



Landeshydrologie und -geologie
Service hydrologique et géologique national
Servizio idrologico e geologico nazionale

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 16

Untere Süsswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf

**Charakterisierung mittels Geologie, Petrophysik
und Fluid Logging**

M. Ammann, P. Birkhäuser, H. R. Bläsi,
J.-M. Lavanchy, S. Löw, B. Meier, W. H. Müller



Landeshydrologie und -geologie
Service hydrologique et géologique national
Servizio idrologico e geologico nazionale

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 16

Untere Süsswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf

**Charakterisierung mittels Geologie, Petrophysik
und Fluid Logging**

M. Ammann¹⁾, P. Birkhäuser¹⁾, H. R. Bläsi²⁾,
J.-M. Lavanchy³⁾, S. Löw³⁾, B. Meier⁴⁾, W. H. Müller¹⁾

¹⁾ Nagra, Wettingen

²⁾ Geologisches Institut der Universität Bern

³⁾ Colenco Power Consulting AG, Baden

⁴⁾ proSeis, Baumackerstrasse 46, Zürich

Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol. **16** (1993)
(mit 12 Beilagen)

Herausgabe und Vertrieb:
Landeshydrologie und -geologie, CH-3003 Bern

© 1993 by Nagra, Wettingen (Switzerland)

VORWORT

Die Landeshydrologie und -geologie (LHG) ist daran interessiert, beim Aufbau eines Datensatzes über hydrogeologische Eigenschaften geringdurchlässiger Gesteine mitzuwirken sowie die damit zusammenhängenden Informationen zu sammeln und interessierten Kreisen zugänglich zu machen. Grosse Vorhaben wie Untertagebauten oder Bohrungen bieten dazu eine ideale Gelegenheit.

Im Rahmen des Projektes "Thermoprogramm Erdsonden", das unter Leitung der Direktion für Bau, Verkehr und Energie des Kantons Bern (BVED, vormals VEWD) durchgeführt wird, ist auf dem Areal der Ingenieurschule Burgdorf ein Versuchsfeld für Erdwärme-Sonden mit 13 Bohrungen erstellt worden. Da sich dabei eine einmalige Gelegenheit für hydrogeologische und geologische Studien in der Unteren Süsswassermolasse (USM) bot, konnte sich die LHG im Einverständnis mit der BVED und in Zusammenarbeit mit der Nagra an diesem Projekt mit zusätzlichen erdwissenschaftlichen Untersuchungen beteiligen. Die Ausführung der Studie erfolgte unter der Leitung der LHG, während die Nagra die Finanzierung sowie die Organisation der Untersuchungen und Auswertungen übernahm. Die LHG dankt allen Beteiligten für die gute Zusammenarbeit.

Für den Inhalt des Textes und der Illustrationen sind die Autoren allein verantwortlich.

Im Rahmen dieser Untersuchungen waren folgende Auftragnehmer beteiligt:

- BPB Instruments Ltd u.Co GmbH, Dortmund (geophysikalische Messungen)
- Broder AG, Sargans (Vertiefung einer Bohrung)
- Colenco Power Consulting AG, Baden (Auswertung Fluid-Logging)
- Geologisches Institut der Universität Bern (Kernaufnahmen, Laborarbeiten)
- Geotest AG, Zollikofen (Fluid-Logging)
- Nold, Keller & Partner, Geophysik AG, Schwerzenbach (Auswertung Petrophysik)
- Solexperts SA, Schwerzenbach (Unterstützungsmessungen für Fluid-Logging)
- Werner + Partner AG, Burgdorf (Koordination und örtliche Bauleitung)

PREFACE

Le Service hydrologique et géologique national (SHGN) accorde une attention particulière à la constitution d'une base de données de référence sur les conditions hydrogéologiques des roches à faible perméabilité; il contribue au relevé des informations correspondantes afin de les rendre accessibles aux intéressés. Les grands projets, comme les travaux souterrains ou les forages offrent une occasion idéale pour l'acquisition de telles données.

Dans le cadre du projet "Thermoprogramm Erdsonden", réalisé sous la conduite de la Direction des travaux publics, des transports et de l'énergie du Canton de Berne (DTTE), un champ d'essai de sondes géothermiques, comprenant 13 forages, a été réalisé dans le périmètre de l'école d'ingénieurs de Berthoud (Burgdorf). Il s'agissait là d'une occasion unique de procéder à une étude hydrogéologique et géologique de la Molasse d'eau douce inférieure (USM). Pour cette raison, le SHGN a sollicité l'accord de la DTTE de réaliser, dans les forages en question, et en collaboration avec la Cédra, des études supplémentaires à caractère scientifique. Les études ont été réalisées sous la conduite du SHGN; la Cédra pour sa part en a pris en charge le financement et s'est chargée de l'organisation du programme de recherches et de la mise en valeur des résultats. Le SHGN remercie tous les participants à ce projet de leur fructueuse collaboration.

Les auteurs sont seuls responsables du contenu du texte et des illustrations.

PREFAZIONE

Il Servizio idrologico e geologico nazionale (SIGN) è interessato a raccogliere dati sulle proprietà idrogeologiche delle rocce debolmente permeabili, a riunirli in modo adeguato e a metterli a disposizione di chi ne fa richiesta. I grandi progetti comprendenti lavori sotterranei o trivellazioni costituiscono occasioni ideali per tali raccolte di dati.

Nell'ambito del progetto "Thermoprogramm Erdsonden", realizzato dalla Direzione dei lavori pubblici, dei trasporti e dell'energia del Cantone Berna (BVED), è stato allestito, sull'areale della Scuola d'ingegneria di Burgdorf, un campo di prova per sonde geotermiche comprendente 13 trivellazioni. Trattandosi di un'occasione unica per procedere ad analisi idrologiche e geologiche della Molassa d'acqua dolce inferiore, il SIGN ha sollecitato l'accordo del BVED per poter effettuare, in collaborazione con la Cibra, studi supplementari di carattere scientifico nei sondaggi in questione. Detti studi si sono svolti sotto la direzione del SIGN, mentre la Cibra si è occupata del finanziamento e dell'organizzazione e valutazione delle analisi. Il Servizio idrologico e geologico nazionale è lieto di cogliere l'occasione per ringraziare della loro preziosa collaborazione tutti i partecipanti.

Per quanto attiene al contenuto del testo e alle illustrazioni, gli autori se ne assumono la piena responsabilità.

Landeshydrologie und -geologie
Der Direktor



Prof. Dr. Ch. Emmenegger

ZUSAMMENFASSUNG

Im Erdsondenfeld Burgdorf sind auf einer Fläche von 14 m auf 14 m 13 Bohrungen in die Untere Süsswassermolasse (USM) abgeteuft worden. Die USM besteht hier aus Sandsteinkörpern von 1 m bis gegen 20 m Mächtigkeit, die aus den faziellen Architektur-Elementen Rinnengürtel, Durchbruchsrinnen und Durchbruchsfächer zusammengesetzt sind und aus zwischengelagerten bis 15 m mächtigen geringdurchlässigen Einheiten aus Uferwall- und Schwemmebenen-Sedimenten.

An 5 Bohrungen wurden **Zusatzuntersuchungen** durchgeführt, über die in diesem NTB berichtet wird. Diese umfassten die Vertiefung der Bohrung M 1400 von 100 auf 250 m, die detaillierte Aufnahme der zwei Kernbohrungen M 1400 und M 2100 (Beschreibung der Lithofazies und Ausscheidung der faziellen Architektur-Elemente), eine Fluid-Logging-Kampagne in der Bohrung M 1400, petrophysikalische Messungen in den Bohrungen M 1400, M 2100, E 2100 und E 2200 und Labor-Untersuchungen an Proben der Kernbohrung M 1400. Das **Ziel** dieser Zusatzuntersuchungen war eine bessere geologische, petrophysikalische und hydrogeologische Charakterisierung der fünf angetroffenen faziellen Architektur-Elemente, sowie deren Erkennung aufgrund der petrophysikalischen Logs, wobei den Architektur-Elementen mit durchlässigen Sandsteinen besondere Bedeutung zukam.

Die **geologischen Zusatzuntersuchungen** umfassten einerseits die Bestimmung der Lithofazies und faziellen Architektur-Elemente an 2 Kernbohrungen. Andererseits wurden anhand zahlreicher Laborproben aus der Kernbohrung M 1400 (insbesondere Sandsteinproben aus Rinnengürteln, Durchbruchsrinnen und Durchbruchsfächern) mineralischer Aufbau und Kennwerte wie Gesteinsdichte, Korndichte, offene Porosität, Gesamtporosität und Permeabilität bestimmt. Die lithologisch untersuchten Fein- und Mittelsandsteine müssen gemäss dem Dreiecksdiagramm "Quarz-Feldspäte-Gesteinsbruchstücke" nach FOLK (1974) als Litharenite und feldspatreiche Litharenite bezeichnet werden. Die Sandsteine haben eine einfache Diagenesegeschichte mit Kompaktion und nachfolgender calcitischer Zementation sowie z. T. Lösung von Feldspäten und Gesteinsbruchstücken. Die Gesamtporositäten der Proben aus Architektur-Elementen, die vorwiegend aus Sandsteinen aufgebaut sind, zeigen Werte von 10 - 25 %, die offenen Porositäten von 4 - 21 % und die Permeabilitäten von 3 - 5660 md. Rinnengürtel- und Durchbruchsrinnen-Sandsteinkörper weisen eine Permeabilitäts-Verteilung mit Höchstwerten im Zentrum und Tiefstwerten oben und unten auf. Die durchlässigen Sandsteinabschnitte werden stets von mergeligen Schichten begrenzt, die nur geringe Porosität und keine messbare Permeabilität aufweisen.

Für die **hydrogeologische Charakterisierung der durchlässigen Bereiche der USM** wurden in der Bohrung M 1400 Fluid-Logging-Methoden (Leitfähigkeits-Logging und Packer-Flowmeter-Logging) eingesetzt. Beide eignen sich gut für die Untersuchung der durchlässigen Bereiche der USM. Bei der Methodenauswahl kann man als Grundregel folgende Entscheidungshilfe beziehen:

- Falls aus dem zu testenden Bohrlochintervall mit machbaren Pump- und Absenkraten (respektive Injektion) mehr als ca. 5 l/min gefördert (resp. injiziert) werden können ($5\text{E-}3 \text{ m}^2/\text{s} > T_{\text{tot}} > 1\text{E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$), ist die Packer-Flowmeter-Methode zu empfehlen.
- Falls geringer durchlässige Teststrecken ($5\text{E-}4 \text{ m}^2/\text{s} > T_{\text{tot}} > 1\text{E-}10 \text{ m}^2/\text{s}$) mit Pump-raten im Bereich von bis zu ca. 5 l/min getestet und die einzelnen Fliesswege lokalisiert und charakterisiert werden sollen, ist die etwas aufwendigere Leitfähigkeits-Methode zu empfehlen.

