

Die Geothermie-Bohrung Weggis, Kanton Luzern

Autor(en): **Greber, Emil / Grünenfelder, Toni / Keller, Beat**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure**

Band (Jahr): **61 (1994)**

Heft 138

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-217662>

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-Bohrung Weggis, Kanton Luzern

mit 11 Figuren und 1 Tabelle

von EMIL GREBER¹⁾, TONI GRÜNENFELDER¹⁾, BEAT KELLER²⁾ und ROLAND WYSS¹⁾

Zusammenfassung

Die 1992/93 auf 2'302 m abgeteufte Bohrung Weggis (LU) zählt zu den ersten tiefen Geothermiebohrungen im subalpinen Bereich. Sie befindet sich am Nordrand der Subalpinen Molasse im basalen Bereich der Überschiebungsdecke des Rigi-Schuttfächers. Die Sedimente oberhalb der in 780 m Tiefe liegenden, mit ca. 27 ° gegen SE einfallenden Hauptüberschiebung lassen sich den bekannten lithostratigraphischen Einheiten der Unteren Süsswassermolasse (USM) und der Unteren Meeresmolasse (UMM) zuordnen. Die untere UMM fehlt. Die unterhalb der Hauptüberschiebung angebotenen USM-Serien lassen sich zur Zeit nur informell gliedern, da entsprechende Oberflächenaufschlüsse fehlen. Wie Cuttings und Dipmeter-Messungen zeigen, ist das Liegende der Hauptüberschiebung teilweise stark tektonisiert, was auf intensive Verschuppung schliessen lässt. Die zwei geophysikalischen Logging-Kampagnen bestätigten den generell hohen Tonanteil und die hohe Kompaktion der durchteuften Serien. Wasserführende Zonen wurden nicht angetroffen. Mit ca. 30 °C/km liegt der berechnete Temperaturgradient deutlich höher als bisher für den subalpinen Bereich angenommen wurde. In sandsteinreichen Serien wurden über 5 Vol.% brennbare Gase gemessen, welche wahrscheinlich aus prä-tertiären Serien stammen.

Abstract

The 2302 m deep well Weggis, which was drilled in 1993/1994, is one of the first deep geothermal wells in the Subalpine zone. It is situated at the northern margin of the Subalpine Molasse, in the basal part of the Rigi alluvial fan thrust sheet. The sediments above the main thrust, which was encountered at a depth of 780 m and dips about 27 ° to the southeast, can be correlated with well-known lithostratigraphic units from the Lower Freshwater Molasse (USM) and the Lower Marine Molasse (UMM). The lower units of the UMM are missing. Based on the existing information, the stratigraphic position of the USM below the main thrust can only informally be categorized because of the lack of corresponding surface outcrops. These footwall sediments are severely tectonized and internally thrust, as indicated by cuttings and dipmeter data. The two geophysical logging campaigns confirm the generally high clay contents and the high degree of compaction. Water bearing zones were not encountered. The calculated temperature gradient of 30 °C/km is distinctly higher than expected up to now in the Subalpine region. Readings of over 5 vol.% of combustible gases were measured in sandstone rich layers. The gas probably originates from pre-Tertiary series.

1) Geoform, Geologische Beratungen und Studien AG, Anton Graff-Strasse 6, CH-8401 Winterthur

2) Mengis + Lorenz AG, Schlossstrasse 3, CH-6005 Luzern

Résumé

Le forage géothermique de Weggis (LU), profond de 2'302 mètres, a été réalisé au cours des années 1992 et 1993. Il fait partie des premiers forages profonds du domaine subalpin et a été implanté dans la partie basale de l'écaille charriée du Rigi (Molasse subalpine). Le chevauchement principal a été recoupé à une profondeur de 780 m et montre un pendage de 27° vers le SE. Les séries sédimentaires situées au-dessus de ce niveau de décollement peuvent être corrélées avec la Molasse d'eau douce inférieure (USM) et la partie sommitale de la Molasse marine inférieure (UMM). Pour la partie inférieure du forage qui est formée d'USM, une subdivision lithostratigraphique informelle a pu être établie. Les "cuttings" et mesures au "dipmeter" montrent que les séries sont localement fortement tectonisées, indiquant un écaillage intense. Deux campagnes de diagraphies ont confirmé la grande quantité d'argile et la forte compaction des séries traversées. Le forage n'a pas rencontré d'eau. Le gradient géothermique de 30 °C/km est élevé par rapport aux valeurs trouvées ailleurs dans le domaine subalpin. Dans les formations gréseuses plus que 5 vol.% de gaz combustible ont été mesurés. Ce gaz provient des séries anté-tertiaires.

1. Einleitung (RW)

Die Bohrung Weggis gehört zusammen mit der Bohrung Weissbad (Kanton Appenzell Innerrhoden) zu den ersten tiefen Geothermiebohrungen im Bereich der subalpinen Molasse (Fig. 3). Der Bauherr H. Füglistner (MAGMA Tiefenwärmegewinnung AG) konzipierte die Bohrung ursprünglich als 2'000 m tiefe Erdwärmesonde, hoffte jedoch, auf heisses Wasser zu stossen. Mit einer geschlossenen Erdsonde sollte der Energiebedarf der Anwohnerschaft mit einer konstanten Leistung von 200 bis 250 kW gedeckt werden. Der Bohrplatz wurde in erster Linie aufgrund infrastruktureller Überlegungen (Nähe der Verbraucher und Besitzverhältnisse) ausgewählt: Auf geologische oder hydrogeologische Vorabklärungen wurde - abgesehen von einer geologischen Kurzprognose der Geotest AG (Horw) - verzichtet.

Nach einer finanziellen Zusicherung des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) und des Amtes für Umweltschutz des Kantons Luzern (AfU) wurde die Geoform, Geologische Beratungen und Studien AG (Winterthur), vom BEW als geologisch-technische Berater mit der Überwachung der Bohrung und der Sicherstellung der Daten beauftragt. Die Firma Mengis + Lorenz AG (Luzern) wurde mit der Aufnahme und Interpretation der Spülproben betraut. Der Geotest AG (Horw) oblag die Überwachung sicherheitstechnischer Belange, insbesondere die Beobachtung der Gasführung.

Der vorliegende Bericht beinhaltet neben bohrtechnischen Aspekten insbesondere neue geologische Erkenntnisse, Resultate der Log-Auswertungen, geothermisch relevante Daten und Interpretationen. Er basiert auf dem Schlussbericht der Geothermiebohrung Weggis (GEOFORM 1994 und MENGIS + LORENZ AG 1993).

2. Bohrtechnische Aspekte (EG)

Mit den Bohrarbeiten wurde anfangs Dezember 1992 begonnen; die Endtiefe von 2'302 m wurde am 14. September 1993 erreicht. Der Bohrvortrieb war durch mehrere, teils längere Unterbrüche gekennzeichnet (Fig. 1). Weil der Bohrplatz inmitten eines Wohngebietes lag, wurde vom Gemeinderat bereits kurz nach Bohrbeginn ein Nachtbohrverbot verfügt, das bis zum Ende der Bohrzeit aufrecht erhalten wurde. Durch diese Bohrunterbrüche wurde nicht nur die Wirtschaftlichkeit des Projekts vermindert, sondern auch die Bohrrisiken erhöht. Nachdem das Bohrgestänge anfänglich noch abends in die zementierte Verrohrung hochgezogen wurde, begnügte man sich später mit einem Hochziehen um 4 Stangenlängen. Dass die Bohranlage durch dieses riskante Vorgehen nicht beschädigt wurde, war wohl in erster Linie der relativ schweren Spülung zuzuschreiben.

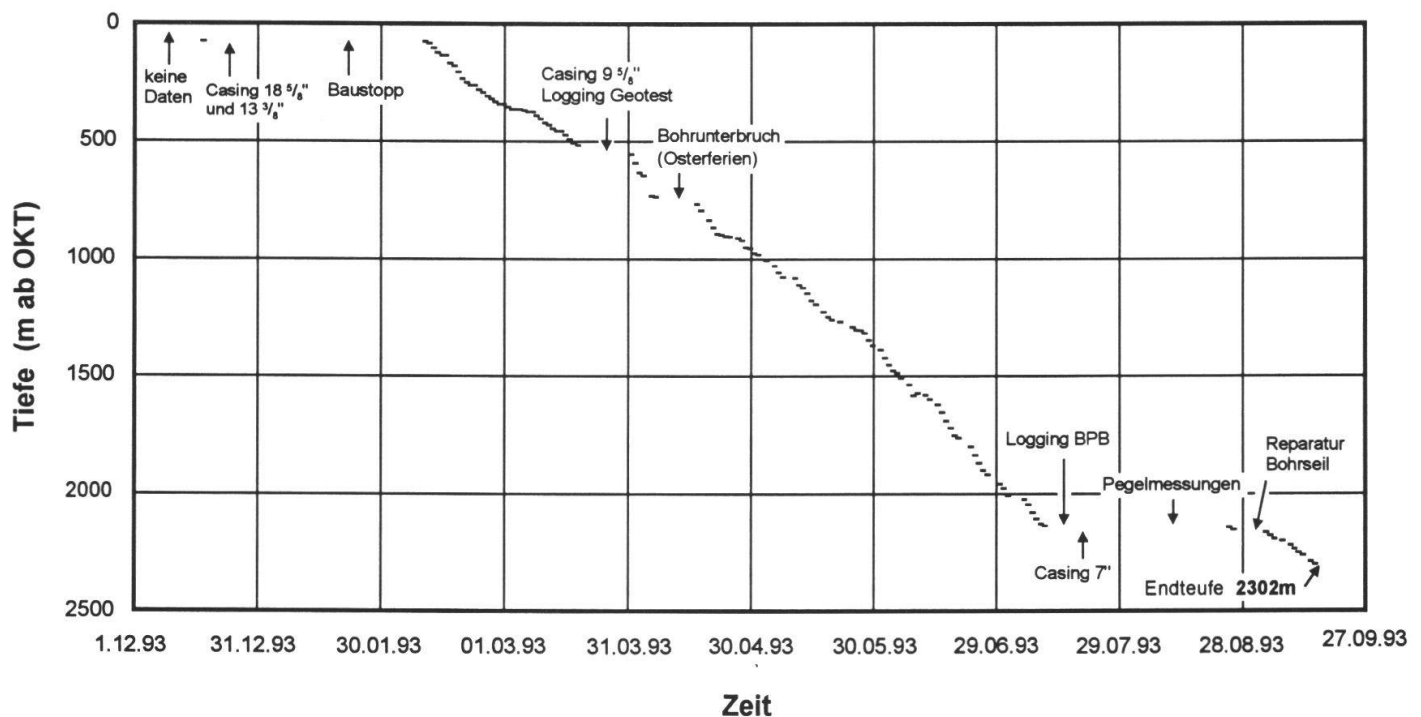


Fig. 1: Bohrfortschritt

Bei der Bohrung verwendete die Firma Stoffner (AOWS) Zahn- und Warzenrollenmeissel mit Durchmesser von zwischen 17½" und 5⅞". Genauere Angaben zu Meisseldurchmessern, Verrohrung und Zementierung sind aus Fig. 2 ersichtlich.

Mit Hilfe der Gamma Ray/1-Arm Kaliber/Abweichungs-Messonde wurde ab 515 m eine relativ starke Abweichung der Bohrachse vom Lot in nordwestlicher Richtung gemessen. Bei 2'136 m betrug sie bereits 241 m, was einer durchschnittlichen Abweichung vom Lot von 8.5° entspricht.

