis schwarze, siltige Mergel bis Tonmergel mit feinen biodetritischen Komponenten, die zunehmend Glimmer führen und ebenfalls teilweise dolomitisch sind. Zudem tritt ab SP 4'397.5 m erstmals Glaukonit auf. Diese zunehmend tonreicher werdende Sequenz an der Basis des Malm wird mit den Impressamergeln korreliert.

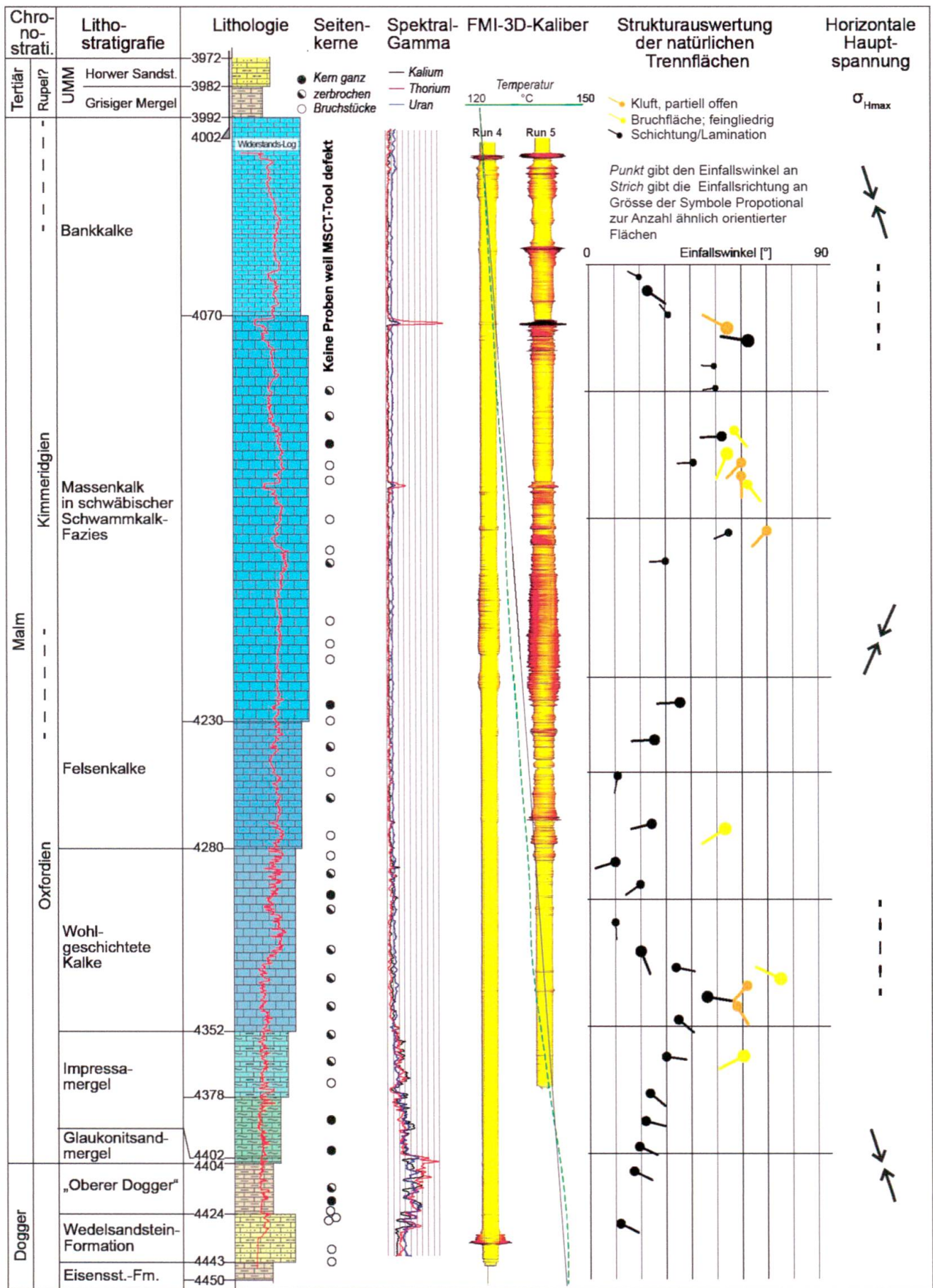


Fig. 10: St. Gallen GT-1: Stratigrafisches Profil der Malm-Dogger-Abfolge, korreliert mit Daten und Auswertungen der geophysikalischen Bohrlochmessungen. Erläuterungen siehe Text.

Die Probe bei 4'405 m besteht aus Glaukonit führenden Mergeln, welche im Südschwäbisch - Nordschweizerischen Raum als diagnostisch für den Untersten Malm gelten

und als Glaukonitsandmergel bezeichnet werden. Ein wirklicher Nachweis kann aber nicht geführt werden. Die lithostratigraphische Grenze zwischen Dogger und Malm