In der Bohrung M 1400 wurden Transmissivitäten von $2\text{E-}5$ bis $2\text{E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$ gemessen, was bezogen auf die Mächtigkeit der Sandstein-Architektur-Elemente K-Werte von $4\text{E-}6$ bis $4\text{E-}8 \text{ m/s}$ ergibt. 7 der 9 eruierten Zuflüsse lagen in Rinnengürteln, 2 weitere in Durchbruchsrinnen/Durchbruchsfächern. Zwei Rinnengürtel zeigten keine erkennbaren Zuflussstellen. Die zwischen den Zuflussstellen liegenden Architektur-Elemente (ton- und siltreiche Überflutungssedimente) wirken als effektive hydraulische Barrieren, die keinen Ausgleich erlauben zwischen den in der Bohrung M 1400 über kurze vertikale Distanz beobachteten relativ grossen Potentialunterschieden.

Die **petrophysikalische Messkampagne** umfasste die Vermessung von 4 Bohrlöchern (Kaliber, natürliche Gamma-Strahlung, Gamma-Gamma-Dichte und Neutron-Porosität). In 2 Bohrlöchern, die bereits verrohrt und mit Kies hinterfüllt waren, waren keine quantitativ auswertbaren Messungen möglich, die Logs "natürliche Gamma-Strahlung" konnten aber trotzdem für "Schichtkorrelationen" zu den anderen Bohrungen verwendet werden. In den zwei unverrohrten Bohrlöchern waren die Messbedingungen gut. Insbesondere in der "natürlichen Gamma-Strahlung" und in der "Gamma-Gamma-Dichte" sind die Sandstein-Einheiten abgrenzbar. Im Bereich von starken Bohrloch-Ausweitungen sind die Kaliberkorrekturen zur Berechnung der Dichte- und Porositätswerte allerdings unbefriedigend. Sandige Einheiten sind anhand der petrophysikalischen Messungen auch ohne geologische Aufnahme erkennbar. Die Rinnensandsteine zeichnen sich dank dem geringen Tongehalt durch tiefste Strahlungsintensitäten ab. Eine Spezialstudie anhand der petrophysikalischen Logs der Kernbohrung M 1400 zeigte, dass auch ohne Kenntnis der geologischen Kernausswertung schon mit dem vorhandenen minimalen petrophysikalischen Datensatz die USM detailliert charakterisiert, d. h. in Architektur-Elemente gegliedert werden kann.

Über die Schichtgeometrie im Untergrund des Erdsondenfeldes Burgdorf lassen sich die folgenden Aussagen machen. Aufgrund aller Daten aus insgesamt 5 Bohrungen kann abgeleitet werden, dass das Schichteinfallen vermutlich gegen ESE gerichtet ist, mit einem Fallwinkel von ca. 10° . Da die Logs "natürliche Gamma-Strahlung" der 4 vermessenen Bohrungen über grosse Tiefenbereiche fast deckungsgleich sind, scheint der geometrische Aufbau des Untergrundes recht einfach zu sein. Grössere Störungen lassen sich ausschliessen. Sowohl aufgrund der Bohrkernfotos, wo mit 60° einfallende Störungen (vermutlich Abschiebungen, Fallazimut unbekannt) festgestellt wurden, als auch aufgrund der Auswertung der Logs "natürliche Gamma-Strahlung" können aber einige Kleinstörungen nachgewiesen werden. Diese sind räumlich nicht orientierbar, weshalb auch eine genaue Aufschlüsselung des dreidimensionalen Aufbaus des Untergrundes des Erdsondenfeldes Burgdorf nicht möglich ist.

RESUME

Dans le champ de prospection géothermique de Burgdorf on a foré, sur une aire de 14 mètres sur 14, 13 sondages dans la molasse d'eau douce inférieure (MDI, USM en allemand). La MDI se compose ici d'éléments architecturaux gréseux tels que chenaux anastomosés (meander belts), sillons de capture (crevasse channels) et deltas de capture (crevasse splays), d'une épaisseur de 1 à 20 m environ, alternant avec des dépôts alluviaux fins et peu perméables tels qu'interfluves (natural levee) et épendages (flood plain) pouvant atteindre une épaisseur de 15 m.

Cinq des forages ont fait l'objet d'**investigations complémentaires** décrites dans ce rapport. Elles comprennent le prolongement du forage M 1400 de 100 à 250 mètres, le relevé détaillé des deux forages carottés M 1400 et M 2100 (description des faciès lithologiques et identification des éléments architecturaux), une campagne de diagraphie de fluide dans le forage M 1400, des mesures pétrophysiques dans les forages M 1400, M 2100, E 2100 et E 2200, ainsi que des analyses en laboratoire sur des échantillons du forage carotté M 1400. Ces investigations **visaient** une meilleure caractérisation géologique, pétrophysique et hydrogéologique des cinq éléments architecturaux observés, et leur identification sur la base des diagraphies pétrophysiques. Dans ce cadre, les éléments gréseux perméables revêtent une importance particulière.

Les **études géologiques complémentaires** comportaient d'une part l'analyse des faciès lithologiques et des éléments architecturaux sur deux forages carottés, d'autre part l'étude en laboratoire d'échantillons gréseux du forage carotté M 1400. Les analyses ont porté sur la composition minéralogique, la densité de la roche, la densité des grains, la porosité, la porosité totale et la perméabilité. Les grès fins et moyens sont caractérisés, d'après le diagramme triangulaire "quartz-feldspath-débris rocheux" de FOLK (1974), comme "litharénite" et "litharénite" riche en feldspath. Les grès ont subi une diagenèse simple avec compaction et cimentation calcitique ultérieure, ainsi qu'une dissolution partielle des feldspaths et débris rocheux. Les échantillons des éléments architecturaux, essentiellement composés de grès, ont une porosité totale de 10 à 25 %, une porosité ouverte de 4 à 21 % et une perméabilité de 3 à 5660 md. Les chenaux et deltas gréseux ont une perméabilité maximale au centre et une perméabilité minimale en haut et en bas. Les séries gréseuses sont toujours délimitées par des couches marneuses qui ne présentent qu'une faible porosité et pas de perméabilité mesurable.

La **caractérisation hydrogéologique des zones perméables de la MDI** a été effectuée dans le forage M 1400 au moyen de diagraphies du fluide (conductibilité électrique et débit entre obturateurs). Les deux diagraphies conviennent à l'étude des zones perméables de la MDI. Les éléments suivants aident généralement à choisir la méthode adéquate:

- Si l'intervalle à tester permet de pomper ou d'injecter plus de 5 l/min environ ($5E-3 \text{ m}^2/\text{s} > T_{\text{tot}} > 1E-7 \text{ m}^2/\text{s}$) avec un équipement et un rabattement réalisables, il est préférable de recourir à la méthode du diagramme de débit entre obturateurs.
- S'il s'agit de tester des intervalles faiblement perméables ($5E-4 \text{ m}^2/\text{s} > T_{\text{tot}} > 1E-10 \text{ m}^2/\text{s}$) avec des débits de pompage pouvant aller jusqu'à environ 5 l/min, ainsi que de localiser et de caractériser les points d'écoulement d'eau, on préférera alors la méthode un peu plus longue de la diagraphie de conductibilité électrique.

Dans le forage M 1400 on a mesuré des transmissivités de $2E-5$ à $2E-7 \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui, par rapport à l'épaisseur des éléments architecturaux du grès, donne des valeurs K de $4E-6$ à $4E-8 \text{ m/s}$. Sept des neuf apports d'eau se trouvaient dans les chenaux anastomosés, les deux autres dans les sillons et deltas. Deux chenaux anastomosés n'ont montré aucun apport d'eau identifiable. Les éléments fins se trouvant entre les zones d'apport d'eau sont des barrières hydrauliques effectives, empêchant la mise à l'équilibre des potentiels très différents observés sur une courte distance verticale dans le forage M 1400.

La **campagne de mesures pétrophysiques** a comporté, dans quatre forages, les diagraphies de calibre, de gamma naturel, de densité gamma-gamma et de porosité neutronique. Dans deux forages, qui étaient déjà tubés et garnis d'une couronne de graviers, il n'a pas été possible d'avoir des mesures quantitativement évaluables, mais on a pu néanmoins utiliser les diagraphies gamma naturel pour corrélérer la séquence des couches avec les autres forages. Les conditions de mesure étaient bonnes dans les deux forages non tubés. On a pu délimiter les unités de grès à partir du gamma naturel et de la densité gamma-gamma. Toutefois, dans la zone où la paroi du forage est fortement endommagée, les corrections de calibre pour calculer les valeurs de densité et de porosité sont insatisfaisantes. On peut donc identifier des unités sableuses avec des mesures pétrophysiques, même sans relevé géologique. Du fait de leur faible teneur en argile, les chenaux gréseux se caractérisent par un très faible rayonnement gamma. Une étude spéciale réalisée à partir des diagraphies pétrophysiques du forage M 1400 a montré qu'on peut même sans carottes caractériser de manière détaillée (subdiviser en éléments architecturaux) la MDI à l'aide des données pétrophysiques disponibles.

On peut tirer les conclusions suivantes à propos de la géométrie des couches du sous-sol sondé à Burgdorf. Sur la base de toutes les données provenant de cinq forages, on peut déduire que l'inclinaison des couches est orientée vraisemblablement ESE et qu'elle est de 10° environ. Etant donné que les diagraphies gamma naturel des quatre forages coïncident sur de grandes profondeurs, la structure géométrique du sous-sol semble être tout à fait simple. On peut exclure la présence de failles importantes. On a toutefois identifié des failles mineures sur les photos des carottes (pendage 60° , direction inconnue) et à partir des diagraphies gamma naturel. Leur orientation étant inconnue, il n'est pas possible de définir de manière précise la structure tridimensionnelle du sous-sol du champ de prospection géothermique de Burgdorf.