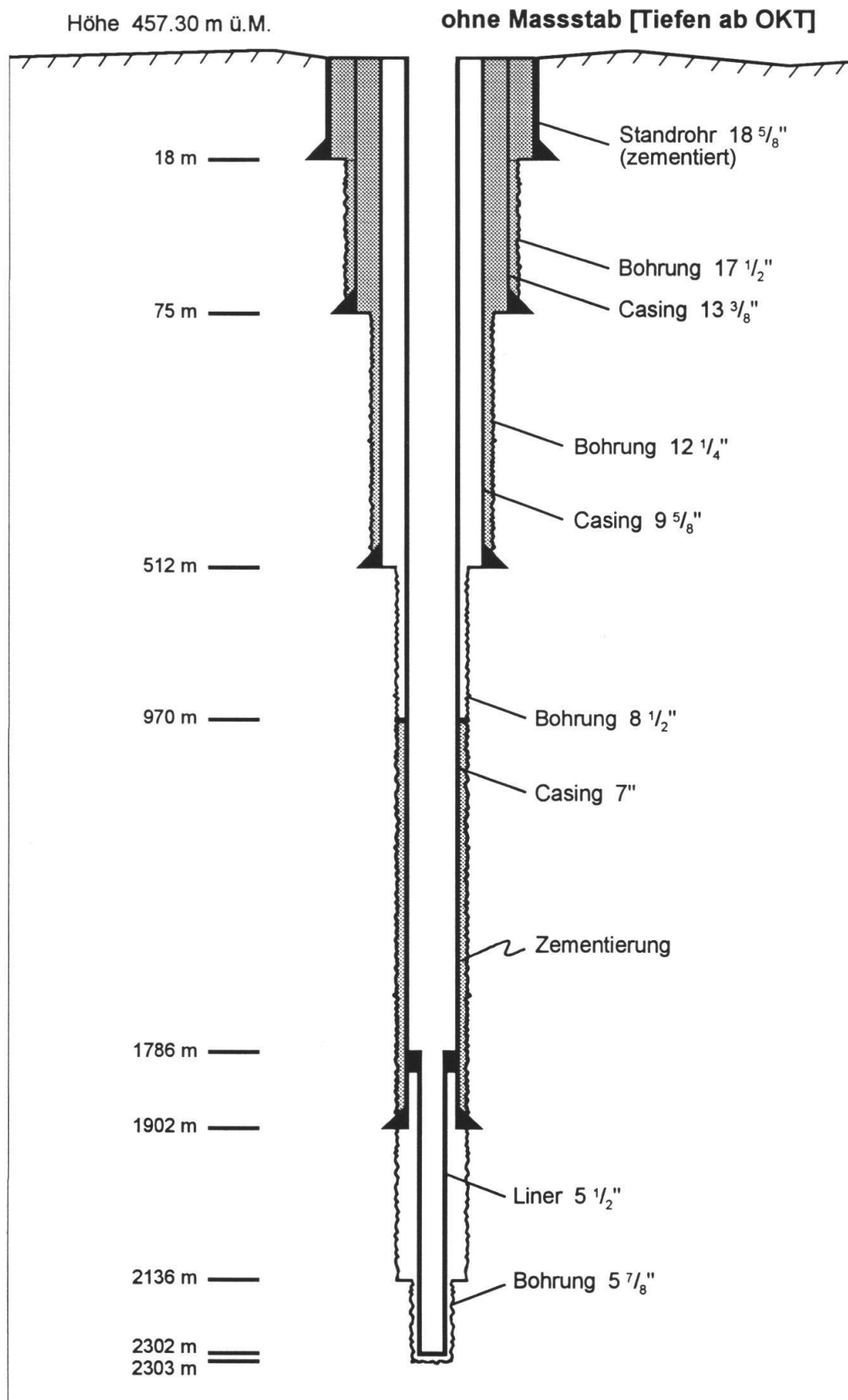


Fig. 2: Verrohrungsschema (Koordinaten der Bohrung: 674.984/209.580, Höhe: 457.3 m ü.M.)

Mit derselben Sonde konnten sehr starke Bohrlochsaukesselungen nachgewiesen werden. Die durchschnittliche Bohrlocherweiterung gegenüber dem Meisseldurchmesser betrug mindestens 2 Zoll (1 Zoll = 2.54 cm). Das Bohrloch erwies sich nur in konglomeratischen Zonen als relativ standfest.

Bis 2'136 m Tiefe wurde eine relativ schwere CMC-Bentonit-Spülung mit Ätznatronzusatz verwendet. Darunter wurde mit Frischwasser gespült.

Da mit artesisch gespanntem Wasser und mit hohen Gasdrucken gerechnet werden musste, wurde vor Beginn der 12¼"-Bohrung ein Blow-out-Preventer installiert.

3. Geologie (BK)

3.1 Methodik

Die Cuttings wurden von Angestellten der Bohrfirma freundlicherweise in Kisten abgefüllt, wobei alle 2 m Proben zur Untersuchung entnommen wurden. Grundsätzlich wurde alle 10 m eine Probe zur Weiterbearbeitung und Dokumentation aufbewahrt und diese durch zusätzliche interessante Proben ergänzt, so dass insgesamt ca. 250 Sedimentproben sichergestellt werden konnten. Das umfangreiche Probenmaterial wurde zur Aufbewahrung und Weiterbearbeitung an das Geologische Institut der Universität Bern überführt.

3.2 Geologischer Überblick

Die regionale Geologie im Bereich Rigi-Weggis ist recht gut bekannt durch die Arbeiten von KAUFMANN (1860, 1872), BAUMBERGER (1925, 1929), BUXTORF & KOPP (1943), KOPP (1937), KOPP & MARTIN (1938) sowie STÜRM (1973).

Demnach liegt die Bohrung Weggis am Nordrand der Subalpinen Molasse im basalen Bereich der Überschiebungsdecke des Rigi-Schuttfächers (Fig. 3 und 4), etwa 2 km südöstlich der Hauptüberschiebung. Das Überschiebungspaket der Rigi wird durch verschiedene steil stehende Brüche zerlegt. Einer davon ist der bekannte Weggis-Greppen-Querbruch, der einige hundert Meter östlich der Bohrung von Norden nach Süden hin durchzieht. Während die Schichten im Raum Weggis mit ca. 27° flach gegen SSE hin einfallen, wurde das Einfallen der Hauptüberschiebung bis anhin mangels Aufschlüssen je nach Autor unterschiedlich beurteilt (Zusammenfassung vgl. BUXTORF & KOPP 1943) und blieb bis zur Abteufung der Bohrung Weggis ungeklärt.

Der geologisch-tektonische Aufbau im Liegenden der Hauptüberschiebung und zwischen dieser und der Monoklinalen im Norden ist ebenfalls nicht sicher bekannt. Im Gegensatz zu älteren Interpretationen, die aufgrund von Oberflächen-

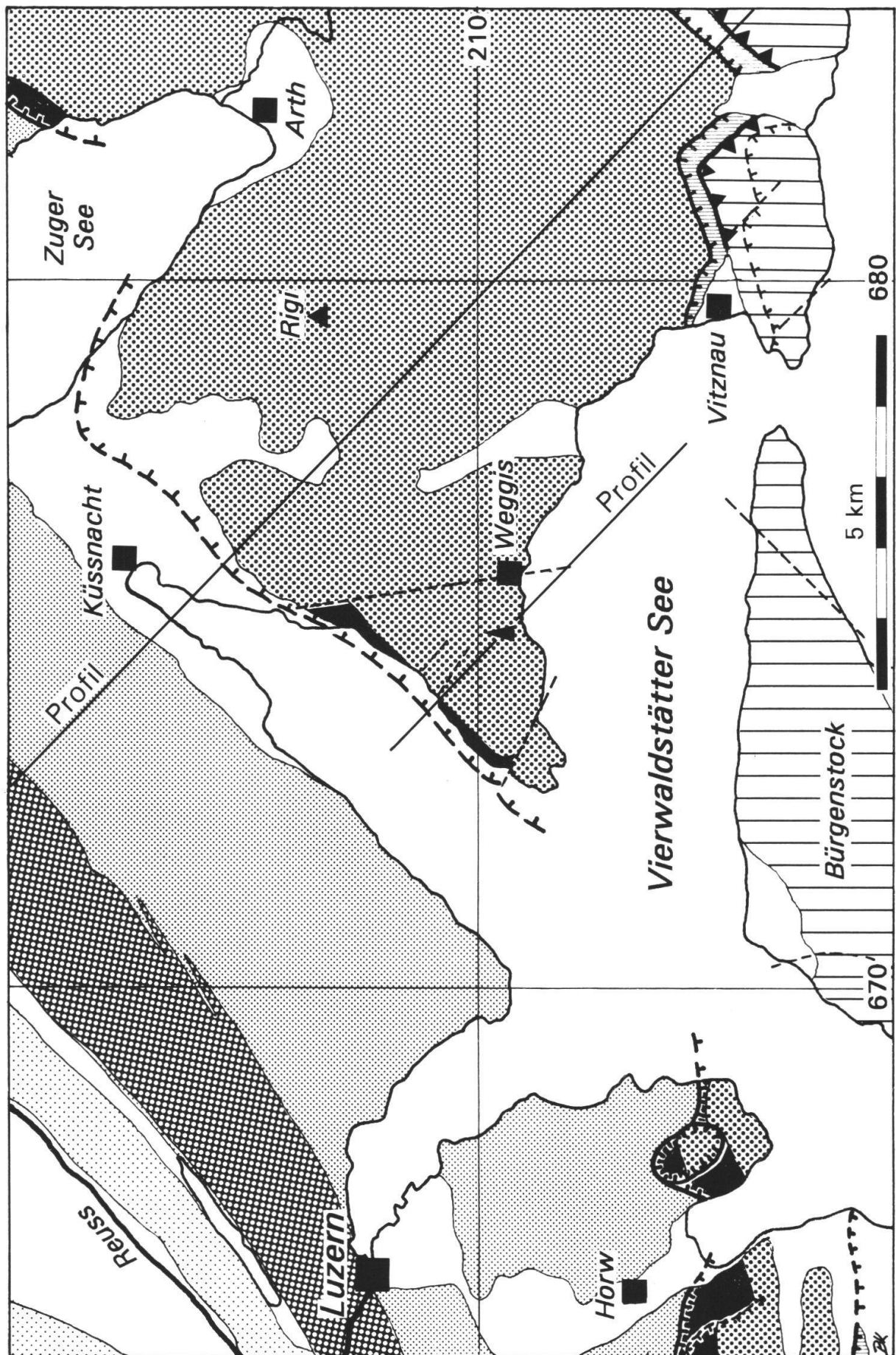


Fig. 3: Geologische Übersichtskarte des Gebietes Vierwaldstätter See - Rigi (verändert nach BUXTORF & KOPP 1943 und HANTKE et coll. 1967; Legende vgl. Fig. 4).

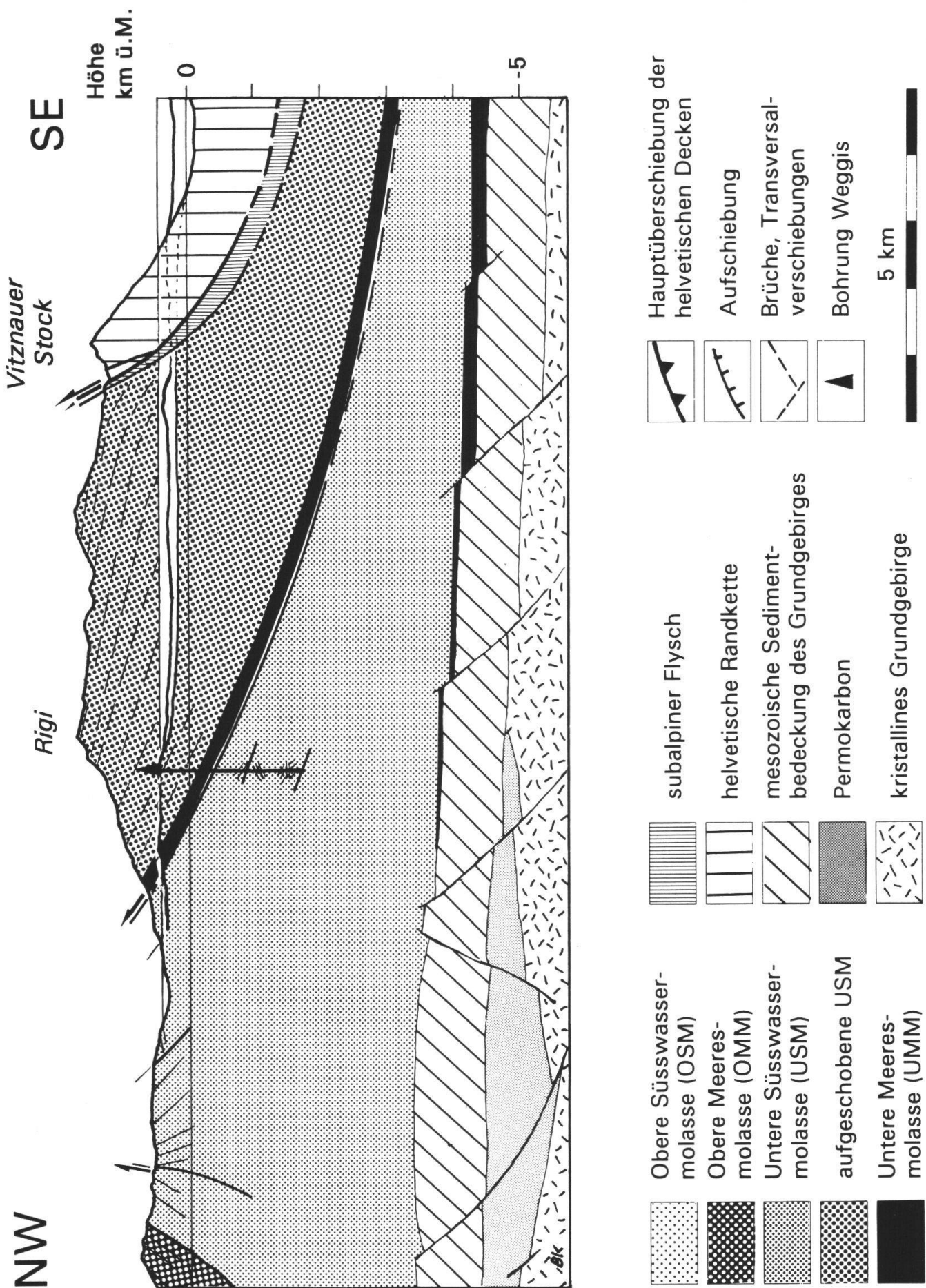


Fig. 4: Geologisches Übersichtsprofil durch die Rigi (verändert nach BUXTORF et al. 1916, autochthoner Bereich nach VOLLMAYR & WENDT 1987; Profilspur vgl. Fig. 3).

aufschlüsseln eine intensiv verfaltete Zone prognostizierten (BAUMBERGER 1934 oder BUXTORF & KOPP 1943), wird der Überschiebungsgürtel von BURKHARD (1990) wohl in Analogie zu den auf Seismik basierenden Interpretationen aus dem süddeutschen Molassebecken (MÜLLER et al. 1988) als Triangle-Zone mit Duplex-Strukturen dargestellt. Diese vereinfachte Neuinterpretation von BURKHARD (1990) ist teilweise nur schwer verträglich mit den tatsächlichen, an der Oberfläche beobachteten Schichtfallen.

