

Zeitschrift: Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft
Herausgeber: St. Gallische Naturwissenschaftliche Gesellschaft
Band: 92 (2015)

Artikel: Die Geothermie-Tiefbohrung St. Gallen GT-1
Autor: Naef, Henry
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-832651>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Geothermie-Tiefbohrung St.Gallen GT-1

Henry Naef

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	360	5.2 Molasse: 4–3992 m MD	372
1 Einleitung.....	360	5.2.1 Obere Süßwassermolasse (OSM): 4–236 m.....	373
2 Das Geothermieprojekt der Stadt St.Gallen	361	5.2.2 Obere Meeresmolasse (OMM): 236–768 m.....	373
3 Planung der Tiefbohrungen	362	5.2.3 Untere Süßwassermolasse (USM): 768–3972 m MD...	375
3.1 Geologische Bohrprognose und Festlegen von Bohrplatz und Bohrtrajektorie.....	362	5.2.4 Untere Meeresmolasse (UMM): 3972–3992 m MD .	376
3.2 Die technisch-wissenschaftliche Planung der Bohrungen.....	365	5.3 Mesozoikum: 3992–4450 m MD..	378
4 Ausführung der Bohrung GT-1 vom März bis Juli 2013	366	5.3.1 Malm: 3992–4404 m MD...	380
4.1 Technische Daten – Überblick ...	366	5.3.2 Dogger: 4404–4450 m MD .	381
4.2 Chronologie der Ereignisse vom SpudIn bis zum Erreichen der Endtiefe.....	367	5.4 Bohrlochgeophysik.....	382
5 Die wichtigsten geologischen Resultate der Bohrung GT-1	371	5.5 Wasser- und Gasführung	386
5.1 Die Schichtabfolge von GT-1 im Überblick	371	5.6 Weitergehende Auswertung der Malm-Dogger-Strecke	387
7 Ausblick	390	5.7 Bohrlochtemperatur.....	388
Literaturverzeichnis	391		

Kurzfassung

Die Stadt St. Gallen hat ein Energiekonzept erarbeitet, in welchem die Geothermie eine wichtige Rolle bei der langfristigen Reduktion von CO₂-Emissionen spielt. Neben dem erprobten, vielfachen Einsatz von Erdwärmesonden sollte ein Tiefengeothermieprojekt auch Strom produzieren und das städtische Fernwärmennetz speisen. Aufwendige Vorabklärungen inklusive 3D-Seismik zeigten die Machbarkeit eines hydrogeothermalen Doppeltensystems im Zusammenhang mit einer regionalen Störungszone, welche im Bereich der potenziellen Tiefenaquifere im Mesozökum nachgewiesen werden konnte.

Die Bohrung wurde von März bis Juli 2013 abgeteuft und erreichte eine Tiefe von 4250 m unter Terrain resp. 4450 m Länge. Dabei wurden eine knapp 4 km lange Molassesstrecke 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 Bohrpfad ab ca. 950 m Tiefe abgelenkt und mit gut 20° nach NW geführt werden. Die Ausführung erfolgte in 4 Bohrlochsektionen mit den Durchmessern von 23", 16", 12^{1/4}" und 8^{1/2}", wobei der grösste Teil mit mehrmaligen Richtbohrtechnik gebohrt wurde. Abgesehen von mehrmaligen Räum- und Nachbohrarbeiten in der tieferen Molasse waren keine grösseren bohrtechnischen Schwierigkeiten zu bewältigen. Die befürchteten Überdrucke sowie plötzliche Gaseinbrüche, wie sie in anderen Bohrungen am Alpenrand auftraten, wurden nicht angetroffen.

Die potenzielle Aquiferzone im Malm ist in schwäbischer Schwammkalk-Fazies ausgebildet und weist tektonisch gestörte Zonen auf, welche als Teil der erwarteten St. Gallen-Verwerfungszone interpretiert werden. Diese Bereiche wurden erfolgreich stimuliert, wobei es zu einem unkontrollierten Gasausbruch und aufgrund der nachfolgenden Bekämpfungsmassnahmen zu anhaltender Mikroseismizität mit einem spürbaren Erdbeben der Magnitude 3.5 kam. Nach einer mehrwöchi-

gen Phase der Bohrlochkontrolle wurde der Malm wieder aufgefahren und seine Ergiebigkeit 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.

1 Einleitung

Im Rahmen der Suche nach alternativen, einheimischen Energiequellen spielt die Geothermie eine wichtige Rolle. Als wesentlicher Vorteil gegenüber der Sonnenenergie und der Nutzung von Windkraft liefert die Geothermie konstante Bandenergie und ist im Hinblick auf raumplanerische Anliegen kaum relevant. In Form der weit verbreiteten Erdwärmesonden (EWS) wird die aus dem Innern der Erde aufsteigende Wärme-Energie bereits seit Jahrzehnten erfolgreich genutzt und ist besonders im voralpinen Klima die wichtigste Alternative zur konventionellen Erdöl-/Erdgasheizung für kleine Wohneinheiten. Mit EWS-Bohrungen werden Tiefen bis etwa 300 m erschlossen, womit Temperaturdifferenzen von lediglich wenigen Grad genutzt werden können; um dann die gewünschten Vorlauftemperaturen im Heizkreislauf zu erreichen, muss das erderwärmte Wasser mit Wärmepumpen d.h. elektrischer Energie zusätzlich aufgeheizt werden. EWS-Raumheizungen sind also zumindest teilweise auch Elektroheizungen. Um die Erdwärme auch für die Stromproduktion einsetzen zu können, müssen Temperaturen von deutlich mehr als 100°C genutzt werden können. Solch hohe Temperaturen werden in den allermeisten Gegenden der Erde erst ab einer Tiefe von ca. 3–4 km erreicht, was zu deren Erschliessung entsprechend tiefe Bohrungen voraussetzt. Nur in vulkanisch aktiven Regionen wie z.B. Island sind bereits in viel geringerer Tiefe Temperaturen von >100 °C zu erwarten, und es gibt dort heisse Wässer, die sogar natürlich bis an die Oberfläche aufsteigen und dann sozusa-

gen gratis genutzt werden können.

Im Gegensatz zur EWS-Nutzung (untief Geothermie), wo die Wärmeträger-Flüssigkeit in einem geschlossenen Rohrsystem, eben der Erdsonde zirkuliert, also nicht mit dem Gestein in direkten Kontakt kommt, wird bei der Tiefengeothermie ein offener Kreislauf als sog. Doublette genutzt.

Es lassen sich zwei Systeme für die Nutzung der tiefen Geothermie unterscheiden:

- Die *hydrothermale Geothermie* geht davon aus, dass in geeigneter Tiefe durchlässige Gesteinsschichten vorhanden sind, die ausreichend heißes Wasser enthalten (sogenannte Tiefenwasser-Aquifere). Dieses muss mit einer Bohrung erschlossen und an die Oberfläche gebracht werden, wo ihm ein Teil der Wärme entzogen wird, bevor es dann über ein zweites Bohrloch wieder in den Untergrund zurückgegeben wird.
- Bei *petrothermalen Systemen* müssen mit einer Tiefbohrung lediglich genügend heiße Gesteinsschichten erreicht werden, die dann mittels Druck aufgesprengt (gefrackt) werden. In die künstlich geschaffenen Hohlräume wird dann Oberflächenwasser zirkuliert, das sich im heißen Gestein rasch aufwärmst und ebenfalls über eine zweite Bohrung wieder gefördert und dann genutzt werden kann.

Für beide Systeme ist es also notwendig, die tiefliegenden Wärmequellen mit aufwendigen Tiefbohrungen zu erschliessen. Diese müssen zudem ausreichende Bohrlochdurchmesser haben und qualitativ hochwertig ausgebaut d.h. verrohrt werden. Die Planung und Ausführung einer solchen Erschliessungsbohrung ist deshalb der massgebliche/kritische Arbeitsschritt eines erfolgreichen Tiefengeothermie-Projekts. Die folgenden Ausführungen sollen diese Arbeiten am Beispiel des hydrothermalen Geothermieprojekts der Stadt St.Gallen aufzeigen.

2 Das Geothermieprojekt der Stadt St.Gallen

Aus regionalgeologischen Überlegungen und früheren Explorationen der Erdölindustrie, insbesondere mit Reflexionsseismik, war zu vermuten, dass unter der Stadt St.Gallen mesozoische Gesteinsschichten in geeigneter Tiefe vorhanden sind, welche als sogenannte Tiefenwasser-Aquifere für die Nutzung mit hydrothermalen Systemen in Frage kommen. Dabei geht es vor allem um die Kalk-Formationen des Oberen Malm, welche in vergleichbarer geologischer Situation unter dem gesamten nordalpinen Molassebecken verbreitet sind und im Raum München seit einiger Zeit erfolgreich geothermisch genutzt werden. Es war deshalb naheliegend, dass im Rahmen der langfristigen Energieplanung mit dem obersten Ziel der CO₂-Reduktion die Option <Hydrothermale Tiefengeothermie> auch in St.Gallen zumindest genauer abgeklärt werden musste!

Im Jahr 2008 beauftragte der Stadtrat deshalb eine Arbeitsgruppe aus Geologen, Geophysikern und Ingenieuren mit der Ausarbeitung einer Machbarkeitsstudie für die Nutzung der Tiefengeothermie in der Stadt St.Gallen. Diese Studie kam zum wenig überraschenden Ergebnis, dass das vermutete Potenzial grundsätzlich vorhanden ist, das heißt die Schichten des Oberen Malms und dann auch des Muschelkalks in Tiefen von über 4 km liegen und die erforderlichen Gesteinstemperaturen von deutlich über 120°C aufweisen dürften. Über die lokale Ausbildung dieser Kalkstein-Aquifer-Formationen unter St.Gallen war allerdings nichts Genaues bekannt; auf Grund regionalgeologischer Vergleiche (z.B. Tiefbohrungen östlich des Bodensees und weiter östlich am Alpenrand) musste eher bezweifelt werden, dass sie generell ausreichende Durchlässigkeiten aufweisen, um ein erfolgreiches hydrothermales Projekt zu realisieren. Aus Beispielen in anderen Regionen, besonders auch dem Raum München, war aber bekannt, dass tektonische Verwerfungszonen die Aquifer-Eigenschaf-

ten von Kalkstein-Formationen deutlich verbessern können. Die extrem spröd reagierenden Kalke bilden an den Brüchen solcher Zonen eine ausgedehnte Klüftung, das heisst das Gestein ist dort von zahlreichen \pm vernetzten Rissen und Spalten durchsetzt; dies ermöglicht unter gewissen Bedingungen eine stark erhöhte Wasserzirkulation.

Mit den verfügbaren Daten konnte angenommen werden, dass unter St.Gallen die mesozoischen Formationen von zumindest einer, eventuell auch zwei Verwerfungszenen betroffen sind, eine im Westen und eine im Osten des Stadtgebietes. Diese wurden dann im abschliessenden *«Prospekt Tiefengeothermie Stadt St.Gallen»* auch als prioritäre Zielgebiete festgelegt (Resultat der Machbarkeitsstudie, GEOWATT AG et al. 2009).

Für die Planung eines konkreten Bohrprojekts musste nun eine der zwei Verwerfungszenen im Mesozoikum ausgewählt werden. Zudem war zu entscheiden, ob die vorhandenen Kenntnisse als Planungsgrundlage ausreichen oder ob noch zusätzliche Exploration dafür notwendig ist. Fachleute und Auftraggeber waren sich zudem insofern nicht einig, als die Stadtwerke aus Bedarfsgründen einer Bohrung im Osten eindeutig den Vorzug gaben, die Geologen aber der vermuteten Störung im Osten nicht ganz trauten und deshalb die Erschliessung der Verwerfungszone West klar favorisierten. Die nachfolgende Diskussion ergab schliesslich, dass ein fachlich gut fundiertes Bohrprojekt nur aufgrund zusätzlicher Reflexionsseismik ausgearbeitet und vor den Projektverantwortlichen sowie der Bevölkerung ausreichend begründet werden kann.

So wurde im Sommer 2009 innerhalb sehr kurzer Zeit ein ausgedehntes 3D-Seismikprojekt geplant, ausgeschrieben, vom Stadtrat bewilligt und an die Firma DMT vergeben. Bis April 2010 konnten dann die anspruchsvollen Feldarbeiten erfolgreich realisiert werden und Ende 2010 waren die Daten soweit ausgewertet, dass detaillierte Projektvarianten diskutiert werden konnten. Dabei stellte sich heraus, dass die Verwerfungszone Ost tat-

sächlich nicht vorhanden ist und die Verwerfungszone West zwar detailliert nachgewiesen werden konnte, aber bis zu 1 km weiter westlich verläuft, als dies in der Machbarkeitsstudie aufgrund der älteren 2D-Seismiklinien dargestellt worden war. Mit diesen wichtigen Resultaten und den zahlreichen weiteren Informationen über die Geologie des tieferen St.Galler Untergrundes konnte der beträchtliche Aufwand dieser zusätzlichen Exploration durch 3D-Seismik mehr als gerechtfertigt werden. Ohne diese Daten wäre die Planung und Auswertung des realisierten Bohrprojekts und dann vor allem auch die Interpretation der nachfolgenden Ereignisse vom Sommer 2013 nicht möglich gewesen.