ABSTRACT

In the Burgdorf geothermal test field, 13 boreholes were drilled into the Lower Freshwater Molasse (USM) over an area 14 m by 14 m. The USM consists here of sandstone formations varying in thickness from 1 m to around 20 m. The architectural features of the sediment facies include meander belts, crevasse channels and crevasse splays, with intercalated low-permeability units of natural levee and flood plain sediments up to 15 m thick.

Supplementary investigations were performed in five of the boreholes and these form the subject-matter of this report. These included extending borehole M 1400 from a depth of 100 to 250 m, detailed logging of the cored boreholes M 1400 and M 2100 (description of lithofacies and identification of architectural elements), fluid logging in borehole M 1400, petrophysical measurements in boreholes M 1400, M 2100, E 2100 and E 2200 and, finally, a series of laboratory experiments on samples from borehole M 1400. The **aim** of these investigations was to improve the geological, petrophysical and hydrogeological characterisation of the five architectural elements encountered, as well as their identification using petrophysical logging techniques. Particular significance was attached to elements with permeable sandstones.

The **geological investigations** included determining the lithofacies and the architectural elements of the facies in two cored boreholes. Numerous samples from borehole M 1400 (particularly sandstone samples from meander belts, crevasse channels and crevasse splays) were used in laboratory tests to determine mineralogical composition and parameters such as rock density, grain density, open porosity, total porosity and permeability. The fine and medium sandstones were identified as litharenites and feldspar-rich litharenites according to the triangular diagram "quartz-feldspars-rock clasts" from FOLK (1974). The diagenesis of the sandstones is relatively straightforward, with compaction followed by calcitic cementation and partial dissolution of feldspars and rock clasts. The total porosities of samples from architectural elements composed mainly of sandstones vary between 10 to 25 %. The open porosities are between 4 and 21 % and the permeabilities between 3 and 5660 md. Meander belt and crevasse channel sandstones have a permeability distribution with maximum values in the centre and minimum values above and below. Permeable sandstone sections are always bounded by marly strata with a low porosity and no measurable permeability.

Fluid logging techniques (conductivity logging and packer-flowmeter logging) were used in borehole M 1400 to carry out a **hydrogeological characterisation of the permeable zones of the USM**. The following basic guidelines are of assistance when deciding on the method to be used:

- If, with feasible pumping and drawdown rates (or injection), more than approx. 5 l/min can be extracted (or injected) from the borehole interval being tested ($5\text{E-}3 \text{ m}^2/\text{s} > T_{\text{tot}} > 1\text{E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$), the packer-flowmeter method is recommended.
- If lower permeability sections ($5\text{E-}4 \text{ m}^2/\text{s} > T_{\text{tot}} > 1\text{E-}10 \text{ m}^2/\text{s}$) with pumping rates in the range up to 5 l/min are to be tested and the individual flow paths characterised, then the conductivity method is more appropriate.

Transmissivities of $2\text{E-}5$ to $2\text{E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$ were measured in borehole M 1400; taken in relation to the thickness of the sandstone elements, this gives K values of $4\text{E-}6$ to $4\text{E-}8 \text{ m/s}$. 7 of the 9 inflow points identified were located in meander belts, and the other two in crevasse channels/crevasse splays. Two meander belts had no identifiable inflow points. The architectural features located between the inflow points (clay- and silt-rich flood plain sediments) function as effective hydraulic barriers which prevent any balancing out of the relatively large differences in potential observed over short vertical distances in borehole M 1400.

The **petrophysical measurements** included a survey of four boreholes (caliper log, gamma log, density log and neutron porosity log). In two of the boreholes which were already cased and infilled with gravel, no quantitative measurements were possible but the gamma logs could be used for "layer correlations" with the other boreholes. Measuring conditions in the two uncased boreholes were good and the sandstone units could be delimited using mainly gamma and density logs. However, in the area of borehole breakouts, the caliper corrections required for calculating the density and porosity values are unsatisfactory. Sandy units can be detected using petrophysical measurements, without any geological input. Because of their low clay content, the channel sandstones are characterised by very low intensities of gamma radiation. A special study carried out using the petrophysical logs from borehole M 1400 showed that, even without any core analysis, the USM can still be characterised in some detail (i.e. divided into architectural elements) using the petrophysical dataset available.

The following information was obtained on the subsurface layer geometry in the Burgdorf investigation area. Based on all the data collected from a total of five boreholes, the strata presumably dip to the ESE, with an angle of approx. 10° . Since the gamma logs from four of the boreholes are more or less identical over large depth ranges, the subsurface geometry would appear to be very simple. The presence of extensive disturbed zones can be ruled out. However, some small-scale disturbed zones could be detected on the basis of drillcore photos (disturbed zones with a dip of 60° ; presumably normal faults, azimuth unknown) and analysis of gamma logs. Spatial orientation of these zones is not possible, and it is therefore impossible to obtain an exact picture of the three-dimensional structure of the underground of the Burgdorf geothermal test field.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

VORWORT	I
ZUSAMMENFASSUNG	III
RESUME	V
ABSTRACT	
INHALTSVERZEICHNIS	VII
VERZEICHNIS DER FIGUREN IM TEXT	X
VERZEICHNIS DER TABELLEN IM TEXT	XI
VERZEICHNIS DER BEILAGEN	XIII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Allgemeines und Zielsetzung	1
1.2 Situation	2
1.3 Die Untersuchungen des Zusatzprogrammes	4
2 GEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN	6
2.1 Sedimentologische Profilaufnahme der Kernbohrungen (M 1400 und M 2200)	6
2.1.1 Einleitung	6
2.1.2 Methodik	7
2.1.3 Lithofazies	7
2.1.3.1 Mittel- und Grobsandsteinfazies S	7
2.1.3.2 Fein- und Mittelsandsteinfazies M	8
2.1.3.3 Grobsilt- und Feinsandsteinfazies F	9
2.1.3.4 Schlammstein- und Mergelfazies T	10
2.1.3.5 Fazies rot-schwarz gefärbter Sedimente RS	11
2.1.4 Sedimentäre Architektur	11
2.1.4.1 Architektur-Element Rinnengürtel (RG)	13
2.1.4.2 Architektur-Element Durchbruchsrinnen (DR)	13
2.1.4.3 Architektur-Element Durchbruchsfächer (DF)	13
2.1.4.4 Architektur-Element Uferwälle (UW)	14
2.1.4.5 Architektur-Element Überschwemmungsebenen, Paläoböden und Sümpfe (UPS)	14
2.1.4.6 Zusammenfassung: Architekturelle Gliederung der Bohrung M 1400 und M 2200	14
2.2 Sedimentpetrographie (Bohrung M 1400)	15
2.2.1 Einleitung	15

2.2.2	Zusammensetzung, Korngrösse und Sortierung	16
2.2.3	Diagenese	19
2.2.4	Porosität und Permeabilität	21
2.3	Zusammenfassung: Abhängigkeit der mineralogischen und petrophysikalischen Werte von den Architektur-Elementen	25
2.3.1	Rinnengürtel (RG)	25
2.3.2	Durchbruchsrinnen (DR)	27
2.3.3	Durchbruchsfächer (DF)	29
2.3.4	Uferwälle (UW)	31
2.3.5	Überschwemmungsebenen, Paläoböden und Sümpfe (UPS)	32
2.3.6	Zusammenfassung, Porosität und Permeabilität der Architektur-Elemente	33
3	HYDROGEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN	35
3.1	Lugeon-Versuche (M 2200) und hydraulische Beobachtungen während der Bohrphase (M 1400)	35
3.2	Fluid-Logging in der Bohrung M 1400	37
3.2.1	Zielsetzung der Untersuchungen	37
3.2.2	Übersicht der Fluid-Logging-Methoden (Packer-Flowmeter-Logging, Leitfähigkeits-Logging)	38
3.2.3	Packer-Flowmeter-Logging in M 1400	40
3.2.3.1	Test-Bedingungen	40
3.2.3.2	Messdaten des Packer-Flowmeter-Versuchs	41
3.2.3.3	Auswertung der Packer-Flowmeter-Daten	44
3.2.4	Dynamisches Leitfähigkeits-Logging in der Bohrung M 1400	45
3.2.4.1	Test-Bedingungen	45
3.2.4.2	Messdaten des dynamischen Leitfähigkeits-Loggings	47
3.2.4.3	Auswertung der dynamischen Leitfähigkeits-Logging-Daten	49
3.3	Beurteilung der Fluid-Logging-Resultate und Schlussfolgerungen	53
3.3.1	Vergleich von Packer-Flowmeter- und Leitfähigkeits-Logging	53
3.3.2	Schlussfolgerungen	54
4	PETROPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN	56
4.1	Ziel der Messkampagne	56
4.2	Messausrüstung, Messbedingungen und Darstellung der Daten	57
4.3	Messmethoden	58
4.3.1	Kaliber (Sonde DD3)	58

		58
4.3.2	Messung der natürlichen Gamma-Strahlung (Sonden DD3 und NN1)	59
4.3.3	Gamma-Gamma-Dichte (Sonde DD3)	60
4.3.4	Neutronen-Porosität (Sonde NN1)	62
4.4	Interpretation der Messdaten	63
4.4.1	Technische Voraussetzungen	63
4.4.2	Aussagen zum strukturellen Aufbau des Erdsondenfeldes Burgdorf	64
4.4.3	Lokalisierung der Lithofazies-Typen resp. der faziellen Architektur-Elemente in M 1400 mit petrophysikalischen Interpretationsmethoden	67
4.4.3.1	Allgemeines und Vorgehen	67
4.4.3.2	Datenauswahl, Datenqualität und Datenaufbereitung	67
4.4.3.3	Analyse und Interpretation der Logs (Methodik)	68
4.4.3.4	Ergebnisse der Logauswertung	71
4.4.3.5	Vergleich der Ergebnisse aus der Logauswertung und der geologischen Aufnahme	74
	LITERATURVERZEICHNIS	76