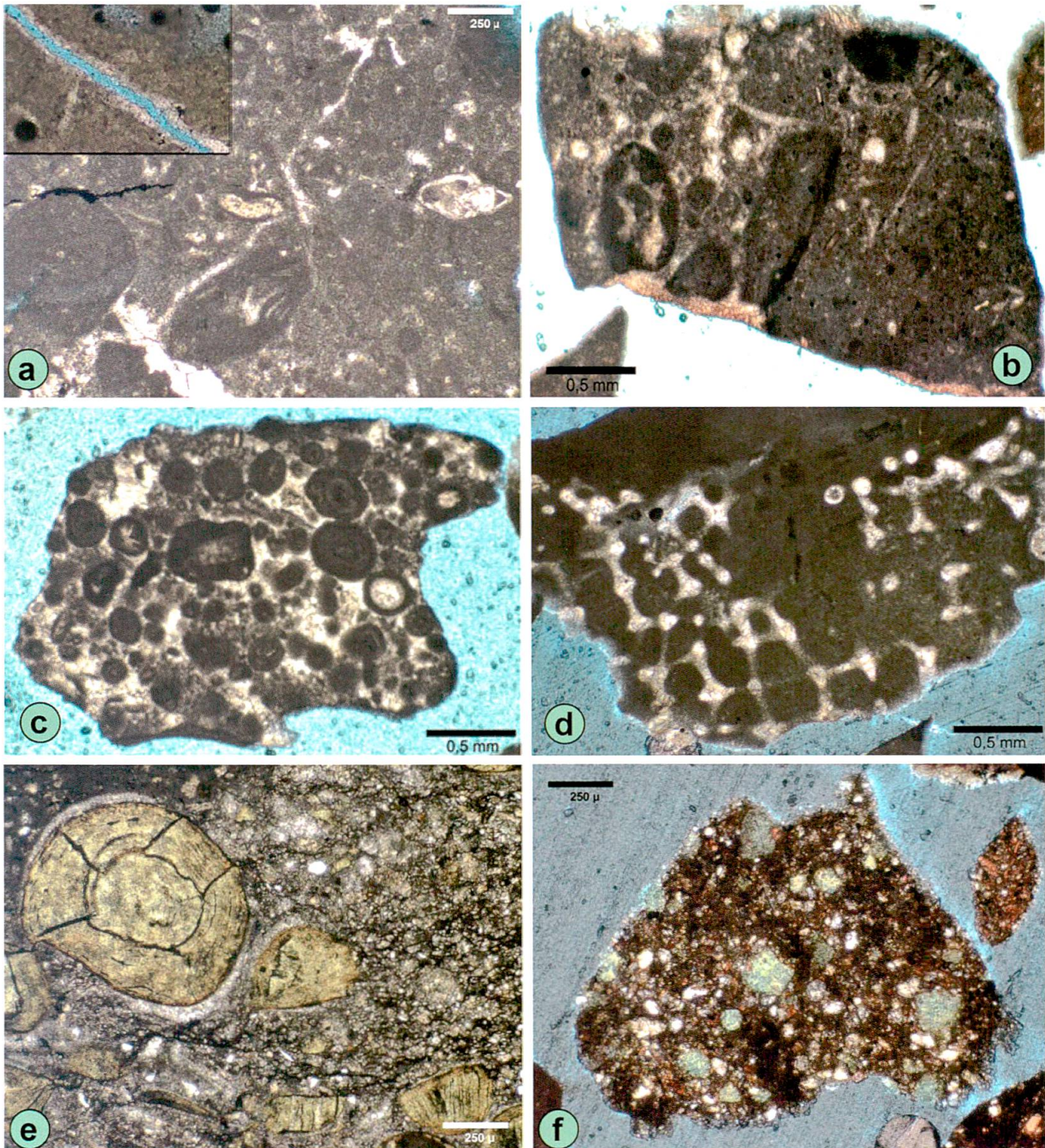


Fig. 11: St. Gallen GT-1: Mikrofazies der Malm-Dogger-Abfolge in Cutting- und Seitenkern-Dünnschliffen. a) Pelmicrit mit Kalzitadern und Mikrostylolithen mit Pyrit, Beckenfazies der Bankkalke [Cutting, 4'035 m MD]; b) Komponentenreicher mikritischer Kalk vom Typ Wackestone mit Tuberoiden und Fossilresten aus der Umgebung von Schwammriffen [Cutting, 4'205 m MD]; c) Oolithischer Pelsparit mit Schalenresten und Intraklasten aus dem Bereich der Felsenkalke [Cutting, 4'270 m MD]; d) Hexactinellides, kalzitisiertes Kiesel Schwamm skelett in Mikritmatrix aus den wohlgeschichteten Kalken [Cutting, 4'325 m MD]; e) Geschrunpftes und kompaktiertes Eisenooid mit internen Brüchen und Kalzit-Zementen an Ober- und Unterseite [Seitenkern, 4'414 m MD]; f) Feinsandiger Kalkmergel mit Glaukonitkörnern [Cutting, 4'415 m MD). Alle Bilder aus Steiger 2014.

bleibt deshalb im Bereich von wenigen Metern offen.

Dogger: 4'404 – 4'450 m MD

Typisch für die Dogger-Formationen des Bodenseeraums und der Nordschweiz sind Eisen-Ooide, teilweise auch (diagenetische) grüne Chamosit-Ooide (Fig. 12e). Diese treten erstmals in der Cutting-Probe bei 4'407.5 m auf.

Von 4'404 – 4'424 m dominieren dunkle bis schwarze, siltige und glimmerführende Tonsteine, die schwach karbonatisch sind und teilweise Glaukonit führen; untergeordnet kommen Mergel (Fig. 11f) und Kalksteine vor. Im Dünnschliff fallen grüne Chamosit-Ooide in mikrobioklastischer Beckenfazies mit Schwammresten auf; bei 4'415 m tritt *Protoglobigerina* auf. Dieser eher tonreiche oberste Abschnitt des Doggers entspricht etwa dem schwäbischen Braunjura delta bis zeta und wird hier informell als «Oberer Dogger» bezeichnet.

Der untersten Bohrlochabschnitt von 4'424 – 4'450 m besteht aus hellen bis weissen Sandsteinen, die unterschiedlich karbonathaltig, teils biodetritisch sind. Dazwischen findet man schwarze, siltige Tonsteine bis Tonmergel mit Glaukonit und Glimmer und teilweise deutlicher Kluftporosität. Sie werden mit Vorbehalt als Wedelsandstein-Eisen-sandstein-Abfolge bezeichnet (Braunjura beta und gamma).

4.4 Weitergehende Auswertung der Malm-Dogger-Strecke

Um die potenziellen Aquiferzonen und die lokale Tektonik der Malm-Dogger-Strecke genauer einschätzen zu können, wurden die verfügbaren Daten (Cuttings, Seitenkerne, Wireline-Logging) weiter untersucht und interpretiert. Diese Auswertungen erfolgten extern durch Dritte und dauerten teilweise bis weit über die operationelle Phase hinaus. Vordringlich waren zuerst einmal konkrete Hinweise auf tektonisch gestörte Zonen, wo gemäss Explorationskonzept mit erhöhten

Durchlässigkeiten gerechnet werden konnte. Deshalb wurden die geophysikalischen Logs unmittelbar nach Abschluss des Wireline-Loggings durch die Firma BLM (2013) im Hinblick auf «potenziell hydrogeologisch aktive Zonen» ausgewertet. Dabei spielt das FMI-Log eine zentrale Rolle, weil damit die Schichtlage, die Klüftigkeit und auch tektonische Störungen der Gesteinsabfolge ermittelt werden können. Zudem ergeben die Daten ein detailliertes, im Raum orientiertes Abbild der Bohrlochwand, woraus sich wiederum wichtige Rückschlüsse auf das herrschende lokale Spannungsfeld im Nahbereich des Bohrlochs ergeben (sog. Breakout-Analyse). Zusammenfassende Resultate dieser Strukturuntersuchungen sind in Fig. 10 dargestellt.

Es ist offensichtlich, dass das Bohrloch durch einige diskrete Zonen und auch grössere Abschnitte mit auffallender Zerrüttung gekennzeichnet ist (Fig. 10: rote bis dunkle Bereiche in der 3D-Kaliber-Darstellung). Wichtig ist auch die Tatsache, dass die Schichtlage nur im untersten Abschnitt ab ca. 4'300 m MD dem erwarteten Einfallen nach SE entspricht, im Bereich der Malmkalken aber mehrheitlich in westliche Richtungen und teilweise ziemlich steil einfällt. Diese «Anomalie» kann damit erklärt werden, dass das Bohrloch hier nahe an einer tektonischen Störung verläuft, wo die Schichtlage gestört ist und deshalb deutlich vom regionalen Trend abweicht. Die aus den Bohrlochrandausbrüchen ermittelte Orientierung der horizontalen Hauptspannung entspricht im Obersten Malm sowie ab ca. 4'300 m MD der erwarteten NNW-SSE-Ausrichtung (vgl. Kastrup et al. 2004, Reinecker et al. 2010), weicht aber im mittleren Abschnitt signifikant von diesem regionalen Trend ab, was ebenfalls auf lokale Spannungsumlagerungen im Bereich von Verwerfungen der SVZ hinweist.