Der tiefste Teil der Rigi-Decke wird durch die Gesteine der Unteren Meeresmolasse (UMM) aufgebaut. Aufgrund von Aufschlüssen am Seeufer hat man die Horwer Platten und wenige Meter Grisiger Mergel erkannt. Darüber liegt die möglicherweise bis über 3'000 m mächtige Untere Süßwassermolasse (USM). Diese wird im basalen Teil - so auch im Gebiet Weggis - durch eine pelitreiche heterolithische Abfolge gebildet, die in einem Coarsening-upwards Megazyklus in die gut 2'500 m mächtige, konglomeratische Hauptmasse des Rigigebirges übergeht. Während die Untere Meeresmolasse in das Rupelian gestellt wird, gehört die Untere Süßwassermolasse der Rigi nach heutiger Kenntnis dem Chat-tian, die jüngsten Teile womöglich dem Aquitanian an.

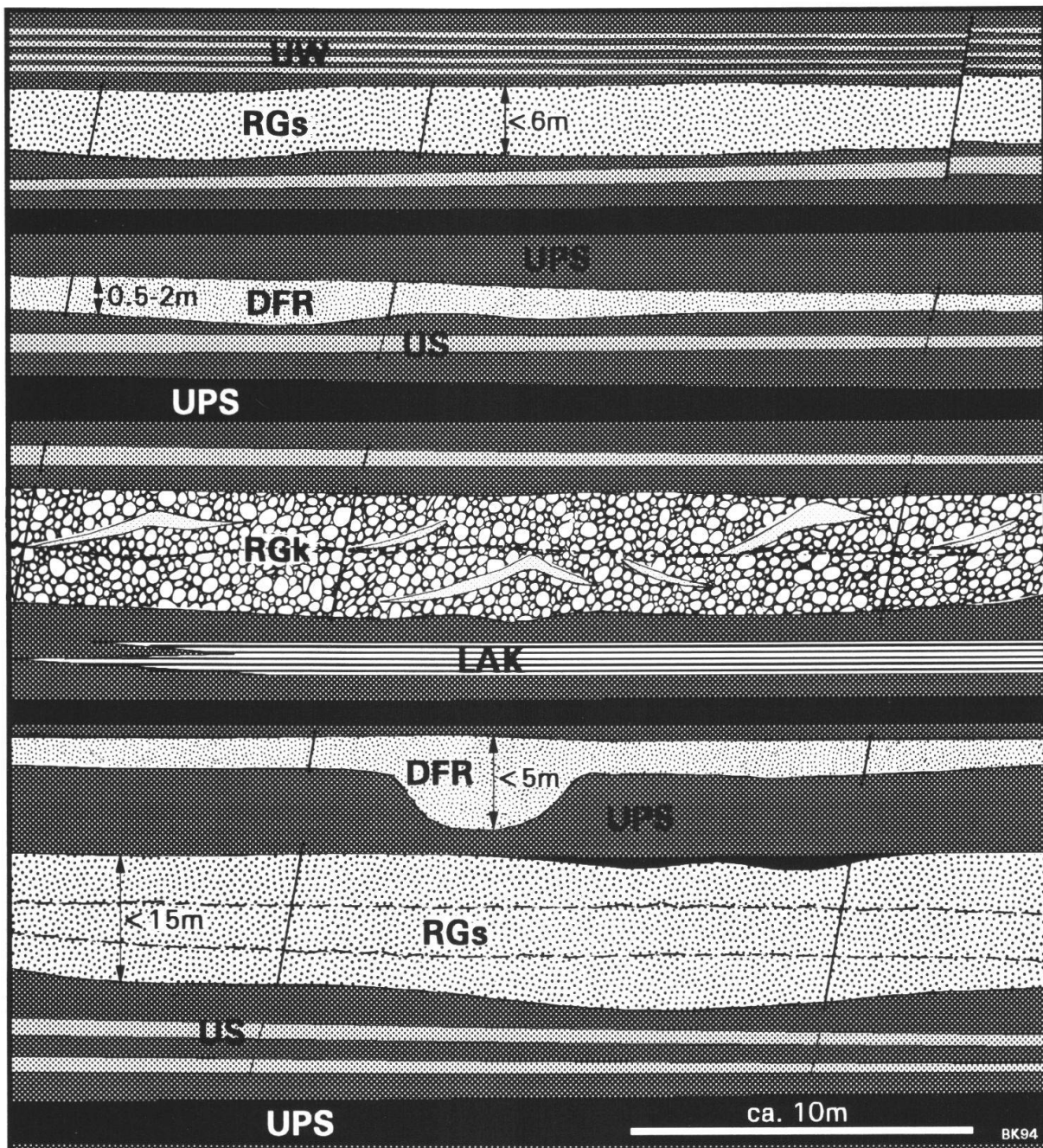
Die Stratigraphie im Liegenden der Hauptüberschiebung hat sich bis heute infolge fehlender Aufschlüsse der Kenntnis entzogen.

Aus hydrogeologischer Sicht kann die Bohrung Weggis in die Zone IV von KELLER (1992) gestellt werden. Diese hydrogeologische Zone zeichnet sich aus durch eine teilweise gute Fissurationsporosität sowie durch eine unbedeutende primäre Porosität. Mit zunehmender Tiefe vermindert sich aber generell die offene Fissurationsporosität, weshalb die Chancen, in der Tiefe auf heisses Wasser zu stossen, aus diesen überregionalen theoretischen Überlegungen gering waren.

3.3 *Lithologische und sedimentologische Gliederung der Bohrung*

3.3.1 Grundlagen der lithologischen Beschreibung

Da es sich bei der erbohrten Gesteinsabfolge der Unteren Süßwassermolasse überwiegend um heterolithische fluviatile Serien handelt, die zumindest in der zweidimensionalen sedimentären Architektur mit der distalen Unteren Süßwassermolasse vergleichbar sind, wurde das Konzept der Architektur-Elemente mit kleinen Anpassungen von KELLER et al. (1990) übernommen (Fig. 5). Damit werden aber wesentliche Unterschiede in der dreidimensionalen Geometrie der einzelnen Architektur-Elemente nicht ausgeschlossen. Entsprechend den Lithologien, der lithologischen Abfolge sowie der Länge der Intervalle der Cuttings sind in der erbohrten **Unteren Süßwassermolasse** zu unterscheiden:



RGs sandige Rinnengürtel

RGk konglomeratistische Rinnengürtel

DFR Durchbruchsfächer und -rinnen

UW Uferwälle und

US distale Überschwemmungssande

UPS Überschwemmungsebene mit
Paläoböden und Sümpfen

LAK lakustrische Ablagerungen

/ Klüfte, Brüche

--- amalgamierte Rinnen

Fig. 5: Die Architektur-Elemente der Unteren Süßwassermolasse in der Geothermiebohrung Weggis (ergänzt nach KELLER 1992).

RGk: konglomeratische Rinnengürtel

Konglomerate (> 50 % Cuttings aus Konglomerat-Splittern) und konglomeratische Sandsteine (< 50 % Cuttings aus Konglomerat-Splittern), meist mittel- bis grobkörnig, beige- bis grünlichgrau, mit Sandsteinbänken wie RGs, Mächtigkeiten generell > 2 m.

RGs: sandige Rinnengürtel

Mittel- bis Grobsandsteine, gelegentlich geröllführend (< 10% Cuttings aus Konglomerat-Splittern), teilweise auch als Feinsandsteine, beige- bis grünlichgrau, Komponenten gerundet bis gut gerundet und vorwiegend gut bis sehr gut sortiert, Mächtigkeiten generell > 2 m.

DFR: Durchbruchsfächer und -rinnen

Fein- bis Grobsandsteine, gelegentlich geröllführend, wie RGs, Mächtigkeiten generell < 2 m.

UW/US: Uferwälle (UW) und distale Überschwemmungssandsteine (US)

Fein- bis Mittelsandsteine, häufig siltig, beige- bis grüngrau, grau oder rötlich pedogenisiert, Komponenten angerundet bis gut gerundet und vorwiegend gut sortiert, geringe Mächtigkeiten, die sich in erster Linie durch die Cutting-Anteile und nicht durch identifizierbare Sandstein-Intervalle ausdrücken, Identifikation in den Logs bei ausreichender Auflösung möglich.

UPS: Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen

Diese Gruppe pelitischer Gesteine umfasst Silt- und Schlammsteine unterschiedlicher Zusammensetzung sowie gelegentlich eigentliche Mergel. Es konnten zwei hauptsächliche Varietäten unterschieden werden: Dunkel rotbraun bis hell rötlichgrau-grüngrau, teilweise auch ockergelbgrau gefleckte, pedogenisierte Silt- und Schlammsteine - gelegentlich mit Caliche-Knöllchen - die unter oxidierenden Bedingungen entstanden sind. Daneben kommen auch graue bis dunkelgraue, oft gefleckte, häufig pflanzenhäckselreiche Pelite vor, die reduzierende Ablagerungsbedingungen anzeigen.

LAK: lakustrische Ablagerungen

Silt- und Schlammsteine, verschiedentlich sehr tonreich, dunkel- bis hellgrau, mitunter grüngrau, häufig mit Pflanzenhäckseln und Blattresten, gelegentlich auch beige mikritische Kalke. Diese Intervalle erreichen meist Mächtigkeiten > 1 - 2 m.

Wertvolle Angaben zur Ausscheidung der verschiedenen Architektur-Elemente lieferten die geophysikalischen Logs. Im Gegensatz zur Unteren Süßwassermolasse sind die Sandsteine der **Unteren Meeresmolasse** quarz- und hellglimmerreich und mehrheitlich feinkörnig. Frisch erscheinen sie hellgrau, führen gelegentlich Pyrit und häufig Pflanzenhäcksel. Ebenso sind die Silt- und Schlammsteine grau bis dunkelgrau, pyritführend, reich an Pflanzenhäckseln und treten zusammenhängend in grösserer Mächtigkeit auf.

Nebst diesen beschriebenen Lithologien fallen auch kalzitische Tektonite auf. Einerseits sind dies fein schuppige Kalzitplättchen, die als Rutschharnische und stark deformierte Zonen interpretiert werden. Andererseits treten aber auch gröber kristalline Kalzite auf, die teilweise als Kluftkalzite angesprochen werden können.

