

Grösster saisonaler Diffusionsspeicher der Schweiz D4 in Root (LU) : Geologie, Petrophysik, Hydrogeologie und Erfahrungen mit der Realisation des Sondenfeldes

Autor(en): **Keller, Beat**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **12 (2007)**

Heft 1

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-226368>

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.

Grösster saisonaler Diffusionsspeicher der Schweiz D4 in Root (LU): Geologie, Petrophysik, Hydrogeologie und Erfahrungen mit der Realisation des Sondenfeldes Beat Keller¹

Stichworte: Geothermischer Diffusionsspeicher, Geothermik, Petrophysik, Hydrogeologie, Obere Meeresmolasse, St. Galler-Formation

Zusammenfassung

In Root (LU) entsteht in Etappen das Unternehmungs- und Innovationszentrum D4. Der Zielsetzung der suva entsprechend sollen 50% des Energiebedarfs durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Das Herzstück des Systems mit BHKW Öl-/Gaskessel, Wärme und Eisspeicher sowie Solardach/Fotovoltaik bildet ein saisonaler Diffusionsspeicher im Felsen. Dieser wird im Sommerhalbjahr durch die Abwärme sowie das Solardach geladen und im Winter zu Heizzwecken entladen. Realisiert werden soll der Speicher in zwei Etappen mit Speichermodulen von je 45.5 × 51.5 m Grundfläche und je 49 Sonden mit 160 m Länge. Mit einem Volumen von 376'000 m³ je Modul ist dies der bislang grösste geothermische Diffusionsspeicher der Schweiz. Durch die geringe Formationsdurchlässigkeit ($k \approx 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) und die hohe Wärmekapazität (2.3 MJ/m³·K) sind die Gesteine der Oberen Meeresmolasse bestens für einen solchen Diffusionsspeicher geeignet. Der Felsuntergrund wurde vorgängig durch eine gekernte Pilotbohrung sowie zwei Pilotsonden eingehend erforscht. In letzteren wurden durch In Situ-Reaktionstests die mittlere Formationstemperatur (12.4°C), die mittlere Wärmeleitfähigkeit (3.0-3.3 W/m·K) sowie der thermische Widerstand der Sonden ermittelt. Die definitive Speicherdimensionierung erfolgte mit dem Programm PILESIM, wobei der ersten Baustufe Wärmeleistungen von 950 kW und Kälteleistungen von 760 kW zu Grunde gelegt wurden. Das erste Speichermodul wurde 2001 erfolgreich realisiert.

Résumé

A Root (LU) le centre de business D4 est réalisé en étapes. La suva a fixé comme objectif de doter le centre D4 d'un concept énergétique respectueux de l'environnement. Le recours aux énergies renouvelables doit couvrir au moins 50% des demandes d'énergie (chauffage/refroidissement). Le système de caractère flexible et polyvalent comprend une toiture solaire, une pompe à chaleur/machine frigorifique combinée et un stockage de chaleur de type diffusif dans le sous-sol rocheux. Ce stockage de chaleur joue un rôle clef dans le concept énergétique et permet de satisfaire aussi bien les besoins de chauffage en hiver que de refroidissement en été. Le stockage de chaleur devrait être réalisé en étapes avec deux modules de stockage couvrant chacun une surface de 45.5 × 51.5 m et comprenant 49 sondes de 160 m de profondeur. Avec un volume de 376'000 m³ par module ce sera jusqu'ici le plus grand stockage de chaleur diffusif en Suisse. Grâce à la faible perméabilité de la formation ($k \approx 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) et la haute capacité thermique du terrain (2.3 MJ/m³·K), la molasse marine supérieure s'apprête idéalement pour un stockage de chaleur diffusif. Le rocher à été investigué par un forage pilote carotté et des investigations géophysiques. Deux tests de réponse sur deux sondes de 160 m ont été effectués pour déterminer les caractéristiques thermiques du terrain et des sondes. Dans ces derniers la température moyenne de la formation (12.4°C), la conductibilité thermique moyenne du terrain (3.0-3.3 W/m·K) ainsi que la résistance thermique effective des sondes ont été déterminées. La dimension définitive du stockage de chaleur à été obtenu avec l'outil de simulation PILESIM, compte tenu d'une puissance thermique de 950 kW de chaleur et de 760 kW de refroidissement pour la première étape. Le premier module du stockage à été réalisé avec succès en 2001.

¹ Beat Keller, Keller + Lorenz AG, Schlossstrasse 3, 6005 Luzern

1. Einleitung

Im Längenbold bei Root (LU) realisiert die suva etappenweise das D4 Business Center Luzern (Projektinformationen unter <http://www.d4center.ch>). Die 2003 vollendete erste Bauetappe mit zwei Bürogebäuden wurde 2005 ergänzt durch einen Flankenbau Lagerung, Produktion und Forschung. Mit den bevorstehenden Etappen werden weitere Bürogebäude sowie ein Hotel realisiert, so dass D4 über 220'000 m² Geschossfläche verfügen und damit zu den grössten Business Centern der Schweiz zählen wird.

Bereits mit der 1990 formulierten Zielsetzung für D4 strebte die suva ein umweltfreundliches, nachhaltiges Energiekonzept an: Nebst einer optimalen Nutzung der Energie und einer Minimierung des Bedarfs sollten erneuerbare Energien bevorzugt eingesetzt werden. Das innovative Energiekonzept strebte einen Jahresenergiebedarf von 30 bis 50% des SIA-Zielwertes (SIA 380/1) an, wovon mindestens 50% durch erneuerbare Energien zu decken sind.

Der im Jahre 2001 realisierte Felsspeicher der ersten Bauetappe hat einen Grundriss von 45.5 × 51.5 m und besteht aus 49 Erdwärmesonden à je 160 m Tiefe. Mit 376'000 m³ Speichervolumen stellt bereits das erste Modul die grösste Anlage der Schweiz und damit eine neue Generation dar, sind doch die bislang realisierten Wärmespeicher jeweils eine Grössenordnung kleiner (z. B. Serse 55'000 m³, Meister Wollerau 40'000 m³, Tschannland Buchrain 29'000 m³ oder Collège de Peseux 22'500 m³, vgl. Hadorn 1997). Auch der von Basetti et al. (2005) als «in dieser Grössenordnung in der Schweiz neuartiges Projekt» gepriesene Speicher des Grand Hotel Dolder in Zürich ist mit 200'000 m³ Volumen gerade mal gut halb so gross wie das erste Modul des Diffusionsspeichers D4. Im Endausbau würde der doppelt so grosse Diffusionsspeicher D4 zu den weltweiten Grossanlagen gehören.

Der vorliegende Artikel widmet sich vorab den geothermisch-geologischen Aspekten

der Grundlagenbeschaffung für die Speicherdimensionierung sowie den Erfahrungen beim Bau des ersten Speichermoduls.

2. Evaluation und Optimierung des Energiekonzepts

Von den anfänglich sieben valablen Energiekonzepten - worunter auch Erdwärmesonden-Felder - wurde die Variante «geothermischer Diffusionsspeicher» (Mengis + Lorenz AG 1996a) parallel zur Vergleichsvariante «Konventionell Gas/Öl» weiter bearbeitet.

Bei der Detailprojektierung des Energiesystems verlangte die schwierige Quantifizierung des Energiebedarfs - insbesondere jene an Kälte - für die noch unbekanntem Nutzer nach einem flexiblen, polyvalenten Konzept. Dieses wurde vom Planungsteam schliesslich in einer Kombination BHKW, Öl-/Gaskessel, Wärme und Eisspeicher, geothermischer Diffusionsspeicher und Solardach/Fotovoltaik gefunden (B+B Energietechnik, P. Berchtold, Mengis + Lorenz AG & Ernst Basler + Partner AG 1999). In einem Umfeld sinkender Preise fossiler Brennstoffe Mitte der 1990er Jahre stellten die hochgesteckten Ziele an eine marktgerechte Wirtschaftlichkeit der Energieerzeugung hohe Anforderungen an das Planungsteam.

Im Zuge der Systemoptimierung wurden mit dem Programm DST (Hellström 1989) unter Verwendung eines geologischen Prognosemodells sowie ersten Messungen der Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten an Gesteinsproben aus der Zielformation der Oberen Meeresmolasse zahlreiche Speichervarianten berechnet und verglichen (Mengis + Lorenz AG 1996b). Insbesondere die Optimierung der Kälteleistungen verlangte nach wiederholten Sensitivitätsanalysen, wobei mit DST unter anderem Varianten von 150 bis 300 kW Kälte und 150 bis 280 kW Wärmeleistung (Wärme 640 bis 1'300 MWh/a, Kälte 650 bis 900 MWh/a) berechnet wurden. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen eines etappierbaren Speicherbaus, mini-

maler Auslaufftemperaturen von 2°C für einen Betrieb ohne Frostschutz, Direktkühlung ohne WP im Sommer sowie einer maximalen Breite des unter dem Parkgeschoss zu platzierenden Diffusionsspeichers von 40 m erwiesen sich Grundrisslängen des Speichers von 60 bis 80 m und Sondenlängen von 150 bis 160 m als optimal, was totalen Speichervolumina von 350'000 bis 550'000 m³ entspricht.

3. Untersuchungsprogramm mit Pilotbohrungen und -sonden

Zur Grundlagenbeschaffung für dieses geothermische Grossprojekt wurden 1999 in einem ersten Schritt eine Pilotbohrung mit zwei Pilotsonden realisiert, die die Basis für ein umfangreiches Untersuchungsprogramm bildeten.

Ziele der Pilotbohrung

1. Beschaffung der Grundlagen für die Dimensionierung des Speichers. Geologisches 3D-Modell des Untergrundes (Unterteilung des Felsens in petrophysikalisch «homogene» Schichten), Grundwasserverhältnisse (fließt Grundwasser durch den Speicher?), Messung des geothermischen Gradienten, Probenbeschaffung für Labormessungen (Wärmeleitfähigkeit und -kapazität, Porosität, Durchlässigkeit), Messungen der geophysikalischen Eigenschaften des Felsens für die Extrapolation der Labordaten sowie Beurteilung der Gasgefährdung.
2. Beobachtung des Speichers in der Betriebsphase durch Einbau einer Temperaturfühler-Messschlange.

Ziele der Pilotsonden

1. Beschaffung der Grundlagen für die Dimensionierung des Speichers durch einen Reaktions-Test (Response-Test): Messung der mittleren thermischen Leitfähigkeit des Felsuntergrundes und Er-

mittlung des thermischen Widerstandes der Sonden.

2. Sammlung von technischen Erfahrungen für den Bau des Sondenfeldes: Angaben über die Bohrbarkeit und den Bohrfortschritt mittels Imloch-Hammer und Erprobung der Hinterfüllung der Sonden mit einem thermisch optimalen Quarzsand.

Die Pilotbohrung Ø 122 mm wurde im Felsen bis zur Endteufe von 161.2 m gekernt und mit einem Standrohr Ø 115 mm aus Stahl ausgebaut. Die beiden Pilotsonden wurden mit dem Imloch-Hammer Ø 152 mm auf Endteufen von 160 m und 162 m vorgetrieben und mit Doppel-U-Sonden bestückt. Dem thermischen Response-Test in den Pilotsonden war ein separates Untersuchungsprogramm der EPFL-LASEN (Pahud 1999) gewidmet.