Auch der Verlauf der Temperaturkurve, welche zwei Tage nach Bohrende mit Logging-Run 4 aufgenommen wurde (Fig. 4 und 10), hat wichtige Indizien für hydraulisch aktive Zonen gebracht: Abschnitte, wo die Tempe-

ratur relativ wenig ansteigt oder sogar zurückgeht, weisen auf Zuflusszonen hin, weil zu vermuten ist, dass dort (relativ kühle) Spülung verloren ging, und nun langsam wieder zurückfliesst.

Auf Grund all dieser Hinweise wurde als wichtigste Vorgabe für die Testarbeiten angenommen, dass bei ca. 4'070 m MD eine diskrete, nach WNW einfallende Kluftzone oder Verwerfung vorliegt, welche auch durch die ausgeprägte Thorium-Anomalie des spektralen Gamma-Logs bestätigt wird. Ein grösserer gestörter Abschnitt in den unteren Malmkalke (ca. 4'300 – 4'350 m), wo die Schichtlagen auffallend variieren und bis 50° steil einfallen und die Seitenkerne stark mit Kalzitadern durchsetzt sind, musste ebenfalls als tektonisch gestörter und deshalb potenziell hydraulisch aktiver Abschnitt in Betracht gezogen werden (Fig. 10). Auch im Doggersandstein gibt es diverse Hinweise auf potenzielle Zuflüsse: Hier ist die Temperaturkurve sehr steil und das Kaliber der Bohrlochwand lokal stark zerrüttet; zudem weisen die Cuttings Anzeichen von Kluftporosität auf, und während des Bohrens wurde am Top Doggersandstein ein deutlich erhöhter Gaszutritt gemessen.

Eine spezifische Auswertung der Cuttings durch Wolfgramm et al. (2014) bestätigte diese Befunde und wies zusätzlich auf mögliche Zuflüsse im Tiefenbereich von 4'145 bis 4'215 m hin.

Für die weitere Auswertung dieser Erkenntnisse wurden auch die petrophysikalischen und felsmechanischen Parameter der Gesteinsabfolge ermittelt. Diese können teilweise direkt durch das Wireline-Logging gemessen, teilweise auch daraus berechnet werden. Um diese Messungen besser zu kalibrieren, wurden am Stück erhaltene Seitenkerne im Labor weiter untersucht (geomecon 2014). Die Ergebnisse zeigen signifikant eine aussergewöhnlich hohe Festigkeit (Kohäsion) der Malmkalke, müssen aber wegen der geringen Probengrösse insgesamt als eher diffus und wenig aussagekräftig angesehen werden.

5 Die Test- und Sicherungsarbeiten im Malmkalk-Aquifer

5.1 Erste Phase mit Gasausbruch und seismischem Ereignis

Gemäss Planung war nach dem Erbohren der potenziellen Aquiferzone im Malm diese mit geeigneten Stimulations- und Testverfahren zu erschliessen, d. h. an das Verwerfungssystem der SVZ anzuschliessen. Dazu sollte zuerst mit einer Säuerung das Bohrloch gereinigt und die vorhandenen Wegsamkeiten verbessert werden, um dann mit einem Airlift-Fördertest die Ergiebigkeit des Aquifers zu ermitteln.

Weil die Spülungsparameter während des Bohrens kaum Hinweise auf hydraulisch aktive Zonen aufzeigten, waren die aufgrund der Datenauswertung ermittelten potenziellen Zuflusszonen (Kap. 4.4) erst einmal rein theoretischer Natur. Es musste damit gerechnet werden, dass die eingegebene Säure durch die Formation gar nicht aufgenommen werden kann. Deshalb wurde kurzfristig beschlossen, dies vorgängig mit einem Injektionstest zu prüfen.

Am 14. Juli wurden innerhalb von ca. 2 Stunden mit stufenweise steigenden Pumpraten von 5 bis maximal 50 l/sec insgesamt 175 m³ Wasser in die Formation verpresst. Der dabei beobachtete Druckanstieg bis ca. 90 bar und die rasche, stufenlose Druckerholung nach Ende der Injektion zeigten, dass das Testintervall zumindest die erhofften Wegsamkeiten aufweist. Allerdings wurden bereits während der Injektion erste seismische Ereignisse mit maximaler Magnitude von 0.9 registriert. In der Folge traten Unterdrucke und damit statische Spülungsverluste auf, die bis zum Beginn der Säuerung andauerten.

Nach diesem erfolgreichen Injektionstest konnten die zwei vermuteten Kluftzonen im Malmkalk nachhaltig mit verdünnter Salzsäure behandelt werden. Am 17. Juli wurde zuerst die tektonisch beanspruchte Zone im Bereich der wohlgeschichteten Kalke (Injek-

tionsstrang bei 4'325 m MD) mit ca. 75 m³ 15%-iger Salzsäure und danach etwa ebenso viel Frischwasser erfolgreich behandelt, d. h. mit ähnlichem Druckverlauf wie beim vorgängigen Injektionstest. In einem zweiten Schritt wurde danach die vermutete Kluffzone bei ca. 4'070 m MD (Injektionsstrang bei 4'040 m MD) mit ebenfalls 75 m³ Säure behandelt. Dabei zeigte sich schon nach kurzer Zeit, dass sowohl Steig- wie Ringraumdrücke rasch abfielen, d. h. die Säure nachhaltig injiziert werden konnte. Im Gegensatz zur ersten Säuerung entwickelte sich die Druckerholung nach Abschluss der vorgesehenen Injektion aber unerwartet langsam, sodass nochmals mit 30 m³ kaltem d. h. «schwerem» Frischwasser nachgespült werden musste.