VERZEICHNIS DER FIGUREN IM TEXT

1	Geografisch-geologische Übersicht	2
2	Das Erdsondenfeld Burgdorf während der Bohr- und Testphase	3
3	Die Bohrungsanordnung im Erdsondenfeld Burgdorf	3
4	Räumliche Anordnung der Bohrungen im Erdsondenfeld Burgdorf	5
5	Faziesmodell für das distale Hauptentwässerungssystem der USM im nördlichen Vorlandbecken	12
6	Petrografische Zusammensetzung der Proben aus den verschiedenen Architektur-Elementen im Dreiecksdiagramm nach FOLK (1974)	17
7	Mittlere mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen Architektur-Elemente	18
8	Abhängigkeit der mittleren Korngrösse von den Architektur-Elementen	18
9	Vergleich von Gesamtporosität und offener Porosität	21
10	Abhängigkeit der offenen Porosität vom Gehalt an Calcizement	23
11	Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Architektur-Element	23
12	Abhängigkeit der offenen Porosität vom Tonmatrix-Anteil	24
13	Abhängigkeit der Permeabilität von der Gesamtporosität	24
14	Permeabilität in Architektur-Elementen	27
15	Packer-Flowmeter-Logging: Elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und Kaliber (statische Messung vor Injektion)	41

16	Packer-Flowmeter-Logging: Wasserspiegel und Injektionsrate	42
17	Packer-Flowmeter-Logging: Fließrate im Bohrloch vor und während der Injektion	43
18	Dynamisches Leitfähigkeits-Logging: Pumprate, Absenkung und Logging-Zeiten	46
19	Dynamisches Leitfähigkeits-Logging: Referenz-Logs und Logs der Phase 1 (verschiedene Pumpraten)	47
20	Dynamisches Leitfähigkeits-Logging: Logs der Phase 2 (konstante Pumprate von 19 l/min)	48
21	Dynamisches Leitfähigkeits-Logging: Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Logs	51
22	Fluid-Logging und Lugeon-Test-Resultate: Vergleich der Transmissivitätswerte	54
23	Versatz von Peakabfolgen zwischen den Bohrungen M 1400 und M 2100.	65
24	Gesamtporositäten von Sandsteinen der verschiedenen Architektur-Elemente	73

VERZEICHNIS DER TABELLEN IM TEXT

1	Mineralogische Zusammensetzung der Rinnengürtel-Sandsteine	25
2	Porosität und Permeabilität der Rinnengürtel-Sandsteine	26
3	Mineralogische Zusammensetzung der Durchbruchsrinnen-Proben	28
4	Porosität und Permeabilität der Durchbruchsrinnen-Proben	28
5	Mineralogische Zusammensetzung der Durchbruchsfächer-Proben	29
6	Porosität und Permeabilität der Durchbruchsfächer-Proben	30
7	Mineralogische Zusammensetzung der Uferwall-Proben	31

8	Porosität und Permeabilität der Uferwall-Proben	32
9	Mineralogische Zusammensetzung der Schwemmebenen-Proben	33
10	Porosität und Permeabilität der Schwemmebenen-Proben	33
11	Resultate der auswertbaren Lugeon-Tests in der Bohrung M 2200	35
12	Abstichmessungen im Bohrgestänge während der Bohrphase (Bohrung M 1400)	37
13	Gemittelte Messdaten der Packer-Flowmeter-Messungen vom 13.6.92	43
14	Mittlere Durchlässigkeiten, Transmissivitäten und Potentiale aus Packer-Flowmeter-Logging	45
15	Wasserspiegel und Position diskreter Zuflussstellen aus Fluid-Logging-Daten	49
16	Zufluss-Raten und -Konzentrationen aus dynamischen Leitfähigkeits-Messungen, ermittelt mit den Programmen MOMENT und BORE	52
17	Transmissivitäten aus dynamischen Leitfähigkeits- Messungen	52
18	Messparameter, eingesetzte Sonden und Benennung der Logs	57
19	Definition von Lithofazies-Typen	72

VERZEICHNIS DER BEILAGEN

- 1 Bohrung M 1400: Sammeldarstellung (Geologie, Petrophysik, Hydrogeologie, Labordaten)
- 2 Bohrung M 1400: Petrophysikalische Interpretation
- 3 Bohrung M 2100: Petrophysikalische Messungen
- 4 Bohrung M 2200: Geologische Interpretation
- 5 Bohrung E 2100: Petrophysikalische Messungen
- 6 Bohrung E 2200: Petrophysikalische Messungen
- 7 Laboruntersuchungen Bohrung M 1400: Probenliste
- 8 Laboruntersuchungen Bohrung M 1400: Mineralgehalte (Röntgen- und Coulomatbestimmungen)
- 9 Laboruntersuchungen Bohrung M 1400: Gesteins- und Korndichte, Gesamtporosität und Permeabilität
- 10 Laboruntersuchungen Bohrung M 1400: Mineralogisch-petrografische Modalbestände der Gesteinsproben (Bestimmungen in Dünnschliffen)
- 11 Laboruntersuchungen Bohrung M 1400: Porositätstypen
- 12 Laboruntersuchungen Bohrung M 1400: Prozentuale Zusammensetzung der Schwermineral-Proben

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines und Zielsetzung

In Burgdorf ist im Areal der Ingenieurschule ein Erdsondenfeld mit 13 Bohrungen aufgebaut worden. In 5 Bohrungen wurden Energiesonden, in die restlichen 8 Messsonden versetzt. Die gewonnene Erdwärme wird von der Ingenieurschule Burgdorf genutzt. Die Auswirkungen des Wärmeentzuges auf die Umgebung und den Untergrund sollen untersucht werden. Die Resultate dienen u. a. als Grundlage für die kantonale Bewilligungspraxis für solche Erdwärmesonden-Anlagen.

Das Erdsondenfeld bot mit seiner hohen Bohrungsdichte eine einmalige Gelegenheit für hydrogeologische und geologische Studien in der Unteren Süsswassermolasse (USM). Deshalb wurden die in diesem Bericht beschriebenen erdwissenschaftlichen Zusatzuntersuchungen ausgeführt.

Die Sedimentabfolge der USM lässt sich aufgliedern in fazielle Architektur-Elemente (Rinnengürtel, Durchbruchsrinnen, Überschwemmungsebenen, etc.). **Das Ziel der Zusatzuntersuchungen** war eine bessere geologische, petrophysikalische und hydrogeologische Charakterisierung dieser Architektur-Elemente am Beispiel der USM im Raume Burgdorf. Die Teilziele lassen sich wie folgt umreissen:

- Lithologisch-sedimentologische Charakterisierung der USM am Beispiel des Erdsondenfeldes Burgdorf;
- Erkennung der faziellen Architektur-Elemente einerseits aufgrund von Kernaufnahmen und andererseits mit Interpretationsmethoden, die auf die vorhandenen petrophysikalischen Logs angewendet wurden;
- hydrogeologische Charakterisierung der faziellen Architektur-Elemente (Fluid-Logging Methoden, Laboruntersuchungen);
- Abklärung über die laterale Ausdehnung der faziellen Architektur-Elemente.

Die **Resultate** sollten die bestehenden Kenntnisse erweitern (z. B. Explorationsmöglichkeiten, hydrogeologisches Dateninventar über geringdurchlässige Gesteinsformationen) und verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten dienen (geothermische Nutzung, Abfallbewirtschaftung).

1.2 Situation

Das getestete Erdsondenfeld befindet sich im Areal der Ingenieurschule Burgdorf (Kt. Bern, Koord. ca. 613.97/211.82, ca. 564 m ü. M.). Burgdorf liegt geologisch-tektonisch gesehen in der flachliegenden USM des mittelländischen Molassebeckens (vgl. Fig. 1).

Insgesamt wurden im Erdsondenfeld 13 Bohrungen abgeteuft (Fig. 2 u. 3), wovon 8 eine Tiefe von 100 m, 4 eine Tiefe von 200 m und 1 Bohrung eine Tiefe von 250 m (vertieft von 100 m auf 250 m im Rahmen des Zusatzprogrammes) erreichten (vgl. Fig. 4). Unter ca. 40 m Quartär-Bedeckung folgen in den Bohrungen die detritischen Sedimentgesteine der Unteren Süsswassermolasse (Sedimente der Genfersee- und Thunersee-Schüttung).

Bemerkenswert und für das Erdsondenfeld Burgdorf charakteristisch ist die engräumige Anordnung der Bohrungen. Der Minimalabstand beträgt lediglich 2 m. Da als Vorgabe für die Abweichung von der Lotrechten eine Toleranz von 50 cm eingehalten werden musste, waren an die operationelle Ausführung der Bohrungen grosse Ansprüche gesetzt.

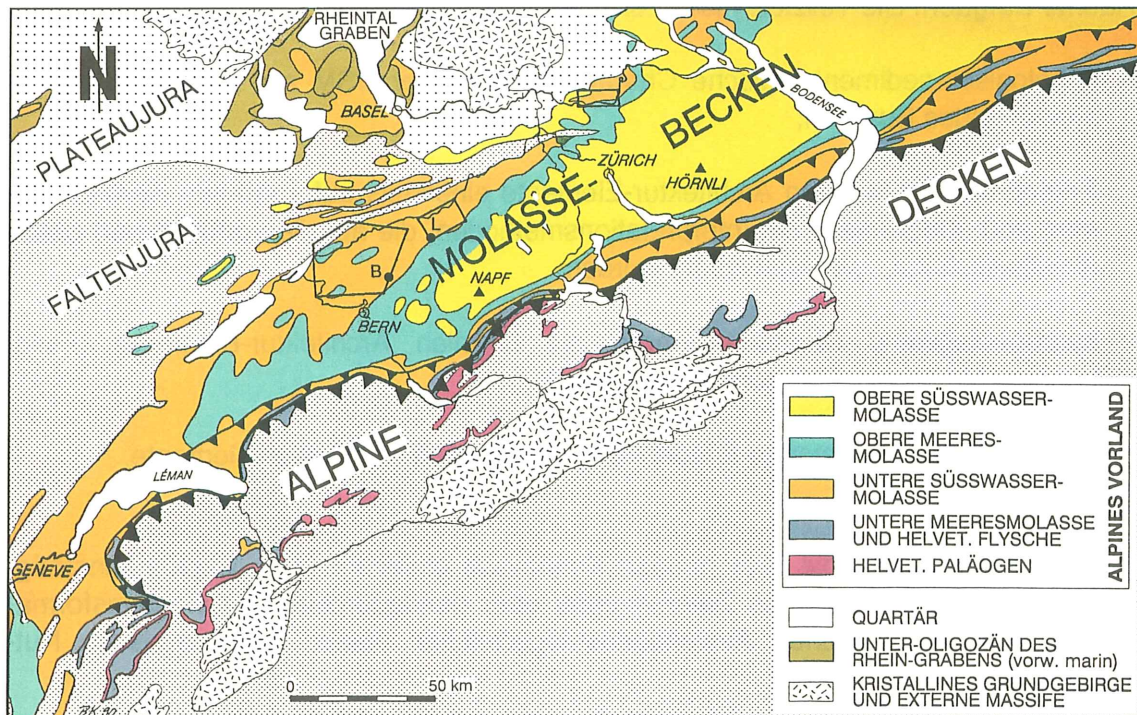


Fig. 1: Geografisch-geologische Übersicht (aus KELLER et al. 1990 NTB 90-41, leicht verändert). B = Burgdorf, L = Langenthal; die umrahmten Gebiete entsprechen den Untersuchungsgebieten in NTB 90-41.