3.3.2 Interpretiertes lithologisches Profil

Ausgehend von der Cuttinganalyse sowie ergänzt und erweitert durch die Interpretation der geophysikalischen Logs können insgesamt 12 wichtige Abschnitte im durchteuften Profil unterschieden werden (vgl. Sammelprofil Fig. 6, ungefähre Meterangaben):

0 m bis 358 m: Heterolithische Abfolge mit konglomeratischen Rinnengürteln

Dieser oberste Abschnitt ist charakterisiert durch die Vorkommen mächtigerer Abfolgen konglomeratischer Sandsteine sowie Konglomerate. Als Konglomerate wurden dabei mehr als 2 m lange Intervalle (d.h. mehr als 1 Probe) interpretiert, die mehr als 50 % Konglomerat-Cuttings enthalten. Zu diesen Konglomerat-Rinnengürteln (RGk) gesellen sich mächtigere Sandsteinabfolgen mit weniger als ca. 10 % Konglomerat-Cuttings, die geröllführenden sandigen Rinnengürteln (RGs) zuzuordnen sind. Diese Sandsteinabfolgen haben teilweise den Charakter von gestapelten Durchbruchsfächern und -rinnen (DFR). Dazwischen befinden sich bis mehrere Dekameter mächtige Intervalle aus teilweise pelitreichen heterolithischen Abfolgen. Diese bestehen einerseits aus mehrheitlich rötlich pedogenisierten, pelitischen Sedimenten der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS). Untergeordnet treten auch graue bis grüngraue Pelite mit Pflanzenhäckseln auf. Andererseits kommen unterschiedliche Anteile an bankigen Sandsteineinschaltungen vom Typ distale Überschwemmungssandsteine (US) und untergeordnet Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) vor. Verschiedenenorts konnten überdies graue Silt- und Schlammsteine mit Pflanzenresten, bei 172 m bis 174 m auch mit gut erhaltenen Blattresten beobachtet werden. Diese Ablagerungen, die verschiedentlich Knochenfragmente enthalten, können als Tümpel- oder Altwassersedimente (Typ LAK) angesprochen werden.

Diese Sequenz ist eher schwach tektonisiert.

358 m bis 576 m: Pelitreiche Abfolge mit sandigen Rinnengürteln

In diesem Abschnitt herrschen mächtigere Schlamm- und Siltsteine mit pelitreichen heterolithischen Intervallen vor. Nebst den rötlich pedogenisierten (UPS) kommen wiederum geringmächtigere graue Silt- und Schlammsteine (Typ LAK) mit Pflanzen- und Kohleresten, seltener Knochenbruchstücken vor. Dazu gesellen sich drei weniger als 10 m mächtige Intervalle aus konglomeratischen Sandsteinen vom Typ RGk (zur Definition vgl. vorangehender Abschnitt).

In dieser Sequenz konnten kaum Anzeichen einer Tektonisierung beobachtet werden.

576 m bis 632 m: Graue Serie

Den unteren Teil dieser Serie bilden graue bis hellgraue heterolithische Abfolgen aus Siltsteinen einerseits und mitunter hellglimmerreichen Sandsteinen andererseits. Teilweise kommen darin reichlich Pflanzenhäcksel, im basalen Teil auch akzessorischer Pyrit vor. Oberhalb von ca. 610 m ist eine rasche Korngrössenzunahme zu beobachten. Darüber liegen hell- bis beige graue, hellglimmerreiche konglomeratische Sandsteine mit Sandstein-Einschaltungen.

Die verwendete Bezeichnung graue Serie begründet sich durch die recht auffällige graue bis hellgraue Färbung dieser Abfolge. Diese graue Färbung der Gesteine und das Vorkommen von akzessorischem Pyrit legen eine Interpretation des unteren Teils der grauen Serie als Ablagerungen unter reduzierenden Bedingungen in einem stehenden Gewässer nahe. Auch wenn bei der Bearbeitung der Cuttings keine Faziesfossilien erkannt wurden, so können hier lakustrische oder lagunäre

Sedimente vermutet werden. Die Coarsening-upwards Sequenz hin zu konglomeratischen Sandsteinen vom Typ konglomeratische Rinnengürtel (RGk) lässt sich im vorliegenden Zusammenhang als progradierendes Delta interpretieren. Mikropaläontologische Studien wären für eine sicherere Interpretation der grauen Serie sehr hilfreich.

Anders als im Hangenden kann in diesem Abschnitt eine teilweise stärkere Tektonisierung beobachtet werden, die durch das Auftreten von bis zu 50 % graphitischen Kalzit-Schuppen und -Plättchen angezeigt wird.

632 m bis 667 m: Quarzreiche Sandsteine

Die hellgrauen Fein- und Mittelsandsteine, die diesen Abschnitt dominieren, sind sowohl quarz- als auch hellglimmerreich und führen Pyrit. Sie zeichnen sich durch eine gute bis sehr gute Kornsortierung aus, und konvex-konkave Kornkontakte deuten auf Drucklösungserscheinungen und/oder Anwachsäume hin. Oberhalb von 650 m kommen in diesen Sandsteinen Einschaltungen von grauen bis dunkelgrauen Siltsteinen mit vielen Pflanzenhäckseln vor. Darunter führen auch die Sandsteine reichlich verkohlte Pflanzenreste. Ausgehend von Fein- bis Feinstsandsteinen im basalen Bereich ist bei einer Zunahme von Mittel- bis Grobsandsteinen ein leichter Coarsening-upwards Trend zu beobachten.

Dieser Abschnitt ist leicht tektonisiert.

667 m bis 780 m: Graue Silt- und Schlammsteine

Von der Basis zum Top ist auch in diesem Schichtglied ein Coarsening-upwards Trend zu beobachten, indem die grauen bis dunkelgrauen Schlamm- und Siltsteine zunehmend Sandsteinbänke aufnehmen. Die Sandsteine sind nunmehr fein- bis sehr feinkörnig und ebenfalls quarz- sowie hellglimmerreich. Sie führen auch akzessorischen Pyrit sowie reichlich Pflanzenhäcksel und Kohlepartikel. Zuweilen viele Pflanzenhäcksel und akzessorischer Pyrit treten auch in den Schlamm- und Siltsteinen auf. Gegen unten nimmt der Anteil an Schlammsteinen generell zu.

Bei der Cutting-Bearbeitung konnte stellenweise reichlich Nachfall aus rötlichen pedogenisierten Schlammsteinen aus dem Hangenden beobachtet werden.

Ab 770 m macht sich eine durch Kalzitplättchen und -schuppen angezeigte, zunehmende Tektonisierung bemerkbar.

780 m bis 802 m: Mehrfarbige heterolithische Sequenz mit häufigen Tektoniten

Kennzeichnend für dieses Intervall sind die teilweise hohen Anteile (bis 40 %) an graphitischen Kalzitplättchen und Bohrklein aus kristallinem Kalzit, die als Rutschharnische, respektive als Kluftkalzite zu interpretieren sind. Daneben kommen auch rötlich pedogenisierte und untergeordnet mausgraue Schlamm- und Siltsteine sowie wenig Feinsandsteine vor.

Aufgrund der Durchmischung der verschiedenen Schlamm- und Siltsteine, vor allem aber wegen der hohen Anteile an Tektoniten kann dieser Bereich als bedeutende tektonische Bewegungszone erklärt werden.

802 m bis 1258 m: Heterolithische Serie

Dieses Intervall der Bohrung besteht aus einer heterolithischen Wechselfolge mit grauen bis beige-grauen Sandsteinen einerseits und gefleckten, pedogenisierten Schlamm- und Siltsteinen andererseits. Die Sandsteine umfassen dabei das gesamte Kornspektrum, wobei Fein- bis Mittelsandsteine dominieren.

Bis 10 m mächtige gröbere Sandstein-Intervalle führen basal zuweilen Gerölle (meist <10 % aus Quarziten, Radiolariten und verschiedenen Kalken) und können sandigen Rinnengürteln (RGs) zugeschrieben werden. Wie die geophysikalischen Logs zeigen, bilden feinkörnigere Sandsteine dünnere Einschaltungen, wodurch sie als distale Überschwemmungssandsteine (US), mächtigere als Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) anzusprechen sind.

Die Schlamm- und Siltsteine sind mehrheitlich rötlichgrau-grüngrau sowie ockergelbgrau gefleckt. Dass nebst diesen unter oxidierenden Bedingungen stattgefundenen Bodenbildungen auch reduzierende Ablagerungsbedingungen existierten, belegen untergeordnet auftretende graue und dunkelgrauen Pelite, die häufig Pflanzenhäcksel und Kohlepartikel, bei 890 m auch Knochenreste führen.

Insbesondere im Bereich sandsteinreicher heterolithischer Abfolgen im tieferen Bereich ist eine etwas stärkere Tektonisierung zu beobachten, angezeigt durch bis zu 20 % Tektonite sowie verschieferte Sandsteine.

1258 m bis 1267 m: Störung

Die starke Tektonisierung mit 40 bis 75 % Cuttings aus Kalzitschuppen und kristallinem Kalzit weist auf eine bedeutende Bewegungszone in diesem Abschnitt hin.

1267 m bis 1544 m: Sandsteinreiche Serie

Hell- bis beige-graue Sandsteine mit sehr geringer Geröllführung prägen diesen Abschnitt des Bohrprofils. Dabei dominieren bis 10 m bis 15 m mächtige Einheiten aus Mittel- bis Grobsandsteinen, die als amalgamierte Rinnengürtel-Komplexe betrachtet werden können. Daneben treten auch geringmächtigere, fein- bis mittelkörnige Sandsteine auf, die den Architektur-Elementen US (distale Überschwemmungssandsteine) und DFR (Durchbruchsfächer und -rinnen) zuzuordnen sind. Die untergeordnet vorkommenden Zwischenschichten aus Silt- und Schlammsteinen sind überwiegend rötlich-, mitunter grünlichgrau und gehören dem Architektur-Element UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) an.

Mit bis zu 30 % Tektoniten sind insbesondere die rigiden Sandsteinabfolgen stärker tektonisiert.

1544 m bis 2147 m: Heterolithische Serie

Im Liegenden der sandsteinreichen Abfolge stellt sich wiederum eine heterolithische Serie ein, die mit derjenigen zwischen 802 m und 1258 m vergleichbar ist. Im Unterschied dazu treten jedoch häufig graue bis dunkelgraue Schlammsteine, vereinzelt auch Süßwasserkalke und häufiger Kohlepartikel auf, was auf vermehrte reduzierende Bedingungen hinweist.

Auffallend ist in diesem Abschnitt das fast durchgehende Auftreten von Tektoniten, wobei - insbesondere im basalen Bereich - einzelne Intervalle mit bis zu 30 % Cuttings aus oft graphitischen Kalzitschuppen und kristallinem Kalzit stärker tektonisiert sind.

2147 m bis 2153 m: Störung

Mit 25 % bis 55 % Cuttings aus $\frac{3}{8}$ alzitschuppen und kristallinem $\frac{3}{8}$ alzit ist dieser Bereich ebenfalls als bedeutende tektonische Bewegungszone zu interpretieren. Im Gegensatz zu derjenigen bei 1258 m bis 1267 m verläuft sie jedoch in einer heterolithischen Abfolge, und die Kalzitschuppen und -plättchen weisen meist graphitische Beläge auf.

2153 m bis 2302 m: Sandsteinreiche heterolithische Serie

Im Liegenden der Störung stellt sich wiederum eine sandsteinreiche heterolithische Abfolge ein. Diese wird dominiert durch bis zu einem Dekameter mächtige Mittel- bis Grobsandsteine mit Feinsandsteinen mehr oder weniger stark amalga-mierter Rinnengürtel (RGs), die teilweise etwas Gerölle führen. Die Arenite scheinen eher schlecht zementiert zu sein und sind im Bohrklein überwiegend in ihre Komponenten disaggregiert.

Der pelitische Anteil besteht aus rötlichen und grüngrauen, gefleckten Schlamm- und Siltsteinen, selten dunkelgrau bis schwarz mit Kohlesplittern. In diese Sedimente der Überschwemmungsebene (UPS) eingeschaltet finden sich wiederum dünnere Feinsandstein-Bänke, die als distale Überschwemmungssandsteine (US) zu interpretieren sind.

Bemerkenswert an diesem tiefsten erbohrten Profilabschnitt ist die durchwegs stärkere Tektonisierung, die sich in jeweils 5 bis 15% Tektonit-Cuttings niederschlägt. Die Kalzitschuppen und -plättchen zeigen häufig graphitische Beläge. Von Bedeutung ist in diesem Intervall auch ein stellenweise deutlicher bituminöser Geruch des Probenmaterials.

3.4 Lithostratigraphische und tektonische Ergebnisse der Bohrung

3.4.1 Lithostratigraphie

Der Schichtstapel bis zur ersten bedeutenden tektonischen Bewegungszone in 780 m Teufe lässt sich mit der von Oberflächenaufschlüssen her bekannten Lithostratigraphie gut übereinstimmend korrelieren (Fig. 4):

- Durch das Auftreten von Konglomeraten kann die heterolithische Abfolge (0 m bis 358 m) der Weggiser Serie s.str. zugeordnet werden (STÜRM 1973, HABICHT 1987). Diese stellt die jüngere konglomeratische Fazies der Weggiser Serie s.l. dar.
- Die pelitreiche Abfolge mit sandigen Rinnengürteln zwischen 358 m und 576 m lässt sich mit der Unteren Bunten Molasse, respektive der Molasse

Rouge parallelisieren (STÜRM 1973, HABICHT 1987). Diese wird von STÜRM (1973) als ältere Fazies der Weggiser Serie s.l. betrachtet.