Untersuchungsprogramm

Das Kernmaterial der Pilotbohrung wurde sedimentologisch aufgenommen und für die Laboruntersuchungen beprobt. Nebst Gasmessungen wurden auch geophysikalische Bohrlochmessungen durchgeführt, wobei folgende physikalischen Grössen mit entsprechenden Sonden kontinuierlich ermittelt wurden: Salinitätslog, Gamma-Ray Log, Sonic Log, sowie Neutron-Neutron Messungen und Kaliberlog. Mittels einer Temperatur-Sonde (PT 1000) wurden in drei Messkampagnen die Temperaturen im Bohrloch kontinuierlich gemessen und daraus der lokale geothermische Temperaturgradient ermittelt. Da sich im Bohrloch eine relativ hohe natürliche Salinität vorfand, wurde entgegen der vorgesehenen Versalzung ein Austausch des Wassers im Bohrloch mit Trinkwasser vorgenommen. Dazu wurden ab Hydrant mittels einer 1"-Eingabeleitung bis 120 m insgesamt 1300 l Wasser in die Bohrung eingeleitet. Danach wurden allfällige Veränderungen der Salinität durch eindringendes Formationswasser beobachtet. Mit einem Pumpversuch unter kontinuierlicher Aufzeichnung der Salinität liessen sich Zuflüsse in das Bohrloch sowie

die mittlere Durchlässigkeit des durchörterten Gesteinskörpers ermitteln.

An den 25 repräsentativen Gesteinsproben aus der Kernbohrung wurden mittels eines Wärmeleitfähigkeits-Messgerätes (Quick Thermal Conductivity Meter) die Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsproben gemessen. Nach der Messung wurde jedem Probenstück ein 30 mm langer Kleinbohrkern (Plug) Ø 30 mm entnommen und zur weiteren Bearbeitung an das geologische Institut der Universität Bern geliefert. An 300-500 g mit dem Steinbrecher zerkleinertem und mit Wasser versetztem Gesteinsmaterial wurde danach mittels einer von der ETH neu entwickelten Apparatur (Leu et al. 1999a) die Wärmekapazität jeder Probe bestimmt.

Im Labor erfolgten an den Kleinbohrkernen Messungen der Quecksilber-Dichte, der Helium-Dichte, des Feststoffvolumens (Korndichte) sowie die Bestimmung der Durchlässigkeit. Die Berechnung der Gesamtporosität und der Nutzporosität basiert auf den gemessenen Quecksilber- und Helium-Dichten.

4. Geologischer und hydrogeologischer Überblick

Das Baugelände D4 ist am Südrand des schweizerischen Molasse-Beckens gelegen - im Übergang von der flach liegenden mittelländischen Molasse im Norden hin zur monoklinalen Aufbiegung (Falte mit nur einem Schenkel) im Süden (Fig. 1). Die Schichten im Untergrund des Längenbold fallen mit ca. 20° gegen NNW hin ein (323/20).

Der Felsuntergrund des südlichen Baugebietes gehört der St. Galler-Formation an - dem jüngeren Teil der Oberen Meeresmolasse (Fig. 2, 3). Sie besteht aus mächtigen Sandstein-Abfolgen mit Einschaltungen von Schlamm- und Siltsteinen, wobei letztere in der St. Galler-Formation sehr verbreitet sind (Keller 1989). Die Obere Meeresmolasse wird überlagert von der Oberen Süsswassermolasse. Diese wird durch mannigfaltige Wechsellagerung aus Schlamm- und Siltsteinen, Mergeln, Sandsteinen sowie Konglomeraten aufgebaut. Die Obere Süsswassermolasse bildet den Felsuntergrund im nördlichen Baugebiet. Die Grenze zwischen der Oberen Meeresmolasse und der Oberen Süsswassermolasse verläuft an der Felsoberfläche genau durch die Pilotbohrung, welche die gesamte St. Galler-Formation durchörterte.

Aus hydrogeologischer Sicht ist die alpenrandnahe Obere Meeresmolasse der hydrogeologischen Zone III des schweizerischen Molasse-Beckens (Keller 1992) zuzurechnen. Diese zeichnet sich aus durch geringe primäre Porositäten und durch Fissurations-Porositäten (Kluftporositäten).

Wegen der generell guten Wärmekapazitäten der Gesteine erscheint die alpenrandnahe Obere Meeresmolasse für die Realisation geothermischer Speicheranlagen als gut geeignet (Leu et al. 1999a, b).

Da die Bohrung in der Oberen Meeresmolasse unter dem Talboden beheimatet ist, waren generell leicht mineralisierte Wässer vom Typus Na-HCO₃ zu erwarten (NAGRA 1988).

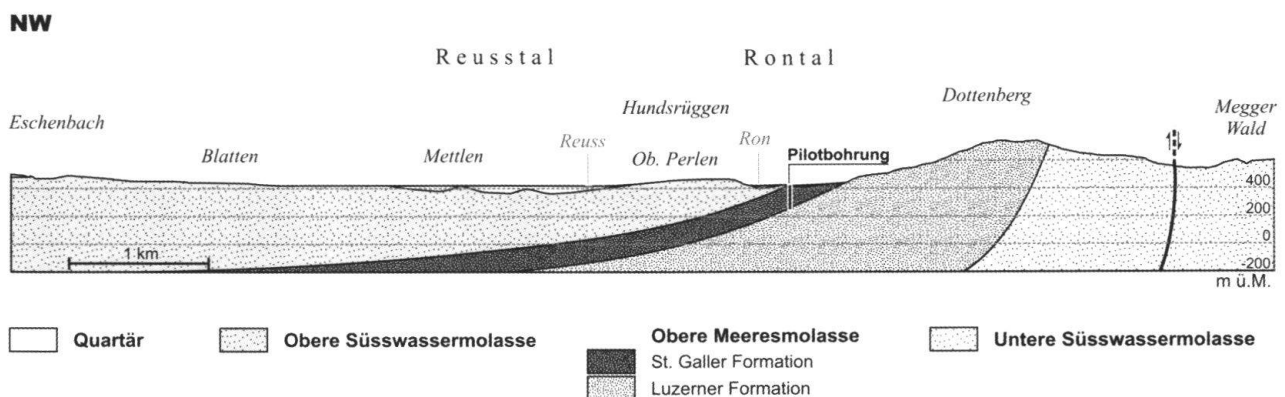


Fig. 1: Geologisches Profil durch das Rontal mit der Lage der Pilotbohrung Längenbold.

5. Geologie

5.1 Sedimentologie

Basierend auf den sedimentologischen Aufnahmen wurde eine fazielle Interpretation nach dem Konzept der Architektur-Elemente für die Obere Meeresmolasse (Keller 1989) vorgenommen (Tab. 1). Dabei werden sedimentologisch einheitliche Abschnitte des Bohrprofils auf Grund lithologischer und sedimentologischer Merkmale den zutreffenden Lithofazies-Kodes zugewiesen. Aus den charakteristischen Vergesellschaftungen der Lithofazies-Kodes wurden fazielle Architektur-Elemente abgeleitet, die jeweils typische Ablagerungsräume mit ihren Prozessen repräsentieren. Dadurch besitzen die

Gesteine eines Architektur-Elementes auch gleichartige petrophysikalische, hydrogeologische und geothermische Eigenschaften. Die Pilotbohrung durchteufte die gesamte St. Galler-Formation (Fig. 3, 4) - das jüngere Glied der Oberen Meeresmolasse. Die Untergrenze der St. Galler-Formation liegt bei einer Bohrteufe von 159.45 m an der Basis der parallel laminierten Feinsandsteine über den pedogenisierten Schlammsteinen. Das Dach der Formation ist an die Basis der Konglomerate in einer Teufe von 6.15 m zu legen. Ausgehend von einer erbohrten Länge von 153.5 m errechnet sich aus dem Schichtfallen von 20° eine effektive Schichtmächtigkeit der St. Galler-Formation von 144.1 m. Die Basis der Bohrung liegt in den dunkel grüngrauen bis dunkelgrauen Schlammstei-

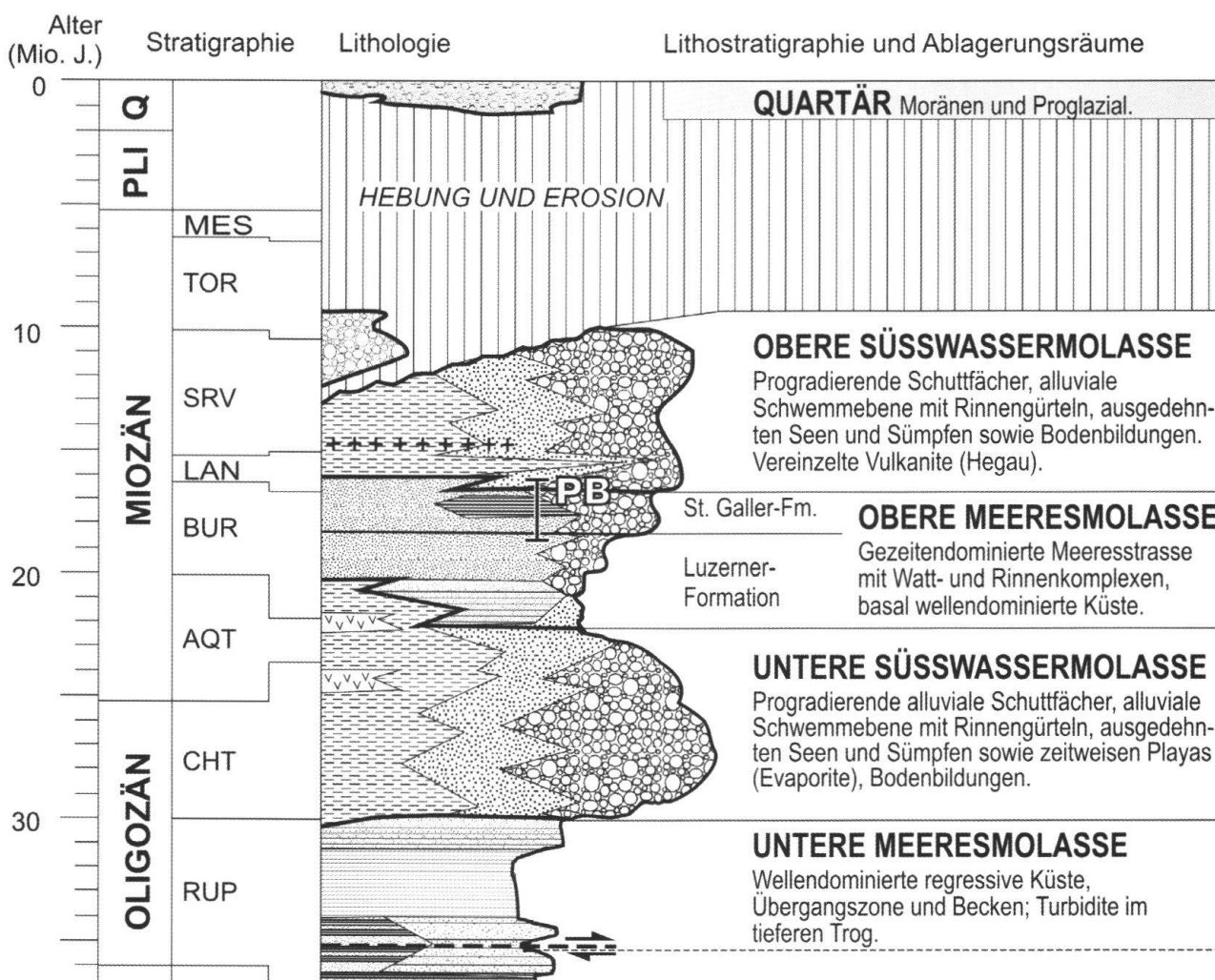


Fig. 2: Stratigraphisches Sammel-Profil durch das Schweizer Molasse-Becken mit der von der Pilotbohrung (PB) durchörterten Abfolge (verändert aus Keller 2000).

nen der Regression im Dach der Luzerner-Formation, die als Ablagerungen der einstigen Küstenebene und von Schlickwatten interpretierbar sind. Im Verlaufe der Transgression sind die Schlammsteine im Dach der Luzerner-Formation von lithophagen Muscheln angebohrt worden.

Der basale Teil der St. Galler-Formation (159.45-148.15 m) besteht aus sehr harten, laminierten Feinsandsteinen mit dünnen Zwischenschichten aus Kletterrippeln und vereinzelt Wulstschichtungen. Diese Einheit ist als wellendominiert-gemischtenenergetische Strandablagerungen (Architektur-Element STE) zu interpretieren.