Fig. 2: Das Erdsondenfeld Burgdorf während der Bohr- und Testphase. Blickrichtung ungefähr gegen Nordwesten. Zu erkennen sind die 8 Bohrungen E 2200 / M 2100 / M 2200, M 1300 / E 2100, E 1300, E 1200 / E 1100 (vgl. Fig. 3).

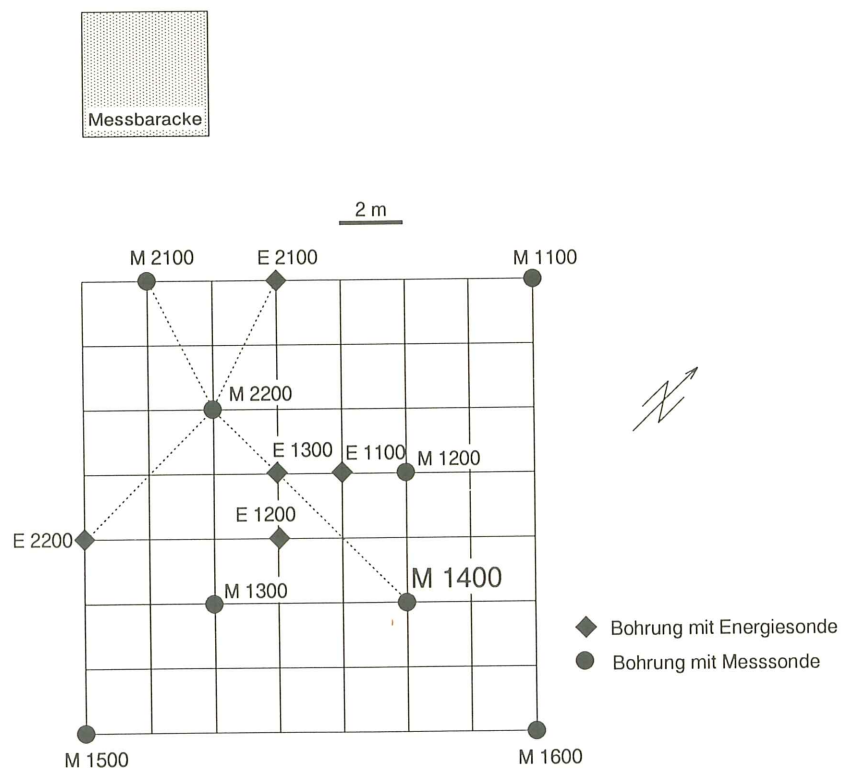


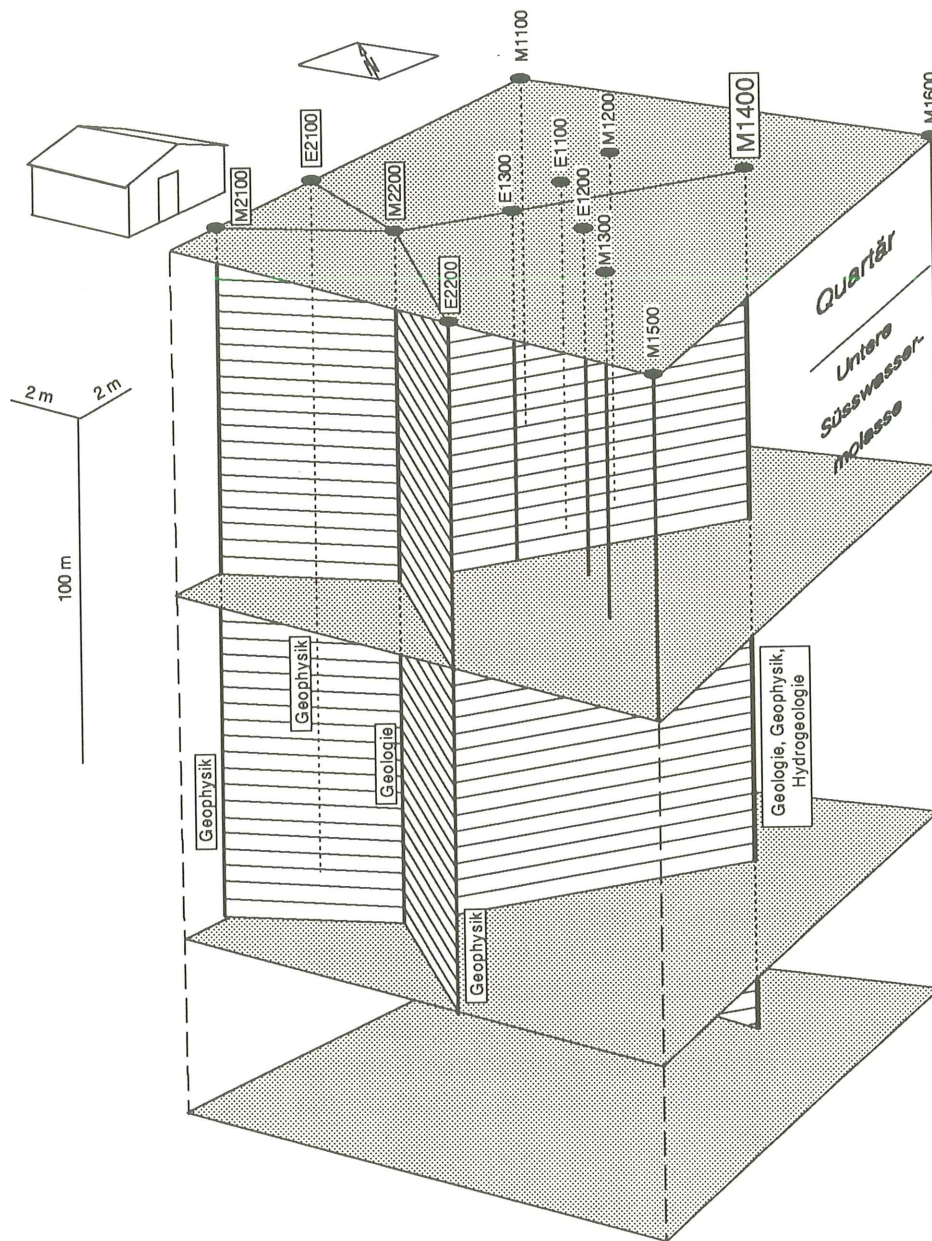
Fig. 3: Die Bohrungsanordnung im Erdsondenfeld Burgdorf. Man beachte die engständige Anordnung der Bohrungen.

1.3 Die Untersuchungen des Zusatzprogrammes

In die in diesem Bericht behandelten Untersuchungen wurden 5 Bohrungen einbezogen, wobei nicht in allen Bohrungen die gleichen Untersuchungen durchgeführt wurden (vgl. auch Tabelle zu Fig. 4). Am umfassendsten wurde die Bohrung M 1400 untersucht. Die Art der **ausgeführten Arbeiten und Untersuchungen** ist im folgenden kurz beschrieben:

- Vertiefung der Bohrung M 1400 von 100 m auf 250 m;
- Petrophysikalische Messungen in 2 verrohrten (E 2100 und E 2200) und 2 unverrohrten Bohrungen (M 1400 und M 2100);
- Fluid-Logging Messungen in der vertieften Bohrung M 1400;
- Bestimmung der faziellen Architektur-Elemente in 2 Bohrungen (M 1400 und M 2200) aufgrund des vorhandenen Kernmaterials;
- Bestimmung der faziellen Architektur-Elemente in der Bohrung M 1400 aufgrund der petrophysikalischen Logs (Bohrung M 1400) ohne Zuhilfenahme des Bohrkern Datensatzes;
- Bestimmung der Wasserfliesswege und deren hydraulische Durchlässigkeiten und Potentiale durch Auswertung der Fluid-Logging-Messungen;
- Ausführung von Laboruntersuchungen an Probenmaterial aus der Kernbohrung M 1400 zur hydrogeologischen Charakterisierung der Architektur-Elemente und zur Abklärung weiterer Fragestellungen (Auswirkungen der Diagenese auf die Durchlässigkeit, etc.).

Die Untersuchungen des Zusatzprogrammes werden in den folgenden Kapiteln diskutiert und dokumentiert.



Bohrung		Geologische Daten	Petrophysikalische Daten	Hydrogeologische Daten
M 1400	Beilage 1	Architektur-Elemente, Kernfotos, Labordaten (Porosität, Durchlässigkeit, Calcit, Ton)	Kaliber, Natürliche Gamma-Strahlung, Kompensierte Dichte (Gamma-Gamma-Dichte), Neutron-Porosität	Fluid-Logging (Packer-Flowmeter-Logging, Leitfähigkeits-Logging)
	Beilage 2	—	Petrophysikalische Interpretation	—
M 2100	Beilage 3	—	wie Beilage 1	—
M 2200	Beilage 4	Architektur-Elemente, Kernfotos	—	—
E 2100	Beilage 5	—	wie Beilage 1	—
E 2200	Beilage 6	—	wie Beilage 1	—

Fig. 4: Räumliche Anordnung der Bohrungen im Erdsondenfeld Burgdorf (knapp 10-fach überhöht). Die in 5 der 13 Bohrungen ausgeführten Untersuchungen, resp. die vorhandenen Daten sind in der Tabelle aufgelistet.

2 GEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

2.1 Sedimentologische Profilaufnahme der Kernbohrungen M 1400 u. M 2200

2.1.1 Einleitung

Die **Kernbohrungen M 1400 und M 2200**, welche weniger als 10 m voneinander entfernt niedergebracht wurden (vgl. Fig. 3), erbohrten unter der Quartärbedeckung 212 m resp. 160 m obere Untere Süsswassermolasse. Der **generelle lithologische Aufbau** beider Bohrungen ist **nahezu identisch**.