3 Planung der Tiefbohrungen

3.1 Geologische Bohrprognose und Festlegen von Bohrplatz und Bohrtrajektorie

Basierend auf diesen vergleichsweise umfangreichen und fachtechnische breit abgestützten Voruntersuchungen konnten die Bohrungen für eine hydrothermale Doublette in St.Gallen entsprechend zielgerichtet geplant werden. Aufgrund der refelexionsseismischen Daten war die Konstellation zwischen der zu erschliessenden St.Gallen-Verwerfungszone (im Folgenden als SVZ bezeichnet) und dem Stadtgebiet vorgegeben: Es musste im Westen der Stadt ein geeigneter Bohrplatz gefunden werden, welcher die logistischen Anforderungen und vor allem auch die zu erwartenden Auflagen einer Bohrbewilligung erfüllen und von dem aus gleichzeitig die Verwerfungszone mit einem möglichst einfachen und kostengünstig dimensionierten Bohrprojekt erschlossen werden konnte. Letztlich sprach Vieles für den gewählten Standort im Sittertobel, obwohl dieser nicht direkt über dem Zielgebiet liegt, sondern ca. 1 km weiter südöstlich, was aber einem abgelenkten Bohrpfad notwendig machte. Das Gelände war bereits im Besitz der Stadt und direkt angrenzend an weitere technische Betriebe (ARA, KVA und Fernwärmennetz), gut er-

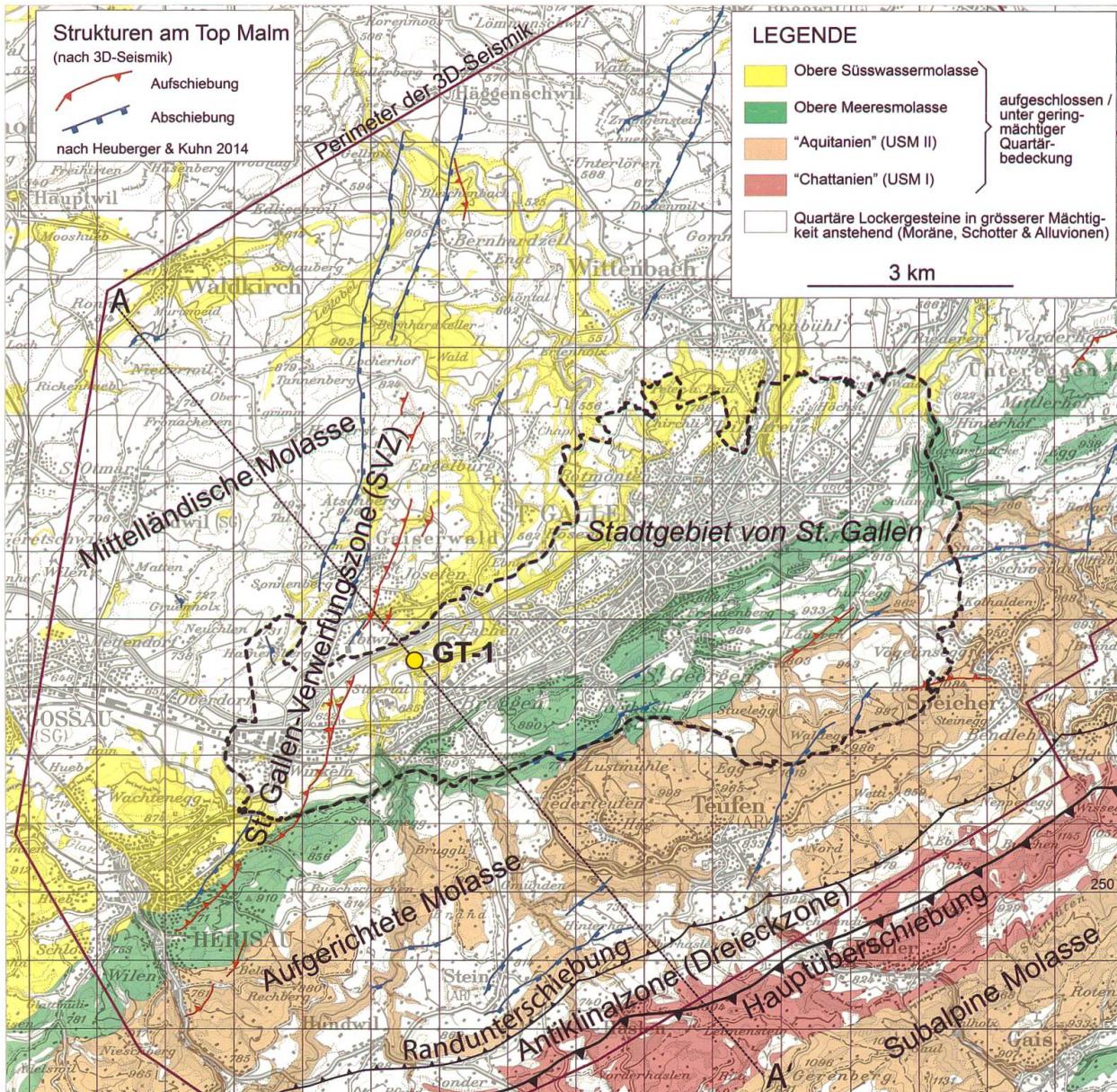


Abbildung 1:
Geologische Übersicht Stadtgebiet St. Gallen und Umgebung mit Perimeter der 3D-Seismik; Darstellung der kartierten Verwerfungen am Top Malm mit der St. Gallen-Verwerfungszone als vorrangiges Zielgebiet. Geologischer Profilschnitt A – A' siehe Abbildung 2.

schlossen und doch soweit abseits von Wohngebieten, dass die Lärmentwicklung durch den 24-Stunden-Bohrbetrieb nur geringfügige zusätzliche Massnahmen erforderte.

Für die detaillierte technische Planung einer Tiefbohrung sind zudem möglichst gute Kenntnisse über die zu durchbohrende Geesteinsabfolge, die allenfalls kritischen Zonen,

deren Eigenschaften und Tiefen etc. von elementarer Bedeutung. Je besser diese Daten bekannt sind, desto gezielter, sicherer und vor allem rationeller, d.h. kostengünstiger kann das Projekt dimensioniert werden. Deshalb wird als wichtigste Planungsgrundlage eine geologische Bohrprognose erstellt, die sich in erster Linie auf Referenzbohrungen und

dann den gesamten lokalgeologischen Datensatz abstützt (NAEF 2012).

In St.Gallen standen mit der vorliegenden 3D-Seismik (3D-Modell) zwar gute Seismikdaten zur Verfügung, die nächsten Tiefbohrungen, welche das Mesozoikum erreicht haben und deshalb als Referenzbohrungen verwendet werden konnten, sind aber 25 und mehr Kilometer weit weg. Über solche Distanzen können sich die massgebenden Parameter stark verändern, sodass bei der Verwendung als Referenz beträchtliche Unsicherheiten verbleiben. Mit entsprechenden Fragezeichen musste dann auch geplant werden, d.h. die resultierende geologische Bohrprognose blieb in wesentlichen Teilen relativ unverbindlich, wobei aus Sicherheitsgründen letztlich immer mit den ungünstigsten Varianten geplant werden musste.

Abbildung 1 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 aneinan-

der reihen: Von der flachliegenden mittelländischen Molasse über deren aufgerichteten Südrand bis in die Subalpine Molasse folgen sich tektonisch unterschiedliche Abschnitte, wie das im geologischen Schnitt in Abbildung 2 aufgezeigt wird.

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 Bohrpfad gut abgeschätzt werden konnte, war die Gesteinsausbildung der tieferen Molasseschichten ab Top Dreieckzone und dann vor allem die mesozoische Schichtabfolge weder mit nahen Tiefbohrungen noch mit naher Oberflächengeologie prognostizierbar.

Wichtig ist auch der Vorbehalt, dass sich aus guten Seismikdaten zwar ein detailliertes tektonisches Bild rekonstruieren lässt, für exakte Tiefenangaben aber die Kalibration der seismischen Geschwindigkeiten durch eine lokale Tiefbohrung notwendig ist (vergl. Ab-

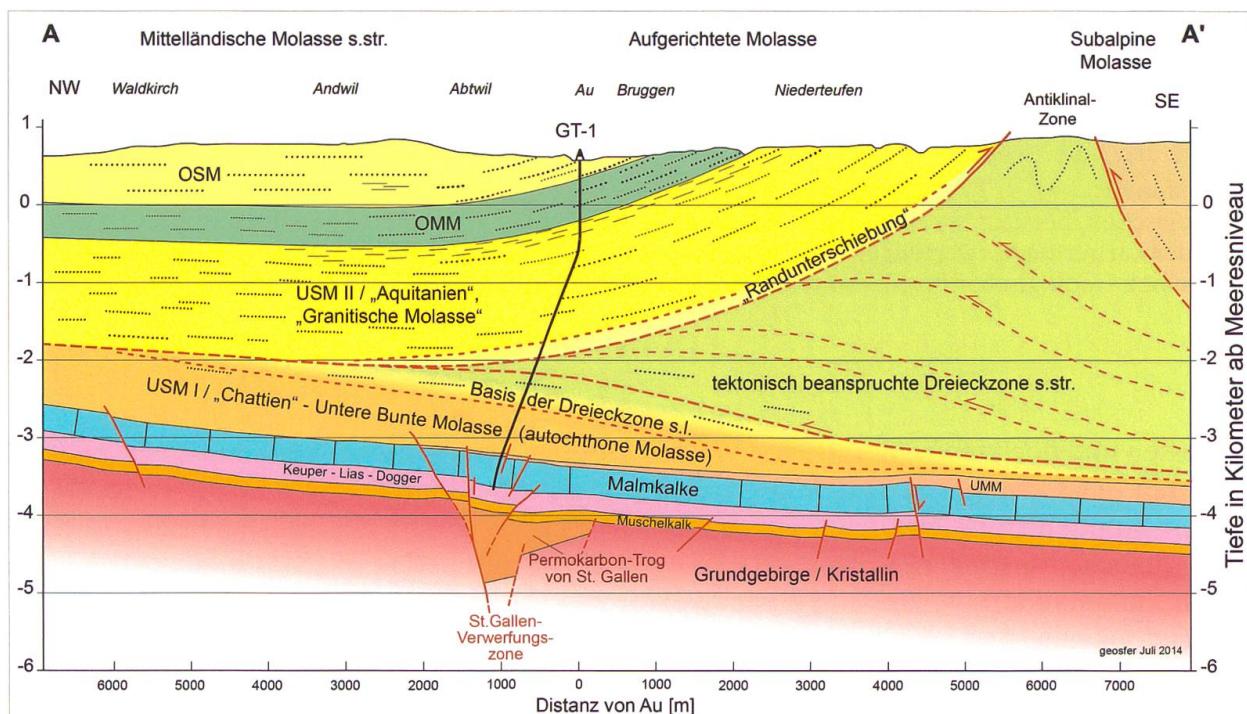


Abbildung 2:
Geologisches NW – SE-Profil durch den Bohrstandort Au im Sittertobel mit dem ausgeführten, abgeleiteten Bohrpfad von GT-1; Profilspur siehe Abbildung 1. Definitive Version 2014 nach Kalibrierung der 3D-Seismik mit den Bohrungsdaten gemäss HEUBERGER & KUHN 2014.

bildung 13). 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. \pm 200 m resp. 5% gerechnet werden.

Zudem ist es nicht möglich, mit den 3D-Seismik-Daten direkt etwas über die Wasserröhligkeit 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 der Schweiz angeführt werden, wo das Modell einer Tiefenwasserzirkulation vom Infiltrationsgebiet im Autochthon der Zentralmasse unter dem Molassebecken hindurch bis zu den Exfiltrationsgebieten am Hochrhein dargestellt wird (BUNDESAMT FÜR UMWELT 2007). In Bezug auf die Gasführung im Mesozoikum und der tieferen Molasse gibt es aus Tiefbohrungen am Alpennordrand zahlreiche Hinweise (z.B. MÜLLER & NIEBERDING 1996) und letztlich war die Bohrung Entlebuch, geologisch in ähnlicher Position im Bereich der Dreieckzone, die bisher einzige fündige Gasbohrung der Schweiz (VOLLMAYR & WENDT 1987).

3.2 Die technisch-wissenschaftliche Planung der Bohrungen

Die technische Planung der Bohrungen begann Ende 2010 aufgrund der 3D-Seismikdaten und der Vorgabe, dass die erste Bohrung so dimensioniert sein sollte, dass sie später auch als Produktions- oder Injektionsbohrung der angestrebten Doublette genutzt werden kann. Alternativ stand nämlich auch die Option zur Diskussion, als erstes eine kostengünstige, risikoarme und technisch einfache und deshalb senkrechte Explorationsbohrung mit minimalem Bohrdurchmesser abzuteufen, um erst einmal die lokale Ge steinsabfolge und die genaue Tiefenlage des

potenziellen Aquifers zu explorieren. Erst danach hätte man dann eine optimale Erschliessungsbohrung durchführen oder – im Falle eines negativen Explorationsresultates – das ganze Projekt ohne einen allzu grossen Abschreiber aufgeben können.

Die dann gewählte und auch ausgeführte Vollvariante umfasste eine bis zu 5 km lange Abfolge von 6 Bohrsektionen mit von oben nach unten stets kleiner werdenden Durchmessern. Diese Bohrlochabschnitte mussten jeweils nach Erreichen der Sektionstiefe mit entsprechend dimensionierten, sich teleskopartig ineinanderfügenden Stahlrohren gesichert werden (vergl. Abbildung 4); allein dies ist ein Projektteil mit Kosten von mehreren Mio. Franken. Realisiert wurden dann aus den in Kapitel 6 erläuterten Gründen nur 4 Bohrsektionen des Gesamtprogramms.

Aus grundsätzlichen Überlegungen zur Durchlässigkeit von Störungszonen ergab sich das letztlich ausgewählte Zielgebiet im NW des Bohrplatzes Au, welches etwa unter dem Zentrum von Abtwil, also deutlich ausserhalb des Stadtgebietes liegt. Die Bohrung musste deshalb – wie bereits gesagt – aus der anfänglich senkrechten Lage abgelenkt und mit Azimut ca. 322° sowie einer Neigung von etwa 21° zur Senkrechten, d. h. schräg nach NW geführt werden. Dies erforderte die Einplanung einer sehr präzisen und deshalb technisch aufwendigen Bohrkopf-Steuerung, was sich natürlich entsprechend in den Kosten niederschlug.

Im Laufe des Jahres 2011 wurden die zahlreichen weiteren Aspekte und Details der Bohrplanung intensiv vorangetrieben und auch erste Ausschreibungen vorgenommen, sodass dann im Herbst das offizielle Bohrge- such beim Kanton eingereicht werden konnte. Dafür mussten allein für die Durchführung der ersten Bohrung über 20 Einzelfirmen berücksichtigt werden, vom lokalen Entsorgungsunternehmen (ca. 500 Tonnen Bohrschlamm!), über die spezialisierten Tiefbohrungsservices, welche alle nur auf dem internationalen Markt zu finden sind, bis zum Herzstück des Unternehmens, nämlich der

Bohrfirma, die dann auch über ein entsprechend leistungsfähiges Bohrgerät verfügen musste. Diese im weiteren Sinne bohrtechnischen Aspekte der Planungs- und Ausschreibungsarbeiten waren sowohl vom Aufwand wie auch von ihrem Anteil am Gesamtbudget wesentlich umfangreicher, als die Teile, welche dann letztlich auch zur Sicherung der projektrelevanten Daten und der wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse führen sollten. Vereinfacht gesagt liess sich das ganze Projekt deshalb in zwei Phasen gliedern:

A Einen technisch sauberen, stabil ausgebauten, aber dennoch kostengünstig abzuteufenden ersten Bohrabschnitt von ca. 4 km Länge, d.h. bis zum Erreichen der potenziellen Reservoir-Formationen im Mesozoikum (oberer Malm), der ‹möglichst rasch› realisiert werden sollte. Obwohl zumindest der untere Teil dieses Abschnitts auch eine echte Explorationsbohrung war, sollten hier keine aufwendigeren wissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt werden. Neben der Analyse des in regelmässigen Abständen aus der Bohrspülung zu entnehmenden Bohrkleins (sog. Cuttings) war ein schlankes geophysikalisches Logging-Programm vorgesehen, das die wesentlichen gesteinsphysikalischen Eigenchaften des offenen (unverrohrten) Bohrlochs sichern und dann den Zustand des verrohrten Bohrlochs abbilden sollte. Die Entnahme von Bohrkernen oder die Aufnahme aufwendiger geophysikalischer Abbildungsverfahren war nicht vorgesehen.

B Einen unteren, relativ kurzen aber bereits ziemlich schlanken Bohrabschnitt im Mesozoikum (8 1/2" resp. 7" Aussendurchmesser), wo die wissenschaftlichen und hydrogeologischen Untersuchungen im Vordergrund stehen sollten. Wegen der grossen Tiefe und der nicht genauer vorhersehbaren Konstellation für diese Aufnahmen und Tests war hier von vorneherein mit grösseren Stand- und Wartezeiten zu rechnen; Zeit konnte hier also nicht mehr der entscheidende Faktor sein.

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

4.1 Technische Daten – Überblick

Der Bohrplatz im Sittertobel liegt unmittelbar neben ARA und KVA und wurde inklusive 3 Standrohre erstellt (Abb. 1 und 3). Als Bohransatz-Niveau für St. Gallen GT-1 gilt OK Betonplatte des Bohrplatzes = **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, als die Endteufe von 4450 m MD erreicht wurde (gemessen entlang dem Bohrpfad = measured depth, abgekürzt MD). Danach erfolgten aufwändige und umfangreiche Testarbeiten, welche infolge Gaszutritts auch eine zeitweilige Verschliessung des Testintervalls unterhalb von ca. 4000 m bedingten. Die unterste Bohrlochstrecke wurde in der Folge wieder aufgebohrt und ebenfalls verrohrt, wobei die aktuelle Endtiefen der erschlossenen Bohrstrecke (= Basis der gelochten 7"-Verrohrung) bei 4372 m MD liegt.