Zwischen 148.15 und 72.75 m steht über einer 0.5 m mächtigen Konglomeratbank aus bis zu 20 cm grossen Schlammstein-Intraklasten eine Wechschichtung aus fein bis mittelkörnigen, zuweilen flaserführenden, harten Sandsteinen mit Klein- und Grossrippelschichtung einerseits sowie heterolithi-

schen Zwischenschichten (wellige Wechschichtung, Linsen- und Flaserschichten) andererseits an. Vor allem im unteren Teil dieser Einheit (unterhalb von 128 m) sind mehrere Fining-Upwards-Sequenzen mit mächtigeren heterolithischen Abfolgen erkennbar. Im oberen Teil dagegen dominieren die Sandsteinabfolgen. Die Fazies dieser Einheit ist als Ablagerungen von grossen Gezeitenrinnen (Architektur-Element GR) sowie von Misch- und Sandwatten (Architektur-Elemente SWP, MW) zu interpretieren.

Der obere Teile der Bohrung (72.75-6.15 m) wird durch dunkelgraue, Silt- und Schlammsteinreiche heterolithische Abfolgen mit vielfältigen Kleinrippelschichtungen aufgebaut, mit mächtigeren Zwischenschichten aus stark bioturbierten, homogeneren siltigen Sandsteinen. In dieser Abfolge finden sich immer wieder fossilreiche Bänke. Diese Fazies der oberen Einheit kann als Ablagerungen der tieferen Delta-Bucht, respektive

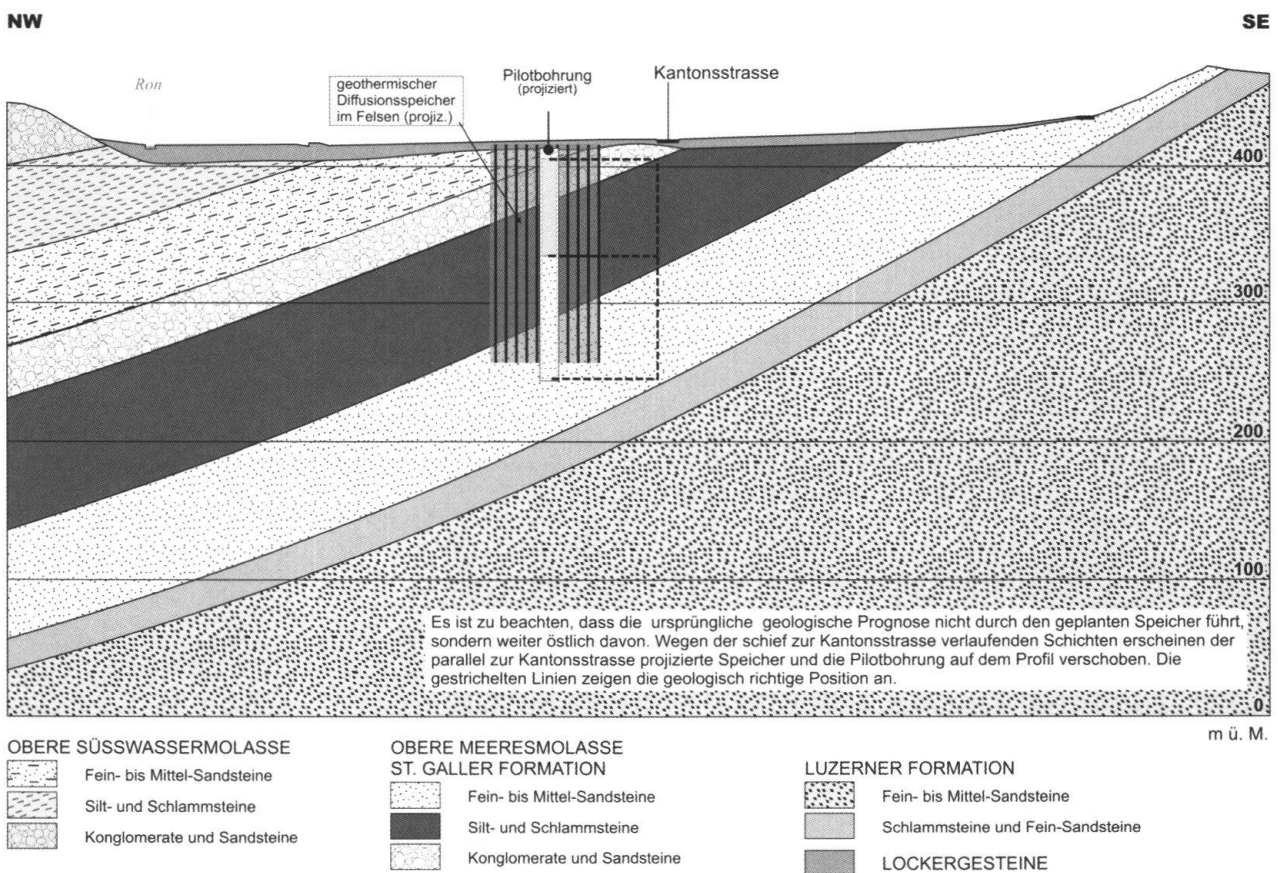


Fig. 3: Geologisches Prognoseprofil mit der Lage des geothermischen Diffusionsspeichers und Vergleich mit der in das Profil projizierten Pilotbohrung.

der Beckenfazies (Architektur-Element BE) interpretiert werden.

Das Dach der Abfolge (6.15-3.20 m) wird durch eine mächtige Bank aus sehr hartem Kristallin-Konglomerat (Nagelfluh) gebildet. Diese liegt den Schlammsteinen im Liegenden erosiv-diskordant auf. Diese Konglomerate sind als Ablagerungen der einstigen vorrückenden Delta-Front einer verwilderten Flussebene (braidplain delta) zu interpretieren und werden der Oberen Süswassermolasse zugeordnet.

Zusammenfassend spiegelt die Abfolge die Meerestransgression der St. Galler-Formation wider, nach der sich sub- bis intertidale Misch- und Sandwatten mit grossen Gezeitenrinnen etablierten. Ein weiterer Meeresspiegelanstieg liess diese Watten untertauchen, und es entstand eine subtidale Meeresbucht mit schwachen Gezeitenströ-

mungen, in der sich eine relativ artenreiche Meeresfauna ansiedelte. Abgeschlossen wird die Abfolge durch die regressiven Konglomerate der vorrückenden Delta-Front.

5.2 Trennflächengefüge

Das Schichtfallen wurde einerseits in der östlichen Baugrube (Z1) direkt im Aufschluss mit 323/20 ermittelt. Aus den optischen Bohrloch-Scans wurden an Hand von abgewickelten Schichtausbissen 29 Schichtfallen ermittelt. Der Mittelwert von 323.3/22.6 stimmt gut mit der Messung im Feld überein.

Am nicht orientierten Kern der Pilotbohrung wurden überwiegend mit Kalzit verheilte tektonische Klüfte festgestellt, meist mit Rutschharnischen. Offene Klüfte waren erst in den Bohrloch-Scans erkennbar. Diese sind

<i>Symbol</i>	<i>Element / Fazies</i>	<i>Lithofazies-Kodes</i>	<i>Lithologie</i>	<i>Sedimentologie</i>
SF	Schwemmfächer	wDS, wPS	vfS, fS, beige-grau, siltig	wellige rauhe und ebene Parallellamination, Strömungs-, tw. Wellenrippeln, tw. Schlicklagen, Kolke, Konvolutschichtung, Vogelfährten, Runzel- und Hufeisenmarken, Rhizolithe
STE	Strandebene	wSS, wwBS, wW, wNS, wES, wSR, wRR	fS-mS, tw. vfS und crS, grün-grau, grau, tw. Schlicklagen	Parallel- und Transcurrentlamination, Strömungs- und Wellenrippeln, planare und trogförmige Schrägschichtung, Strömungsriefen und -wülste, tw. Flaserschichtung
BE	Becken (sublitorale Buchten)	wNS, SWS, SWS-B, SWS-wST, SSTR	Silt, Ton, vfS, tw. fS, (Diamiktite) dunkelgrau, blaugrau	heterolithische Wechselschichtungen, Strömungs- und Wellenrippeln, tw. Schlicklagen, tw. laminiert, hfg. bioturbiert
SW	Schlickwatt	tSWS-OE, SWS, tMIS-SWS	Silt, Ton, vfs, tw. fs, dunkelgrau bis beige-grau	heterolithische Wechselschichtungen, Strömungs- und Wellenrippeln, häufig Schlicklagen, tw. laminiert, tw. bioturbiert, Vogelfährten
MW	Mischwatt	tMIS, tMIS-SWS	Silt, vfS, fS, Ton, grau und dunkelgrau, grün-grau	heterolithische Wechselschichtungen, Strömungs- und Wellenrippeln, Schlicklagen, Flaser- und Linsenschichtung, tw. Parallel- und Transcurrentlamination, bioturbiert
SWP	Sandwatt Platen	tSTS-TS, twSS, tSTS-FSW, wtSTS, wwBS, wtSS, tES-B	fS-mS, tw. vfS od. mS, Silt, grau bis grün-grau	planare und trogförmige Schrägschichtung, Strömungs- und Wellenrippeln, Flaser- und Linsenschichtung, Laminationen, double-muddrapes
GR	Grossrinnen	tSTS-SW, tSTS-TS, tMIS-SWS, tMIS-STG	fS-mS, tw. crS, Gerölle tSTS-RR grau-grün bis grau	planare und trogförmige Schrägschichtung, Strömungs- und Wellenrippeln, Flaser- und Linsenschichtung, doublemuddrapes, Schille, Riesenrippeln
GD	Gezeiten-deltas	tSTS-RR, tSTS-TS, wtSTS	mS-crS, tw. fs, Gerölle grau-grün bis grau	Riesen-Schrägschichtung, Vorschüttung, trogförmige Schrägschichtung, Schille
RR	Riesenrippeln (Muschelsandsteine)	tSTS-RR, tSTS-RS	mS-crS, tw. fS, Gerölle, grau bis grün-grau	Riesen-Schrägschichtung, Vorschüttung, Schille

Tab 1: Die Architektur-Elemente und Lithofazies-Kodes der Oberen Meeresmolasse (Details zu den Kodes vgl. Keller 1989).

zonal verteilt mit Kluffabständen von zwischen 5 bis 20 cm in kluffreichen Zonen. Die offenen Klüfte verlaufen mehr oder weniger schichtparallel, sind bis 0.5-1 mm geöffnet und haben anscheinend keine Klufffüllung. Besonders intensiv geklüftet war der Bereich ab OK Fels bis 24 m. Bei 78.65, 79.4 und 82.1 m waren drei weitere offene Klüfte erkennbar (Fig. 5); letztere präsentierte sich

als bis 10 mm geöffnet. Diese Klüfte können als Entlastungsklüfte interpretiert werden, die sich nach dem Abschmelzen der eiszeitlichen Gletscher durch pseudoplastisch / elastische Deformation in Folge der Entlastung der unter der bis 1'000 m mächtigen Eisbedeckung erodierten, stark überkonsolidierten Gesteine ausbildeten.