Entgegen der Ansicht von STÜRM (1973), der im Westen der Rigi aufgrund von Oberflächenaufschlüssen nur eine geringmächtige bis auskeilende Molasse Rouge mutmasste, liess sich diese Einheit durch die Bohrung in einer Mächtigkeit von ca. 220 m nachweisen.

- Die graue Serie zwischen 576 m und 632 m kann nicht ohne weiteres in die gängige Lithostratigraphie eingefügt werden. Einerseits lassen sich die hellgrauen Schlamm- und Siltsteine nur durch ihre hellere Farbe von den Grisisger Mergeln abgrenzen. Andererseits sind in der subalpinen Molasse durch die Arbeiten von FREI (1979) und DIEM (1986) über den Sandsteinen (Horwer Platten) der Unteren Meeresmolasse verschiedenenorts graue und graugüne Schlammsteine und Mergel bekannt geworden. Da sich auch keine Anzeichen einer tektonischen Verdoppelung finden, kann die graue Serie einem lagunär-lakustrischen Ablagerungsraum mit Deltaprogradation zugeordnet werden (wie die Profile Vuippens und Ammer in DIEM 1986). Mikropaläontologische Untersuchungen am geborgenen Probenmaterial könnten diesbezüglich wertvolle weiterführende Resultate und Argumente bringen.
- Die Schichtabfolge zwischen 632 m und 780 m lässt sich der Unteren Meeresmolasse zuordnen, wobei die quarzreichen Sandsteine der oberen UMM (Küstenfazies) von DIEM (1986), respektive den Horwer Platten entspricht. Die grauen Silt- und Schlammsteine verkörpern die mittlere UMM (Tonmergelabfolge) von DIEM (1986), bekannt als Grisisger Mergel.
- Die mehrfarbige heterolithische Sequenz mit häufigen Tektoniten zwischen 780 m und 802 m kann als Hauptüberschiebung der subalpinen Rigidecke interpretiert werden, da in deren Liegenden nur noch Untere Süswassermolasse erbohrt wurde.
- Die unter der Hauptüberschiebung durchteufte Schichtserie lässt zum heutigen Zeitpunkt lediglich eine informelle Gliederung zu, wie sie im vorangehenden Kapitel erörtert wurde (Fig. 6). Aufgrund des momentanen Kenntnisstandes kann nicht einmal gesagt werden, ob es sich hier um Sedimente der älteren (sog. "Chatt") oder der jüngeren USM (sog. "Aquitane") handelt. Schwermineralogische Untersuchungen könnten hier zumindest eine Schwermineral-stratigraphische Zuordnung erlauben.

3.4.2 Tektonik

Wie BUXTORF & KOPP (1943) anhand einer Zusammenstellung der Rigi-Profile verschiedener Autoren anschaulich dargelegt haben, sind aus tektonischer Sicht drei hauptsächliche Fragen ungeklärt geblieben, über welche die Bohrung Weggis wichtige weiterführende Erkenntnisse lieferte:

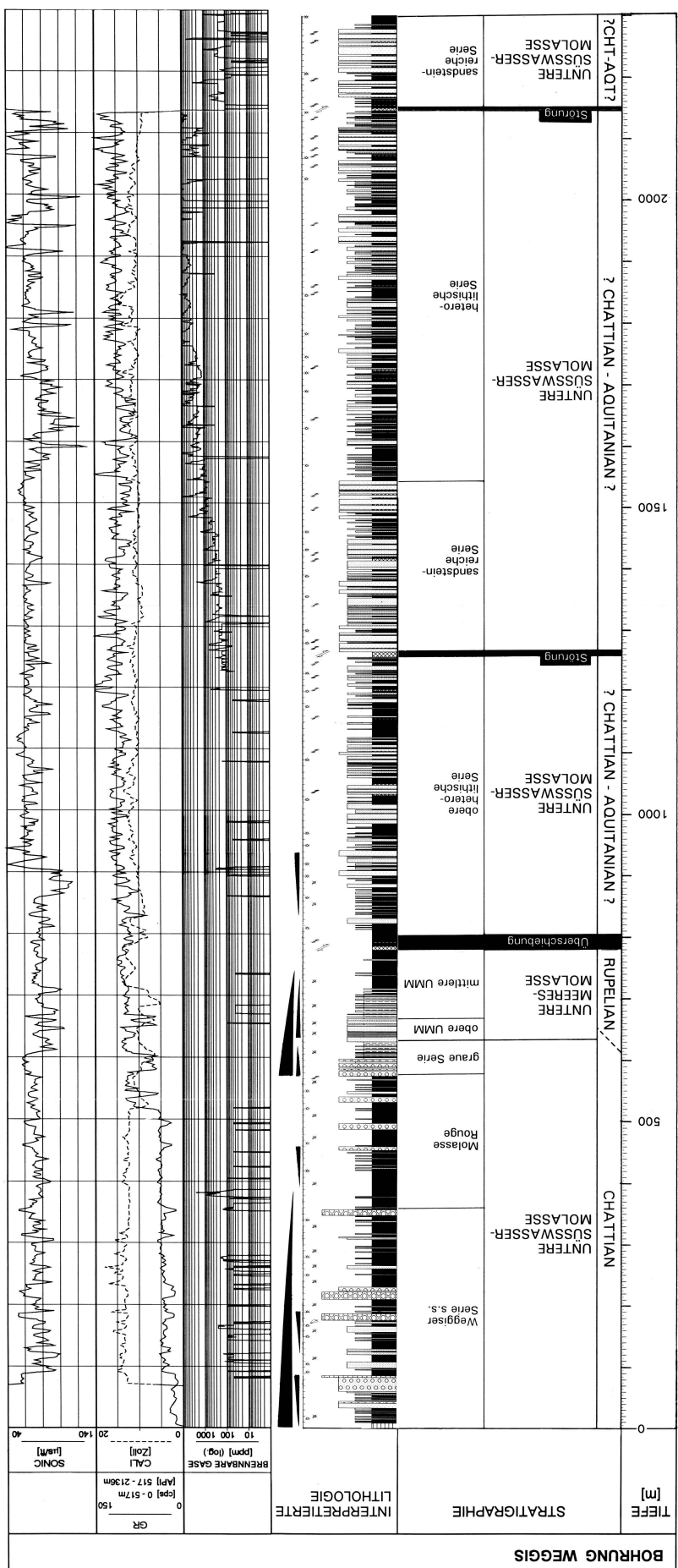
- **Räumliche Lage der Hauptüberschiebung.**
Die Profilkonstruktion (Fig. 4) zeigt, dass die Hauptüberschiebung bis Weggis mit ca. 27° gegen SE hin und damit annähernd parallel zur Schichtung einfällt. Der weitere Verlauf in die Tiefe ist ungewiss.
- **Stratigraphische Lage der Hauptüberschiebung.**
Interessant ist diesbezüglich die Beobachtung, dass die Untere Meeresmolasse relativ geringmächtig ist und über der Hauptüberschiebung lediglich die mittlere UMM und die obere UMM vorhanden sind. Die untere UMM ist somit abgesichert und vermutlich weiter südlich zurückgeblieben. Überdies kann in diesem Abschnitt keine Verdoppelung der Unteren Meeresmolasse wie wenig westlich auf der Horwer Halbinsel (KOPP 1962) oder im Entlebuch (DIEM 1986) festgestellt werden.
- **Struktur unter der Hauptüberschiebung.**
Die Ergebnisse der Cutting-Analysen lassen sich generell dahin interpretieren, dass die Gesteinsabfolge im Liegenden der Hauptüberschiebung gesamthaft recht intensiv, partiell auch sehr stark tektonisiert ist. Dieser Befund scheint durch die leider nicht allzu erfolgreichen Dipmeter-Messungen bestärkt zu werden, zeigen diese doch bereits auf kürzere Vertikaldistanz mitunter sehr rasche Wechsel im Schichtfallen. Dieses weist generell in südliche, über kurze Intervalle aber auch in nördliche Richtung, wobei nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, ob hier nicht teilweise auch Strukturdaten gemessen wurden oder aber methodische Unzulänglichkeiten vorliegen. Mit der gebührenden Vorsicht kann aus diesen Beobachtungen und Interpretationen geschlossen werden, dass die laterale Einengung unter der Hauptüberschiebung nicht nur zu einfachen Duplex-Strukturen wie in BURKHARD (1990) dargestellt, sondern unter anhaltender Kompression auch zu einer intensiven Verschuppung geführt hat.

Bei all diesen Folgerungen gilt es zu bedenken, dass die tektonischen Aussagen einer einzelnen Bohrung ohne detaillierte Zusatzuntersuchungen oder weiterführende Angaben beispielsweise aus seismischen Linien naturgemäss beschränkt sind.

4. Geophysikalische Logauswertung (TG)

4.1 Beschreibung der Logging-Kampagnen

In der unverrohrten Bohrung wurden verschiedene geophysikalische Bohrlochmessungen durchgeführt, um Datengrundlagen für die weiterführende geologische und hydrogeologische Auswertung des Bohrprofils zu beschaffen. Diese Messungen dienten nicht nur der besseren geologisch-hydrogeologischen Erfassung des durchteuften Gebirges, sondern ermöglichten auch die Charakterisierung des Bohrlochzustands (Ablenkung, Bohrlochrandausbrüche) im Hinblick auf den technischen Ausbau. Sie lieferten zudem die Grundparameter für die geothermischen Berechnungen.



Aus bohrtechnischen Gründen, und um möglichst lückenlose Informationen über die gesamte Bohrstrecke zu erhalten, wurden zwei Messkampagnen durchgeführt. Die erste Messkampagne von 517.5 m bis zur Verrohrung (75 m) wurde von der Geotest AG (Zollikofen) am 19. März 1993, die zweite von 2'136 m bis zur Verrohrung (521 m) von der Firma BPB-Instruments (Dortmund) am 12./13. Juli 1993 durchgeführt. Die Resultate sind in den Fig. 6, 7, 8 und 9 dargestellt.

Aus Kostengründen musste mit sogenannten "Slimhole tools" gemessen werden; auch konnten nur die wesentlichsten Messgeräte eingesetzt werden. Vor allem im tieferen Bohrlochbereich erwies sich der Einsatz der "Slimhole tools" als problematisch, traten doch vermehrt Störungen und Ausfälle auf.

4.2 Resultate der Log-Auswertungen

4.2.1 1. Messkampagne

(0 bis 517.5 m: Untere Süsswassermolasse, siehe Fig. 7)

Aus dem GR- Log lassen sich mehrere 10 m mächtige Formationsabschnitte mit sehr geringem Tonanteil herauslesen. Gemäss Litholog (Fig. 6) handelt es sich dabei um Konglomerate (oder vielmehr um konglomeratische Sandsteine, wie Aufschlüsse der Umgebung zeigen) der Weggiser Serie und der Molasse Rouge. Die Sonic-, Neutron- sowie Widerstandsmessungen zeigen, dass diese Schichten sehr dicht gelagert sind und praktisch keine Porosität aufweisen.

Abgesehen von diesen vereinzelt Bohrlochabschnitten mit geringerer GR-Lesung (konglomeratische Sandsteine und Sandsteine) liegt der mittlere GR-Wert um 40 cps. Es sind dies vorwiegend Schlammsteine in Wechsellagerung mit siltigen Feinsandsteinen und teilweise mit Kalksandsteinen. Bestätigt wird diese Wechsellagerung durch eine GR-Varianz um ca. 10 cps. Entsprechend dem Tonanteil täuschten die Sonic- und vor allem die Neutronmessung eine erhöhte Porosität vor, die aber reell nicht existiert. Bestätigt wird der hohe Tonanteil auch durch die sehr geringen Formationswiderstände.

Wegen ihrem hohen Tonanteil müssen die Schlammsteine und auch die siltigen Feinsandsteine als praktisch wasserundurchlässig beschrieben werden.

Aufgrund der tiefen GR-Werte wären die USM-Abschnitte 224 m bis 234 m und 310 m bis 315 m relativ wasserhöffige Bereiche. Die Neutronmessung zeigt aber sehr geringe Porositätswerte, und die Sonicsmessung weist mit Messwerten um ca. 55.5 s/ft auf einen wenig porösen Sandstein hin.