Die in der Planung vorgesehenen Bohrloch-Abschnitte 4b und 5, mit welchen die Bohrung bei Nicht-Fündigkeits im Malm hätte bis ins Grundgebirge vertieft werden sollen, wurden also nicht mehr ausgeführt. Dies vor allem wegen des stark erhöhten Risikos weiterer Gaseinbrüche und/oder seismischer Ereignisse und der damit verbundenen Gefahren für die Bohrung selbst sowie die potentiellen Schäden für Dritte (siehe Ausführungen in Kapitel 6).

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die stratigrafische Abfolge und den Ausbau der ausgeführten Bohrung GT-1. Ein Vergleich der MD-Tiefen mit den vertikalen Tiefen unter dem Bohrabsatzpunkt (m TVD = true vertical depth) zeigt, dass wegen des abgelehnten Bohrpfads bis zur Endtiefen eine Differenz von ca. 200 m resp. 5% erreicht wurde.

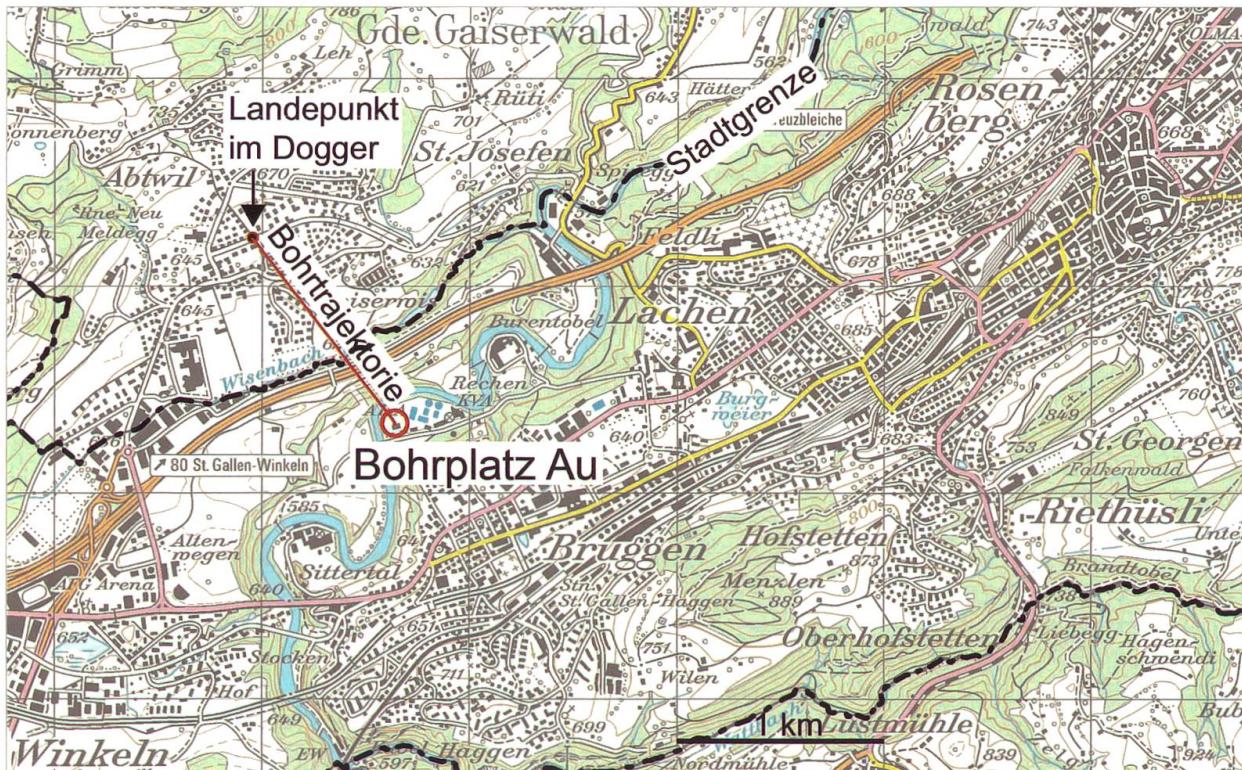


Abbildung 3:
Lage des Bohrplatzes Au für St.Gallen GT-1 an der Sitter westlich des Stadtzentrums; der Landepunkt der Bohrung im Dogger liegt bereits ausserhalb der Stadtgrenze unter Abtwil, in der Gemeinde Gaiserwald.

4.2 Chronologie der Ereignisse vom SpudIn bis zum Erreichen der Endtiefe

Das Zeit/Teufen-Diagramm in Abbildung 5 zeigt den chronologischen Ablauf der Bohrarbeiten im Überblick. Gemäss Planung wurde die Bohrung in 4 Etappen oder Sektionen (von engl. section) abgeteuft, wobei der Bohrdurchmesser von 23" für Sektion 1 bis auf 8 1/2" für Sektion 4 im Mesozoikum reduziert wurde. Dieses teleskopartige Ineinandergreifen der einzelnen Sektionen ist notwendig, weil jeder Abschnitt nach dem Bohren mit einer Verrohrung gesichert und diese mit Zement dicht ans Gebirge geschlossen werden muss. Da ein offenes Bohrloch mit zunehmender Länge und Zeit auch ein zunehmendes Stabilitäts- und damit Sicherheits-Risiko darstellt, ist eine bis zu 5 km tiefe Bohrung zwangsläufig mit mehreren Sektionen zu planen, wobei die in GT-1 realisier-

ten geneigten Molasse-Sektionen 2 und 3 mit je ca. 1,5 km Länge für eine Explorationsbohrung bereits ein relatives Wagnis darstellen.

Bohrtechnisch stehen zwei unterschiedliche Vortriebstypen zur Verfügung, das konventionelle Verfahren mit drehendem Rollen- oder Zahnmeissel und das moderne, bei optimalem Einsatz wesentlich leistungsfähigere PDC-Verfahren (PDC = Polycrystalline Diamond Compact bit, im Wesentlichen ein rasch drehendes, schabendes Bohrverfahren). Im Einzelnen steht eine für den Laien unüberschaubare Vielfalt an verschiedenen Meisseltypen zur Verfügung, deren optimaler Einsatz von Spezialisten in Zusammenarbeit mit dem Geologen beschlossen werden muss.

In GT-1 wurde die erste Sektion bis in 960 m Tiefe mit dem Rollen- resp. Zahnmeissel unter Verwendung einer Bentonit-Polymer-Spülung mit einer mittleren Dichte von 1.1 gebohrt. Dabei ergaben sich bereits zu Beginn

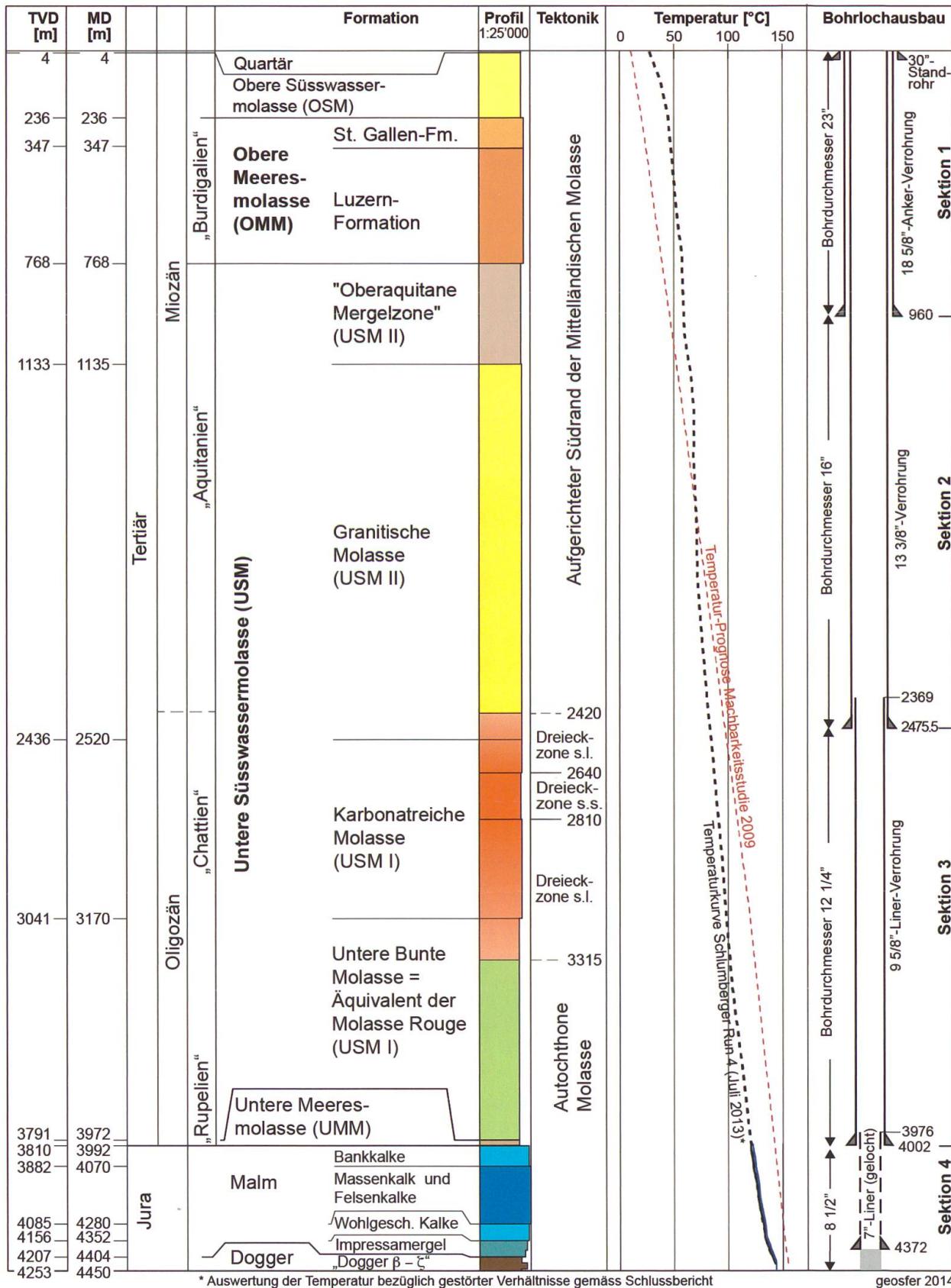


Abbildung 4:
Die Bohrung St.Gallen GT-1 im Überblick.

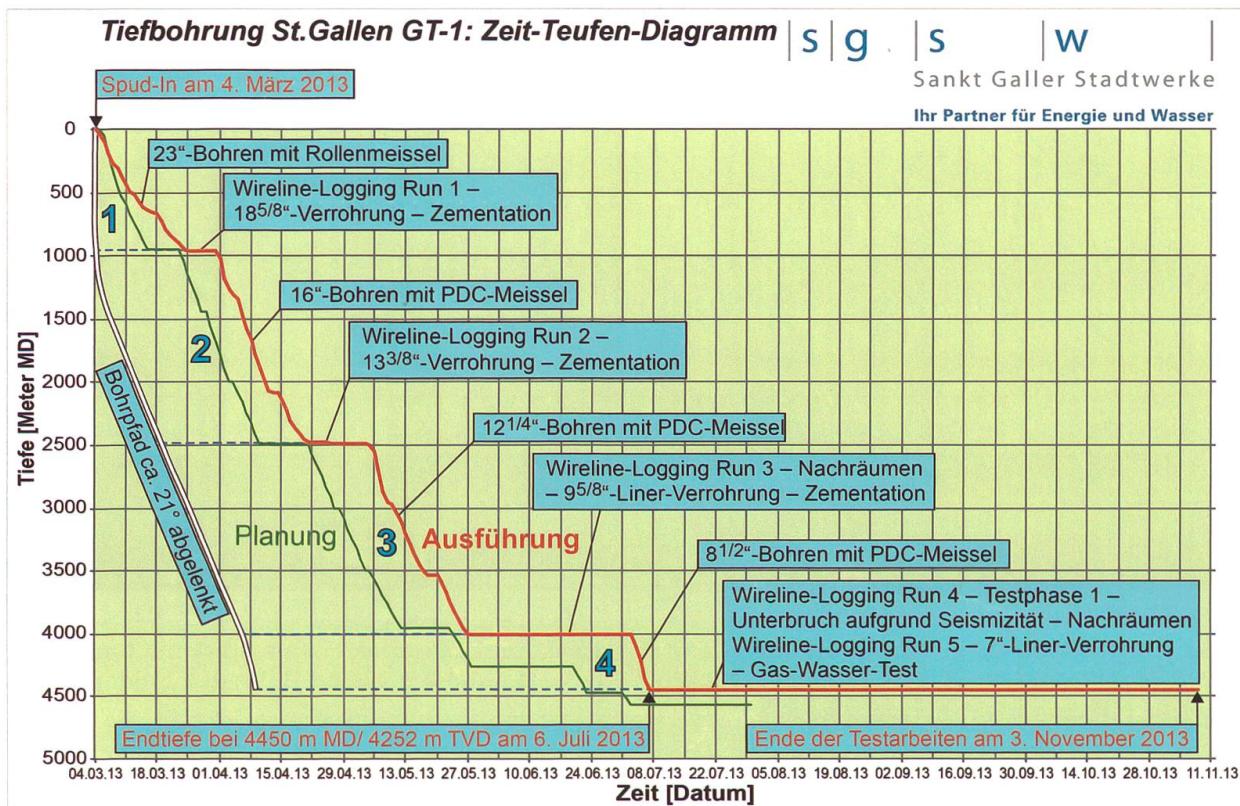


Abbildung 5:
Zeit/Teufen-Diagramm der Bohrung St.Gallen GT-1, mit Darstellung der wichtigsten Arbeitsphasen in den Bohrloch-Sektionen 1 bis 4 (grün = Planung, rot = Realisierung).

unerwartete Probleme, indem die relativ weichen, tonreichen Mergel der OSM für nachhaltiges Verkleben der Bohrgarnitur (siehe Abb. 6, links) und damit zeitliche Verzögerungen sorgte. Ab Top OMM verursachten die zahlreichen, bis zu 25 m mächtigen Konglomerat-Abschnitte weitere Verzögerungen, weil diese Nagelfluhbänke unerwartet abrasiv waren und damit einen enormen Meisselverschleiss bewirkten. Bis zum Fuss der ersten Sektion wurde praktisch senkrecht gebohrt, dann ein erfolgreiches Wireline-Logging (siehe Kapitel 5.4) durchgeführt und danach der Abschnitt hinter einer dicht einzementierten 18^{5/8}"-Verrohrung gesichert.

Sektion 2 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 einem PDC-Meissel

(Abbildung 6, rechts), was teilweise sehr gute Bohrfortschritte von bis zu 25 m/h und eine Meterleistung des ersten Meissels von 1170 m ergab. In Sektion 2 musste der Bohrpfad gemäss Zielvorgabe nun abgelenkt und mit einem Winkel von ca. 21° zur Senkrechten nach Azimut 322,5° also ca. NW geführt werden. Eine abgelenkte Bohrung erfordert zusätzlich den Einsatz spezieller Richtbohrtechniken, welche je nach eingesetztem System sehr kostenrelevant sein können. In GT-1 kamen verschiedene Systeme zum Einsatz, wobei insgesamt gute bis sehr gute Resultate, d.h. stabile Bohrlochgeometrien erreicht wurden.