Anschliessend wurde der geplante Reinigungslift im offenen Bohrloch vorbereitet. Am 18. Juli wurde im Bohrloch ein Ruhewasserspiegel von 23.8 (morgens) und 39.56 m ab OKT (abends) gemessen. Nach Ausbau des Säuerungsstrangs am Morgen des 19. Juli lag er bei 73.6 m ab OKT. Danach erfolg-

te der Einbau des Airliftstrangs mit Ausbläser in 653 m Tiefe und gegen 11 Uhr die Einfahrt der Wireline-Drucksonde. Dabei kam es innerhalb kurzer Zeit zu einem unerwarteten Druckaufbau im Bohrloch, der zu einem Gas/Wasser-Austritt aus dem Steigraum führte. Um die Situation kontrollieren zu können, beschloss man, das Messkabel zu kappen und die Bohrung einzuschliessen; mittlerweile hatte sich ein Kopfdruck von ca. 85 bar aufgebaut (Fig. 12, Pkt. 2). Weil der Druck auch im geschlossenen Bohrloch weiter anstieg, wurde ab ca. 15 Uhr versucht, mit dem Einpumpen von Frischwasser in den Ringraum den weiteren Druckaufbau zu stoppen. Diese Aktion war rasch erfolgreich und führte bei maximalen Pumpraten von ca. 22 l/sec bis gegen 22 Uhr zu einem Druckabbau auf ca. 25 bar. Bis dahin waren etwa 300 m³ Wasser, d. h. etwas mehr als das Bohrlochvolumen von ca. 260 m³ injiziert. Bis am frühen Morgen gegen 4 Uhr konnte der Druck aber trotz weiterer Wasser-Injektionen nicht weiter gesenkt werden, die Tendenz war eher steigend (Fig.12).

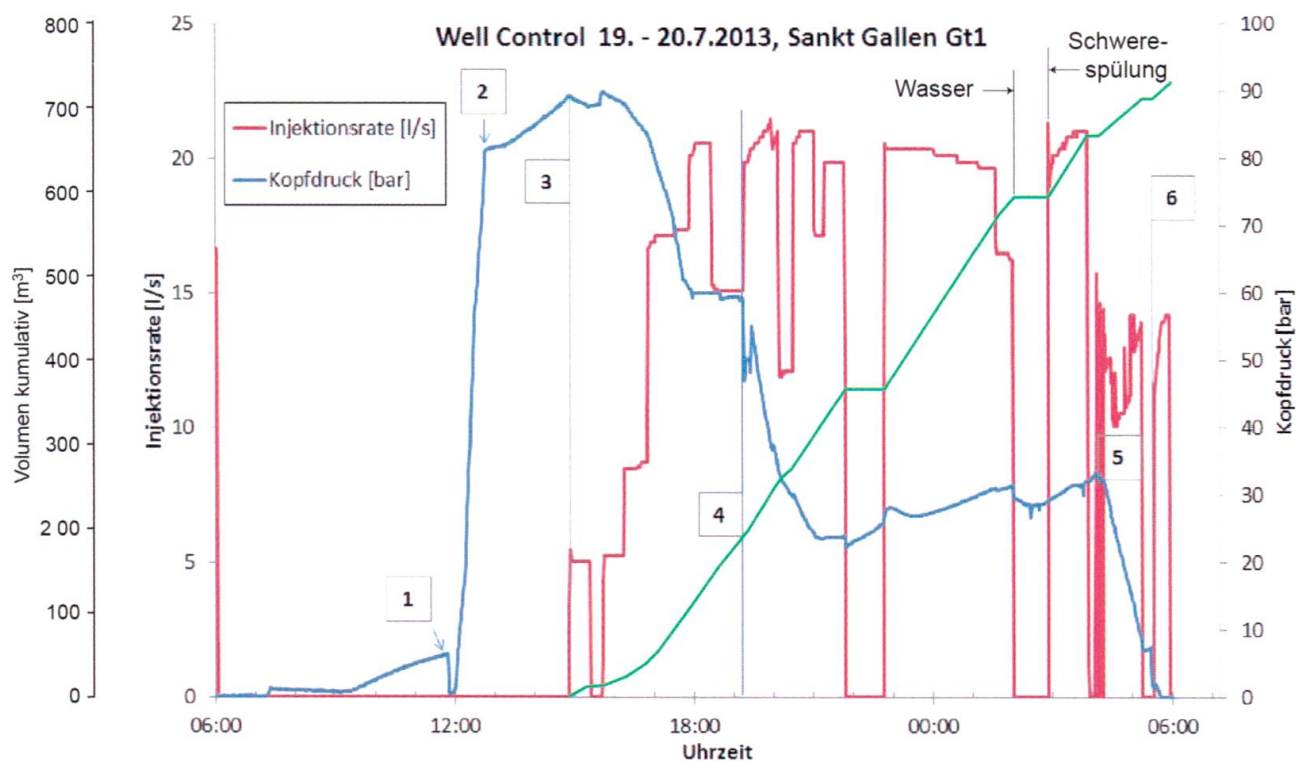


Fig. 12: Grafische Darstellung des Ablaufs der Ereignisse vom 19./20. Juli 2013. Grafik aus Wolfgramm et al. 2014, ergänzt. Rot = Injektionsrate, blau = Kopfdruck, grün = injiziertes Volumen kumulativ.

In der Zwischenzeit wurde schwere Spülung mit einer Dichte von 1.32 g/cm^3 konditioniert. Diese verpumpt man nun mit geringerer Rate über den Steigraum, was eine Kopfdruckabsenkung von 31 auf 7 bar bewirkte. Mit Erreichen der 7 bar ereignete sich um 05:30 Uhr während eines kurzen Pumpenstillstands ein Erdbeben der Magnitude 3.5, mit gleichzeitigem und schlagartigem Abfall des Ringraumkopfdruckes auf 2 bar (Fig. 12, Pkt. 6). Nach weiteren 15 Minuten Pumparbeiten war die Bohrung sowohl im Ring- wie auch im Steigraum drucklos. Insgesamt waren während dieser Well-Control Massnahme 544 m^3 Wasser und 105 m^3 schwere Kaliumkarbonatpülung verpumpt worden, was etwa dem zweieinhalb-fachen Bohrlochvolumen entspricht.

Aufgrund dieser Zusammenhänge muss angenommen werden, dass bereits die Säure-Stimulation und dann vor allem die Totpump-Arbeiten vom 19./20. Juli eine generelle Destabilisierung des Gebirges verursachten, was sich rasch in lokaler mikroseismischer Aktivität ausdrückte. Diese konnte dank dem eigens für das Projekt installierten seismischen Überwachungsnetz detailliert aufgezeichnet werden und kumulierte am frühen Morgen des 20. Juli im allseits bekannten seismischen Ereignis mit der Magnitude 3.5, gefolgt von weiterer Mikroseismizität in grosser Anzahl.

Als Folge der schweren Spülung und der Spannungsentladung durch das Erdbeben wurden im nun beruhigten Bohrloch grosse Spülungsverluste von mehreren Kubikmetern pro Stunde festgestellt, d. h. es floss nun immer mehr Spülung in die Formation, was das Auftreten von weiterer seismischer Aktivität womöglich begünstigte. Ohne laufendes Nachfüllen der verlorenen Spülung hätte sich aber dank der Druckabsenkung im Bohrloch die Gefahr eines erneuten Gasausbruchs wieder erhöht. Um eine Eskalierung dieser sehr instabilen Situation zu verhindern, mussten in erster Priorität die Verluste bekämpft werden, was mit dem Einbringen grosser Mengen von Verstopfungsmaterial

(Kalkgranulat) geschah. Damit konnte die Bohrung zwar nach einigen Tagen und einem gesamten Spülungsverlust von ca. $2'400 \text{ m}^3$ hydraulisch stabilisiert werden; als Folge dieser Massnahmen wurde das unverrohrte Bohrloch der Sektion 4 aber wieder vollständig aufgefüllt.