Die Temperatur- und die elektrische Leitfähigkeitsmessung deuten in 234 m Tiefe auf einen möglichen Wassereintritt hin, der aber sehr gering sein dürfte.

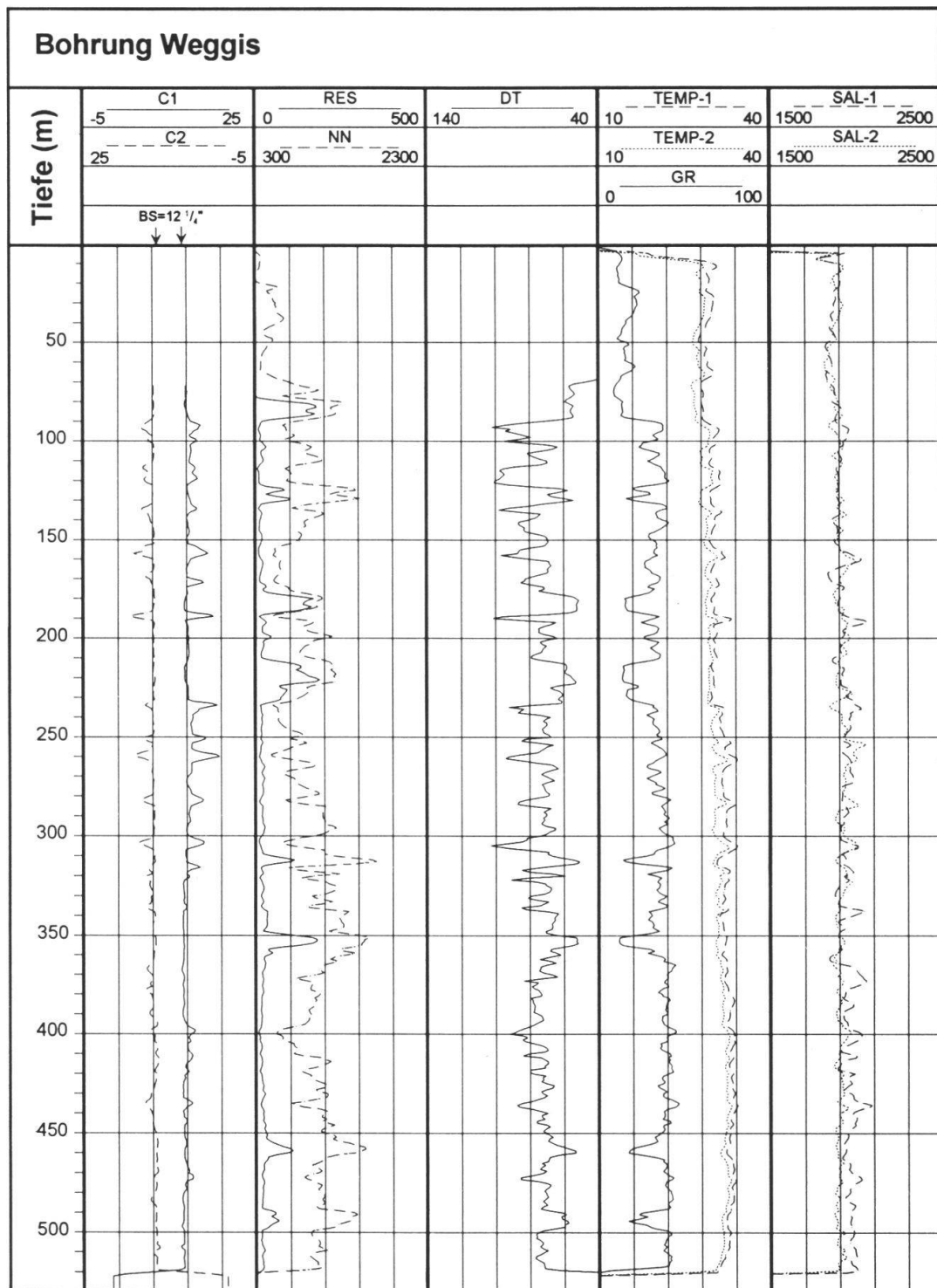


Fig. 7:

Logs der 1. Messkampagne am 19. März 1993 (0 bis 550 m).

C = Vierarmkaliber [Zoll], BS = Bit size;

RES = Formationswiderstand [Ω m];

NN = Neutron [counts per second cps];

DT = Sonic [μ s/ft];

TEMP = Temperatur [$^{\circ}$ C];

GR = Gamma Ray [counts per second cps];

SAL = Elektrische Spülungsleitfähigkeit [μ S/cm] bei 20 $^{\circ}$ C.

4.2.2 2. Messkampagne

(512 bis 2'136 m: Untere Süsswassermolasse und Untere Meeresmolasse, siehe Fig. 8)

In diesem zweiten Messabschnitt wurden die "Slimehole tools" teilweise bis über ihre Leistungsgrenzen beansprucht: Die Porositäts- und Widerstand-Sonden hielten den Bedingungen unter 1'545 m bzw. 1'800 m nicht mehr stand und wurden zerstört.

Die hohe Dichte der Spülung erschwerte das Absenken der leichten Sonden und verminderte auch die Messqualität.

Das Kaliber-Log bestätigt die erschwerten Bedingungen: Das Bohrloch weist sehr starke Auskesselungen und in Bereichen starker Bohrlochneigungsänderungen ausgeprägte Verjüngungen des Bohrlochs auf. Generell beträgt die Bohrlochserweiterung gegenüber dem Meisseldurchmesser mindestens 2 Zoll.

Aufgrund des GR-Logs lassen sich drei tonarme Einheiten ausscheiden: Bei den obersten beiden handelt es sich gemäss Litholog (Fig. 6) um konglomeratische Sandsteine der USM, bei der untersten um Sandsteine der oberen UMM (635 m bis 670 m).

Unterhalb der oberen UMM folgt zwischen 670 und 780 m Tiefe ein Abschnitt mit relativ konstant hohen GR-Messwerten. Dieser Abschnitt wird der mittleren UMM zugeordnet (Fig. 6).

Unterhalb von 780 m Tiefe bis zur Messendtiefe von 2'136 m dominiert eine tonreiche Sandsteinwechsellagerung mit GR-Werten um 100 API.

Zwischen 1'250 m und 1'550 m Tiefe liegt mit GR-Werten um 80 API eine insgesamt leicht sandigere Wechsellagerung vor. Bestätigt wird dies durch einen relativ stabilen Bohrlochdurchmesser sowie leicht erhöhte Formationswiderstände.

Während der Sonic in einer Tiefe zwischen 860 m und 905 m eine ausgeprägte Abnahme der Geschwindigkeit misst, registriert das GR eine geringere Radioaktivität. Diese Konstellation kann mit einem gewissen Anteil an organischem Material erklärt werden, was durch das Litholog (Fig. 6) bestätigt wird.

In Abschnitten mit relativ guter Sonic-Lesung, geringeren GR-Messwerten und einem stabilen Bohrloch lässt sich eine mittlere Slowness von 65 s/ft ermitteln. Dieser Messwert entspricht einer Sandsteinporosität von 10 %. Unter Berücksichtigung des doch relativ hohen GR-Messwertes müssen diese Sandsteine als tonreich und weitgehend dicht charakterisiert werden.

Die Temperatur- und die elektrische Leitfähigkeitsmessung zeigen einen praktisch konstanten Verlauf. Das Bohrloch scheint in sich abgeschlossen zu sein, es sind keine Wassereintritte zu verzeichnen.

Die Dipmeter-Sonde wurde über vier Abschnitte gefahren (Fig. 8). Aufgrund des stark ausgekesselten Bohrlochs ist aber die Interpretation der Messungen mit grossen Unsicherheiten verbunden. In einzelnen Bereichen scheinen sie aber doch komplexe tektonische Strukturen widerzuspiegeln (siehe Kap. 3.4.2).

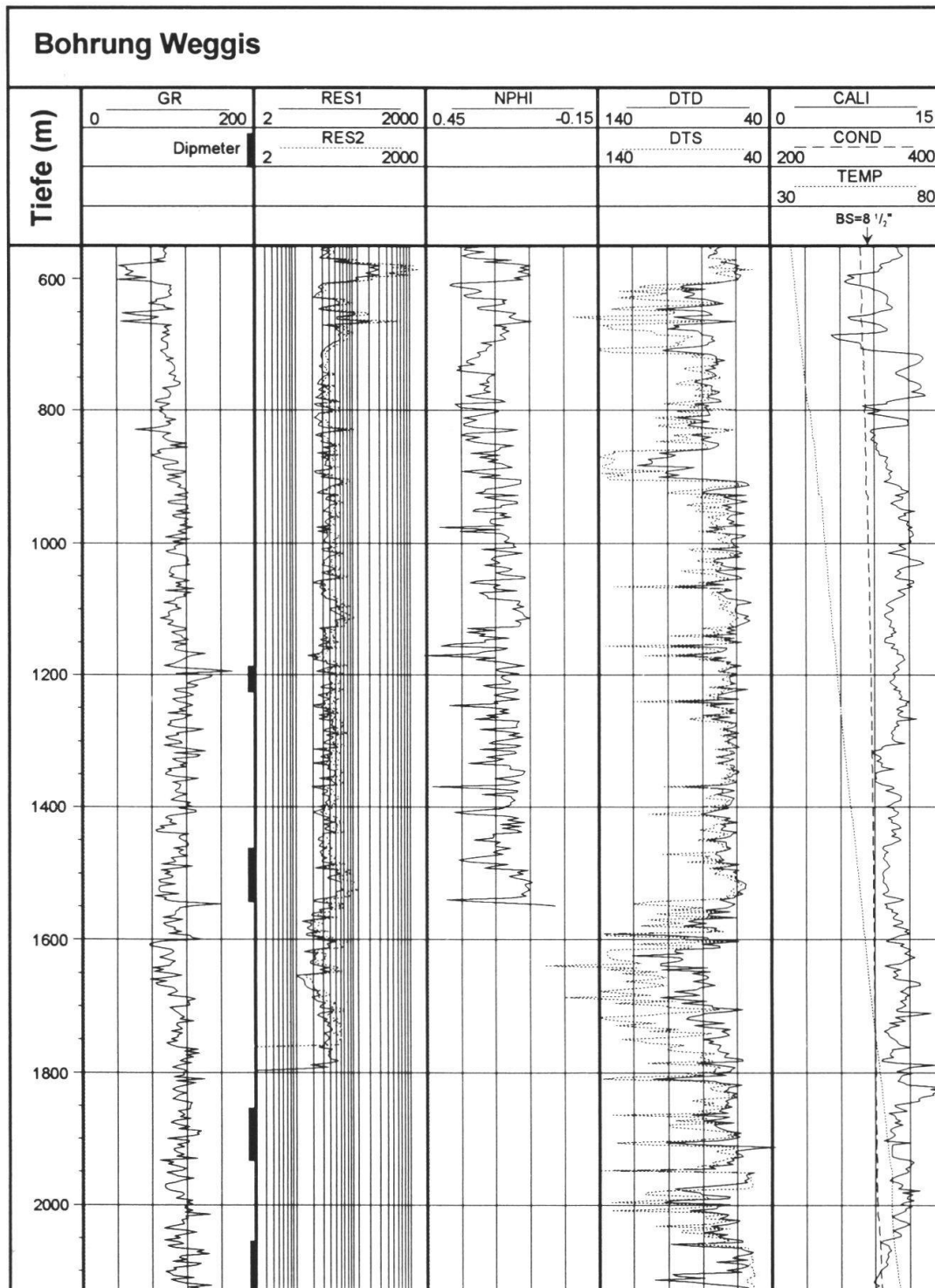


Fig. 8:

Logs der 2. Messkampagne am 12./13. Juli 1993 (512 m bis 2'136 m)

GR = Gamma Ray [American Petroleum Institute API];

RES = Formationswiderstand [Ω m], logarithmische Darstellung;

NPHI = Neutron-Porosität [-];

DTD = Sonic deep [μ s/ft];

DTS = Sonic shallow [μ s/ft];

CALI = Einarmkaliber [Zoll], BS = Bit size;

COND = Elektrische Spülungsleitfähigkeit [mS/m] bei 20 °C;

TEMP = Temperatur [°C].

4.3 Ausgewähltes Interpretationsbeispiel (Fig. 9)

Der Messabschnitt zwischen 150 bis 350 m Tiefe wird von konglomeratischen und siltigen Sandsteinen sowie Schlammsteinen dominiert (Fig. 6).