Bei knapp 2500 m MD wurde die Sektion 2 gestoppt. Es zeigte sich, dass das über gut 1500 m offene Bohrloch trotz der stabilen Geometrie diverse Problemzonen aufwies, welche mit mehrmaligem Befahren und Säubern des Bohrlochs nachgearbeitet werden mussten.



Abbildung 6:
Links: Konventioneller 23"-Rollenmeissel, wie er in der Sektion 1 zum Einsatz kam, stark mit tonreichem Bohrgut verklebt. Rechts: Moderner 18"-PDC-Meissel teilweise noch mit Bohrgut aus der jüngeren USM (Oberaquitane Mergelzone in Sektion 2).

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 1081 m Bohrlochtiefe nicht passieren konnten. Die geophysikalischen Daten zu Sektion 2 beschränken sich deshalb auf ein während des Bohrens aufgenommenes Gamma-Log sowie die später durch die Verrohrung aufgenommenen akustischen Messungen (Sonic- und Zementbond-Logs siehe Kapitel 5.4). Die 13^{3/8}"-Verrohrung von Sektion 2 reicht bis an die Oberfläche und deren Zementation musste ohne detaillierte Kaliberinformationen durchgeführt werden, wobei grössere Unsicherheiten durch Zementverluste und ungewöhnliche Druckverhältnisse auftraten.

Die nochmals ca. 1500 m lange Sektion 3 wurde mit demselben Verfahren und wiederum guten bis sehr guten Bohrfortschritten abgeteuft wie Sektion 2. Die tektonisch überprägte Dreieckzone, wo mit bedeutenden hydrostatischen Überdrücken und allenfalls grösseren Gasvorkommen gerechnet wurde, erwies sich als praktisch problemlos. In der

Folge konnte auch die ältere USM, wo zuerst harte Sandsteine und im untersten Abschnitt tonreiche Serien dominierten, mit dem PDC-Werkzeug erfolgreich durchteuft werden. Dabei ergaben sich allerdings zunehmende Probleme mit der langen, offen stehenden Bohrstrecke, sodass die einmal erbohrten Abschnitte ein immer aufwändigeres Nachräumen erforderten. Zudem erreichte die Temperatur für die eingesetzte Spülung kritische Werte, was mit zusätzlichen Massnahmen jedoch ohne externe Kühlung unter Kontrolle gehalten werden konnte.

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 maximal 1,35 erhöht wurde. Die in der Bohrprognose abgeschätzten hydrostatischen Überdrücke von 1,6 bis 1,8 wurden also nicht bestätigt.

Die Zieltiefe am Top Malm wurde nach nur 85 Tagen Bohrzeit bei 3992 m MD mit hoher Präzision erreicht (Prognose = 3940 m). Das Bohrloch erwies sich bei den notwendigen Räumarbeiten aber – gelinde gesagt – als sehr widerspenstig und musste deshalb mehr-

fach, teilweise mit Spezialwerkzeugen befahren werden. Das Wireline-Logging konnte wiederum nicht über die ganze Tiefe durchgeführt werden, denn bei 2916 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 (vergl. Kapitel 5.4).

Die Sicherung der Sektion 3 erfolgte als sogenannter Liner, eine nicht mehr bis zutage reichende Verrohrung, welche ca. 100 m über dem Rohrschuh im bestehenden 13 $\frac{3}{8}$ "-Casing aufgehängt wurde (siehe Schema in Abb. 4). Dafür musste das Bohrloch nochmals geräumt werden, wonach das Setzen der 9 $\frac{5}{8}$ "-Verrohrung mit viel Aufwand verbunden und erst beim zweiten Versuch erfolgreich war. Insgesamt verstrichen so vom Erreichen der Zieltiefe am Top Malm über 5 Wochen (inkl. geplanter, sicherheitsbedingter Pause während des St. Galler OpenAirs) bis weitergebohrt werden konnte.

Die Bohrarbeiten für die Sektion 4 erfolgten wiederum im Richtbohrverfahren mit einem PDC-Meissel. Dabei wurde die Neigung von 22 auf 8 Grad abgebaut, um gemäss einer aufgrund der bisherigen Bohrergebnisse plausiblen geologischen Neubeurteilung die Bohrspur näher an einer vermuteten Verwerfungszone verlaufen zu lassen. Die ca. 450 m lange Malm-Dogger-Strecke wurde in einem Run in nur 3 Tagen ohne Probleme abgeteuft, wobei weder Spülungsverluste noch nahmhbare 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.

Das geplante Wireline-Logging inkl. Bohrlochseismik (Check Shot) und Entnahme von Seitenkernen konnte dann fast wie geplant durchgeführt werden, womit zumindest für die Zielformationen in Sektion 4 ein wertvoller geophysikalischer Datensatz gesichert wurde (siehe Kapitel 5.4). Mit diesen Aufnahmen wurde das eigentliche Bohrprogramm am 11. Juli abgeschlossen. Die nachfolgenden Test- und Sicherungsarbeiten werden hier nicht ausführlicher behandelt; eine Zusammenfassung dieser bis in den November 2013 dauernden operationellen Phase folgt in Kapitel 6 dieses Beitrags.

5 Die wichtigsten geologischen Resultate der Bohrung GT-1

5.1 Die Schichtabfolge von GT-1 im Überblick

Abbildung 4 zeigt einen Überblick des Bohrprofils mit MD- und TVD-Tiefen der durchteuften Formationsgrenzen, in Tabelle 1 sind die Dimensionen der einzelnen Formationen zusammengestellt. Weil der Bohrpfad nur im untersten Abschnitt etwa senkrecht zur Schichtung verläuft (Abbildung 2), müssen die wahren Mächtigkeiten berechnet werden. In Tabelle 1 sind sowohl die dazu verwendeten Winkel zwischen Bohrpfad und Schicht wie auch die damit berechneten wahren Formations-Mächtigkeiten angegeben. Daraus ergibt sich, dass mit der 4450 m langen Bohrung eine Tiefe von 4252 m unter Terrain erreicht und dabei eine Schichtreihe mit der primären stratigrafischen Gesamtmächtigkeit von ungefähr 4180 m durchteuft wurde.

Im Folgenden werden die einzelnen im Bohrprofil unterschiedenen lithostratigraphischen Einheiten kurz beschrieben und charakterisiert, wobei die Gliederung des Molasseabschnittes aufgrund sedimentpetrografischer Kriterien erfolgte. Detailliertere Darstellungen der Molassestrecke und des Mesozoikums sind in den Beiträgen von SCHLANKE und von STEIGER (in diesem Band) zu finden.

<Wahre Mächtigkeit> [m]	Formation		von MD	bis MD	Länge [m]	Winkel Bohrpfad /Schicht ca.	Basis TVD [m ab OKT]	TVD [m ü.M]
4,0	Quartär		0	4	4	90	4	575
222,4	Obere Süßwassermolasse OSM		4	236	232	73,5	236	343
106,4	Obere Meeresmolasse	OMM	St.Gallen-Formation	236	347	111	73,5	347
403,7			Luzern-Formation	347	768	421	73,5	768
354,5	Untere Süßwassermolasse	USM II	Oberaquitane Mergelzone	768	1135	367	75	1134
1199,4			Granitische Molasse	1135	2520	1385	60	2436
627,9		USM I	Karbonatreiche Molasse	2520	3170	650	75	3041
789,8			Untere Bunte Molasse	3170	3972	802	80	3791
19,7	Untere Meeresmolasse	UMM	Horwer Sandstein + Grisiger Mergel	3972	3992	20	80	3809
77,7	Malm		Bankkalke	3992	4070	78	85	3882
159,4			Massenkalke	4070	4230	160	85	4037
49,8			Felsenkalke	4230	4280	50	85	4086
71,7			Wohlgeschichtete Kalke	4280	4352	72	85	4156
52,0			Impressameriegel + Glaukonitsandmergel	4352	4404	52	90	4207
20,0	Dogger	Oberer Dogger	4404	4424	20	90	4227	-3648
26,0		Wedelsandstein + Eisensandstein	4424	4450	26	90	4252	-3674
4184,4					4450			

Tabelle 1:
Tiefen und Mächtigkeiten der erbohrten Formationen von St.Gallen GT-1

5.2 Molasse: 4–3992 m MD

Die 4450 m lange Bohrstrecke (MD) besteht zu 90% aus fluvioterrestrischen und marinen Molasse-Ablagerungen. 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 da-

bei 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 Gesteins-

kontraste und der durchgehend verfügbaren geophysikalischen Logs gut begründet ist. Eine globale Kalibration mit Sedimentpetrografia ist zwar ebenfalls möglich, bleibt aber im Vergleich zur liegenden USM relativ unverbindlich.

Die durchwegs in einer distalen, von feinkörnigen Schwemmsedimenten geprägten Vorlandfazies abgelagerten USM-Sequenzen haben über mehr als 3000 m eine sehr uniforme lithologische Ausbildung und müssen deshalb mit Hilfe von sedimentpetrografischen Kriterien weiter gegliedert werden. Ein ausführlicher Bericht über diese Untersuchungen ist im Beitrag von SCHLANKE (2015) zu finden. Dabei spielt die lückenlos verfügbare Kalzistratigrafie eine tragende Rolle.

5.2.1 Obere Süsswassermolasse (OSM): 4–236 m MD

Die Gesteine der Basiszone der Oberen Süsswassermolasse sind in der näheren und weiteren Umgebung des Bohrplatzes, vor allem entlang der Sitter, mehrfach aufgeschlossen und deshalb gut bekannt. Zusammenhängende Oberflächenprofile sind in den relativ rasch verwitternden, nur mässig verfestigten OSM-Lithologien allerdings selten. Ein über ca. 200 m zusammenhängendes Profil ergibt sich aus den Kernbohrungen, welche für den Bau des Rosenberg-Tunnels der N1 aufgenommen wurden. Feinkörnige, mergelig-tonige Lithologien dominieren dort 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“); diese konnten auch sehr schön in einer Kernbohrung nachgewiesen werden, welche 2012 auf dem Bohrplatz Au nur wenige Meter neben dem Bohrkeller niedergebracht wurde, um den Zustand der oberflächennahen Festgesteine im Hinblick auf die Verankerung der Standrohre zu prüfen (GRUNDBAUBERATUNG AG 2012).

Die Lage bei der Au entspricht paläogeografisch dem Übergangsbereich vom radialen Hörnli-Schuttfächer 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 variiieren. 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. Diese beruht im Sitter – Urnäsch-Profil vor allem auf der Korrelation von Konglomerat-Lagen und dem lithologischen Charakter der dazwischen dominierenden feinkörnigen Schichten. Daraus ergibt sich fast zwangsläufig, dass die Konglomerat-Lage zwischen 236 und 250 m Bohrtiefe der Oberen Grenznagelfluh entspricht, weshalb die Basis OSM bei 236 m gezogen wurde. Eine deutliche kalzimetrische Grenze ergibt sich aber erst wesentlich tiefer, nämlich zwischen 270 und 300 m Bohrtiefe (siehe SCHLANKE 2015).

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

236–347 m	St. Gallen – Formation
– 250 m	Obere Grenznagelfluh
– 274 m	Obere Plattensandsteine
– 302 m	Dreilinden-Nagelfluh
– 333 m	Zone der Schiefermergel
– 347 m	Freudenberg-Nagelfluh
347–768 m	Luzern-Formation
– 407 m	Burdigale Zwischenzone
– 482 m	Zone der mittleren Plattensandsteine
– 628 m	Zone der unteren Plattensandsteine
– 725 m	Zone der untersten Plattensandsteine
– 768 m	Burdigales Basiskonglomerat (?)

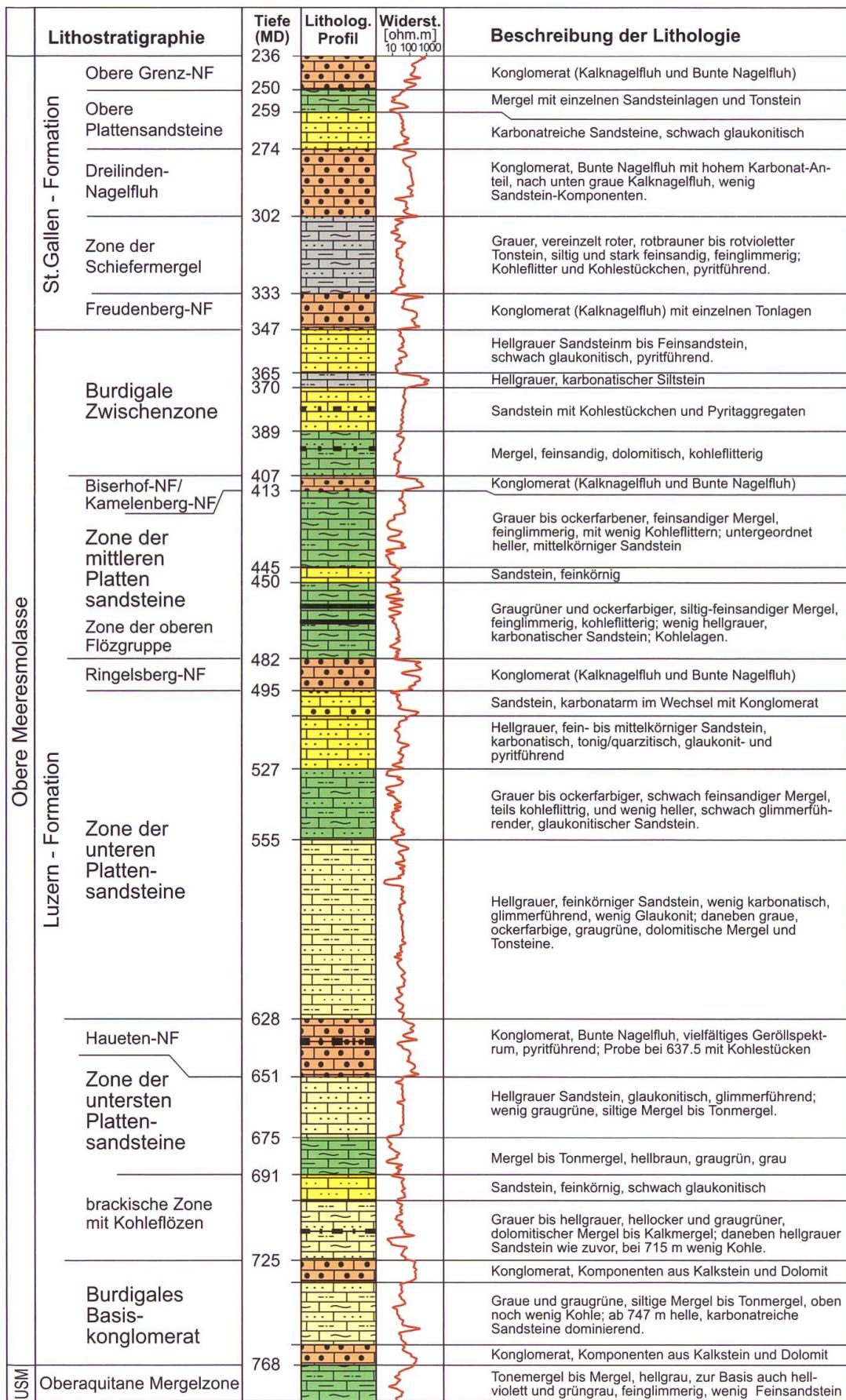


Abbildung 7:
St.Gallen GT-1:
Lithostratigrafisches
Profil der OMM mit
Gliederung in Member
und Schichten gemäss
BÜCHI 1955. Hinter-
grundfarben: orange
= Konglomerat, gelb
= Sandstein, grau =
Siltstein-dominiert,
grün = Mergel-do-
miniert, hellgelb =
Sandstein-dominiert.