Nach einer mehrere Wochen dauernden Stillstandsphase mit Begutachtung der Projektrisiken und -optionen wurde beschlossen, die Verstopfungszone wieder aufzufahren, d. h. zu räumen, um die Testarbeiten nach Kohlenwasserstoff-Standards als Gas-Wasser-Fördertest auszuführen.

5.2 Zweite Phase mit Verrohrung und Gas-Wasser-Test

Die Räumarbeiten gestalteten sich anspruchsvoll, wurden sehr vorsichtig durchgeführt und immer wieder unterbrochen, um die mit den Aktivitäten zusammenhängende Mikroseismizität möglichst gut verstehen zu können. Dabei konnte teilweise, aber nicht generell, eine signifikante Korrelation zwischen Arbeiten mit eher injektivem Charakter (z. B. Arbeiten auf Sohle) und erhöhter Seismizität sowie umgekehrt Arbeiten mit eher extraktivem Charakter (z. B. Rückzug des Gestänges) und seismischer Ruhe festgestellt werden. Mit zunehmender Nachbohrtiefe zeigte sich eine generelle Zunahme der laufenden Spülungsverluste und auch der Gaskonzentration in der Spülung (bis max. 68 Volumen%), was mit einer entsprechenden Zunahme der mikroseismischen Ereignisse verbunden war. Bei einer Tiefe von $4'387 \text{ m MD}$, d. h. kurz vor Erreichen der Basis Malm wurde aufgrund dieser Zusammenhänge beschlossen, die Aufbohrarbeiten aus Sicherheitsgründen abubrechen.

Es folgten weitere Nachräum- und Freispülarbeiten im offenen Bohrloch und dann ein fünfter Logging-Run mit unter anderem der Aufnahme eines zweiten FMI der Bohrlochwand (Fig. 10). Zur Sicherung des Bohrlochs wurde das Testintervall danach mit einem

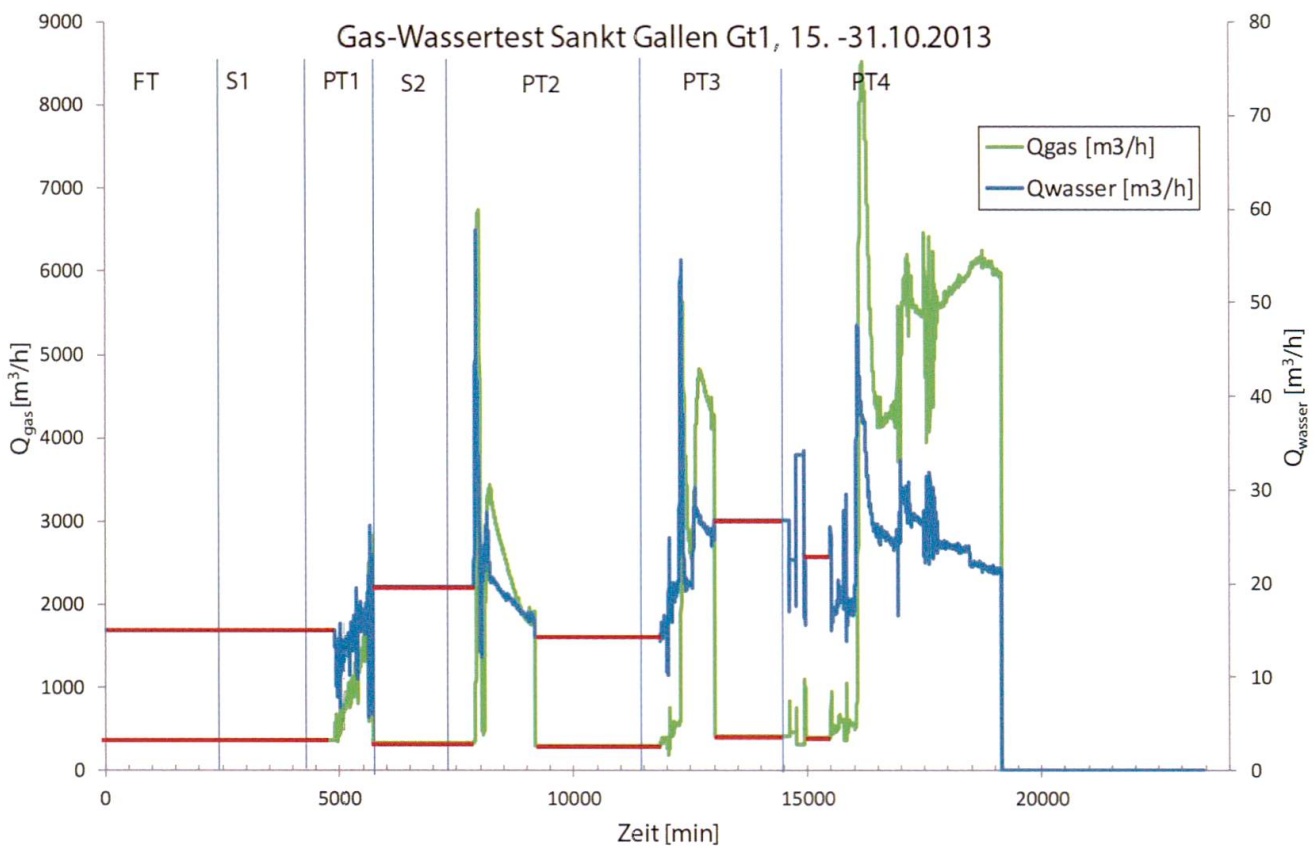
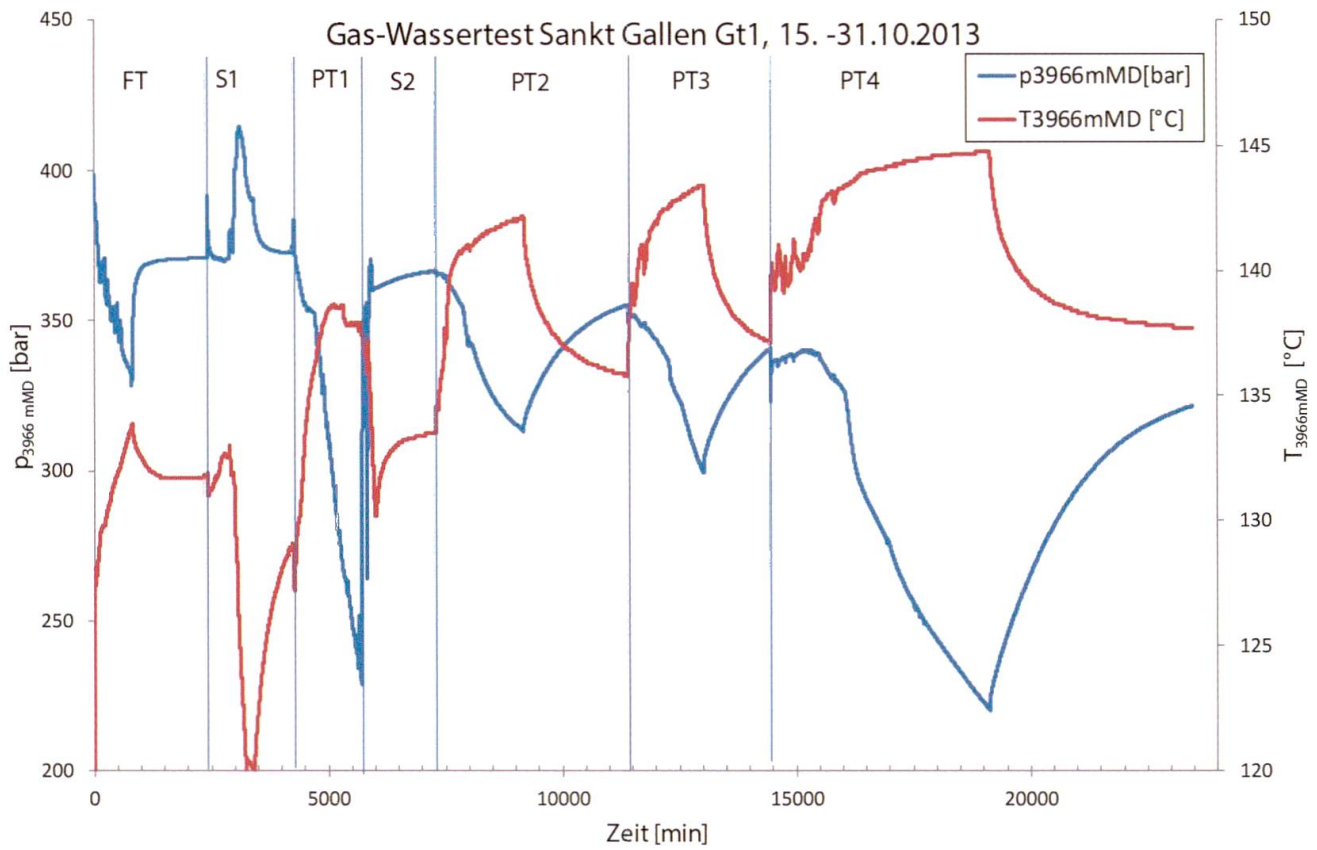