Verwitterungserscheinungen des Felsverbandes

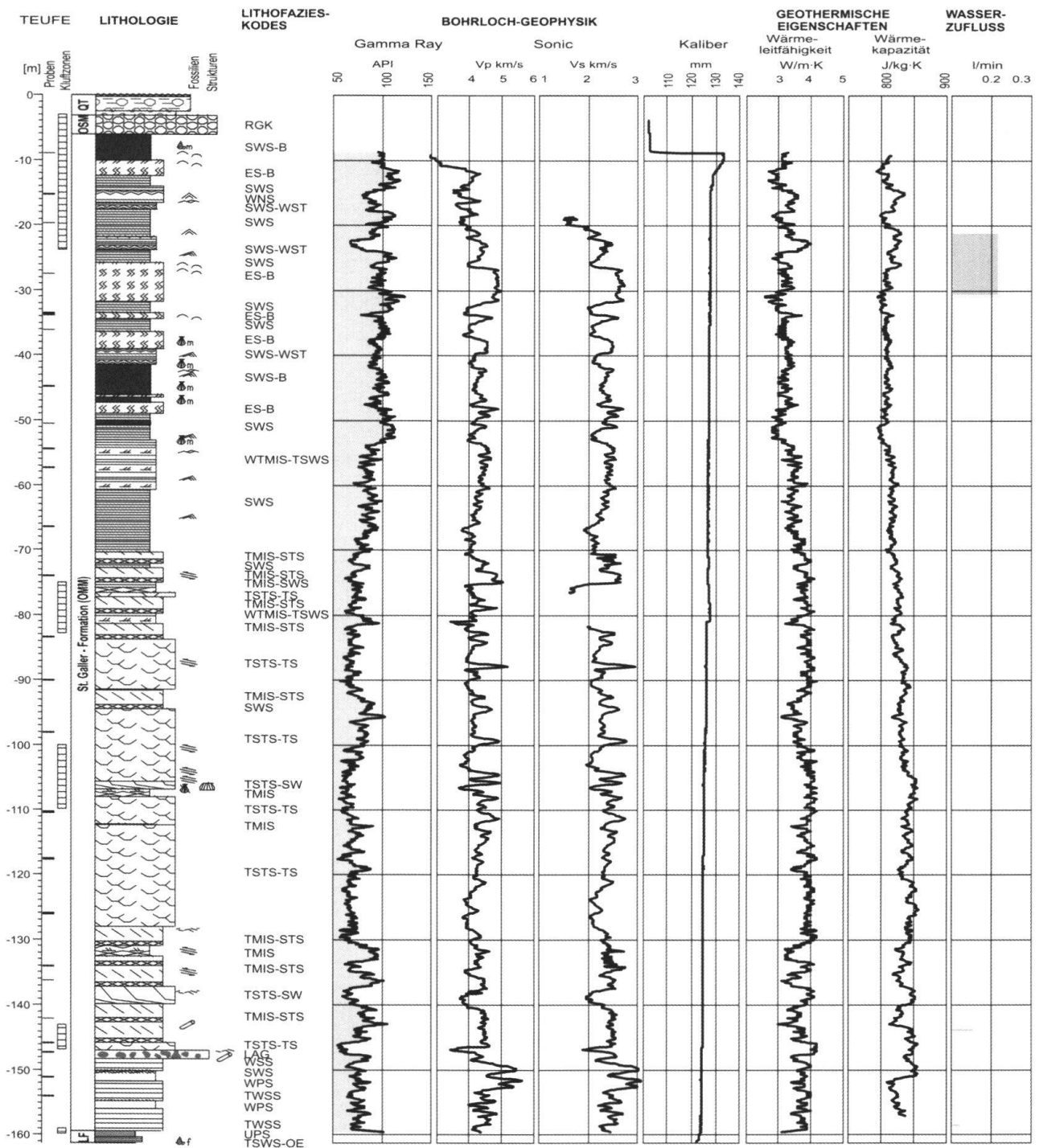


Fig. 4: Übersicht der Resultate der Bohrloch-Logs (Solexperts et al. 1999) mit den Lithofazies-Kodes der durchbohrten St. Galler-Formation.

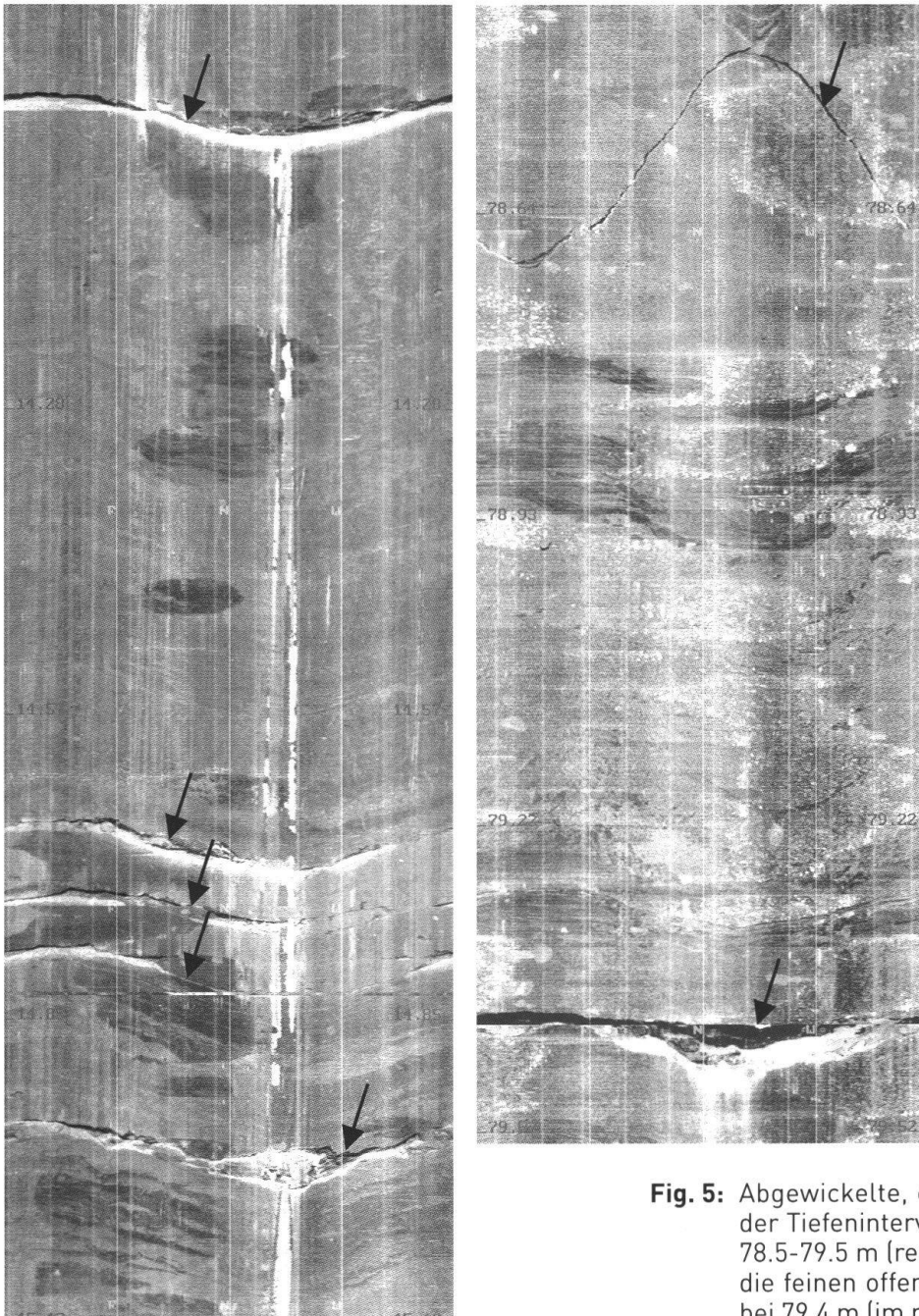


Fig. 5: Abgewickelte, orientierte Bohrloch-Scans der Tiefenintervalle 14.0-15.1 m (links) und 78.5-79.5 m (rechts). Deutlich sichtbar sind die feinen offenen Klüfte (Pfeile). Die Kluft bei 79.4 m (im rechten Ausschnitt unten) ist scheinbar mehrere Millimeter geöffnet.

des konnten einerseits in der Konglomeratbank an der Basis der Oberen Süßwassermolasse beobachtet werden, deren oberster Teil (bis 4.6 m) stark verwittert und entfestigt war. In den Silt- und Schlammsteinen waren zwischen 6.2 und 10.0 m zonenweise Verwitterungsphänomene (ockerbraune Verfärbung durch Oxydation, Entfestigung und Verlehmung) zu beobachten. Die durch erhöhte sekundäre Porositäten, Verlehmungserscheinungen von Tonmineralien und intensivere Klüftung gekennzeichnete Verwitterungszone

des Felsens reicht in der Pilotbohrung bis etwa 10 m unter Terrain und umfasst die obersten 7 m des Felsens.

6. Petrophysikalische Eigenschaften des Felsens

6.1 Porosität und Permeabilität

Die Korndichte variiert bei einem geometrischen Mittel von 2'770 kg/m³ zwischen 2'730

und $2'810 \text{ kg/m}^3$. Diese Werte sind um ca. 4% höher als beispielsweise in der distalen Unteren Süsswassermolasse (Keller et al. 1990). Die Gesamtporosität beträgt im geometrischen Mittel 6.3%, bei einem Minimum von 3.1% und einem Maximum von 11.9%. Die gemessenen Gesamtporositäten sind deutlich geringer als diejenigen der distalen Unteren Süsswassermolasse (Keller 1992), wo für Sandsteine Medianwerte von 14.5% bis 20.0%, für Silt- und Schlammsteine solche von 7.5% ermittelt wurden. Bei der Nutzporosität wurden erwartungsgemäss etwas geringere Volumenanteile gemessen als bei der Gesamtporosität, da nicht alle Poren miteinander kommunizieren. Bei einem geometrischen Mittel von 5.8% variieren die Werte zwischen 3.0% und 11.8%. Naturgemäss haben die Sandsteine der Sandwatten (Architektur-Element SWP: tMIS-STs, tMIS-Ts) mit geometrischen Mittelwerten von 6.4% bis 7.0% höhere Nutzporositäten als die Silt- und Schlammsteine der Deltabucht (Architektur-Element BE: SWS, tMIS-SWS) mit geometrischen Mittelwerten von 4.2% bis 5.7% (Fig. 6). Die geringsten Nutzporositäten wiesen die kompakten wellendominierten Strandsandsteine der basalen Einheit (Architektur-Element STE: twSS, wSS, wPS) mit einem geometrischen Mittel von 3.6% auf. In Folge von Rissen in den Proben ergaben einige Messungen fälschlicherweise grössere Nutz- als Gesamtporositäten. Die Permeabilitäten waren generell sehr gering, und die Hälfte der messbaren Proben wiesen Werte von $< 0.5 \text{ md}$ (Durchlässigkeitsbeiwerte $k < 4.2 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$) auf. Bei den übrigen messbaren Proben ergaben sich Werte von zwischen 1 und 6 md (Durchlässigkeitsbeiwerte $k = 8.5 \cdot 10^{-9}$ bis $5.1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$). Diese Laborwerte stimmen sehr gut mit den Resultaten der hydraulischen Versuche (Kap. 8) überein. Auch bei den Durchlässigkeiten resultierten deutlich geringere Werte als in der distalen Unteren Süsswassermolasse (Keller 1992), wo in Sandsteinen Werte zwischen 100 md und 1200 md weit verbreitet sind (geometrische Mittel Sandsteine RG: $k = 4.2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$, Sandsteine DFR: $k = 4.9 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$).