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 zur hangenden OSM und zur liegenden USM – geprägt von kleinräumigen Lithologie- und Mächtigkeitswechseln, welche eine vergleichsweise detaillierte lithostratigrafische Gliederung ermöglichen. BÜCHI (1955) hat die OMM-Profile in und um St.Gallen im Detail aufgenommen – insbesondere die praktisch lückenlos aufgeschlossene Abfolge entlang von Urnäsch und Sitter – und leitete daraus die auch hier verwendete Nomenklatur ab. Es handelt sich um eine rein lithologische Gliederung ohne biostratigrafische oder sedimentpetrografische Marker. Diese orientiert sich in erster Linie an prominenten Nagelfluh-Bänken, die bis zu 25 m mächtig sein können, sowie an der Fazies der dazwischen liegenden siltig-sandig-tonigen Abschnitte. Diese feinkörnigen Lithologien enthalten reichlich biogenes Material, welches vorwiegend flachmarines bis brackisches Milieu anzeigt.

Die OMM von St.Gallen weist aber auch Schichten mit limnischen und terrestrischen Faunen sowie reichlich pflanzliche Überreste auf (Pflanzenabdrücke, Kohlelagen, verkiezelte Hölzer). Paläogeografisch entspricht die ganze Abfolge dem Südrand des OMM-Meeres, wo sich Schuttfächer, Deltas, Lagunen und Küstenebenen sowohl lateral wie vertikal überlagern.

Im Vergleich zu den lithofaziellen Kriterien sind die Möglichkeiten der sedimentpetrografischen Gliederung mit Hilfe von Kalzimetrie und Schweremineralien beschränkt. Der Grund hierfür liegt im Fehlen durchgehender, sedimentpetrografisch kalibrierter Referenzprofile aus der Oberflächengeologie. Signifikant ist lediglich eine OMM-Karbonatfazies, indem diese einen deutlich höheren Dolomit-Anteil aufweist, als die hangende OSM, der Gesamtkarbonat-Anteil (ohne Konglo-

merate!) aber ebenso deutlich geringer ist, als bei der unmittelbar liegenden USM (vergl. SCHLANKE 2015). Diese Kriterien genügen allerdings nicht für eine Meter-genaue Definition von Top und Basis OMM, sondern sind nur als zusätzliche Argumente zur rein lithologischen Gliederung verwendbar.

Für die genaue Abgrenzung der einzelnen Lithologien innerhalb der OMM konnten die Schlumberger-Logs verwendet werden, was vor allem für die Konglomeratbänke, hervorragend funktionierte (siehe Widerstands-Log in Abb. 7).

Gemäss BÜCHI (1955) setzt die Sedimentation der OMM mit markanten Geröllschüttungen ein, welche das sog. Burdigale Basiskonglomerat bilden. Dieses ist im Sitter – Urnäsch-Profil 20–25 m mächtig (vergl. auch KELLER 1989) und setzt sich aus drei Geröllschüben zusammen. Im Liegenden sollen dann fluvioterrestrische, zunehmend auch bunte Mergel der jüngsten USM folgen, die ebenfalls noch Nagelfluhkörper aufweisen (vergl. auch Atlasblatt St.Gallen – Appenzell, LUDWIG et al. 1949 und die kontroverse Diskussion in den entsprechenden Erläuterungen, EUGSTER et al. 1960). Es wird offensichtlich, dass das Kriterium Konglomerat allein nicht zur Abgrenzung taugt. Auch biostratigrafische Argumente fehlen und die Fazies der Untersten OMM ist in diesem Gebiet auch nicht marin sondern terrestrisch ausgebildet.

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 768 m Tiefe auf. Eine genauere Beschreibung der kalzimetrischen Grenze zur liegenden USM wird in SCHLANKE (2015) gegeben.

5.2.3 Untere Süsswassermolasse (USM): 768–3972 m MD

Die relativ monotonen, fluvioterrestrischen Mergel – Siltstein – Sandstein-Serien der USM umfassen eine Bohrlochstrecke von

3'200 Metern und werden noch von ca. 20 m UMM unterlagert. Abgesehen von den vermuteten tektonischen Störungen im Bereich der Dreieckzone (Abb. 2) handelt es sich im Wesentlichen um eine durchgehende, stratigrafische Sequenz am Übergang von der mittelländischen zur subalpinen Molasse, wie das durch die sedimentpetrografischen Analysen bestätigt wird. Gemäss anderen regionalen Tiefbohrungen im Bodenseeraum und den aufgeschlossenen Profilen in der angrenzenden Ostschweizer Molasse wird grob zwischen der älteren ‹chattischen› oder karbonatreichen und der jüngeren ‹aquitainen› resp. granitischen USM unterschieden. Mangels klar definierter Formationen resp. biostratigrafischer Marker werden diese zwei übergeordneten Abteilungen der USM in jüngerer Zeit auch mit den neutraleren Begriffen USM I und USM II bezeichnet; als Referenz für die zeitliche Gliederung dienen dabei magnetostratigrafische Referenzprofile (KEMPF et al. 1999; siehe auch ZAUGG & LÖPFE 2011, ZAUGG et al. 2012).

768–2520 m USM II, ‹Aquitien›
 – 1135 m *Oberaquitane Mergelzone*
 – 2520 m *Granitische Molasse*

2520–3972 m USM I, ‹Chattien›
 – 3170 m *Karbonatreiche Molasse*
 – 3972 m *Untere Bunte Molasse*

Eine detailliertere lithostratigrafische Gliederung der USM-Abfolge von GT-1 gelingt anhand sedimentpetrografischer Kriterien (siehe SCHLANKE 2015). Sind entsprechende Analysen nicht verfügbar, so muss eine rein lithologische Gliederung vorgenommen werden, was nur sinnvoll ist, wenn diese mit geeigneten Referenzprofile aus benachbarten Aufschlüssen und/oder Bohrungen korreliert werden kann. Dies ist gerade für GT-1 nur sehr beschränkt möglich, weil:

- die lithologische Abfolge nur wenig spezifisch ausgebildet ist
- die altersmäßig entsprechenden Sequenzen unterhalb der Randunterschiebung bes-

tenfalls in Oberflächenaufschlüssen der Subalpinen Molasse zu finden sind,

- letztere aber paläogeografisch viel südlicher abgelagert wurden, d.h. Schuttfächer-interner und deshalb tendenziell grob-klastischer ausgebildet sind als die entsprechenden feinkörnigen Abfolgen im distalen Ablagerungsraum, der von GT-1 erfasst wird und somit ein direkter lithologischer Vergleich nicht möglich ist.

Abbildung 8 zeigt ein lithostratigrafisches Übersichtsprofil der USM, ergänzt durch die Daten der Kalzimetrie sowie der Auszählung von weissen Kluftkalziten in den Cutting-Proben. Sehr schön kommt der Kontrast im Karbonatgehalt zwischen der Granitischen USM II und der Karbonatreichen USM I zu Geltung.

Eine qualitative Eingrenzung der tektonisch beanspruchten Dreieckzone gelingt anhand der systematischen Auszählung von weissen Kluftkalziten in den Cutting-Proben (blaue Balken im Profil Abb. 8). Aufgrund dieser Daten wird der Tiefenbereich zwischen 2420 und 3315 m MD als Dreieckzone s.l. abgegrenzt; ein zentraler Teil 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, dieser Band).

5.2.4 Untere Meeresmolasse (UMM): 3972–3992 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

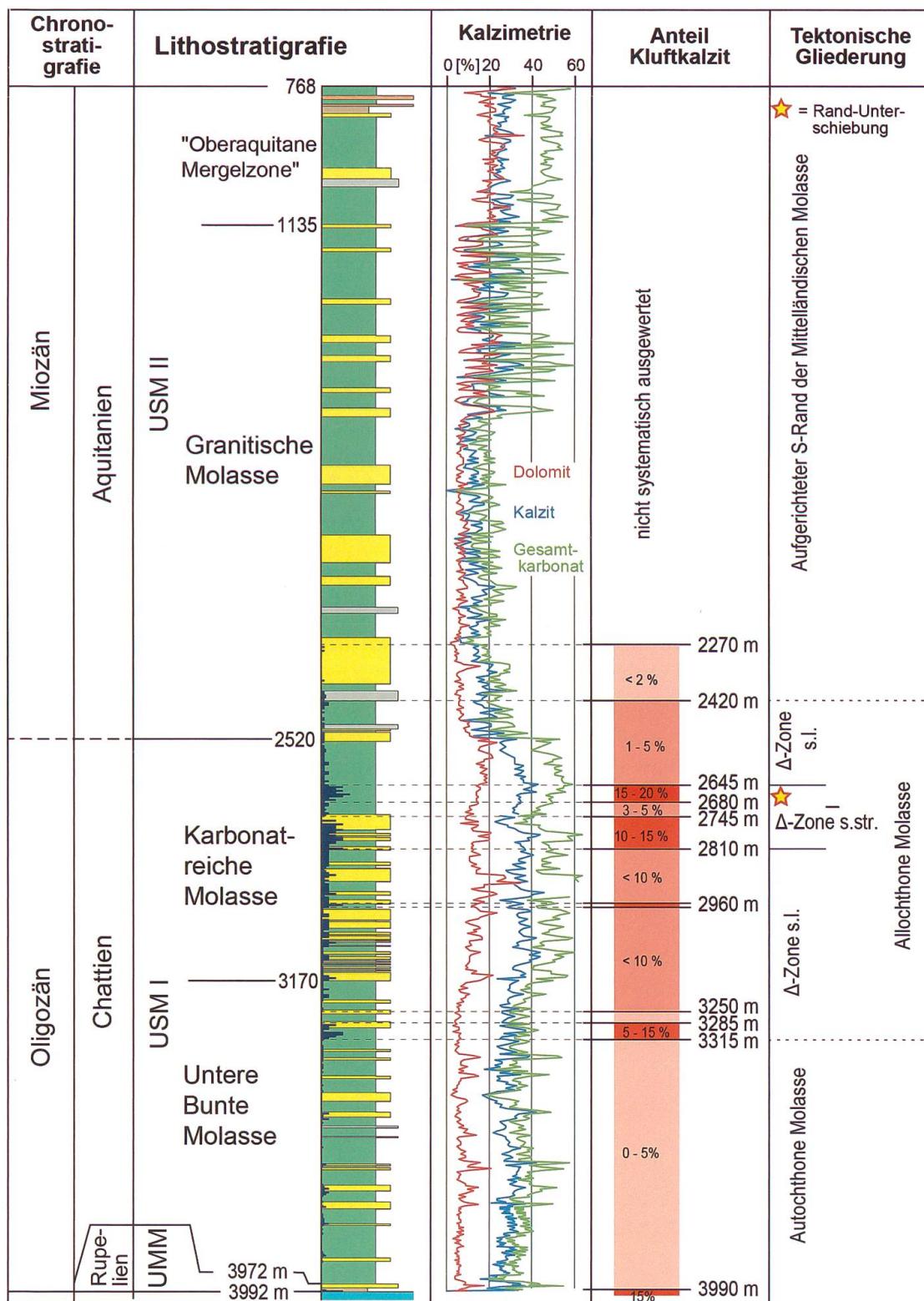


Abbildung 8:

St.Gallen GT-1: Vereinfachtes lithologisches Profil der USM mit Kalibration durch Kalzimetrie und Abgrenzung der Dreieckzone aufgrund des relativen Kluftkalzit-Anteils in den Cuttingproben (blaue Balken im lithostratigrafischen Profil); Hintergrundfarben des Profils: orange = Konglomerat, gelb = Sandstein, grau = Siltstein, braun = Tonstein, grün = Mergel, blau = Kalkstein; Tiefen in m MD.

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 Bunt-Molasse deutlich abhebenden, aber ebenfalls feinkörnigen Siliziklastika gerechnet.

Um die basale Molasse und dann den Top Malm möglichst frühzeitig zu erkennen, wurde der Probenahme-Abstand ab 3750 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 eine detaillierte Beurteilung des Bohrkleins erlaubte. So konnten die ab 3972 m MD erbohrten Sandsteine und Mergel rasch als UMM interpretiert werden. Ab 3987,5 m wurde dann 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 3991,25 m Kalkmergel mesozoischer Provenienz erscheinen und die Probe bei 3992,5 m bereits den für die folgenden Proben typischen, bioklastischen Pelmikrit der distalen Schwäbischen Schwammfazies aufweist. Die lithostratigrafische Grenze Basis Molasse resp. Top Malm wurde deshalb im Einklang mit dem kalzistratigrafischen Befund bei 3992 m MD festgelegt.

Gemäss 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 3990 m auffallend viel Kluftkalzit enthalten, was auf eine mögliche tektonische Überprägung dieses lithologischen Übergangs hinweist.

Die ca. 20 m mächtige Abfolge kann in ei-

nen hangenden Sandstein und eine liegende Tonmergel-Sequenz unterteilt werden:

3972–3992 m UMM, <Rupelien>

– 3982 m *Horwer Sandstein*
– 3992 m *Grisiger Mergel*

5.3 Mesozoikum: 3992–4450 m MD

Zwischen der Basis der Molasse bei 3992 m und der Endtiefe bei 4450 m wurden noch 412 m Malm und 46 m Dogger erbohrt. Diese 8^{1/2"}-Bohrstrecke (Sektion 4) wurde intensiv untersucht und betestet, wodurch eine Fülle von Informationen gesichert werden konnte (siehe auch Kapitel 6).

Die Beprobung der Malm-Dogger-Strecke erfolgte durchgehend im 2,5 m-Abstand, am Übergang Molasse/Malm teilweise noch enger (siehe oben). Von jeder 2. Cutting-Probe wurden vor Ort-Dünnschliffe hergestellt und laufend ausgewertet, sodass die Beschreibung und Gliederung der Malm-Dogger-Abfolge vor allem auf der Auswertung dieser Dünnschliffe beruht (siehe STEIGER 2014, 2015 in diesem Band). Zusätzliche Informationen lieferten die zwischen 4100 m und Endtiefe gezogenen Seitenkern-Proben, von denen ebenfalls mehrheitlich Dünnschliffe und einige Anschliffe erstellt wurden.

In der Bohrsektion 4 konnte auch ein umfangreiches Wireline-Logging durchgeführt werden, dessen Auswertung weitere wichtige Informationen für die Beschreibung und Interpretation der Abfolge Malm-Dogger lieferte (siehe auch Abbildung 12).