Die obersten 45 m der USM (d. h. bis ca. 85 m Bohrteufe) bestehen aus einer Wechsellagerung von grün-gelbbraun gefleckten Mergeln, Siltsteinen und Feinsandsteinen, wobei um 60 m Bohrteufe eine mittelkörnige Sandsteinbank angebohrt wurde, welche in M 2200 kleine geschlossene Klüfte enthält.

Darunter folgt in M 2200 bis 148 m Tiefe ein sandreicher Abschnitt, gegliedert in Sohlbankzyklen, in denen die Korngrösse gegen oben abnimmt (fining upward). Der basale Teil der Zyklen besteht aus 4 - 10 m mächtigen Mittel- und seltener Grobsandsteinen, die meistens einen erosiven Basalkontakt aufweisen. Der obere feinkörnige Teil, der im Mittel ein Drittel bis die Hälfte des Gesamtzyklus ausmacht, wird von Mergel-Siltstein-Feinsandstein Wechselfolgen aufgebaut. In diesem sandreichen Teil des Profils wurde ebenfalls eine grössere Klufthäufigkeit festgestellt. Die meisten Klüfte sind geschlossen; die wenigen offenen Klüfte treten in den Sandsteinen auf und zwar in M 2200 bei Profilmeter 84.60, 129.00, 133.70 und 145.35 m und in M 1400 bei 63.10, 101.25, 114.90 und 146.65 m.

Im Bereich von 148 - 190 m (d. h. bis fast zur Endtiefe der Bohrung M 2200) nimmt der Anteil der feinkörnigen Wechselfolgen an der Gesamtmächtigkeit auf Kosten der Mittel- und Grobsandsteine auf ca. 50 % zu. Darunter, bis zur Endtiefe der Bohrung M 1400, machen sie gar 80 % aus.

Mittels der Kernfoto-Dokumentation (Bohrungen M 1400 und M 2200) lassen sich einige **Kleinstörungen** erkennen, so durch deutlichen Schichtversatz (M 1400: 63.2 m, M 2200: 129.05 m) oder durch Rutschharnische (M 1400: 114.9 m, M 2200: 133.7 m). Weitere Kleinstörungen im Bereich von Kernstrecken mit schlechter Kernqualität oder Kernverlusten sind möglich. Diese Störungen fallen mit ca. 60° ein, was Abschiebungscharakter vermuten lässt. Zudem können an zahlreichen weiteren Stellen mit 50° bis 70° einfallende Strukturen beobachtet werden, die nicht sicher interpretiert werden können (Kluftflächen oder Störungsflächen?). Da die Kerne nicht orientiert sind, können die kleintektonischen Verhältnisse im Erdsondenfeld Burgdorf nicht genau räumlich aufgeschlüsselt werden. Die wichtigsten Kleinstörungen würden sich z. B. zwischen den beiden Bohrungen korrelieren lassen, wenn man ein Einfallen gegen Osten an-

nimmt; diese Lösung ist aber wegen der Vieldeutigkeit des Systems sehr zweifelhaft. Die Korrelation der Lithofazies-Typen zwischen den Bohrungen M 1400, M 2100, E 2100 und E 2200 ist mittels der natürlichen Gamma-Strahlung (vgl. Kap. 4) gut möglich. Ein Quervergleich zwischen der Tiefenlage der Peaks in den 4 genannten Bohrungen und der Lithologien in M 1400 und M 2200 lässt vermuten, dass die Schichten mit bis ca. 10° gegen ESE einfallen.

2.1.2 Methodik

Die Kerne beider Bohrungen wurden am Geologischen Institut der Universität Bern der Länge nach halbiert und anschliessend mit einer Sinar-Kamera mit Vericolor L (Kodak) Farbfilm fotografiert. Die sedimentologischen Aufnahmen der frisch gesägten Bohrkerns erfolgte im Massstab 1:50. Wie in KELLER et al. (1990) wurden zuerst die **Lithofaziestypen** bestimmt unter besonderer Berücksichtigung der Kontaktverhältnisse im Liegenden und Hangenden, der Gesteinsfarbe, der Körnigkeitsentwicklung sowie der Abfolge sedimentärer Strukturen. Diese Kriterien waren für die Gliederung der Profile in **Architektur-Elemente** im Sinne von KELLER et al. (1990) ausschlaggebend.

2.1.3 Lithofazies

Aufgrund der lithologischen Eigenschaften können in den beiden Bohrungen folgende Lithofaziestypen ausgeschieden werden:

- Mittel- und Grobsandsteinfazies (S)
- Fein- und Mittelsandsteinfazies (M1, M2)
- Grobsilt- und Feinsandsteinfazies (F1, F2)
- Schlammstein- und Mergelfazies (T)
- Fazies rot-schwarz gefärbter Sedimente (RS)

2.1.3.1 Mittel- und Grobsandsteinfazies S

Beschreibung

Die Sedimente dieser Fazies bestehen aus 4 - 6 m mächtigen Mittel- und Grobsandsteinen, wobei selten auch bis 12 m mächtige Bänke vorkommen. Ihr Liegendkontakt ist erosiv. In der Basis kommen Gerölle alpiner Herkunft und gefleckte tonige Aufarbeitungsgerölle (intraformationelle Gerölle) vor. Zur hangenden Faziesseinheit besteht gewöhnlich ein kontinuierlicher Übergang, der sich in einer Korngrössenabnahme (fining upward) und Zunahme der Fleckung äussert. Scharfe Erosionskontakte mit Ton-

geröllen innerhalb von Sandsteinabfolgen lassen erkennen, dass vor allem die mächtigeren Sandsteine komplexe amalgamierte, mehrphasige Einheiten darstellen.

Die vorwiegend massigen Sandsteine lassen gelegentlich Schrägschichtung erkennen mit Set-Höhen bis 50 cm. Das Sandgefüge ist gekennzeichnet durch relativ gute Sortierung sowie Fehlen einer sedimentären Matrix.

Interpretation

Der erosive Basalkontakt der Sandsteine mit Sohlenpflaster (intraformationelle Tongallen, Gerölle), die Körnigkeit sowie die unter kontinuierlich starker unimodaler Strömung entstandene, massige Internstruktur mit gut sortiertem Mikrogefüge lassen diese Sandsteine als **Ablagerungen in Rinnengürteln** interpretieren (COLLINSON 1986). Ein strukturloses Gefüge entsteht in Rinnengürteln, welche durch untiefe, schwach verästelte Rinnen und zahlreiche Sandbänke (Longitudinalbarren) gegliedert sind. Das Fehlen bedeutender Erosionskolke innerhalb der Sandsteine deutet auf die Abwesenheit tieferer Rinnen hin. Der Rinnengürtel wies demzufolge ein Fließmuster auf, welches oft von lagekonstanten, grobsandigen, bodenfrachtreichen Flüssen im Vorland von Gebirgen beschrieben wird (WARNICK & FLORES 1987, SHUSTER & STEIDTMANN 1987). Die Füllung solcher Rinnengürtel mit Sedimenten erfolgt meistens durch Aggradation und erzeugt bei Aufgabe der Rinne eine Korngrößenabnahme, wie das bei Sedimenten dieser Lithofazies beobachtet werden kann.

2.1.3.2 Fein- und Mittelsandsteinfazies M

Die Sedimente der Fein- und Mittelsandsteinfazies können in zwei sedimentologisch voneinander verschiedene Subfazien M1 und M2 gegliedert werden.

a) Fein- und Mittelsandsteinfazies M1

Beschreibung

Die Sedimente der Fein- und Mittelsandsteinfazies M1 sind generell 2 - 3 m mächtig und beginnen über einem basalen Erosivkontakt mit gefleckten Tongallen und Geröllen. Gegen das Hangende zu wird meistens eine Korngrößenabnahme beobachtet, so dass der Übergang zur hangenden lithofaziellen Einheit graduell ist. Als Internstruktur wird eine Schrägschichtung beobachtet, welche auf den basalen Erosivkontakt folgt und durch den ganzen Sandsteinkörper zieht. Mikroskopische Analysen dieser Fazies zeigen einen geringen Anteil an sedimentärer Matrix.

Interpretation

Diese schwach matrixführenden Fein- und Mittelsandsteine mit basalem Erosivkontakt und einem Sohlenpflaster (intraformationelle Tongallen, Gerölle), einer durchziehenden Schrägschichtung sowie einer Korngrößenabnahme gegen das Hangende zu, ent-

standen durch **mäandrierende Mischfrachtflüsse** (ALLEN 1970, GALLOWAY & HOBDAY 1983, MIALl 1985), deren Rinne sich kontinuierlich seitlich verlagerte und somit die Ausbildung der diagnostischen Schrägschichtung (Epsilon-Schrägschichtung) ermöglichte. Diese Flüsse nahmen jedoch verglichen mit den Hauptrinnen (Lithofazies S) eine unbedeutende Stellung ein und werden daher als **Durchbruchs- oder Nebenrinnen** interpretiert.

b) Fein- und Mittelsandsteinfazies M2

Beschreibung

Die Fein- und Mittelsandsteine M2 sind ebenfalls zwischen 2 und 3 m mächtig und setzen mit einem basalen Erosivkontakt, begleitet von Tongallen und Geröllen ein. Gegen das Hangende zu werden die Sandsteine feinkörniger und vielfach marmoriert. Einige Sandsteinkörper dieser Lithofazies bestehen aus einer Folge von 20 - 50 cm mächtigen, nach oben feinkörniger werdenden Sandsteinbänken mit erosiver Basis. Als Internstruktur wird eine Parallellamination beobachtet, wobei vereinzelt auch massige Einheiten vorkommen. Parallellamination folgt meistens auf den basalen Erosivkontakt.

Interpretation

Die Korngrösse, Erosivkontakte, Parallellamination und Gradierung deuten darauf hin, dass diese Sandsteine durch episodische, hochenergetische Strömungen abgelagert worden sind. Die Fleckung (Marmorierung) im oberen Teil der Bänke widerspiegelt Überprägung durch bodenbildende Prozesse und weist somit auf längere Sedimentationsunterbrüche zwischen den einzelnen Überflutungsereignissen hin. Die Fein- und Mittelsandsteinfazies M2 kennzeichnet **Durchbruchsfächer** (crevasse splays); sie tritt gewöhnlich im Hangenden der Rinnensandsteine auf, was auf die enge Beziehung zur Hauptrinne hinweist.