6.2 Wärmeleitfähigkeit und -kapazität des Felsens

Die Wärmeleitfähigkeiten betragen bei einem geometrischen Mittelwert von $3.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ zwischen 2.6 und $4.7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Ebenso sind zwischen den verschiedenen Lithofazies Unterschiede festzustellen (Fig. 6): So haben die poröseren Fein- bis Mittelsandsteine (Li-

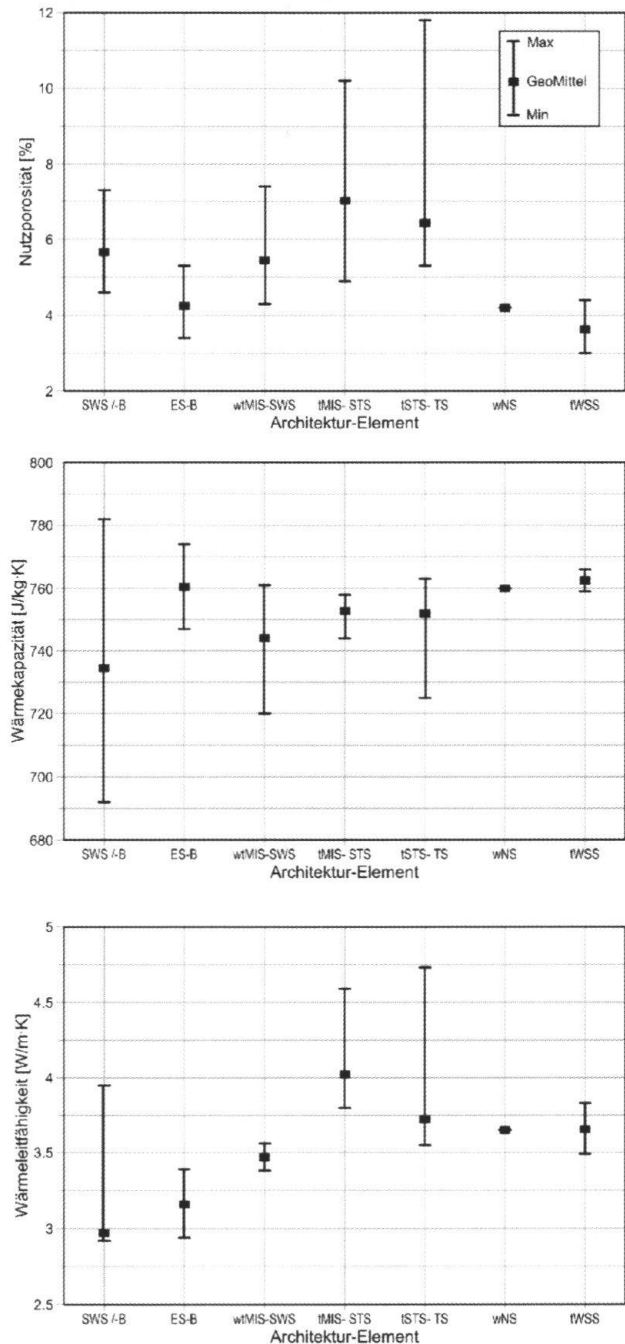


Fig. 6: Vergleich der im Labor ermittelten Wärmekapazitäten, der Wärmeleitfähigkeiten und der Nutzporositäten für verschiedene Architektur-Elemente.

thofazies-Kodes tMIS-STS und tSTS-TS) deutlich höhere Wärmeleitfähigkeiten als die feinkörnigeren Silt- und Schlammsteine (SWS, ES-B). Mit der Tiefe ist zwar eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit zu beobachten (Schärli & Rybach 1999), diese rührt aber vom Umstand her, dass gegen die Tiefe hin die Fein- und Mittelsandsteine mit ihren höheren Wärmeleitfähigkeiten dominieren (Kap 5.1). Im Vergleich mit dem übrigen Mittelland - wo Werte zwischen 2.3 bis 3.0 W/m·K vorherrschen (Leu et al. 1999a) - sind die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten überdurchschnittlich hoch. Die gemessenen Wärmekapazitäten liegen zwischen 690 und 780 J/kg·K, bei einem geometrischen Mittelwert von 746 J/kg·K (2.1 MJ/m³·K). Die feinkörnigeren Lithofazies (SWS) besitzen mit geometrischen Mittelwerten von 734 J/kg·K tendenziell deutlich geringere Wärmekapazität als die dichten, wenig porösen Sandsteine (tWSS, ES-B, wNS) mit geometrischen Mittelwerten um 760 J/kg·K (Fig. 6). Im Vergleich mit dem übrigen Molasse-Becken (Leu et al. 1999a: 1075-1380 J/kg·K) sind diese Werte relativ tief, was durch die hohe Kompaktion und die geringe Porosität am Beckensüdrand (Keller 1992) erklärbar ist.

7. Durch die geophysikalischen Logs bestimmte petrophysikalische Eigenschaften des Felsens

7.1 Ausbreitungsgeschwindigkeiten elastischer Wellen

Mit dem Akustiklog (Solexperts et al. 1999) wurden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der elastischen Wellen (v_p Kompressions- oder Longitudinalwellengeschwindigkeiten und v_s Scher- oder Transversalwellengeschwindigkeiten) der Gesteine im Bohrloch bestimmt (Fig. 4). Daraus lassen sich einerseits die Nutzporositäten, andererseits geotechnische Felskennwerte (Poissonzahl, Schermodulus und Young's Modulus) bestimmen, die bedeutsam sind für die

Gesteinsfestigkeit und damit die Bohrbarkeit und Standfestigkeit der Sondenbohrlöcher. Wichtig sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten auch für die Beurteilung von Erdbebenrisiken. Die Kompressionswellengeschwindigkeiten v_p betragen im Mittel zwischen 4'000 und 4'500 m/s, wobei die Silt- und Schlammsteine den unteren, die Sandsteine den oberen Geschwindigkeitsbereich abdecken. Erhöhte Kompressionswellengeschwindigkeiten von bis zu 5'000 m/s erreichten die hart zementierten Sandsteine im basalen Bereich (Architektur-Element STE, 159.45-148.15 m). Auch die Scherwellengeschwindigkeiten v_s sind ebenfalls entsprechend hoch und betragen im Mittel zwischen 2'000 und 2'500 m/s, wobei in Silt- und Schlammsteinen tiefere Laufzeiten von 1'500-2'000 m/s, in den hart zementierten Sandsteinen im basalen Bereich bis 2'700 m/s zu beobachten waren.

Im Vergleich mit dem übrigen Molasse-Becken sind dies generell hohe Laufzeitgeschwindigkeiten, die als Folge der hohen diagenetischen Reife mit guter Zementation, hoher Kompaktion und geringer Porosität in der monoklinalen Falte am Südrand des Beckens (Fig. 1) erklärbar sind (Büchi & Bodmer 1983, Keller 1992).

7.2 Nutzporositäten

Ausgehend vom Akustiklog (Sonic Log) und im Vergleich mit den Labormessungen (Kap. 6) berechnete Geoform AG (1999) die für die Gesteinsdurchlässigkeit ausschlaggebenden Nutzporositäten über das gesamte Profil. Die Auswertungen aus dem Akustiklog ergeben mit 6% bis 9% insgesamt etwas höhere Nutzporositäten als aus den Labormessungen (3.0% bis 11.8%, Kap. 6). Bezüglich der Architektur-Elemente, resp. der Lithologien resultieren jedoch vergleichbare Ergebnisse. In der Gesamtabfolge unterscheiden sich die von geringen Nutzporositäten gekennzeichneten Silt- und Schlammsteine der Beckenfazies (Architektur-Element BE, bis ca. 72.75 m Teufe) deutlich von den Sandsteinen der

grossen Gezeitenrinnen (Architektur-Element GR) sowie von Misch- und Sandwatten (Architektur-Elemente SWP, MW) im unteren Teil (148.15-72.75 m) der Bohrung mit ihren höheren Nutzporositäten.

7.3 Wärmeleitfähigkeit und -kapazität des Felsens

Die Wärmeleitfähigkeit wird durch die Sedimentpetrographie, die Porosität und damit durch den Wassergehalt sowie die Temperatur bestimmt. Durch empirisch ermittelte Beziehungen lässt sich die Wärmeleitfähigkeit aus verschiedenen geophysikalischen Bohrloch-Logs ermitteln. Die beste Korrelation liess sich zwischen dem Gamma Ray Log (Fig. 4) und der Wärmeleitfähigkeit durch die Beziehung $\lambda_{wg \text{ Log}} = (-0.0246 \cdot GR) + 5.5915$ herleiten (Geoform AG 1999). Es bedeuten: $\lambda_{wg \text{ Log}}$ Wärmeleitfähigkeit wassergesättigt [W/m·K], GR API Wert Gamma Ray Log. Die ermittelte mittlere Wärmeleitfähigkeit zeigt eine deutlich Abhängigkeit von der Lithologie: In Silt- und Schlammsteinen beträgt sie um 3 W/m·K, in Mittel- bis Grobsandsteinen erreicht sie 3.7-4.0 W/m·K. Für die Speicherdimensionierung bedeutsam ist die Variation der Wärmeleitfähigkeit mit der Tiefe. Entsprechend der Lithologien (Kap. 5.1) sind auch hier zwei deutlich unterschiedliche Abschnitte feststellbar (Fig. 7): Im Bereich OK Fels bis 53 m beträgt das geometrische Mittel der Wärmeleitfähigkeit 3.2 W/m·K, und zwischen 53 und 160 m werden 3.7 W/m·K erreicht. Das geometrische Mittel der Wärmeleitfähigkeit der Gesamtbohrung im Felsen beträgt 3.6 ± 0.2 W/m·K.

Die Interpretation der Messungen in den zwei Pilotsonden (Pahud 1999) erlaubte die Ermittlung einer mittleren Wärmeleitfähigkeit des Felsuntergrundes von 3.0-3.3 W/m·K, was etwas niedriger ist als die Laborwerte (Kap. 6.2) und die an Hand der Bohrlochgeophysik extrapolierten Werte.

Die Wärmekapazität wird wesentlich beeinflusst durch den Wassergehalt des Gesteins;

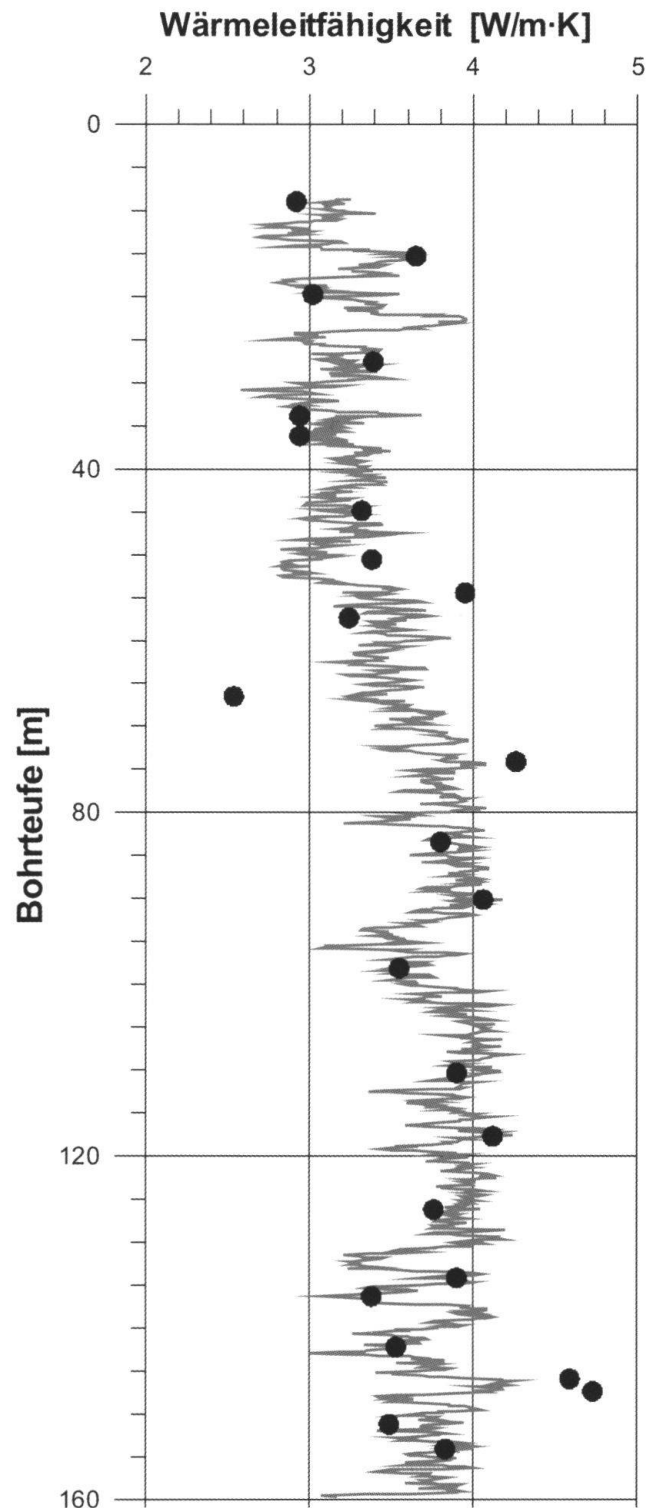


Fig. 7: Graph der aus den geophysikalischen Logs (Fig. 4) bestimmten Wärmeleitfähigkeiten in Relation zur Bohrtiefe und im Vergleich zu den Laborwerten (schwarze Punkte). Ausgehend von einem Mittelwert von 3.6 W/m·K sind zwei Abschnitte erkennbar: OK Fels bis 53 m mit einem geometrischen Mittel der Wärmeleitfähigkeit von 3.2 W/m·K und von 53-160 m mit einem solchen von 3.7 W/m·K.