Fig. 13: Übersicht der wichtigsten Parameter des Gas-Wassertests vom 15. bis 31. Oktober 2013. Oben: das Zusammenspiel von Druck (blau) und Temperatur (rot) im Bereich Top Reservoir. Unten: Förderraten von Wasser (blau) und Gas (grün) während der vier Produktionstests (FT = Fördertest, S1 & S2 = Säuerungen, PT1–PT4 = Produktionstests). Grafik aus Wolfgramm et al. 2014.

gelochten 7"-Produktionsliner inkl. nach oben abschliessendem Sicherheitspacker ausgebaut. Seit Aufnahme der Räumarbeiten gingen insgesamt nochmals ca. 1'600 m³ Salzpülung (spez. Gewicht 1.06 bis 1.08 kg/l) in der Formation verloren, respektive waren notwendig, um den laufenden Gasdruck unter Kontrolle zu halten. Die kumulativen Verluste auf der Malm-Dogger-Strecke betragen vor Beginn des Gas-Wasser-Tests also ca. 4'000 m³.

Das so geräumte und gesicherte Bohrloch stand nun für den geplanten Gas-Wasser-Produktionstest zur Verfügung. Die Förderung des Gas-Wasser-Gemisches wurde aus Sicherheitsgründen mit Stickstofflifts über Coiled-Tubing angefahren. Nachdem ein initialer Reinigungsift die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des installierten Systems bestätigte, wurde die Teststrecke im Malm nochmals mit 15 %-iger Salzsäure behandelt. Mit den folgenden Stufentests konnte ein Gemisch aus Formationswasser, injizierter Salzpülung und vor allem einem hochwertigen Erdgas (ca. 94% Methan) gefördert werden, wobei die Produktionsrate bis zum Abschluss des vierten, 50 Stunden dauernden Tests zunehmende Tendenz anzeigten. Insgesamt konnten in dieser zweiten Testphase kontrolliert ca. 3'500 m³ Wasser und 400'000 m³ Erdgas gefördert werden.

In Fig. 13 sind der Druck und Temperaturverlauf sowie die Förderraten für Wasser und Gas während dieser Testphase vom 15. bis 31. Oktober 2013 grafisch aufgezeichnet. Dabei zeigte sich ein klarer Trend zu abnehmendem Formationsdruck und gleichzeitig zunehmender Temperatur des geförderten Gas-Wasser-Gemisches (Grafik oben). Sehr schön kommt auch die zunehmende Ergiebigkeit des Reservoirs zur Geltung, und beim vierten und längsten Produktionstest erweist sich die Gasproduktion als klar dominant, d. h. generell steigend. Im Gegensatz dazu war die Wasserförderung tendenziell rückläufig und hatte sich bis zum Ende des Tests noch nicht stabilisiert.

Eine erste Messung der Bohrlochtemperatur

erfolgte mit dem Wireline-Logging in Sektion 4. Die Messung wurde ca. 24 Stunden nach der letzten Spülungszirkulation als Downlog über die gesamte Bohrlochstrecke ausgeführt, wobei noch keine ausgeglichenen Verhältnisse geherrscht haben (siehe T-Kurve in Fig. 4). Über die offene Malm-Dogger-Bohrlochstrecke wurde eine von ca. 125 °C ziemlich kontinuierlich auf 145 °C ansteigende Temperatur gemessen.

Die abschliessende Auswertung der Testarbeiten ergab eine maximale Fördertemperatur auf Teufe Top Aquifer von ca. 145 °C, was auch etwa dem unter stationären Bedingungen erreichbaren Wert entsprechen dürfte. Die an der Oberfläche ankommende nutzbare Temperatur von lediglich 95° ist stark von der Abkühlung durch das Gebirge und vom Gasgehalt des geförderten Fluids abhängig: Je grösser der Gasgehalt desto stärker auch die Abkühlung wegen der Expansion der Gasphase.