Das lithostratigrafische Prognoseprofil stützte sich auf Referenzbohrungen östlich des Bodensees (Markdorf, Opfenbach, Tettnang, Sulzberg) und für die Mächtigkeiten auf das Geschwindigkeitsmodell aus der 3D-Seismik. Erwartet wurde ein relativ geringmächtiger Malm in helvetischer Ausbildung mit etwa 300 m mächtigen, teilweise mergeligen, mikritischen Kalken vom Typ Quintnerkalk; angetroffen wurde aber eine gut 350 m mächtige Kalksteinabfolge in schwäbischer Schwammkalk-Fazies gefolgt

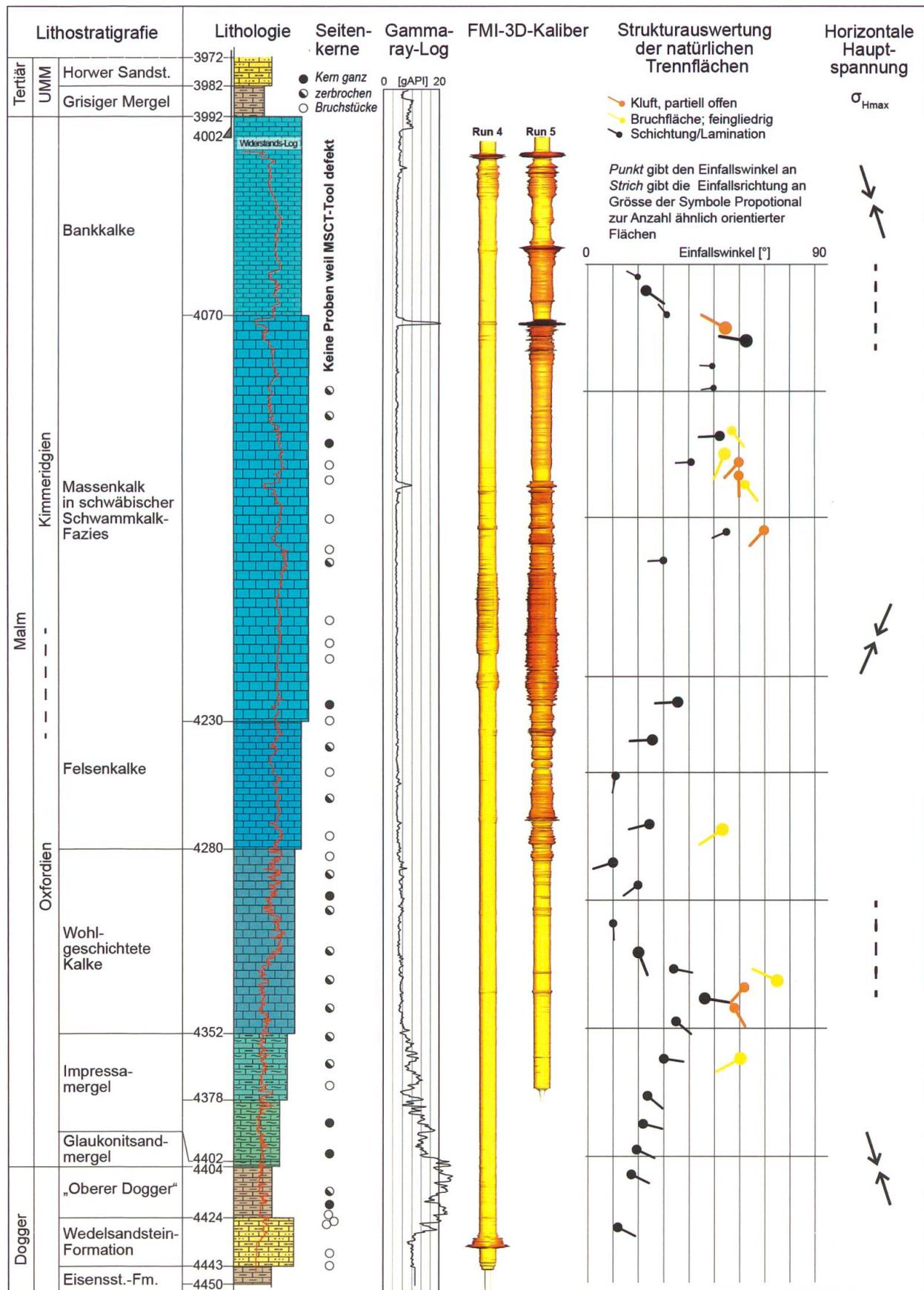


Abbildung 9:
St.Gallen GT-1: Stratigrafisches Profil der Malm-Dogger-Abfolge korreliert mit Daten und Auswertungen der geophysikalischen Bohrlochmessungen. Erläuterungen siehe Text.

von 50 m zunehmend tonreichen Impressa-
mergeln 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 folgende Beschreibung entspricht des-
halb nicht mehr einem lediglich auf der Be-
gutachtung von Cuttings und Kalzimetrie
beruhenden Feldbefund, wie das für die Mo-
lasse-Strecke noch weitgehend der Fall ist,
sondern wird gestützt durch weitergehende
Labor-Auswertungen und die Korrelation

mit qualitativ einwandfreien geophysikalischen Daten; eine Auswahl dieser Daten ist in Abb. 9 dargestellt.

5.3.1 Malm: 3992–4404 m MD

Der schwäbische Malm besteht in den Auf-
schlüssen des Randen und der schwäbischen
Alb aus gebankten bis massigen Kalksteinen
in charakteristischer Schwammfazies, welche
sich über den gesamten Zeitabschnitt lateral
und vertikal verzähnen. Weil gute biostra-
tigrafische Marker weitgehend fehlen, ist eine
zeitliche Einstufung der einzelnen Formati-
onen des schwäbischen Malm nur bedingt

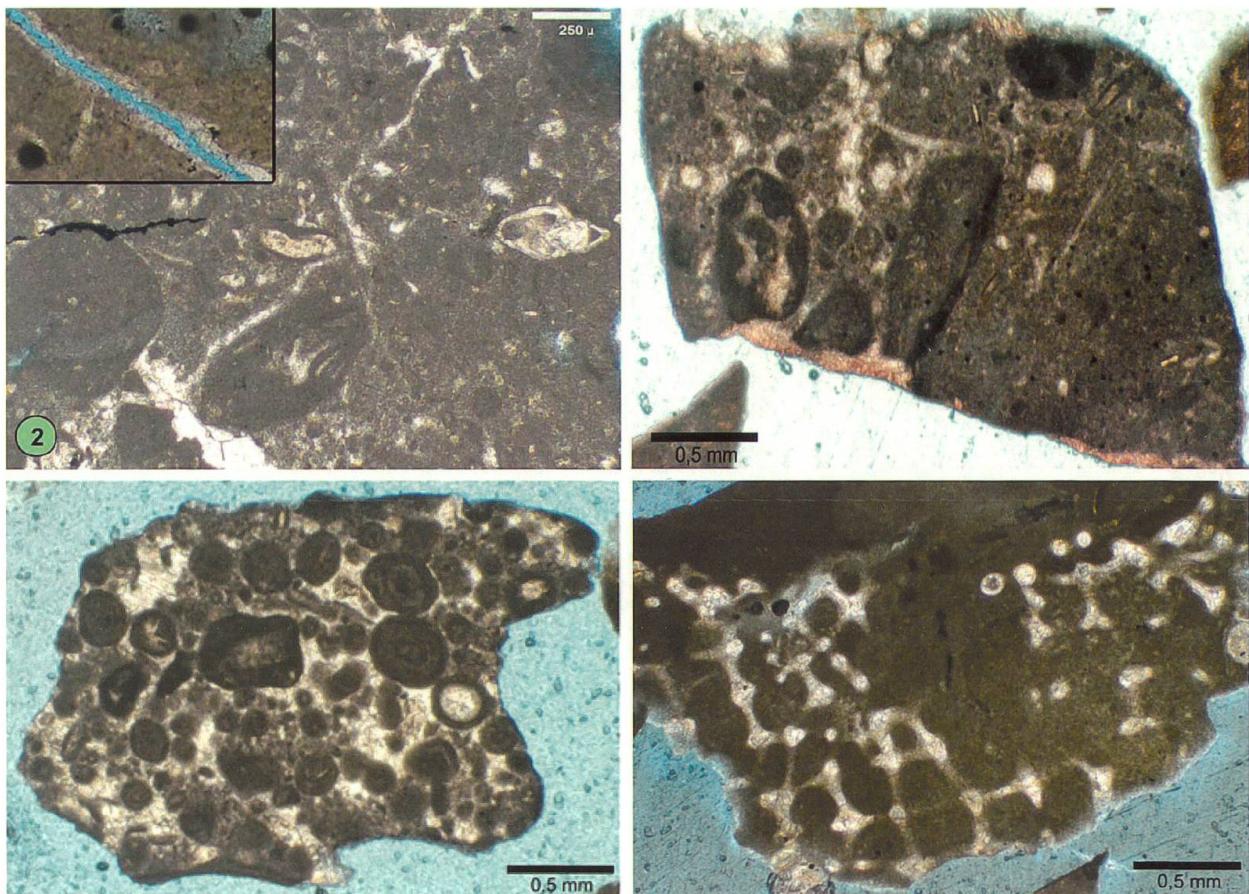


Abbildung 10:
St.Gallen GT-1: Mikrofazies der Malmkalke nach Cutting-Dünnschliffen: Links oben: Pelmikrit mit Kalzitadern und Mikrostylolithen mit Pyrit, Beckenfazies der Bankkalke (4035 m MD). Rechts oben: Komponentenreicher mikritischer Kalk vom Typ Wackestone mit Tuberoiden und Fossilresten aus der Umgebung von Schwammriffen (4205 m MD). Links unten: Oolithischer Pelsparit mit Schalenresten und Intraklasten aus dem Bereich der Felsenkalke (4270 m MD). Rechts unten: Hexactinellides, kalzitiertes Kieselschwammskelett in Mikritmatrix aus den wohlgeschichteten Kalken (4325 m MD).

möglich. Die vorrangige Gliederung erfolgt deshalb anhand der Fazies-Merkmale, der Schichtung und der mineralogischen Zusammensetzung (Tongehalt). GEYER et al. (2011) geben einen Überblick der lithofaziellen Kriterien und Verhältnisse in Baden-Württemberg (Alb und nördliches Molassebecken), welche auch für den Bodenseeraum und die in GT-1 angetroffene Malm-Abfolge angewendet werden kann.

Die im Folgenden umgesetzte Einteilung beruht auf dem Vorschlag von BLÄSI (2013), und wird durch die detaillierte Fazies-Auswertung von STEIGER (2014) bestätigt.

3992–4280 m Massenkalk

– 4070 m

Hellgraue bis hellbeige, mikritische Kalksteine mit Schwammmadeln, Schälchen und weiteren Bioklasten, Tuberoiden, Peloiden; untergeordnet Pelsparite mit Einfachoiden und pelmikritischen Krusten. Beckenkalk- bis Bankkalk-Fazies im distalen Bereich von Schwammriffen.

– 4280 m

Hellbeige, vorwiegend mikrosparitische Kalksteine; Peloosparite mit Intraklasten und daneben Intramikrite mit Peloiden, Schwammmadeln, Tuberoiden. Bankkalk-Fazies im proximalen Bereich von Schwammriffen (siehe Abb. 14 oben links).

4280–4352 m Wohlgeschichtete Kalke

Graue bis dunkelgraue mikritische Kalksteine mit tonigen Stylolithen und Tonflasern; Kieselschwamm-Fazies vorwiegend als Intramikrit bis Pelmikrit, untergeordnet Peloosparit; reichlich feinverteilter Pyrit, viel Kluftkalzit, z.T. mikrobrekziöse Ausbildung. Distale Schwammkalk bis Beckenkalk-Fazies. Die Seitenkerne zeigen zahlreiche Kalzitadern (siehe Abb. 14 oben rechts).

4352–4402 m Impressamergel

4352–4378 m

Dunkelgraue, mikritische Kalksteine im Wechsel mit dunkelgrauen, siltigen Kalkmergeln in Schwammfazies, teilweise dolo-

mitisch, feinverteilter Pyrit.

4378–4402 m

Dunkelgraue bis schwarze, siltige Mergel bis Tonmergel mit feinen biotritischen Komponenten, zunehmend glimmerführend, teilweise dolomitisch, ab SP 4397,5 m Glaukonit, teilweise Kluftkalzit (siehe Abb. 14 unten links).

4402–4404 m Glaukonitsandmergel

In der Probe 4405 m finden sich Glaukonit führende Mergel, welche im Südschwäbisch – Nordschweizerischen Raum als diagnostisch für den Untersten Malm gelten. Aufgrund der Geophysikalischen Logs (Gamma und Density) und einem Vergleich mit Bohrungen der Nordschweiz wird dieser massgebende Grenzhorizont auf genannte Tiefe festgelegt. Ein wirklicher Nachweis kann aber nicht geführt werden. Die lithostratigrafische Grenze zwischen Dogger und Malm bleibt deshalb im Bereich von wenigen Metern offen. Zumindest mit dem Auftreten der ersten Ooide (4407,5 m MD) dürfte aber der Dogger erreicht worden sein (vergl. Diskussion in STEIGER 2015).

5.3.2 Dogger: 4404–4450 m MD

Typisch für die Dogger-Formationen des Bodenseeraums und der Nordschweiz sind Eisen-Ooide, teilweise als (diagenetische) grüne Chamosit-Ooide. Diese treten erstmals in der Cutting-Probe 4407,5 m MD auf. Der oberste Abschnitt des Doggers ist zudem geprägt von Tonsteinen und biotritischen Mergeln, welche in den Referenzbohrungen der Nordschweiz und östlich des Bodensees um die 20 m mächtig sind und sich im Gamma- oder Widerstands-Log gut abzeichnen. Dieser eher tonreiche oberste Abschnitt des Doggers entspricht etwa dem schwäbischen Braunjura delta bis zeta und kann informell als ‹Oberer Dogger› bezeichnet werden.

Im Liegenden folgt der von zunehmend gröberen Sandsteinen geprägte mittlere Dogger mit Wedelsandstein-Formation und Dogger-Beta-Sandsteinen, welche in den nächsten Referenzbohrungen (Kreuzlingen, Tettnang)

25 bis 30 m mächtig sind. Sie werden im Folgenden mit Vorbehalt als Wedelsandstein – Eisensandstein-Abfolge bezeichnet (Braunjura beta & gamma).

4404–4424 m <Oberer Dogger>

Tonstein, schwarz, teilweise grau und graubraun, siltig, glimmerführend, schwach karbonatisch, teilweise mit Glaukonit; untergeordnet Mergel und Kalkstein; im Dünnschliff grüne Chamosit-Ooide in mikrobioklastischer Beckenfazies, Schwammreste, bei 4415 m *Protoglobigerina*.

Der Seitenkern 4414 m besteht aus einem eisenoolithischen Kalk mit deformierten Chamosit-Ooiden in einer tonig geäderten, mikritischen Matrix (siehe Abb. 11 links) und der Kern 4419 m aus einem schwarzen, siltigen Tonmergel mit bis 5 mm mächtigen hellen Silt- bis Feinsandsteinlaminae (siehe Abb. 14 unten rechts).

4424 – 4450 m Eisensandstein – Wedelsandstein-Formation (?)

Sandsteine, hell bis weiss, wenig Karbonat, teilweise auch kalkreiche, biotritische Sandsteine, im Wechsel mit schwarzen, siltigen Tonsteinen bis Tonmergeln, Glaukonit und Glimmer.

Die Seitenkerne bei 4425 und 4442,5 m MD zeigen weisse kalkarme Feinsandsteine und schwarze, siltige Tonsteine bis Tonmergel

mit bis 5 cm mächtigen Feinsandsteinlaminae und -lagen. Vererzte Lagen und Bioturbationsgefüge sind typisch; teilweise offene Kluftporosität.