die Sedimentpetrographie selbst spielt nur eine untergeordnete Rolle. Grundsätzlich ist eine gute empirische Beziehung zur Gesamtgesteinsdichte vorhanden (Leu et al. 1999a, b), für die im vorliegenden Fall aber das Dichtelog fehlt. Somit musste eine Korrelation mit der Neutron-Porosität gesucht werden. Die ermittelte Korrelationsgleichung lautet: $C_{wg \text{ Log}} = (2.946 \cdot N\phi) + 804.06$. Es bedeuten: $C_{wg \text{ Log}}$ Wärmekapazität wassergesättigt [J/kg·K] und $N\phi$ Neutronporosität korrigiert für Tonanteil [%]. Die aus den Logs berechnete Wärmekapazität (Fig. 8) ist abhängig von der Lithologie und nimmt mit der Tiefe in Folge der Zunahme der Sandsteine generell zu. Die Wärmekapazität variiert über einen engen Bereich von 790 bis 860 J/kg·K, bei einem geometrischen Mittelwert von 825 J/kg·K.

8. Hydrogeologie

Im Ausgangszustand lag der Grundwasserspiegel in der Bohrung 2.90 m unter OKT, d. h. auf 415.5 m ü. M.

Die Salinitätsmessungen im Bohrloch (Solexperts et al. 1999) ergaben eine relativ hohe Salinität in der Pilotbohrung von zwischen 300 und 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Zur genaueren Untersuchung wurde am 17.06.99 aus der Pilotbohrung und am 25.07.01 aus der Erdwärmesonde Nr. 1 je eine Probe entnommen und analysiert (Tab. 2). Im Vergleich mit den von Schmassmann (1990) beschriebenen Grundwässern aus dem Molasse-Becken kann gesagt werden, dass in der Erdwärmesonde Nr. 1 ein Natrium-Hydrogenkarbonat-Tiefengrundwasser gefördert wurde, das durch eiszeitliche Infiltration in marine Formationswässer der Oberen Meeresmolasse entstanden ist. Aus der Pilotbohrung dagegen liegt ein typisches Mischwasser zwischen oberflächennahem Grundwasser und Natrium-Hydrogenkarbonat-Tiefengrundwasser vor. Die Durchmischung erfolgte in der Verwitterungszone des Felsens durch Zufluss von oberflächennahem Grundwasser.

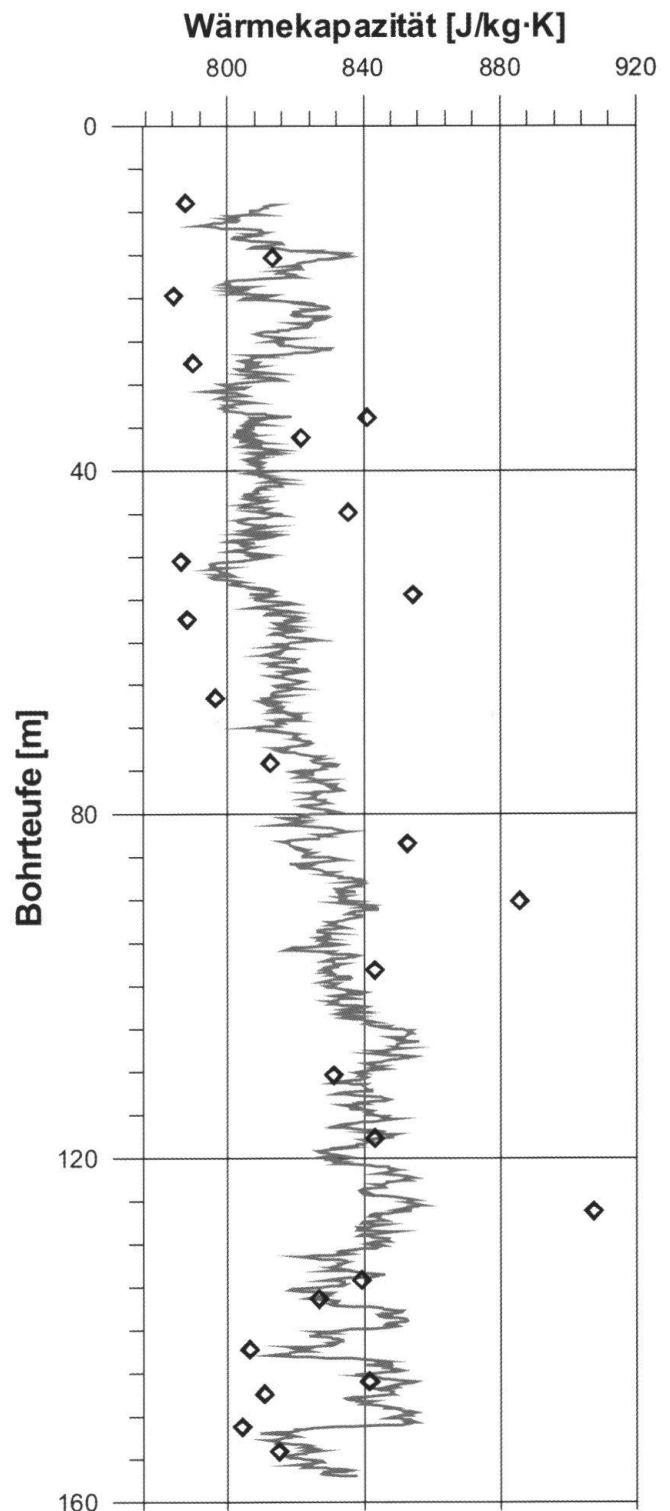


Fig. 8: Graph der aus den geophysikalischen Logs (Fig. 4) bestimmten Wärmekapazitäten in Relation zur Bohrtiefe und im Vergleich zu den Laborwerten (schwarze Symbole). Ausgehend von einem Mittelwert von 825 J/kg·K sind zwei Abschnitte erkennbar: OK Fels bis 53 m mit einem geometrischen Mittel der Wärmekapazität von 810 J/kg·K und von 53-160 m mit einer solchen von 830 J/kg·K (aus Geoform AG 1999).

Da das Wasser im Bohrloch bereits eine erhöhte Salinität aufwies, wurde ein Austausch mit sauberem Trinkwasser ab Hydrant vorgenommen und der Wiederanstieg der Salinität durch die Zuflüsse aus dem Felsen beobachtet (Solexperts et al. 1999). Der Frischwasseraustausch konnte aber nur bis eine Teufe von ca. 144 m vorgenommen werden. Für das wassererfüllte Profil liess sich bei einer Absenkung von 16.9 m (19.42 m unter Terrain) eine Transmissivität $T \approx 1.6 \cdot 10^{-7}$ bis $2.0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ abgeschätzt werden, bei angenommenen Speicherkoeffizienten von $1 \cdot 10^{-6}$ bis $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$. Diese Abschätzungen ergeben einen Gebirgs-Durchlässigkeitsbeiwert $k \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$. Diese Werte stehen in guter Übereinstimmung mit den Laborwerten (Kap. 6.1). Aus den Salinitätsmessungen (Solexperts et al. 1999) liessen sich folgende Zuflüsse ins Bohrloch feststellen (Fig. 4): Der Hauptzufluss erfolgte demnach in der oberflächennahen Kluftzone bis 30 m Teufe, die bereits durch die Kernaufnahme, die Bohrloch-Scans und das akustische Wellenbild eruiert wurde (Kap. 5.2). Ein weiterer Zufluss ist in der Kluftzone mit porösen Sandsteinen in 143-147 m Teufe feststellbar. Der unterste, geringste Zufluss entsprang dem basalen Bereich, im Übergang zu den verschieferten Silt- und Schlammsteinen.

Beim Bohren des Erdwärmesonden-Feldes für den Speicher (Kap. 11) trat Kluftwasser vorab unterhalb eines Tiefenbereichs von zwischen 55 und 75 m unter dem Terrain der Aushubsohle (415.2 m ü. M., ca. 3 m unter OKT der Pilotbohrung, entspricht in der Pilotbohrung 52-72 m), worauf sich im Bohrloch erst ein Grundwasserspiegel einstellte. Dieser Teufenbereich entspricht der unteren Kluftzone (Kap. 5.2), aus der bei den hydrodynamischen Messungen interessanterweise keine Zuflüsse festgestellt wurden. In den Sonden Nr. 21 und 41 führten Kluftwasserzutritte im Teufenbereich zwischen 135-140 m (entspricht in der Pilotbohrung 132-137 m) zu artesischen Wasseraustritten (bezüglich der abgesenkten Baugrubensohle 415.2 m ü. M.), die aber innert Tagen nachliessen.

9. Temperatur

Im wassergefüllten Bohrloch wurden am 13.07. und am 24.08.1999 Temperaturmessungen durchgeführt (Solexperts 1999), die praktisch identische Resultate lieferten. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Störungen des Temperaturfeldes durch die Bohrarbeiten - die eine Abkühlung um ca. 0.5°C zur Folge hatten - abgeklungen waren und das Temperaturfeld wieder im natürlichen Gleichgewicht war (Fig. 9). Der

	Erdwärmesonde Nr. 1 25.07.2001		Pilotbohrung 17.06.1999	
elektr. Leitfähigkeit vor Ort	560 $\mu\text{S/cm}$		- $\mu\text{S/cm}$	
Calcium	1.20 mg Ca/l	15 mmol/(eq)/m ³	430 mg Ca/l	5365 mmol/(eq)/m ³
Magnesium	0.50 mg Mg/l	10 mmol/(eq)/m ³	2.3 mg Mg/l	47 mmol/(eq)/m ³
Natrium	125 mg Na/l	5438 mmol/(eq)/m ³	60 mg Na/l	2610 mmol/(eq)/m ³
Kalium	0.90 mg K/l	23 mmol/(eq)/m ³	70 mg K/l	1790 mmol/(eq)/m ³
Chlorid	15.0 mg Cl/l	423 mmol/(eq)/m ³	3.5 mg Cl/l	99 mmol/(eq)/m ³
Sulfat	45 mg SO ₄ ²⁻ /l	234 mmol/(eq)/m ³	<0.05 mg SO ₄ ²⁻ /l	<0.25 mmol/(eq)/m ³

Tab. 2: Tabellarische Zusammenstellung der Analyseresultate der Formationswässer aus der Pilotbohrung und der Erdwärmesonde Nr. 1.

ermittelte lineare Temperaturgradient beträgt demnach zwischen 10 m und 160 m Teufe 23.3°K/km. Bedingt durch die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit in 53 m Teufe ist der Gradient darunter leicht erhöht (Solexperts et al. 1999).