Die weitere Auswertung der Testarbeiten und die chemischen Analysen an Gas- und Tiefenwasserproben zeigen, dass die realisierbare Wasser-Förderrate mit < 5 l/sec viel zu gering ist, um die Option einer hydrogeothermalen Doublette weiter zu verfolgen. Es muss aber auch berücksichtigt werden, dass die weiteren Projektschritte, welche im Fall einer nicht ausreichenden Fündigkeit im Malm geplant waren, wegen der Gas- und Erdbebenproblematik nicht mehr ausgeführt werden konnten. Es bleiben deshalb wichtige Fragen über die Herkunft des Gas-Wasser-Gemisches, allfällige Mutter- und Speichergesteine sowie die massgebenden Migrationswege unbeantwortet. Immerhin lässt die relativ niedrige Salinität des geförderten NaCl-Fluids (ca. 25 g/l) vermuten, dass es sich dabei um ein fossiles Formationswasser handelt, und dass nur ein geringer Teil der verlorenen Salzwasserspülung (140 g/l) auch wieder rückgefördert wurde.

6 Ausblick

Die Bohrung St. Gallen GT-1 hat ein wertvolles lithostratigrafisches Profil am Südrand des Ostschweizer Molassebeckens erschlossen, mit welchem die regionale Geologie neu kalibriert werden kann. Das 4'450 m lange Bohrprofil ist durchgehend im 5 m-Abstand, ab 3'750 m im 2.5 m-Abstand mit Cuttingproben dokumentiert. Das entsprechende Kalzimetrie-Profil zeigt eindrücklich, dass sich diese Methode gut für die Gliederung und paläogeografische Interpretation der lithologisch monotonen Molasseabfolge, insbesondere der USM, eignet.

Die in der untersten Molasse und im Mesozoikum ausgeführten Schnellschliffe bilden eine rationelle und gut auswertbare Grundlage für die lithostratigrafische Gliederung und die Fazies-Interpretation; zusammen mit den Seitenkernen kann so ein differenziertes Bild der Malm – Dogger-Sequenz rekonstruiert werden. Die Faziesanalyse ergibt eindeutig, dass der Malm unter St. Gallen noch zum schwäbischen, von Schwammkalken dominierten Ablagerungsraum gehört, im Gegensatz zu den «Referenzbohrungen» östlich des Bodensees, wo eine helvetische Ausbildung mit Mikriten vom Typ Quintnerkalk angetroffen wurde. Dies legt nahe, dass unter dem gesamten Ostschweizer Molassebecken die schwäbische Malmfazies ausgebildet ist und die bestehenden paläogeografischen Darstellungen entsprechend geändert werden müssen (z. B. Bachmann & Müller 1992).

Die quantitative Auszählung und qualitative Beurteilung von Kluftkalziten ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Lokalisierung tektonisch beanspruchter Bohrlochabschnitte, sowohl in der Molasse (Dreieckzone) wie auch im Mesozoikum (potenzielle Zuflusszonen).

Das gewählte Konzept einer abgelenkten Bohrung, mit welcher direkt das Kluftsystem der St. Gallen-Verwerfungszone erschlossen werden sollte, war im Prinzip erfolgreich. Auch die vorgefundenen Temperaturen entsprachen den Erwartungen. Nicht vorgesehen und mit den verfügbaren Daten nur schwer verein-

bar war dagegen die Tatsache, dass man hier ein System aktiv vorgespannter Störungen angetroffen hat, welches äusserst sensibel und unerwartet heftig auf die vergleichsweise bescheidenen Eingriffe reagiert hat.

Sowohl für den sachgerechten Ausbau (Kaliber) wie auch für die geologisch-geophysikalische Interpretation einer Explorationsbohrung wie St. Gallen GT-1 ist ein einwandfreies, durchgehendes geophysikalisches Logging unabdingbar. Dieses sollte auch gegen Kosten- oder Zeitbegründungen durchgesetzt werden. Allenfalls ist eine Reserve-Rohrtour einzuplanen. Sidewall-Cores sind eine gute Alternative zu Kernstrecken, deren Entnahme muss aber sorgfältig geplant und vom Geologen begleitet werden.

Vertikale Bohrungen sind besonders im tektonisch vorgespannten Regime einem abgelenkten Bohrfad generell vorzuziehen (vgl. auch Marsch 2013). Besondere Probleme bereiten die kleinräumigen Lithologiekontraste in der USM, welche auch bei sehr gut ausgerichteter Bohrung rasch zu einem wenig kaliberhaltigen Bohrloch mit Engstellen und Aufweitungen führen, welche in geneigter Lage für das Befahren mit Mess-tools sehr ungünstig sind.

Für das Testing von Explorationsbohrungen ist das Openhole-airlift-Verfahren generell in Frage zu stellen. Zudem haben die Probleme mit defekten oder verlorenen Messsonden gezeigt, dass die Instrumentierung während des Testens mit ausreichend Reserven-Tools geplant werden muss.

Dank

Der Autor hat bereits bei der Machbarkeitsstudie mitgearbeitet und war in der Folge bei allen Projektschritten zuständig für die «trockene Geologie», zuletzt als Auftragnehmer Bohrstellengeologie. Ich möchte mich bei allen Beteiligten, insbesondere auch bei der Projektleitung, bedanken für die allgemein konstruktive Zusammenarbeit. Ohne die vorbehaltlose Unterstützung von Sigi Schlanke, dem GEOdata-Team, Tosten Steiger, Stephan Uhlig, Andy Macek, Michael Sonderegger, Thomas Bloch, Markus Wolfgramm, den Drilling-Supervisoren und vielen anderen wäre meine Arbeit auf und neben der Bohrstelle nicht möglich gewesen.