5.4 Bohrlochgeophysik

Die modernen Methoden der Bohrloch-Auswertung stützen sich neben der Analyse des Bohrkleins (Cuttings) vor allem auf die Bohrlochgeophysik. Dabei werden am Kabel (Wireline) elektronische Messsonden ins Bohrloch abgesenkt und (in der Regel beim langsamem Heraufziehen) verschiedene Parameter der erschlossenen Gesteinsabfolge oder auch des verrohrten Bohrlochs gemessen. Mit mechanischen, akustischen, elektromagnetischen und auch radioaktiven Verfahren können so kontinuierliche geophysikalische Profile aufgezeichnet werden, deren kombinierte Auswertung gezielt Auskunft über die Dichte, den Tongehalt, die Porosität, die Schallgeschwindigkeit, Zustand von Verrohrung und Zementation etc. der durchbohrten Gesteine geben.

In der technischen Planung war deshalb ein aufwendiges Wireline-Logging vorgesehen, das die Bohrung durchgehend mit modernen geophysikalischen Logs dokumentieren sollte. Dieses Programm konnte aber wegen technischer Schwierigkeiten nur zum Teil umgesetzt werden; sowohl in Sektion 2 wie auch

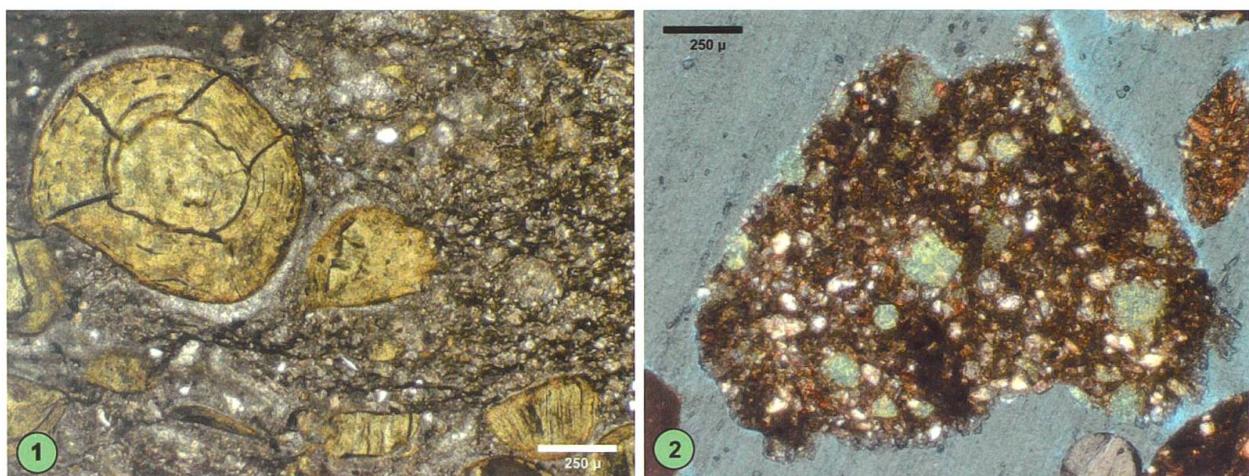


Abbildung 11:
St.Gallen GT-1: Mikrofazies im Dogger mit: Links: Geschrumpftes und kompaktiertes Eisenoid mit internen Brüchen und Kalzit-Zementen an Ober- und Unterseits (Seitenkern, 4414 m MD). Rechts: Feinsandiger Kalkmergel mit Glaukonitkörnern (Cutting, 4415 m MD).

in Sektion 3 konnte das Bohrloch nur zu einem kleinen Teil mit den Wireline-Sonden befahren werden, weil Unregelmässigkeiten in der Bohrlochwand das Absenken der Tools verhinderten. Die geophysikalischen Daten sind deshalb unvollständig, was die Erstellung eines detaillierten lithologischen Profils für die USM erschwert. Auch fehlen damit Daten für eine genauere Analyse der Dreieckzone, insbesondere im Hinblick auf die tektonische Interpretation (Spannungsanalyse). In Sektion 3 konnte immerhin ein durchgehendes MWD-Programm mit Gamma- und Widerstands-Log aufgenommen werden. Zudem wurden die Sektionen 2 und 3 auch mit einem Sonic durchs Casing dokumentiert, d.h. man hat die Schallgeschwindigkeit der Abfolge nachträglich im bereits verrohrten Bohrloch gemessen. Natürlich sind sowohl die MWD-Aufnahmen wie auch die durchs Casing gemessenen Daten von beschränkter Qualität; besonders das MWD-Gamma-Log erweist sich aber als durchaus brauchbare, den Cutting-Befund gut abbildende Messung.

In Abbildung 12 ist das ausgeführte Logging-Programm zusammengestellt. Daraus wird ersichtlich, dass vor allem die wichtige Malm-Dogger-Strecke (Sektion 4) sehr gut mit geophysikalischen Daten dokumentiert ist. Hier wurden zwei Logging-Programme durchgeführt, das erste unmittelbar nach Erreichen der Endtiefen (Run 4) und dann ein zweites nach dem Räumen des temporär verschlossenen Bohrlochs und unmittelbar vor der Verrohrung mit dem 7"-Lochliner (siehe Kapitel 6). Neben den Standard-Logs wurde dabei auch eine hochauflösende Abbildung der Bohrlochwand aufgenommen, die Seitenkerne entnommen und eine Bohrlochseismik (CheckShot) ausgeführt.

Mit dem im Raum orientierten, widerstandsisierten Abbild der Bohrlochwand (Formation Micro Imager = FMI) können vor allem Strukturelemente (Schichtlage, Klüfte, tektonische Störungen) erkannt werden und es können anhand des Zustands der Bohrlochwand Rückschlüsse auf die im Un-

tergrund herrschenden Diffenzialspannungen gezogen werden (siehe Abb. 9). Diese Informationen sind von grosser Bedeutung für das Verständnis der lokalen Tektonik und die weitergehende Interpretation der erschlossenen Störungszone; so konnte mit diesen Daten plausibel bestätigt werden, dass das seismische Ereignis vom 19. Juli 2013 als sinistrale Blattverschiebung an einer etwa NNE-SSW-streichenden Verwerfung zu interpretieren ist.

Mit Run 4 des Schlumberger-Loggings wurde auch eine Bohrlochseismik (CheckShot) durchgeführt. Damit werden die akustischen Wellengeschwindigkeiten der durchteuften Formationen ermittelt, welche insbesondere für die Tiefenkalibration der 3D-Seismik benötigt werden. Die Auswertung dieser Messreihe hat ergeben, dass die für die Prognose verwendeten Formationsgeschwindigkeiten des aus dem Prozessing der 3D-Seismik abgeleiteten Modells z.T. erheblich von den tatsächlichen Werten abweichen. Dadurch konnte unter anderem erklärt werden, weshalb für den Malm in der Bohrprognose eine viel zu geringe Mächtigkeit angenommen wurde. In Abbildung 13 ist das aus dem CheckShot abgeleitete Geschwindigkeitsprofil der Bohrung GT-1 dargestellt und mit den entsprechenden Daten von Referenzbohrungen sowie dem 3D-Modell verglichen. Diese Darstellung zeigt sehr schön, wie gross die Unsicherheiten in Bezug auf die Tiefenumrechnung von Seismikdaten sein können, wenn keine lokalen Bohrdaten verfügbar sind. Besonders die in der tieferen USM I deutlich ausgeprägte Geschwindigkeitsinversion ist ohne lokale Daten kaum prognostizierbar.

In der Planung wurde explizit darauf verzichtet, auch Kernstrecken zu realisieren, mit dem Hinweis, dass man sehr vieles aus den geophysikalischen Logs ableiten und berechnen kann. Um die Gesteinansprache 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 Bohr-

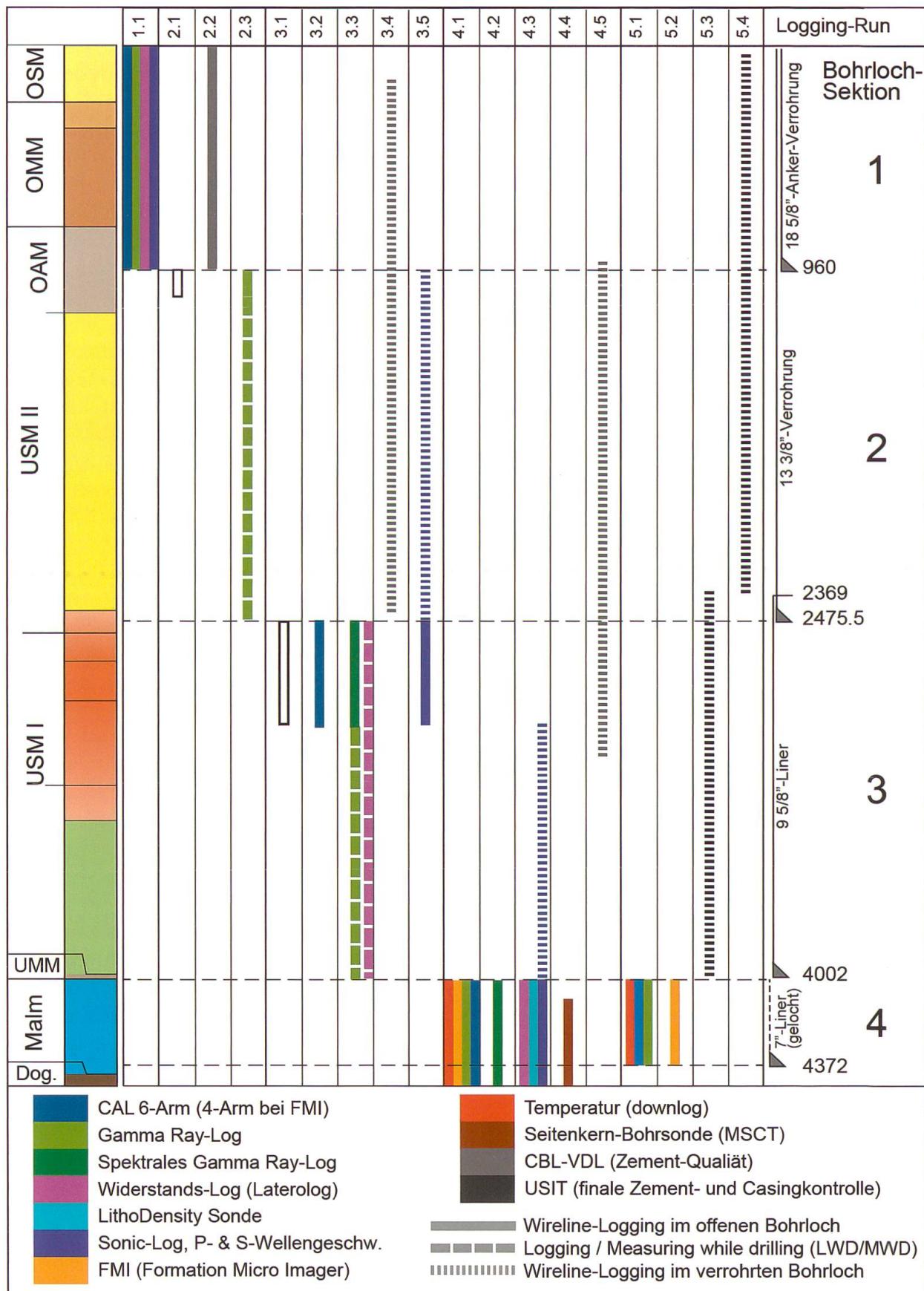


Abbildung 12:
St.Gallen GT-1: Übersicht über das ausgeführte geophysikalische Logging-Programm.
(Wireline Logging)

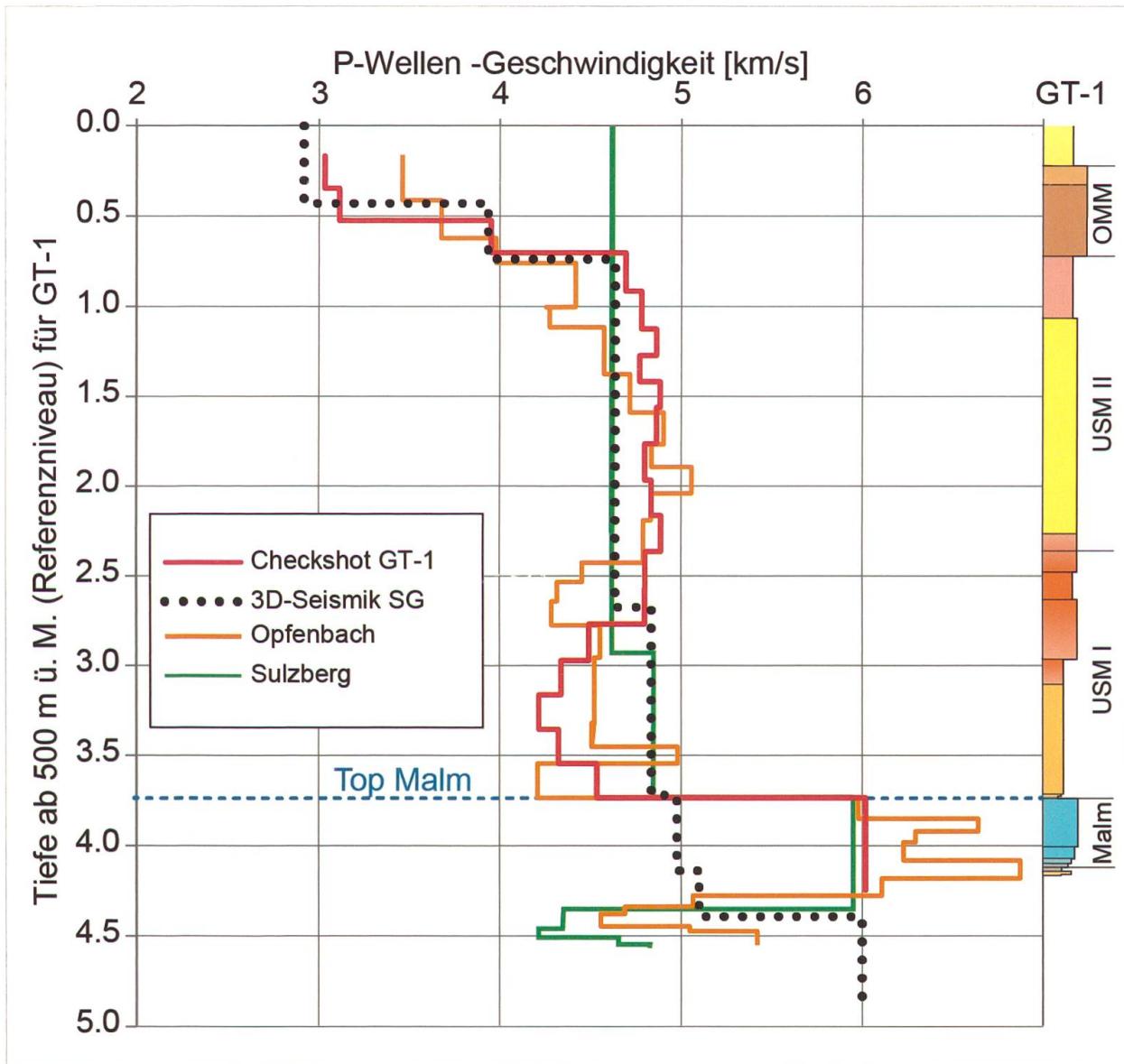


Abbildung 13:
P-Wellen-Formationsgeschwindigkeiten in GT-1 und Vergleich mit Referenzbohrungen (Korrelationsniveau = Top Malm).

gerät, mit welchem aus der Bohrlochwand bis zu 50 horizontale Kerne von ca. 2 x 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 leider nicht mehr beprobt werden konnte. Zudem waren von den 36 Proben nur 10 als ganze Kerne erhalten (siehe Abb. 14), weitere 11 waren zerbrochen und z.T. unvollständig und bei 15 Proben wurden lediglich Bruchstücke gebor-

gen. 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 (siehe Kapitel 5.6)

5.5 Wasser- und Gasführung

In einer Tiefbohrung spielen die chemische Zusammensetzung und das spezifische Gewicht der eingesetzten Bohrspülung eine hervorragende Rolle. Sie soll gegenüber dem durchbohrten Gestein möglichst inert sein, dient als Transportmedium für den Austrag des Bohrkleins (Cuttings), in gewisser Weise auch als Schmiermittel für die Bohrgarnitur und soll vor allem die Stabilität des offenen, noch unverrohrten Bohrlochs garantieren. Das spezifische Gewicht der Bohrspülung muss deshalb stets dem Innendruck des Bohr-

lochs angepasst sein. In Oberflächennähe ist dieser meist etwa 1, d.h. entspricht dem Druck einer normalen Wassersäule (hydrostatischer Druck). Je tiefer man bohrt, desto eher erreicht man Gesteinsschichten, welche unter Differenzialspannungen stehen, deren Druck die Tendenz hat, das Bohrloch zusammenzudrücken. Damit das nicht geschieht, muss durch die Erhöhung des Spülungsgewichts Gegendruck erzeugt werden, was durch Zugabe von Mineralstoffen mit einer höheren Dichte geschieht: Kochsalz, Kaliumkarbonat und insbesondere Schwerspat (Baryt).