Die Temperatur im Bohrloch nahm von 10°C in 10.0 m Teufe bis auf 14.53°C in 161.2 m Teufe zu. Vor den thermischen Reaktionstests (Response Tests) in Pilotsonden wurde durch Zirkulation der

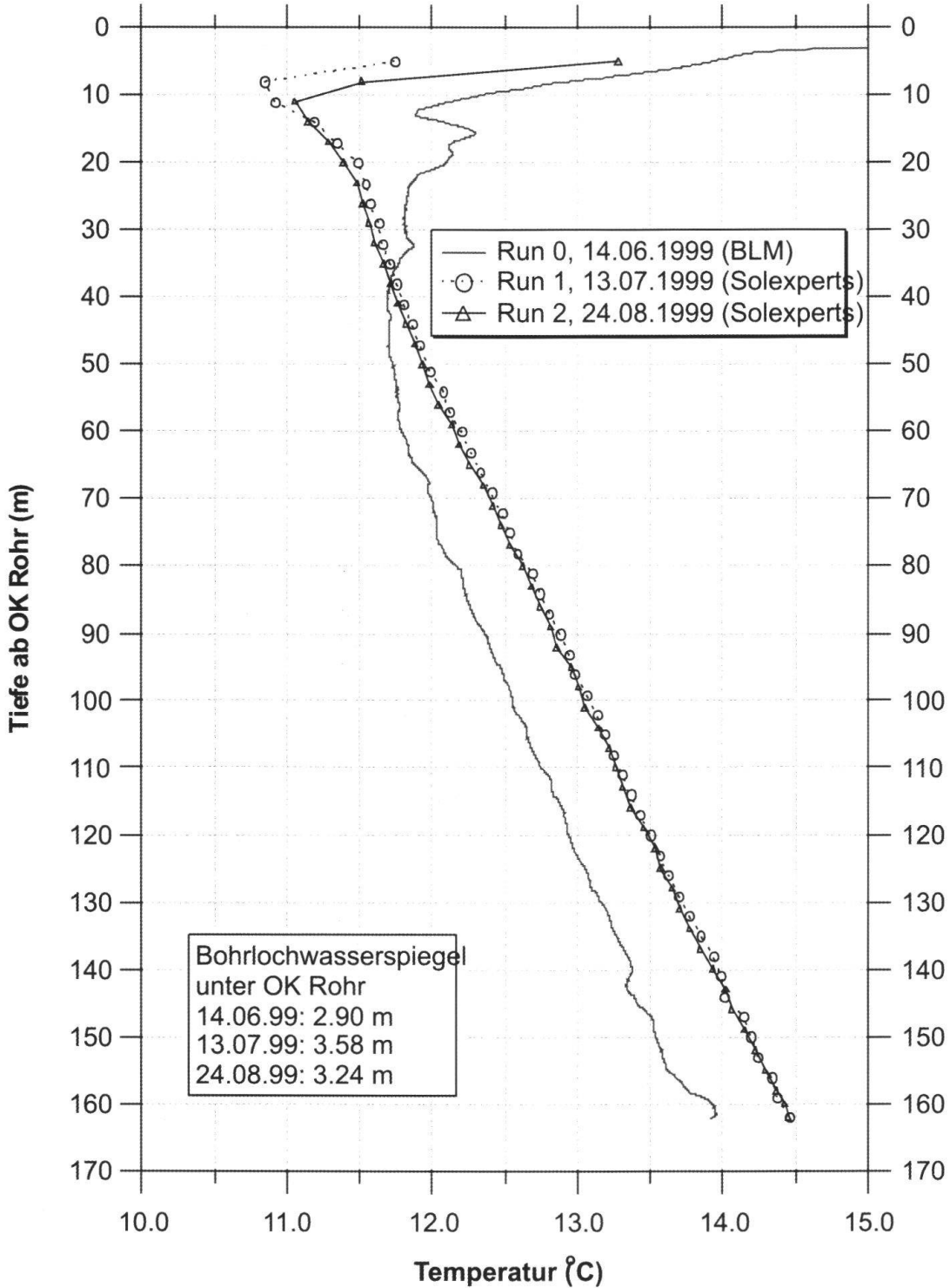


Fig.9: Graph der Temperaturmessungen in der Pilotbohrung (aus Solexperts et al. 1999). Run 0 zeigt den durch das Spülwasser gestörten, abgekühlten Zustand unmittelbar nach Abschluss der Bohrung. Die beiden anderen, fast deckungsgleichen Kurven (Rund 1 und 2) repräsentieren den ungestörten Zustand nach einer längeren Ruhephase. Der daraus ermittelte lineare geothermische Temperaturgradient beträgt zwischen 10 und 160 m Teufe 23.3°K/km.

noch unerwärmten Trägerflüssigkeit die mittlere Ausgangstemperatur des Felsens bestimmt. Diese betrug in der Sonde Nord 12.4°C (Pahud 1999).

10. Erdgas

Der geothermische Diffusionsspeicher und die Pilotbohrungen liegen in einem Gebiet mit kleiner Gasgefährdung der Stufe 2. Konkret liegt der Längenbold am Nordrand eines kohlereichen Permokarbon-Trogs in ca. 4.5 km Tiefe (Greber et al. 1994). Dieser bildet vermutlich ein grösseres Gasreservoir, das aber gegen oben gut abgedichtet ist. Somit sind nahe der Oberfläche (bis ca. 100 m Tiefe) auch kleine Gasvorkommen eher unwahrscheinlich.

Da der Speicher aber bis 160 m Tiefe reicht und die zwar geringen Risiken zu minimieren waren, wurden in der Spülung der Pilotbohrung kontinuierliche Gasmessungen vorgenommen. Der Messbereich umfasste 0-100% UEG (Untere Explosionsgrenze), was Methangas-Konzentrationen von 0-5% entspricht. Methangas-Konzentrationen von 0.03% bis 0.04% wurden lediglich in der Tiefe von 140-147 m und in 154 m festgestellt. Die geringen, kurzzeitigen Ausgasungen entstammen der bereits vorher beschriebenen Kluftzone (Kap. 5.2). Da im weiteren Bohrverlauf keine Anzeichen von Methangas mehr vorhanden waren, ist davon auszugehen, dass es sich dabei um einzelne Kluftgas-Einschlüsse handelte, die beim Anbohren entgasten.

11. Speicherdimensionierung

Die rechnerische Dimensionierung des geothermischen Diffusionsspeichers D4 konnte auf eine solide Datengrundlage abgestellt werden. Einerseits lieferte die Pilotbohrung nebst den geothermischen Gradienten und den Formationstemperaturen die notwendigen Angaben über die Wärmekapazität und -leitfähigkeit sowie die hydrogeologischen

und bohrtechnischen Eigenschaften des Felsens. Andererseits wurden mit dem thermischen Reaktionstest in den Pilotsonden Angaben über die mittleren Formationstemperaturen und Wärmeleitfähigkeiten des Speichergesteins sowie den thermischen Widerstand der Sonden beigebracht. Bei der Dimensionierung wurden drei verschiedene Systemkonzepte untersucht:

Das erste Konzept beruhte auf der Annahme einer Direktkühlung aus dem Speicher ohne Kältemaschine. Damit liess sich der sommerliche Kältebedarf aber nur teilweise durch den Speicher befriedigen. Die Wärmepumpe zur Wärmeentnahme aus dem Speicher im Winter wurde derart ausgelegt, dass keine längerfristige Abkühlung zu erwarten war. Im zweiten Konzept wurde der gesamte Kältebedarf durch Wärmerückführung aus einer Kältemaschine in den Speicher gedeckt. Die dazu notwendige Wärmepumpe erlaubte eine viel grössere Wärmegewinnung als im ersten Fall. Zur Deckung des Wärmebedarfs war aber immer noch eine zusätzliche Heizung notwendig. Dem dritten Konzept schliesslich wurde eine Wärmepumpe mit eineinhalbfacher Nennleistung der vorangehenden zu Grunde gelegt, wodurch der thermischen Regenerierung des Speichers im Sommer eine noch grössere Bedeutung zukam. Diese konnte gewährleistet werden durch die Abwärme der Kältemaschine und die in den Sonnenkollektoren gesammelte Wärme.

Diese drei Systemvarianten wurden mit dem Simulationsprogramm PILESIM (Pahud 1999b) beurteilt. PILESIM ist ein Werkzeug zur Simulation von Heiz- und Kühlsystemen mittels Energiepfählen oder Erdwärmesondenfeldern EWS. Die thermischen Leistungen der EWS werden als integraler Teil des Systems berechnet. Die Simulationen umfassen einen Zeitraum von 10 Jahren, um einen annähernd stationären Zustand des Speichers zu erreichen. Für alle drei Fälle erwiesen sich eine vergleichbare Anzahl von Sonden und ähnliche Sondenabstände als günstig. Auf Grund der Simulationen wurde für

eine erste Etappe - ursprünglich umfangreicher ausgelegt als die jetzt realisierte - ein Speicher aus 49 Sonden à 160 m Tiefe und Sondenabständen von 6.5 m empfohlen. Die aus dem Speicher schöpfende Wärmepumpe mit einer Nennleistung von 450 kW würde die Deckung von 90% des Wärmebedarfs erlauben. Daraus resultiert eine mögliche Wärmeleistung des Speichers im Winterhalbjahr von 910 MWh/a, die durch eine mögliche Wärmerückgabe im Sommerhalbjahr aus der Kühlung und dem Solardach von bis zu 1'270 MWh/a kompensiert werden könnte.

12. Erkenntnisse aus dem Bau des ersten Speichermoduls

Mit dem Bau des Speichers wurde die Broder AG (Sargans) beauftragt, welche die 49 Sonden und die Messsonde in der vorgegebenen Zeit vom Juli bis September 2001 realisierte (Fig. 10, 11). 16 der Bohrlöcher wurden durch Lotmessungen der Firma Solexperts AG (Schwerzenbach) überprüft. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Sonden am Fuss zwischen 8-17 m nach Südosten abweichen (Fig. 12). Eine stereographische Auswertung zeigt deutlich, dass es sich um systematische Ablenkungen in Richtung des Flächenpols der Schichtung (323/20, Pol 143/70) han-

delt. Diese erklären sich dadurch, dass ein Bohrkopf mit zunehmender Teufe der Tendenz folgen will, die Schichtung senkrecht zu durchbohren (Fig. 13). Auch wenn durch die Ablenkung keine Sonden überbohrt wurden, so öffnete sich durch den beim Bohren angelegten Druck von bis zu 23 bar ein vorhandenes Kluftsystem. Interpretierbar ist dieses Phänomen unter dem Einfluss der noch vorhandenen, erhöhten tektonischen Horizontalspannungen im Gebirge sowie der alpenrandnah grossen fossilen Überkonsolidation. Dieses in der Bohrlochverfälschung der Pilotbohrung noch als geschlossen beobachtete System führte zu Kommunikationen zwischen mehr oder weniger weit entfernten Sondenlöchern, was sich beim Ausblasen mitunter in spektakulären Wasserfontänen (Fig. 16) sowie in einem erhöhten Verbrauch an Injektionsgut manifestierte.

Die ursprünglich vorgesehene, schwierig einzubringende EWS-Hinterfüllung aus thermisch vorteilhaftem Quarzsand wurde durch das Produkt ThermoCem® (AZ BUT) ersetzt. Diese Suspension mit einer nachgewiesenen Wärmeleitfähigkeit von 2.0 W/m·K ist etwa gleich teuer wie Quarzsand und lässt sich ebenso einfach injizieren wie Bentonit.



Fig.10: Bohrarbeiten für das Erdwärmesondenfeld des Speichers.



Fig.11: Überblick der beiden Verteiler sowie der im Sandbett verlegten Sondenzuleitungen und -ableitungen (Zustand Mitte Oktober 2001).