Literaturverzeichnis

- Bachmann, G. H. & Müller, M. 1992: Sedimentary and structural evolution of the German Molasse Basin. *Eclogae geol. Helv.* 85/3, 519–530.
- Bayerisches Geologisches Landesamt 2010: Bayerischer Geothermieatlas. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, München.
- Bertleff, B., Ondreka, J., Plum, H., Storz, R. & Schloz, W. 2005: Bereitstellung hydrogeologischer und geothermischer Grundlagen zur Nutzung der tiefen Geothermie/Hydrogeothermie in der Region Bodensee – Oberschwaben. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Bad.-Württemb., Freiburg.
- Bläsi, H. R. 2013: Bericht zur Untersuchung der Malm- und Doggerstrecke der Geothermie Bohrung St. Gallen GT-1. Institut für Geologie der Universität Bern.
- BLM Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH 2013: Kurzbericht Petrophysikalische Auswertung und Trennflächen- und Breakout-Analyse St. Gallen GT-1. Unpubl. Auftragnehmerberichte BLM/ST. Galler Stadtwerke.
- Büchi, U. P. 1950: Zur Geologie und Paläogeographie der südlichen mittelländischen Molasse zwischen Toggenburg und Rheintal. Diss. Univ. Zürich.
- Büchi, U. P. 1955: Zur Geologie der Oberen Meeresmolasse von St. Gallen. *Eclogae geol. Helv.* 48/2, 257–321.
- Bundesamt für Umwelt 2007: Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES. Bundesamt für Umwelt, Bern. siehe auch: <http://www.hades.unibe.ch/de/products/datenportal/pdf>.
- Diehl, T., Kraft, T., Kissling, E., Deichmann, N., Wiemer, S., Clinton, J., Haslinger, F. & Waldhauser, F. 2013: Near-real-time high-precision relocation of induced seismicity in the geothermal system below Sankt Gallen (Switzerland). American Geophysical Meeting 2013, Poster S33D-2465.
- Diem, B. 1986: Die Untere Meeresmolasse zwischen der Saane (Westschweiz) und der Ammer (Oberbayern). *Eclogae geol. Helv.* 79/2, 493–559.
- Eugster, H., Fröhlicher, H. & Saxer, F. 1960: Erläuterungen zum Blatt Nr. 23: St. Gallen – Appenzell des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000. Schweiz. geol. Komm.
- Geodata GmbH 2013: Abschlussbericht der feldgeologischen Arbeiten St. Gallen GT-1. Unpubl. Auftragnehmerbericht, St. Galler Stadtwerke.
- Geomecon GmbH 2014: Bestimmung petrophysikalischer und geomechanischer Kennwerte aus Seitenkernen der Geothermiebohrung St.Gallen GT1.
- Geowatt AG, Foralith Drilling Support AG, Wyss GmbH, Naef, H. & Progeo GmbH 2009: Machbarkeitsstudie Tiefengeothermie Stadt St. Gallen: Konzept für die Entwicklung (Planung und Erstellung) einer Geothermieanlage in der Stadt St. Gallen. Schlussbericht. Stadt St. Gallen, Direktion Technische Betriebe.
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. 2011: Geologie von Baden-Württemberg (5. völlig neu bearbeitete Auflage). Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart.
- Heuberger, S. & Kuhn, P. 2014: Geothermieprojekt St. Gallen: Permokarbon-Interpretation, Verfeinerung der Bruchkartierung im Bereich der Bohrung GT-1 sowie Aufdatierung des 3D-Modells. Sankt Galler Stadtwerke, Bericht Proseis AG, Zürich.
- Hofmann, F. 1951: Zur Stratigraphie und Tektonik des st. gallisch-thurgauischen Miozäns (Obere Süsswassermolasse) und zur Bodenseegeologie. *Jb. st. gall. natw. Ges.* 74, 1–87.
- Kastrup, U., Zoback, M., Deichmann, N., Evans, K., Giardini, D. & Michael, A. 2004: Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. *Journal of geophysical research* 109: B01402.
- Keller, B. 1989: Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (Unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. Diss. Univ. Bern.
- Kempf, O., Matter, A., Burbank, D. W. & Mange, M. 1999: Depositional and structural evolution of a foreland basin margin in a magnetostratigraphic framework: the eastern Swiss Molasse Basin. *Int. Journ. Earth Sciences* 88, 253–275.
- Kuhn, P. 2014: Geothermieprojekt St. Gallen: Geschwindigkeitsanalyse des Checkshot und Aufdatierung des 3D-Modells nach Abschluss der Sektion 4a von SG GT-1. Sankt Galler Stadtwerke. Bericht Proseis AG, Zürich.
- Ludwig, A., Saxer, H., Eugster, H. & Fröhlicher H. 1949: Geologischer Atlas der Schweiz, Blatt 23: St. Gallen – Appenzell, 1:25'000. Schweiz. Geol. Komm.
- Macek, A. 2014: Geothermiebohrung St. Gallen GT-1. Abschlussbericht Bohrtechnik. Geowell GmbH / St. Galler Stadtwerke.
- Marsch, F. W. 2013: Bohrlochinstabilitäten bei Tiefbohrungen in den Ostalpen. *Bull. angew. Geol.* 18/1: 43–50.
- Müller, M. & Nieberding, F. 1996: Principles of abnormal pressure related to tectonic developments and their implication for drilling activities (Bavarian Alps, Germany). In: Wessely, G. & Liebl, W. (eds), 1996: Oil and Gas in Alpidic Thrustbelts and Basins of Central and Eastern Europe, EAGE Special Publications 5, 119–126.
- Naef, H. 2012: Geologische Bohrprognose St.Gallen GT-1. Sankt Galler Stadtwerke, Bericht vom 14.7.2012, geosfer ag, St. Gallen.

- Naef, H. & Schlanke, S. 2014: Schlussbericht Geologie Tiefbohrung St. Gallen GT-1. Unpubl. Auftragnehmerbericht geosfer AG, St. Galler Stadtwerke.
- Naef, H. 2015: Die Geothermie-Tiefbohrung St. Gallen GT-1. Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft, Band 92.
- Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B. & Heidbach, O. 2010: Present-day stress orientation in the Molasse Basin. *Tectonophysics* 482, 129–138.
- Roth, Ph., Naef, H. & Schnellmann, M. 2010: Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz. Nagra Arbeitsbericht NAB 10-39, Text- und Beilagenband, Wettingen.
- Schlanke, S. 2015: Lithostratigrafie und Sedimentpetrographie der Molasse in der Bohrung St. Gallen GT-1. Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft, Band 92.
- Schneider, J. 1962: Der Jura in Erdölbohrungen des westlichen Molassetroges. In: Hermann-Aldinger-Festschr. Schweizerbart, Stuttgart, 163–172.
- Steiger, T. 2014: Geothermiebohrung Sankt Gallen GT-1: Bericht zur Mikrofaziesanalyse an Cuttingproben und Seitenkernen. Geotec Consult, 85570 Markt Schwaben.
- Steiger, T. 2015: Fazies und Stratigrafie der mesozoischen Gesteinsabfolge in der Bohrung St. Gallen GT-1. Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft, Band 92.
- Vollmayr, Th. & Wendt, A. 1987: Die Erdgasbohrung Entlebuch 1, ein Tiefenaufschluss am Alpenrand. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 53/125, 67–79.
- Wolfgramm, M., Voigt, H.-D. & Bartels, J. 2014: Geothermieprojekt St. Gallen. Test und Stimulation, Abschlussbericht. Unpubl. Auftragnehmerbericht Geothermie Neubrandenburg GmbH / St. Galler Stadtwerke.
- Zaugg, A., & Löpfe, R. 2011: Geologischer Atlas der Schweiz: Blatt 1114 Nesslau. *Geol. Atlas Schweiz 1:25'000, Erläuterungen 141*, Swisstopo, Bern.
- Löpfe, R., Zaugg, A. & Schlanke, S. 2012: Geologischer Atlas der Schweiz: Blatt 1113 Ricken. *Geol. Atlas Schweiz 1:25'000, Erläuterungen 142*, Swisstopo, Bern.

Where does your borehole go?

Gyro-Service

- You lead site investigation in a tunneling project.
- You explore mineral resources using diamond core drilling.
- You use raise boring techniques for shaft excavation.
- You are responsible for horizontal directional drilling.

Do you know where your boreholes go?
We will tell you!

GYRO-SERVICES
S W I T Z E R L A N D
www.gyro-services.com