Abbildung 14:
Beispiele von intakten Seitenkernen (MSCT) aus der Malm-Dogger-Strecke. Oben links: heller, mikritischer Kalkstein bei 4100 m MD. Oben rechts: stark geklüfteter dunkler Kalkstein aus dem Bereich der Wohlgeschichteten Kalke. Unten links: Dunkler feinsandiger Kalkmergel aus den untersten Impressa-mergeln. Unten rechts: Laminierter Feinsandstein aus dem <Oberen Dogger>.

Wenn nun durchlässige Schichten angebohrt werden, so hat die Bohrspülung die Tendenz, in diese Schichten hinein d.h. aus dem Bohrloch wegzufliessen, was je schwerer die Spülung ist umso rascher geschieht und zu umso grösseren Problemen bei der Beherrschung der Bohrung führen kann; deshalb sind bei massiven Spülungsverlusten sofort Gegenmassnahmen durch die Eingabe von Verstopfungsmaterial erforderlich. Dadurch entsteht die etwas widersinnige Situation, dass beim Erreichen der an sich erwünschten durchlässigen Schichten diese in einem ersten Schritt sofort wieder verschlossen werden müssen!

Wenn nun andererseits mit der Bohrung Wasser oder insbesondere Gas führende Schichten oder Klüfte erreicht werden, deren innerer Druck den Gegendruck der Bohrspülung übersteigt, dann strömt das Gas ins Bohrloch, macht dadurch die Spülung spezifisch leichter und kann so zu einem spontanen Ausbruch der Bohrung, dem gefürchteten Blowout führen. Eine kontinuierliche chemische und physikalische Überwachung der Bohrspülung, insbesondere des Gasgehalts ist deshalb ein zwar unspektakulärer aber zentraler Teil des Tiefbohrbetriebs.

Zusammengefasst kann man sagen, dass mit einer Hydrogeothermie-Tiefbohrung zwar unbedingt Wasser gesucht wird, dieses aber zuerst ernsthaft Kopfzerbrechen bereiten kann, während Gas in der Bohrung generell unerwünscht ist.

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 4450 m MD keine hydraulischen Anomalien festgestellt, weshalb zuerst einmal angenommen werden musste, dass die erhoffte Aquiferzone im Bereich der St. Gallen-Störung zumindest nicht erreicht wurde.

Auch bei der Gasführung konnten über die gesamte Bohrstrecke keinerlei auffallende Maxima beobachtet werden. Ein geringer

Methangehalt im ppm bis ‰-Bereich war zwar durchgehend vorhanden, mit einigen lokalen Peaks von maximal 2% im tiefen 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.

Erschwerend wirkt nun die Tatsache, dass nur mässig durchlässige oder nur ungenügende erschlossene Schichten während des Bohrbetriebs kaum bemerkt werden, wenn die Bohrspülung optimal eingestellt ist, d.h. die Dichte der Spülung etwa dem inneren Druck der erbohrten, durchlässigen Schicht entspricht. Deshalb ist es unerlässlich, dass ein potenzieller Aquifer nach dem Aufbohren gereinigt und auch in geeigneter Form stimuliert wird, um seine definitive Qualität beurteilen zu können.

Erst die Stimulations- und Testarbeiten, welche nach dem Abteufen der Bohrung in zwei Phasen durchgeführt wurden, erbrachten dann auch den Nachweis, dass das geplante Erschliessungskonzept grundsätzlich erfolgreich war. Diese Arbeiten werden in Kapitel 6 kurz erläutert.

5.6 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 (Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH, Poing

bei München) im Hinblick auf ‹potenziell hydrogeologisch aktive Zonen› ausgewertet. Dabei spielt das FMI-Log eine zentrale Rolle, weil damit die Schichtlage, die Klüftigkeit und auch echte 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 ableiten lassen (sog. Breakout-Analyse). Zusammenfassende Resultate dieser Strukturuntersuchungen sind in Abb. 9 dargestellt.

Es ist offensichtlich, dass das Bohrloch durch einige diskrete Zonen und auch grössere Abschnitte mit auffallender Zerrüttung gekennzeichnet ist (rote bis dunkle Bereiche in der 3D-Kaliber-Darstellung). Wichtig ist auch die Tatsache, dass die Schichtlage nur im untersten Abschnitt ab ca. 4300 m MD dem erwarteten Einfallen nach SE entspricht, im Bereich des Malmkalk-Aquifers aber mehrheitlich in westliche Richtungen und teilweise ziemlich steil einfällt. Diese ‹Anomalie› kann nur damit erklärt werden, dass das Bohrloch hier nahe an einer tektonischen Verwerfung 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. 4300 m MD der erwarteten NNW-SSE-Ausrichtung (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. Als Vorgabe für die Testarbeiten wurde aufgrund den Daten eine diskrete Verwerfung bei ca. 4070 m MD vermutet sowie ein grösserer gestörter Abschnitt in den unteren Malmkalken, wo die Schichtlagen stark variieren (siehe Abb. 9).

Für die weitere Auswertung dieser Erkenntnisse müssen auch die petrophysikalischen und felsmechanischen Parameter der Gesteinsabfolge bekannt sein. Diese werden

teilweise direkt durch das Wireline-Logging gemessen, teilweise auch daraus berechnet. Für eine bessere Kalibrierung dieser Messungen wurden geeignete, d.h. am Stück erhaltene Seitenkerne im Labor weiter untersucht (GEOMECON GmbH 2014). Die Ergebnisse zeigen signifikant eine aussergewöhnlich hohe Festigkeit der Malmkalke, müssen aber wegen der geringen Probengrösse insgesamt als eher diffus und wenig aussagekräftig angesehen werden.

5.7 Bohrlochtemperatur

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 Temperatur-Kurve in Abbildung 4). Über die offene Malm-Dogger-Bohrlochstrecke wurde eine von ca. 125° C ziemlich kontinuierlich auf 145°C ansteigende Temperatur gemessen. In einigen Bereichen zeigten sich jedoch kleine Anomalien, die auf eine Auskühlung durch an diesen Stellen verlorene Spülung hinwiesen, so z.B. im Bereich der Störungszone bei 4070 m.

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 ist aber 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.

6 Die Test- und Sicherungsarbeiten im Malmkalk-Aquifer

Gemäss Planung war nach dem Erbohren der potenziellen Aquiferzone im Malm diese mit geeigneten Stimulations- und Testverfahren zu erschliessen, resp. das Bohrloch an das Verwerfungssystem der SVZ anzuschliessen. Dafür wurde ein detaillierter Vorgehensplan erarbeitet, mit allen vorhersehbaren Varianten und entsprechenden Abbruchkriterien. Grundsätzlich war vorgesehen, zuerst mit einer Säuerung das Bohrloch zu reinigen und vorhandene Wegsamkeiten zu verbessern. Danach sollte mit einem Airlift-Fördertest die Ergiebigkeit des Aquifers ermittelt werden (WOLFRAMM et al. 2014).

6.1 Erste Phase mit Gasausbruch und seismischem Ereignis

Weil das Bohrloch nur wenig Hinweise auf hydraulisch aktive Zonen aufwies, wurde als Erstes abgeklärt, ob die Formation überhaupt ausreichend Säuerungsmaterial aufnehmen kann. Nach einem erfolgreichen Injektionstest wurden die zwei vermuteten Kluftzonen im Malmkalk nachhaltig mit verdünnter Salzsäure behandelt. Während der folgenden Vorbereitungen für den Fördertest kam es zu einem spontanen Gas-/Wasserausbruch, welcher nur mit dem sofortigen Verschluss der Bohrung und dann massivem Einsatz von schwerer (K_2CO_3), aufgesalzener Spülung zum Zurückpumpen des Gas-/Wasser-Gemisches in die Formation unter Kontrolle gebracht werden konnte. Diese sogenannten Totpump-Arbeiten verursachten also anhaltende Injektionen in die mit Gas gefüllten Kluftzonen und damit eine generelle Destabilisierung des Gebirges, 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 in einem spürbaren seismischen Ereignis mit der Magnitude

3.5, gefolgt von weiterer Mikroseismizität in grosser Anzahl.

Als Folge der schweren Spülung mit einem spezifischen Gewicht von bis zu 1.4 und der Spannungsentladung durch das Erdbeben wurden im nun beruhigten Bohrloch massive Spülungsverluste festgestellt, d.h. es floss nun immer mehr Spülung in die Formation, was weitere seismische Aktivität verursachte. Deshalb mussten in erster Priorität diese Verluste bekämpft werden, was mit dem Einbringen grosser Mengen von Verstopfungs-material (Kalkgranulat) geschah. Damit konnte die Bohrung zwar nach einigen Tagen hydraulisch stabilisiert werden, als Folge dieser Massnahmen wurde das unverrohrte Bohrloch der Sektion 4 aber mit säuberbarem Material wieder vollständig aufgefüllt. Ab Beginn der Testarbeiten gingen insgesamt ca. 2400 m³ Spülung verloren.

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 d.h. im gesichertem Bohrloch auszuführen.

6.2 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 eine deutliche 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 aber eine generelle Zunahme der laufenden Spülungsverluste und auch der Gaskonzentration im Bohrloch, was auch eine entsprechend Zunahme der

mikroseismischen Ereignisse zur Folge hatte. Bei einer Tiefe von 4387 m MD, d.h. kurz vor Basis Malm wurde deshalb beschlossen, die Aufbohrarbeiten aus Sicherheitsgründen abzubrechen.

Es folgten weitere Nachräum- und Freispülarbeiten im offenen Bohrloch, dann ein fünfter Logging-Run mit Aufnahme eines zweiten FMI der Bohrlochwand und danach die Verrohrung mit einem gelochten 7"-Produktionsliner inkl. nach oben abschliessendem Sicherheitspacker. Seit Aufnahme der Räumarbeiten gingen insgesamt nochmals ca. 1600 m³ Salzspülung in der Formation verloren, resp. waren notwendig, um den laufenden Gasdruck unter Kontrolle zu halten. Die kumulativen Verluste betrugen vor Beginn des Gas-Wasser-Tests also ca. 4000 m³.

Das so geräumte und gesicherte Bohrloch stand nun für den geplanten Produktionstest zur Verfügung. Die Förderung des Gas-Wasser-Gemisches wurde aus Sicherheitsgründen mit Stickstoff-Airlifts angefahren. Nachdem ein initialer Reinigungslift 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 Salzspülung und vor allem einem hochwertigen Erdgas (ca. 94% Methan) gefördert werden. Dabei zeigt die Produktionsrate von Gas bis zum Abschluss des vierten, 50 Stunden dauernden Tests zunehmende Tendenz an während die Wasser-Förderrate noch leicht abnehmend war. Insgesamt konnten in dieser zweiten Testphase kontrolliert ca. 3500 m³ Wasser und 400'000 m³ Erdgas gefördert werden.

Die 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 Fündigkeits im Malm geplant waren, wegen der Gas- und Erdbebenprob-

lematik 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.

7 Ausblick

Die Bohrung St.Gallen GT-1 hat ein wertvolles lithostratigrafisches Profil am Südrand des Ostscheizer Molassebeckens erschlossen, mit welchem die regionale Geologie neu kalibriert werden kann. Das 4450 m lange Bohrprofil ist durchgehend im 5 m-Abstand, ab 3750 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 Meozoikum 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 Ostscheizer Molassebecken die schwäbische Malmfazies anzutreffen ist und die bestehenden paläogeografischen Darstellungen entsprechend geändert werden müssen (z.B. BACHMANN & MÜLLER 1992).

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 vorge-

sehen und mit den verfügbaren Daten nur schwer vereinbar war dagegen die Tatsache, dass man hier ein System aktiv vorgespannter Störungen angetroffen hat, welches sehr sensibel und unerwartet heftig auf die vergleichsweise sehr bescheidene hydraulische Stimulation reagiert hat.

Literaturverzeichnis

- BACHMANN, G.H. & MÜLLER, M. 1992: Sedimentary and structural evolution of the German Molasse Basin. – *Eclogae geol. Helv.* 85/3: 519–530.
- BLÄSI, H.R. 2013: Bericht zur Untersuchung der Malm- und Doggerstrecke der Geothermie Bohrung St.Gallen GT-1. – Institut für Geologie der Universität Bern.
- 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>.
- 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.*
- GEOMECON GMBH 2014: Bestimmung petrophysikalischer und geomechanischer Kennwerte aus Seitenkernen der Geothermiebohrung St.Gallen GT1.
- GEOWATT AG, FORALITH DRILLING SUPPORT AG, WYSS GMBH, H. NAEF & 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. – Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart.
- GRUNDBAUBERATUNG AG 2012: Geothermie Stadt St.Gallen. Bohrplatz Au. Ergänzende Untersuchungen. – Geologischer Bericht Nr. G 4842/1, Grundbauberatung-Geoconsulting AG, St.Gallen.
- 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.
- KELLER, B. 1989: Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeressmolasse (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.
- LUDWIG, A., SAXER, H., EUGSTER, H. & FRÖHLICHER, H. 1949: Geologischer Atlas der Schweiz, Blatt 23: St.Gallen – Appenzell, 1:25'000. – Schweiz. Geol. Komm..
- 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. & UHLIG, S. 2014: Geothermieprojekt St.Gallen, Schlussbericht Geologie. – Sankt Galler Stadtwerke – Bericht geosfer ag, St.Gallen.
- REINECKER, J., TINGAY, M., MÜLLER, B. & HEIDBACH, O. 2010: Present-day stress orientation in the Molasse Basin. – *Tectonophysics* 482:129–138.
- SCHLANKE, S. 2015: Lithostratigrafie und Sedimentpetrographie der Molasse in der Bohrung St.Gallen GT-1. – Berichte der St.Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft, Band 92
- 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 Alpennordrand. – *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.* 53/125: 67–79.
- WOLFGRAMM, M., VOIGT, H.-D. & BARTELS, J. 2014: Geothermieprojekt St.Gallen. Test und Simulation, 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
- ZAUGG, A., & LÖPFE, R. & SCHLANKE, S. 2012: Geologischer Atlas der Schweiz: Blatt 1113 Ricken. – *Geol. Atlas Schweiz 1:25'000, Erläuterungen 142*, Swisstopo, Bern