Nr. 16 und 33: Pilotsonden
PB Pilotbohrung

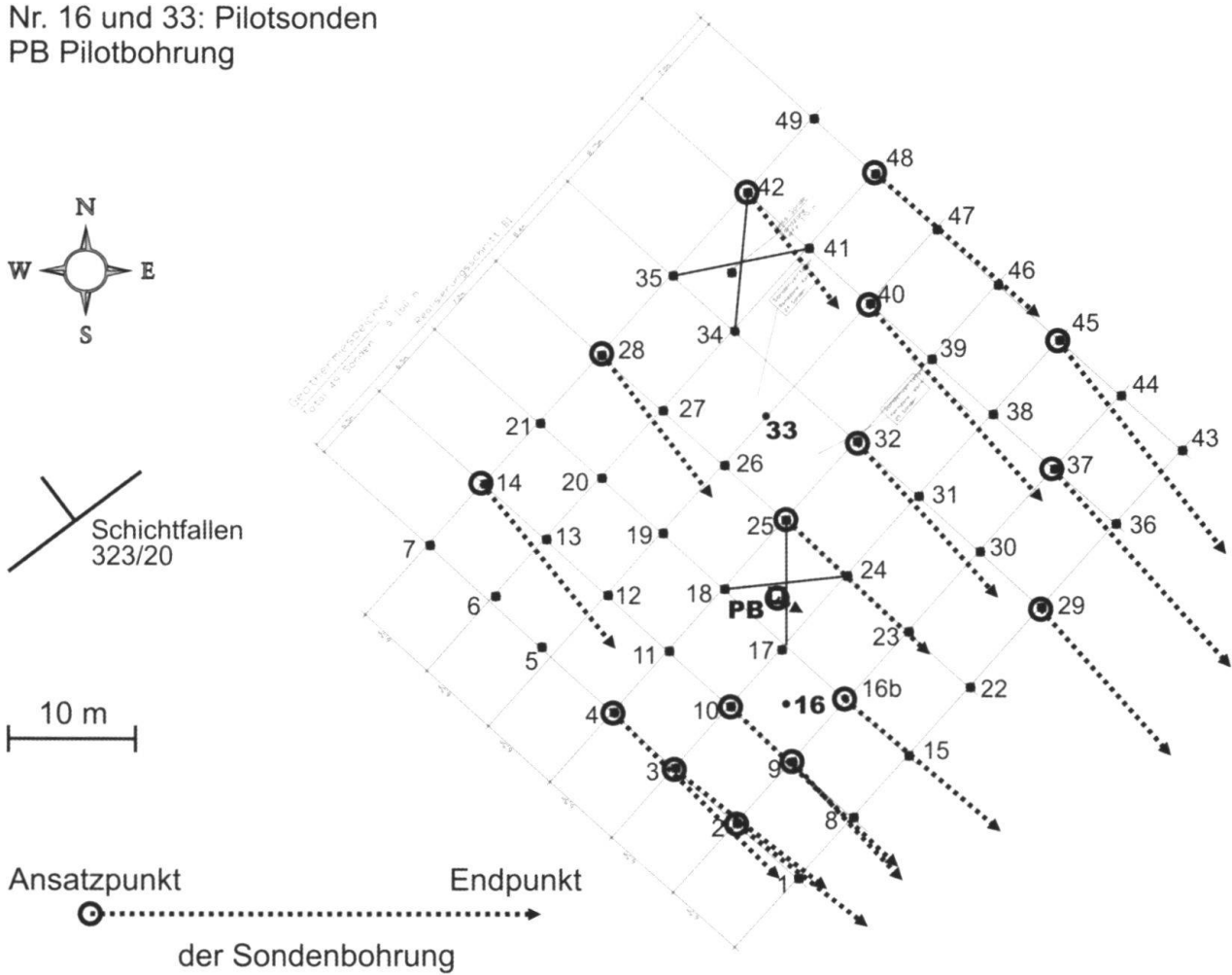


Fig.12: Graphische Darstellung der Ablenkungen der 160 m tiefen Sondenbohrungen.

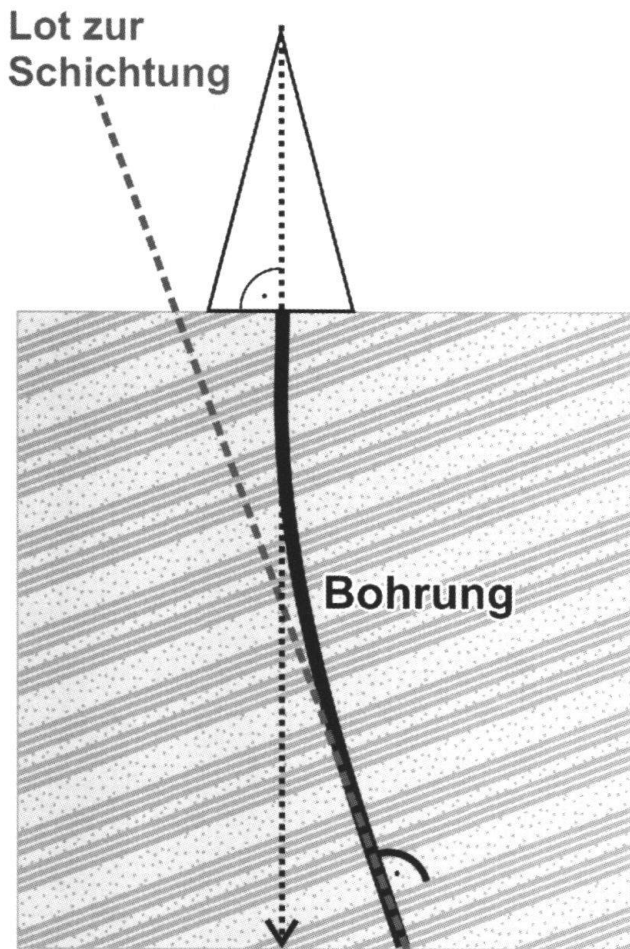


Fig.13: Prinzip der Ablenkung der Sondenbohrungen in Richtung der Lotrechten zur Schichtung.

Dank

In Anerkennung der zukunftsweisenden Bedeutung des Grossprojekts erfuhr die geplante Anlage vom Bundesamt für Energie (Projekt-Nr. 32525) als Abschlussprojekt von «Energie 2000» sowie vom Kanton Luzern (Aktionsprogramm «Energie und Umwelt») konzeptionelle und finanzielle Unterstützung. Besonderen Dank gebührt M. Furer (suva), J.-C. Hadorn, Prof. D. Pahud und Prof. L. Rybach für ihre stetige Förderung und Unterstützung des Projekts. Ebenso sei Dr. W. Albert, Dr. H.-R. Fisch, K.N. Lux, S. Fricke, H. Hess, Frau H. Haas, Dr. W. Leu, Prof. A. Matter, Dr. U. Schärli sowie U. Stump für ihre Beiträge gedankt.



Fig.14: Rund 30 m hoher «Blow Out» aus der Pilotbohrung beim Spülen des 12 m entfernten Sondenlochs Nr. 26.

Literatur

- Basetti, S., Rohner, E. & Wellstein, J. (2005): Ein geothermischer Energiespeicher für den Grand Hotel Dolder in Zürich. Bull. Geothermie 39, 10-11.
- Berchtold, P. (1997): D4 Unternehmens- und Innovationszentrum Root (Luzern): Konzept Energieversorgung. Unpubl. Gutachten im Auftrag suva Luzern.
- Büchi, U.P. & Bodmer, Ph. (1983): Der Tiefenverlauf der seismischen Geschwindigkeiten in den Molassesedimenten des schweizerischen Mittelandes. Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 49/116, 3-13.
- B+B Energietechnik, P. Berchtold, Mengis + Lorenz AG & Ernst Basler + Partner AG (1999): D4 Unternehmens- und Innovationszentrum Root (Luzern): Optimierte Energiekonzept PGHT, Stand 4.5.1999. Unpubl. Konzeptvorschlag im Auftrag suva Luzern.
- Geoform AG (1999): Logauswertung - Geothermische Eigenschaften. Pilotbohrung für geothermischen Diffusionsspeicher. Unpubl. Gutachten im Auftrag suva Luzern.
- Geologisches Institut Universität Bern (1999): Porositäts- und Permeabilitätsmessungen an Proben der Pilotbohrung D4, Unternehmenszentrum Längenbold, Root LU. Unpubl. Gutachten im Auftrag suva Luzern.
- Greber, E., Grünenfelder, T., Keller, B. & Wyss, R. (1994): Die Geothermie-Bohrung Weggis, Kanton Luzern. Bull. Schweiz. Ver. Petroleum-Geol. u. -Ing., 61/138, 17-43.
- Hadorn, J.-C. (1997): A review of seasonal storage in Switzerland. In: BFE: Programme de recherche et programme P+D. Stockage de chaleur. Rapport annuel 1997, 115-120 avec annexe].
- Hellström, G. (1989): Duct ground heat storage model. Manual for computer code. Dep. Math. Phys. Univ. Lund, Sweden.
- Keller, B. (1989): Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. Diss. pil.-natw. Fakultät Universität Bern, 304 p.
- Keller, B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Kenntnisstand und weiterführende Betrachtungen. Eclogae geol. Helv. 85/3, 611-651.
- Keller, B. (2000): Fazies der Molasse anhand eines Querschnitts durch das zentrale Schweizer Mittelland (Exkursion D am 27. April 2000). Jber. Mitt. oberrhein. Ver. N.F. 82, 55-92.
- Keller, B., Berchtold, P. & Pahud, D. (2001): Unternehmens- und Innovationszentrum D4 in Root (LU). Grösster saisonaler Diffusionsspeicher der Schweiz. Bull. Geothermie 31, 2-6.
- Keller, B., Bläsi, H.-R., Platt, N.H., Mozley, P.S. & Matter, A. (1990): Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse. Landeshydrologie und -geologie. Geol. Ber. 13, 100 p.
- Leu, W., Keller, B., Matter, A., Schärli, U. & Rybach, L. (1999a): Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich bis 500 m). Programm Geothermie, Schlussbericht i. A. Bundesamt f. Energie.
- Leu, W., Keller, B., Mégel, T., Schärli, U. & Rybach, L. (1999b): PC-Programm für die Berechnung geothermischer Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0-500 m). Programm Geothermie, Schlussbericht i. A. Bundesamt f. Energie.
- Mengis + Lorenz AG (1996a): Energiekonzept Phase I Vorstudien: Geothermische Energie. Variantenstudium geothermische Anlagen: Erdwärmesonden und Diffusionsspeicher. Unpubl. Gutachten im Auftrag suva Luzern.
- Mengis + Lorenz AG (1996b): Energiekonzept Phase I Vorstudien: Optimierung geothermischer Diffusionsspeicher. Unpubl. Gutachten im Auftrag suva Luzern.
- Mengis + Lorenz AG (2004): Pilotbohrung und Pilotsonden für den geothermischen Diffusionsspeicher. Zusammenfassender Untersuchungsbericht mit Erfahrungen aus dem Bau des ersten Speichermoduls. Unpubl. Gutachten im Auftrag suva Luzern, Bundesamt für Energie Bern und Kantonale Fachstelle für Energiefragen Luzern.
- Nagra (1988): Sedimentstudie - Zwischenbericht 1988. Nagra Tech. Ber. NTB 88-25. Nagra, Baden.
- Pahud, D. (1999): Étude pilote pour les bâtiments du centre suva Lucerne. Analyse des réponses de 2 sondes tests et optimisation du stockage diffusif. Rapport intermédiaire. Office fédéral de l'énergie, Suisse.
- Pahud, D. (1999b): PILESIM-LASEN : Simulation tool for heating/cooling systems with heat exchanger piles or borehole heat exchangers. Unpubl. user manual. Laboratory of energy systems, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Switzerland.
- Schärli, U. & Rybach, L. (1999): Wärmeleitfähigkeits- und Wärmekapazitäts-Messungen an Bohrkernen (OMM). Institut für Geophysik ETH Zürich, unpubl. interner Bericht Nr. 4321 im Auftrag suva Luzern.
- Schmassmann, H. (1990): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär und Malm-Aquifere. Nagra Tech. Ber. NTB 88-07. Nagra, Baden.
- Solexperts AG, Albert-Donié Geo-Consult-GmbH & BLM-GmbH (1999): Bericht zu den geophysikalischen Bohrlochmessungen und zu den Fluid-Logging-Messungen in der Bohrung D4 Längenbold, Root. Unpubl. Gutachten im Auftrag suva Luzern.