2.1.3.3 Grobsilt- und Feinsandsteinfazies F

Die Grobsilt- und Feinsandsteine lassen sich ebenfalls in zwei Faziestypen unterteilen, deren Entstehung auf zwei verschiedene Ablagerungsprozesse zurückgeführt wird.

a) Grobsilt- und Feinsandsteinfazies F1

Beschreibung

Die Grobsilt- und Feinsandsteinfazies ist charakterisiert durch 20 - 50 cm mächtige Bänke mit planarem scharfem Basalkontakt. Oft sind mehrere Bänke übereinandergestapelt. Gegen das Dach hin wird eine Korngrößenabnahme beobachtet, begleitet von einer kontinuierlichen Zunahme der Fleckung. Rippel- und Kletterrippelkreuzschichtung ist häufig, zusätzlich kommen Wulstschichtung und kleine Sackungsstrukturen vor.

Hinzu kommt eine starke Verwühlung mit Wühlgängen, Fluchtspuren und Wurzelstrukturen sowie eine intensive Fleckung.

Interpretation

Rippel- und Kletterrippelkreuzschichtung entsteht durch schnelle Ablagerung der Feinfracht aus schwach energetischen, suspensionsreichen Strömungen, wie sie oft während des Hochwassers eines Flusses auf **Uferwällen** beobachtet werden. Die durch solche Strömungen abgelagerten Sedimente sind jeweils wassergesättigt, was Interndeformationen zur Folge hat, die sich in Wulstschichtungen und kleineren Sackungen äussert. Anschliessendes Trockenfallen ermöglicht die Besiedlung durch Tiere und Pflanzen und führt zur biogenen Umlagerung des Sediments. Die Fleckung (Marmorierung) widerspiegelt Überprägung durch bodenbildende Prozesse und somit längere subaerische Exposition.

b) Grobsilt- und Feinsandsteinfazies F2

Beschreibung

Die Bänke der Grobsilt- und Feinsandsteinfazies F2 sind generell ebenfalls 10 - 50 cm mächtig. Sie setzen mit einem planaren scharfen Basalkontakt ein und sind entweder normal oder invers gradiert. Auffallend ist die starke Bioturbation (Wühl- und Wurzelspuren) und Fleckung im oberen Teil der Bänke.

Interpretation

Diese Bänke wurden als Folge episodischer Ereignisse als **distale Durchbruchsfächer auf der Überschwemmungsebene** abgelagert. Kontinuierliche Energiezunahme während der Überschwemmung führt zur inversen Gradierung einzelner Bänke, wogegen normalerweise die Energie während des Ereignisses abnimmt und eine normalgradierte Bank entsteht. Die anschliessende länger andauernde subaerische Exposition führt zur ausgeprägten diagenetischen Veränderung der Grobsilt- und Feinsandsteine.

2.1.3.4 Schlammstein- und Mergelfazies T

Beschreibung

Die Sedimente dieser Fazies sind generell zwischen 10 und 50 cm mächtig, rot-gelb gefleckt, entweder massig oder parallel laminiert und bioturbiert (Wühlspuren, Fluchtspuren, Kriechspuren, Rhizolite).

Interpretation

Diese Fazies weist die Kennzeichen von feinst-detritischen Ablagerungen auf der Schwemmebene auf. Die Parallellamination sowie das Fehlen grösserer Trockenrisse deuten darauf hin, dass diese Feinfracht in schon bestehenden **Tümpeln** abgelagert wurde, welche kaum richtig trocken fielen.

2.1.3.5 Fazies rot-schwarz gefärbter Sedimente RS

Auf Grund der Korngrößen lässt sich diese Fazies in zwei Subfazien unterteilen, nämlich in eine grobkörnige (RS1) und eine siltig-tonige (RS2).

a) Fazies RS1

Beschreibung

Die ungefähr 50 cm mächtigen Sedimente folgen in kontinuierlichem Kontakt auf Sand- und Siltsteinen und führen in einer tonig-siltigen Matrix grobe Sandkörner, deren Konzentration gegen das Liegende zu oft abnimmt. Die obersten Lagen einer Sequenz sind grauschwarz bis schwarz gefärbt. Darunter folgt ein grauer Horizont, der zu einer rot gefärbten Zone mit pedogenen Rutschspiegeln (slick and slides), die wie tektonische Rutschharnische aussehen, jedoch durch wiederholtes Austrocknen und Wiederbefeuchten der Tone entstehen, überleitet. Gegen unten verliert die Rotfärbung an Intensität und wird von einer reduzierten, beigen Zone, die oft cm-grosse Kalkknollen führt, abgelöst.

Interpretation

Die beschriebene Sequenz entspricht dem **typischen Bodenprofil in der weiträumigen Alluvialebene**, entstanden durch komplexe pedogenetische Prozesse bei oxidierenden und reduzierenden Bedingungen im Zusammenhang mit einem fluktuierenden Grundwasserspiegel.

b) Fazies RS2

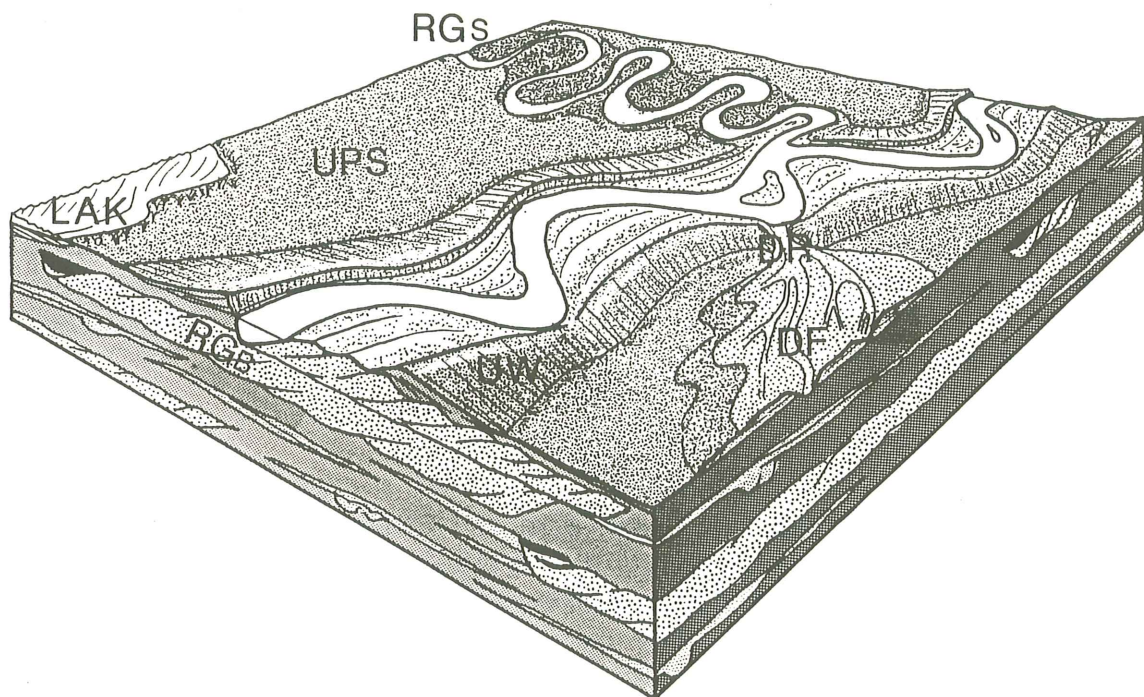
Der Unterschied der Sedimente dieser Fazies zu RS1 besteht lediglich in der Körnigkeit. Dabei wurden im Unterschied zu RS1 die siltig-tonigen Sedimente (RS2) in einen vollständigen pedogenetischen Prozess einbezogen.

2.1.4 Sedimentäre Architektur

Die vorgestellten Lithofaziestypen lassen sich in dem von KELLER et al. (1990) beschriebenen Faziesmodell für die distale Untere Süsswassermolasse wiederfinden. Damit können die verschiedenen Fazies in Kenntnis der fluviatilen Ablagerungsmodelle aufgrund der Sedimentstrukturen und -texturen den Architektur-Elementen zugeordnet werden. Beispielsweise werden die Sandstein-Folgen hauptsächlich aufgrund ihrer jeweiligen Mächtigkeit, der Korngrösse und des Ablagerungsgefüges, wobei die einzelnen Faktoren miteinander verknüpft sind, entweder als Rinnengürtel-, oder als Durchbruchsrinnen- oder als Durchbruchsfächersedimente interpretiert. Somit ergibt sich die folgende Gliederung in Architektur-Elemente:

- | | |
|---|------------------------------|
| - Rinnengürtel (RG) | : Lithofazies S |
| - Durchbruchsrinnen (DR) | : Lithofazies M1 |
| - Durchbruchsfächer (DF) | : Lithofazies M2, F2 |
| - Uferwälle (UW) | : Lithofazies F1 |
| - Überschwemmungsebenen,
Paläoböden und Sümpfe (UPS) | : Lithofazies T, RS1 und RS2 |

Die Zuordnung der Architektur-Elemente zu den Lithofazien ist auf den sedimentologischen Profilen der Bohrungen M 1400 (Beil. 1) und M 2200 (Beil. 4) dargestellt. Die Bezeichnungen UPS/DF, UW/DF etc. bedeuten, dass geringmächtige Lagen dieser Architektur-Elemente übereinanderfolgen, wobei infolge der Platzverhältnisse nicht jede Lage einzeln angeschrieben werden kann.