Die Messungen wurden untereinander auf Tiefe gebracht, als Referenzmessung wurde das GR gewählt. Die Sonic-Werte wurden auf offensichtliche Fehlmessungen korrigiert. Nicht editiert wurden Slowness-Zunahmen bedingt durch Auskesselungen. Der Berechnung der Sonic-Porosität wurde ein Sandsteinmatrix-Wert von 55 sec/ft und ein Wassermatrix-Wert von 189 sec/ft zugrunde gelegt.

Die Werte der GR-Messkurve wurden direkt für die Berechnung der Ton- und Shale-Volumen verwendet. Die Neutronenporosität (PHIN) wurde mit einer Näherungsformel aufgrund der NN-Messwerte (counts per second) ermittelt.

Die gemessenen und berechneten Kurven sind in Fig. 9 dargestellt.

In Bereichen mit Auskesselungen (z.B. 188 m: C1 und C2 in Track 1) sind sowohl die Porositäten der Neutronmessung (PHIN, Track 3) als auch der Sonicmessung (PHIA) eindeutig von diesen beeinflusst. Die Auswertung ergibt unrealistisch hohe Porositätswerte. Generell ist das Bohrloch nur in Abschnitten mit sehr geringen GR-Messwerten und somit tiefen Ton- und Shalegehalten kaliberhaltig. Es sind dies vorwiegend die Bereiche mit konglomeratischen und siltigen Sandsteinen. In Track 4 sind die ermittelten Ton- und Shale-Volumen (VCLAY und VS-HALE) dargestellt. Entsprechend dem GR-Index nimmt der Volumenanteil von Ton und Shale (= siltiger Ton) gegen unten zu. Mit diesem Ton- und Shale-Volumen kann nun die Sonicporosität auf deren Einfluss korrigiert werden. PHIE (Track 3) ist die auf Ton korrigierte Sonicporosität und stellt die effektive Porosität der Formation dar. PHIE zeigt Porositäten um 1 bis 3 Vol.%.

5. Geothermische Aspekte

5.1 Hydrogeologische Tests (EG)

5.1.1 Pegelmessungen

Bei einer Bohrtiefe von 2'136 m wurde am 4. August 1993 das Bohrgestänge ausgebaut und das Bohrloch mit Wasser gefüllt. Die getestete offene Strecke lag zwischen dem letzten zementierten Rohrschuh in 1'902 m Tiefe und der vorläufigen Endtiefe von 2'136 m. Zwischen dem 4. und 9. August 1993 wurde das hydraulische Niveau punktuell mit einem Lichtlot gemessen (Fig. 10). Der Pegel sank innerhalb von 6 Stunden um 1.07 m und stieg in den folgenden 106 Stunden nur sehr langsam wieder um 0.25 m an. Somit waren keine nennenswerten Zuflüsse ins Bohrloch zu verzeichnen. Auch die daraus abschätzbaren Durchlässigkeitsbeiwerte sind tief.

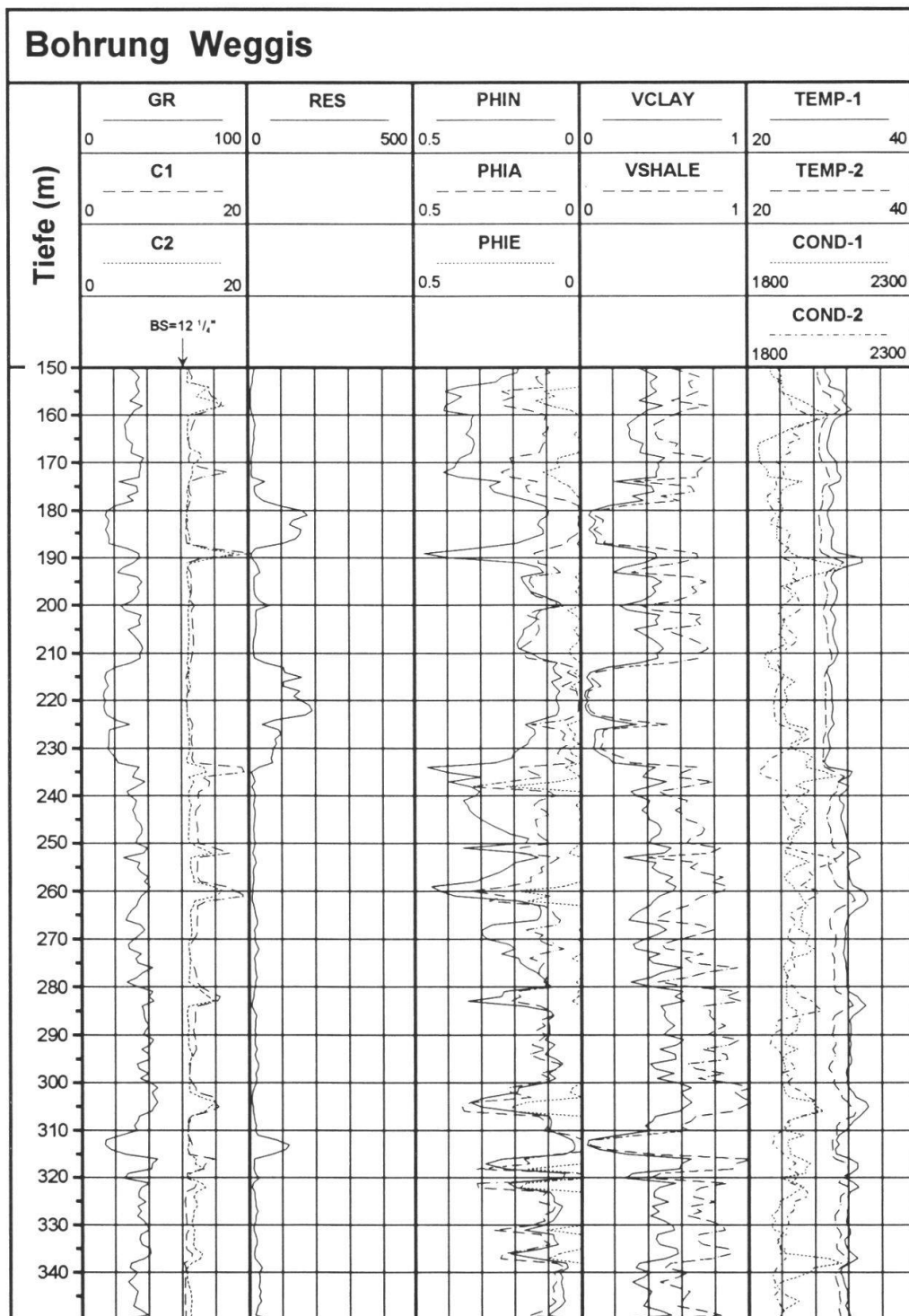


Fig. 9: Interpretationsbeispiel.
 GR = Gamma Ray [counts per second cps];
 C = Vierarmkaliber [Zoll], BS = Bit size;
 RES = Formationswiderstand [Ωm];
 PHIN = Neutron-Porosität [-];
 PHIA = Sonic-Porosität [-];
 PHIE = Effektive Porosität [-];
 VCLAY = Ton-Anteil [-];
 VSHALE = Anteil an siltigem Ton [-];
 TEMP = Temperatur [$^{\circ}\text{C}$];
 COND = Elektrische Spülungsleitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$] bei 20 $^{\circ}\text{C}$.

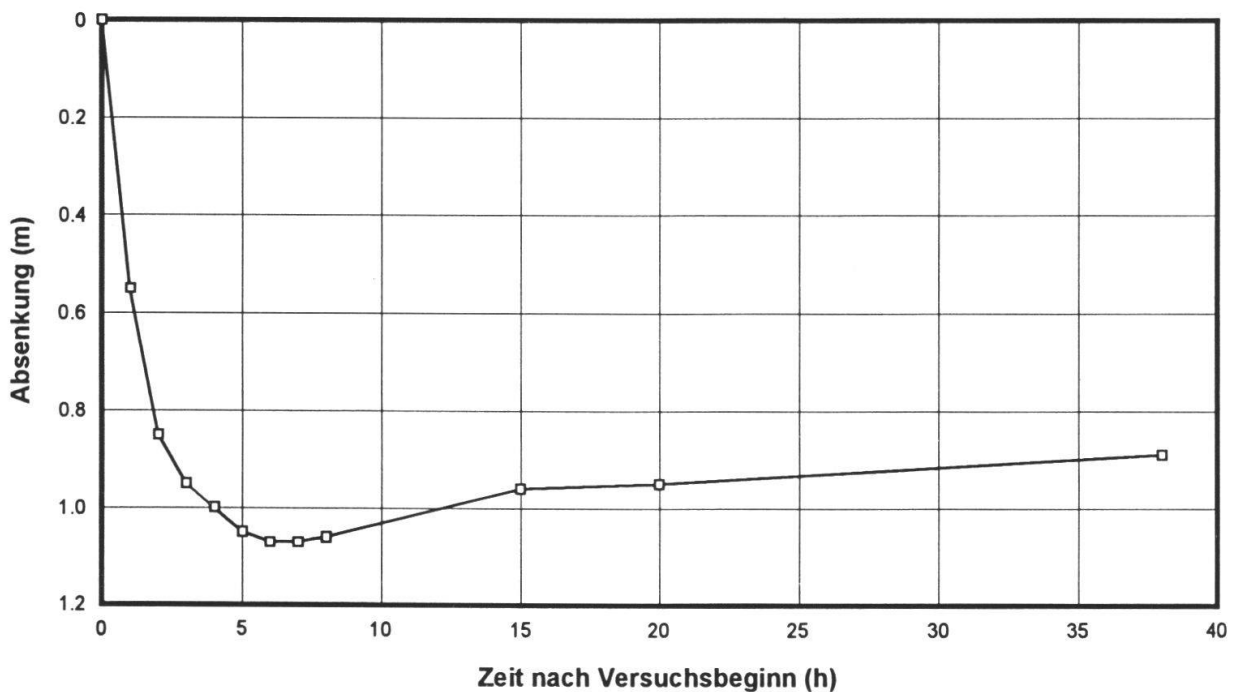


Fig. 10: Pegelmessungen im Bohrloch 4. bis 9. August 1993 (siehe Text)

5.1.2 Pumpversuche

Es wurden zwei Pumpversuche durchgeführt, welche die sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeit bestätigten.

Beim Pumpversuch Nr. 1 am 7. September 1993 wurde das offene Bohrlochintervall 1'902 bis 2'201 m getestet. Es wurden keine nennenswerten Zuflüsse festgestellt.

Der Pumpversuch Nr. 2 wurde nach Erreichen der Endtiefe am 15. September 1993 bei einer offenen Bohrstrecke zwischen 1'902 und 2'302 m durchgeführt. Nach dem Ausbau des Gestänges wurde in 250 m Tiefe eine Pumpe installiert. Während dem Test wurde der Manometerdruck im Bohrloch (bei 250 m Tiefe) abgelesen und die Zeit gemessen, bis ein 18 Liter-Gefäß gefüllt war. Gleichzeitig wurde die Wassertemperatur gemessen. Die Temperatur stieg nur geringfügig an, von anfangs 23.4°C bis auf 24.3°C am Ende des Versuchs. Wegen zu geringem Nachfluss musste der Versuch vor Erreichen eines stationären Zustandes abgebrochen werden.

5.2 Wasserprobe (EG)

Die am 20. September 1993 aus der Endtiefe genommene Wasserprobe ist chemisch nicht von Remisbachwasser, welches als Spülflüssigkeit verwendet wurde, zu unterscheiden. Somit konnte kein mobiles Formationswasser nachgewiesen werden.

5.3 Formationstemperatur (TG)

Figur 11 gibt einen Überblick des Temperatur- und Salinitätsverlaufs der Bohrung. Auf dem Salinitätsdiagramm ist die zwischen dem oberen und unteren Messabschnitt unterschiedliche Spülungssalinität deutlich erkennbar. Die ausgeprägten Salinitätsmaxima der ersten Messkampagne korrelieren mit lokalen Auskesselungen. Es muss deshalb angenommen werden, dass diese Maxima durch eine kurz vor der Messung ausgetauschte Spülung verursacht wurde. Zuflüsse von Formationswässern oder lithologiebedingte Wärmeleitfähigkeitssprünge können praktisch ausgeschlossen werden.

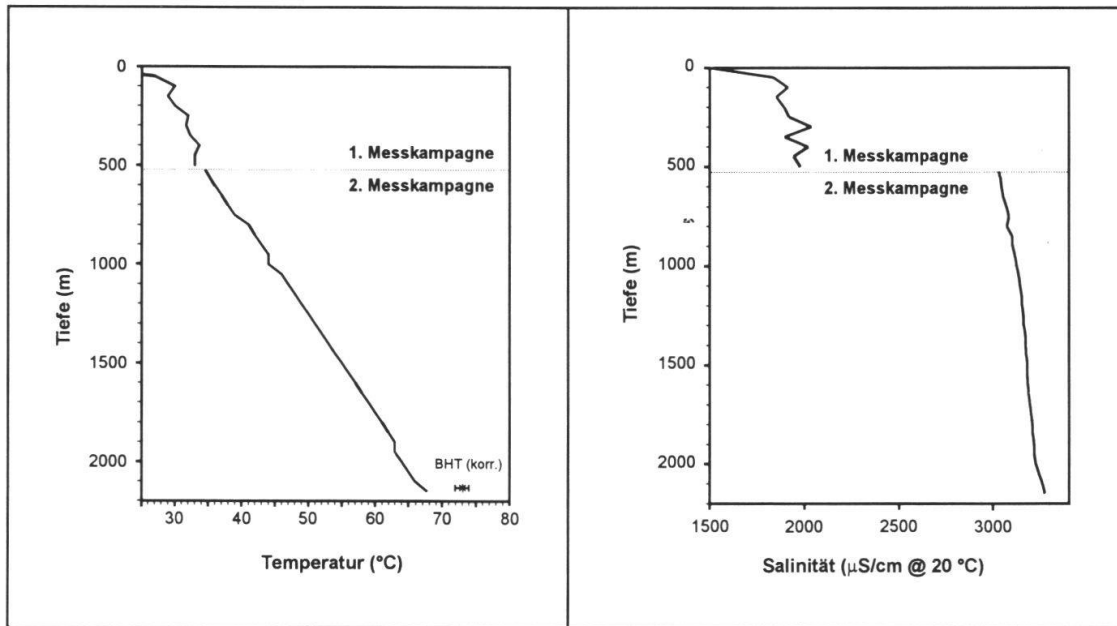


Fig. 11: Temperatur- und Salinitätsverlauf beider Messkampagnen

Die gemessenen Maximaltemperaturen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Run	Tiefe [m]	Temperatur [°C]
1	2'133	71
2a	ca. 1'400	54
2b	2'133	72
3	2'133	72
4	2'133	73
6	2'133	72

Tab 1: Gemessene Maximaltemperaturen

Die Korrektur der ungestörten Formationstemperatur wurde nach der Methode von LACHENBRUCH & BREWER (1959) durchgeführt. Für die ungestörte Formationstemperatur in 2'133 m Tiefe wurde ein Wert von 73.0°C +/- 1.0°C berechnet (Fig. 11).

Basierend auf der errechneten ungestörten Formationstemperatur von 73°C, der Bohrlochlänge von 2'133 m und einer Oberflächentemperatur von 10°C resultiert über die ganze Bohrung ein Temperaturgradient von 29.5 °C/km.

Für den Raum Weggis wird von RYBACH et al. (1987) aufgrund regionaler Extrapolation für den Tiefenbereich 750 bis 1'700 m ein mittlerer Temperaturgradient von unter 25 °C/km angegeben. Dieser Wert liegt somit deutlich unter dem mit den neuen Daten der Bohrung Weggis berechneten Wert. Dies deutet möglicherweise auch auf einen höher als bisher angenommen Wärmefluss (RYBACH & BODMER, 1984) hin.

6. Gasvorkommen (EG)

Da Gasausbrüche zu befürchten waren, wurde in der austretenden Spülung ab 77 m Bohrtiefe die Konzentration an brennbaren Gasen gemessen.

In der subalpinen USM und UMM wurden nur geringe Gasgehalte gemessen (Fig. 6). Erst ab einer Tiefe von 1'196 m wurde eine starke Zunahme der Gaskonzentrationen beobachtet, also ab einer Tiefe, wo auch fein- bis grobkörnige Sandsteine einsetzen und der Anteil der pelitreichen Gesteine zurückgeht. Die höchsten Konzentrationen (über 5 Vol.%) wurden im Tiefenintervall 1'923 bis 1'937 m gemessen.

Während also Sandsteine klar als potentielle Speichergesteine und schlammsteinreiche Serien als Deckgesteine identifiziert wurden, bleibt die Frage nach den Muttergesteinen noch offen. Es gilt aber als sehr wahrscheinlich, dass das in der Bohrung angetroffene Gas aus grösserer Tiefe, vermutlich aus prä-tertiären Schichten stammt.

7. Schlussfolgerungen

Die Bohrung hat eine Vielzahl von geologischen, hydrogeologischen und geothermischen Daten im Bereich der subalpinen Molasse erbracht. Während die Sedimente der USM im Hangenden der Hauptüberschiebung bekannten lithostratigraphischen Einheiten zugeordnet werden können, sind jene im Liegenden stratigraphisch momentan noch nicht einzuordnen. Die relativ geringe Mächtigkeit der UMM ist wohl darauf zurückzuführen, dass der untere Teil bei den Abscherungsvorgängen weiter im Süden zurückgeblieben ist. Das Einfallen der Hauptüberschiebung konnte mit ca. 27° gegen SE bestimmt werden. Von Bedeutung sind auch die zahlreichen Hinweise auf starke Tektonisierung und Verschuppung im Liegenden der Hauptüberschiebung, was vermutlich auf starke laterale Einengung zurückzuführen ist.

Die Sedimente der subalpinen Molasse sind generell durch relativ geringe Porositäten und Durchlässigkeiten gekennzeichnet. Dies lässt sich einerseits dadurch

erklären, dass die Sedimentationsraten (und damit der diagenetische Reifegrad) in proximalen Bereichen des Molassebeckens höher waren als in distalen und andererseits darauf, dass die proximale Zone durch das Heranrücken der alpinen Decken tektonisiert, intensiv verschuppt und sehr stark kompaktiert wurde (siehe z.B. KELLER, 1992).

Die Wasserführung der angetroffenen Sedimente ist bescheiden. Der generell hohe Tonanteil und die starke Kompaktion der Gesteine ist auch aus den geophysikalischen Logs ersichtlich.

Erstaunlich hoch ist der berechnete Temperaturgradient. Mit ca. 30 °C/km liegt er deutlich über dem bisher vermuteten.

In sandsteinreichen Partien der Bohrung wurden mit stellenweise über 5 Vol.% recht hohe Gaskonzentrationen gemessen.

Die geologisch-technische Betreuung der laufenden Bohrung war aufgrund des beschränkten Budgets nur minimal. Grundsätzlich sollte eine solche Betreuung vor Ort erfolgen. Dadurch könnte der Bohrverlauf koordiniert, optimiert und eine gute Datenqualität sichergestellt werden. Bohrlochvermessungen und Tests sollten im Zeitplan und Budget einkalkuliert werden.

Verdankungen

Dank gebührt den Herren Dr. A. Fehr und M. Brunner, Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), und Herrn L. Buchecker, Fachstelle für Energiefragen des Kantons Luzern, sowie Herrn Dr. F. Renner, Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, für ihre vielfältige Unterstützung des Projekts. Sie ermöglichen die Sicherstellung des zahlreichen Datenmaterials, welches für die weitere geothermische Nutzung im subalpinen Raum von grossem Nutzen sein kann. Ebenso danken wir dem Bohrmeister Peter Stoffner und seiner Equipe für die zuvorkommende und angenehme Zusammenarbeit. Für die Übersetzung des Résumé danken wir Dr. R. Schegg und Prof. Dr. W. Wildi.

Literaturverzeichnis

- BAUMBERGER, E. (1925): Versuch einer Umdeutung der Profile durch die subalpine Molasse der Zentral- und Ostschweiz. - *Eclogae geol. Helv.* XIX/1, 165-177.
- BAUMBERGER, E. (1929): Die Deutung des Rigi- und Rossbergprofils auf Grund neuer Fossilfunde. - *Ver. natf. Ges. Basel* 40/2 (1928/29), 295-312.
- BAUMBERGER, E. (1934): Exkursion Nr. 54. Umgebung von Luzern - Rigi. - In: *Geol. Führer Schweiz* 10, Wepf, Basel.
- BURKHARD, M. (1990): Aspects of the large-scale Miocene deformation in the most external part of the Swiss alps (Subalpine Molasse to Jura fold belt). - *Eclogae geol. Helv.* 83/3, 559-583.
- BUXTORF, A., TOBLER, A., NIETHAMMER, G., BAUMBERGER, E., ARBENZ, P. & STAUB, W. (1916): Geologische Vierwaldstättersee-Karte 1:50 000. (Spezialkarte Nr. 66a). - *Schweiz. geol. Komm.*
- BUXTORF, A. & KOPP, J. (1943): Über das Unterstampien der Rigi und über Querbrüche in der Molasse zwischen Vierwaldstätter- und Zugersee. - *Eclogae geol. Helv.* 36/2, 291-302.

- DIEM, B. (1986): Die Untere Meeresmolasse zwischen Saane (Westschweiz) und Ammer (Oberbayern). - *Eclogae geol. Helv.* 79/2, 493-560.
- FREI, H.-P. (1979): Stratigraphische Untersuchungen in der subalpinen Molasse der Nordost-Schweiz zwischen Wägitaler Aa und Urnäsch. - *Mitt. geol. Inst. ETH und Univ. Zürich [N.F.]* 233, 219 p.
- GEOFORM (1994): Geothermiebohrung WEGGIS - Schlussbericht Geologie/Geophysik/Bohrtechnik. - Bericht ans BEW gf-138-12, 31 p., 8 Figuren und 4 Anhänge.
- HABICHT, J.K.A. (1987): Internationales stratigraphisches Lexikon. Band Europa. Fasz. 7, Schweiz. Fasz. 7b, Schweizerisches Mittelland (Molasse). - *Schweiz. Geol. Komm. und Landeshydrol. und -geol.*
- HANTKE, R. et coll. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete, 1:50'000. - *Vjschr. natf. Ges. Zürich*, 112/2, 91-122.
- KAUFMANN, F.J. (1860): Untersuchungen über die mittel- und ostschweizerische subalpine Molasse. - *N. Denkschr. schweiz. Ges. Natw.* 17.
- KAUFMANN, F.J. (1872): Rigi und Molassegebiet der Mittelschweiz. - *Beitr. geol. Karte Schweiz* 11. *Schweiz. geol. Komm.*, 534 p.
- KELLER, B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. - *Eclogae geol. Helv.* 85/3, 611-651.
- KELLER, B., BLÄSI, H.R., PLATT, N.H., MOZLEY, P.S. & MATTER, A. (1990): Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehungen zur Diagenese und den petrophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrungen Langenthal. - *Nagra Techn. Ber.* 90-41, Baden, 100 p.
- KOPP, J. & MARTIN, G.P.R. (1938): Die Hauptaufschiebung der subalpinen Molasse zwischen Zugersee und Aegerisee. - *Eclogae geol. Helv.* 31/2, 387-394.
- KOPP, J. (1937): Demonstration einer geologischen Karte der Südseite der Rigi. - *Eclogae geol. Helv.* 39/2.
- KOPP, J. (1962): Erläuterungen: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000. Bl. 1150 Luzern (Nr.28). - *Schweiz. Geol. Komm.*, 66 p.
- LACHENBRUCH, A.H. & BREWER, M.C. (1959): Dissipation of the temperature effect in drilling a well in Arctic Alaska. - *Bull. U.S. Geol. Surv.*, 12083-C, 73-109.
- MENGIS + LORENZ AG (1993): Schlussbericht über die lithologische Bearbeitung Geothermiebohrung Weggis TH1. - Anhang 1 des Berichts Geoform (1994), 24 p.
- MÜLLER, M., NIEBERDING, F. & WANNINGER, A. (1988): Tectonic style and pressure distribution at the northern margin of the Alps between Lake Constance and the River Inn. - *Geol. Rdsch.* 77/3, 787-796.
- RYBACH, L., EUGSTER, W. & GRIESSER, J.-C. (1987): Die geothermischen Verhältnisse in der Nordschweiz. - *Eclogae geol. Helv.*, 80/2, 521-534.
- RYBACH, L. & BODMER, PH. (1984): Geothermal map of Switzerland (heat flow density). *Beitr. Geol. Schweiz. Ser. Geophysik* Nr.22, 47 p.
- STÜRM, B. (1973): Die Rigi-Schüttung. Sedimentpetrographie, Sedimentologie, Paläogeographie, Tektonik. - *Diss. Univ. Zürich*, 96 p.
- VOLLMAYR, T. & WENDT, A. (1987): Die Erdgasbohrung Entlebuch 1, ein Tiefenaufschluss am Alpenrand. - *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.*, 53/125, 67-79.