- | | |
|-----|---|
| RG | Rinnengürtel (RG _B = bodenfrachtreiche RG, RG _S = suspensionsfrachtreiche RG) |
| DR | Durchbruchsrinnen |
| DF | Durchbruchsfächer |
| UW | Uferwälle |
| UPS | Überschwemmungsebenen, Paläoböden und Sümpfe |

Fig. 5: Faziesmodell für das distale Hauptentwässerungssystem der USM im nördlichen Vorlandbecken

2.1.4.1 Architektur-Element Rinnengürtel (RG)

Das Architektur-Element Rinnengürtel (RG) ist in den Bohrungen M 1400 und M 2200 leicht kenntlich und bildet mittel- bis grobsandige Intervalle von 2 bis 6 m. Bei aufeinander-gestapelten, amalgamierten Sequenzen werden Mächtigkeiten von bis zu 12 m und in einem Fall sogar 17 m (M 1400: 85 - 102 m) erreicht. Dieses mächtige Sandsteinpaket enthält allerdings als Top der einen Sequenz einen tonigen Bodenhorizont. Die Rinnengürtel-Sandsteine weisen stets eine grobe Basislage auf, die erosiv meist in tonige Sedimente der Überschwemmungsebene oder selten in Silt- und Feinsandsteine des Uferwalls und von Durchbruchsfächern greift. Häufig sind die Sandsteine massig, bisweilen ist auch eine flachwinklige Kreuzschichtung oder eine trogförmige Schrägschichtung von Grossrippeln ausgebildet. Gegen oben weisen die Rinnenfüllungen eine, jedoch nicht immer sehr ausgeprägte Korngrößenabnahme auf. Im Dach findet meist ein gradueller Übergang zu pedogenesierten Sedimenten der Schwemmebene statt.

Sämtliche offenen und geschlossenen Klüfte, welche in der Bohrung M 1400 vorgefunden werden, sind an das Architektur-Element Rinnengürtel gebunden.

2.1.4.2 Architektur-Element Durchbruchsrinnen (DR)

Die Sedimente des Architektur-Elementes Durchbruchsrinne bestehen aus 2 - 3 m mächtigen Mittelsandsteinen. Diese setzen mit einem erosiven Basalkontakt und Sohlenpflaster auf tonigen Sedimenten der Schwemmebene oder seltener auf Silt- bis Feinsandsteinen von Durchbruchsfächern und Uferwällen ein. Die Sandsteinkörper weisen Schrägschichtung sowie eine Korngrößenabnahme gegen das Hangende auf. Letzteres kann aus Sandsteinen eines Durchbruchsfächers oder Rinnengürtels oder Uferwall-Ablagerungen bestehen. Verglichen mit den Rinnengürtel-Sandsteinen weisen diejenigen der Durchbruchsrinnen in erster Linie eine geringere Mächtigkeit und im weiteren feinkörnigere Komponenten auf.

2.1.4.3 Architektur-Element Durchbruchsfächer (DF)

Die Sedimente der Durchbruchsfächer bestehen entweder aus 2 - 3 m mächtigen Fein- und Mittelsandsteinen, wenn sie in direkter vertikaler Abfolge mit RG assoziiert sind (proximale Durchbruchsfächer), oder aber aus 20 - 50 cm mächtigen Feinsandsteinen, wenn sie in distaleren Bereichen abgelagert wurden. In diesem Fall besteht keine vertikale genetische Beziehung zu RG. Der Liegendkontakt der Durchbruchsfächer-Sedimente ist scharf und planar, überwiegend zu Mergeln der Schwemmebene. Der Übergang zu den hangenden sedimentären Einheiten ist dagegen graduell, verbunden

mit einer Korngrössenabnahme und zunehmender Marmorierung gegen das Hangende zu. Die proximalen Durchbruchsfächer sind intern zyklisch in normal gradierte, parallel laminierte Untereinheiten gegliedert und weisen auf pulsierend ablaufende Durchbruchereignisse hin. Jeder Zyklus wird durch einen basalen Erosivkontakt mit Sohlenpflaster eingeleitet. Die distalen Durchbruchsfächer dagegen sind oft invers gradiert.

2.1.4.4 Architektur-Element Uferwälle (UW)

Die Uferwall-Sedimente bestehen aus oft mehrfach repetierten dünnen, 10 - 50 cm mächtigen Feinsand- und Siltsteinbänken. Ihr typisches Kennzeichen ist ihre Kleinrippelschichtung, die jedoch auch stark verwühlt sein kann, sowie ihre gefleckte olivgrüne, ockerbraune und manchmal rotviolette Färbung. Die einzelnen Bänke beginnen meist über einer scharfen Basis und sind intern rippellaminiert oder eben laminiert. Nach oben werden sie feinkörniger und weisen Kletterippelkreuzschichtung auf, die - wie die ebenfalls verbreiteten Wulst- und Rutschstrukturen - für eine rasche Sedimentation charakteristisch ist.

2.1.4.5 Architektur-Element Überschwemmungsebenen, Paläoböden und Sümpfe (UPS)

Aufgrund der auffallenden bunten, pedogenen Horizonte sind die Sedimente der Schwemmebenen mit Paläoböden und Sümpfen leicht zu erkennen. Die infolge der Bodenbildung in jedem Fall tonigen Sedimente können einen beträchtlichen Anteil von Sandkörnern enthalten, wenn es sich beispielsweise um eine pedogenetisch überprägte Rinnenfüllung handelt, oder bei distalen Überschwemmungssedimenten ausschliesslich tonig ausgebildet sein. Der Übergang aus dem liegenden Architektur-Element ist normalerweise graduell und von einer zunehmenden Pedogenisierung gekennzeichnet. Die Grenze zum Hangenden ist jedoch generell scharf und erosiv.

2.1.4.6 Zusammenfassung: Architekturelle Gliederung M 1400 und M 2200

Die fünf definierten Architektur-Elemente sind in unterschiedlichem Ausmass am Aufbau der 212 m mächtigen Molassestrecke der Bohrung M 1400 beteiligt. Die Sandsteine des Rinnengürtels nehmen 30 % und die der Durchbruchsfächer und -rinnen 23 % der gesamten Strecke ein. Die Architektur-Elemente sind jedoch in der Profilstrecke unterschiedlich verteilt. So beträgt der Anteil der genannten Sandsteine im Abschnitt 85 - 150 m sogar 75 %.

Nicht viel anders sind die Verhältnisse in der Bohrung M 2200, wo die Rinnengürtel-Sandsteine 28 % und die Durchbruchsfächer- und Durchbruchsrinnen-Sandsteine 25 % der gesamten Molassefolge und zusammen 72 % der Strecke 83 - 150 m einnehmen.

Die kleinen Unterschiede bei der architekturellen Gliederung der an sich identischen Profile M 1400 und 2200 haben sich vor allem durch die pedogene Überprägung der

Sedimente ergeben. Die Pedogenisierung eines Sand- oder Siltsteins einer beliebigen Sedimentationseinheit kann sehr inhomogen verlaufen und über kleinste Distanzen variieren, so dass in einer Bohrung ein Horizont infolge vollständiger pedogener Überprägung dem Architektur-Element UPS zugeordnet wird und in der anderen Bohrung wegen des dominierenden primären Ablagerungsgefüges den Architektur-Elementen RG, DR, DF, oder UW. Andere Abweichungen beruhen auf dem geringen horizontalen Ausschnitt, der die zur Charakterisierung wichtigen Sedimentstrukturen nur ungenügend wiedergibt. Beispielsweise wird ein Rinnensandsteinkörper der einen Bohrung durch einen nicht kontinuierlichen Trennhorizont in der anderen Bohrung in aufeinandergestapelte Durchbruchsfächer gegliedert.

2.2 Sedimentpetrographie (Bohrung M 1400)

2.2.1 Einleitung

Den Sedimentkernen der Bohrung M 1400 wurden total 120 Proben gemäss vorgesehenem Untersuchungsprogramm entnommen (vgl. Probenlisten Beil. 7). **Die Sandsteine der Architektur-Elemente Rinnengürtel, Durchbruchsrinnen und Durchbruchsfächer wurden wegen ihrer hydrologischen Bedeutung als potentielle Wasserleiter erheblich stärker beprobt.** Die Auswahl der Proben erfolgte gezielt an die Lithologien und Sedimentstrukturen angepasst, um beispielsweise die geringmächtigste, von Mergeln eingerahmte Rinnenfüllung, ebenso wie die amalgamierte oder auf einen Durchbruchsfächer folgende Rinne zu erfassen. Ferner sollten die ausgewählten Proben einen Resultatsvergleich mit der vorangegangenen Molassestudie (KELLER et al. 1990) ermöglichen. Deshalb wurden auch alle Analysen nach den gleichen, dort beschriebenen Methoden mit Ausnahme der Permeabilität durchgeführt. Quarz- und Feldspatgehalte wurden röntgenographisch bestimmt, die Karbonatminerale durch Kombination von Röntgendiffraktometrie und Coulometrie und die Gehalte an Schwefel (woraus der Pyritanteil berechnet wird) und an organischem Kohlenstoff wurden coulometrisch ermittelt. Die Permeabilitätswerte (Beil. 9) stammen von 2.5 - 3.5 cm hohen und 3 cm breiten, aus den Kernstücken überwiegend senkrecht zum Kern herausgebohrten Zylindern, bei denen mittels eines Gaspermeameters die Menge des durchströmenden Stickstoffs unter gegebenem Druck gemessen wird. Die Messungen ergeben die spezifische Permeabilität k in Millidarcy (md), die in den Durchlässigkeitskoeffizienten K (ms^{-1}) umgerechnet wird.

Wegen der schlechten Zementation von v. a. gröberen Sandsteinen und mergeligen Paläoböden zerfielen einige der zur Analyse vorgesehenen Gesteine, so dass schliesslich 111 **Durchlässigkeits- und Porositätsresultate** erzielt werden konnten (Beil. 9). Davon stammen 46 von Rinnengürtel-Sandsteinen, 17 von Durchbruchsrinnen, 12 von Durchbruchsfächern, 20 von Sedimenten des Uferwalls und 16 von solchen der Schwemmebenen. Bei 25 Proben wurde die **mineralogische Zusammensetzung** (Beil. 8) und bei 15 die **Schwerminerale** (Beil. 12) bestimmt. Zur Charakterisierung der petrographischen Zusammensetzung und der Diagenese (Zementation und Poren-genese) wurden 30 Dünnschliffe quantitativ ausgezählt. Die daraus resultierenden Modalbestände und deren Mittelwerte sind in Beilage 10 und die separat ausgezählten Porositätstypen in Beilage 11 aufgeführt.

2.2.2 Zusammensetzung, Korngrösse und Sortierung

Zusammensetzung

Die untersuchten Gesteine sind, entsprechend der Probenauswahl, hauptsächlich fein- bis mittlkörnige Sandsteine. Sie gehören aufgrund der Petrographie der Sandkörner, wovon je gut ein Drittel Quarze, ein Drittel Gesteinsbruchstücke und ein Sechstel Feldspäte sind, entweder zu den feldspatreichen Lithareniten oder den Lithareniten (Fig. 6).

Die Gesteinsbruchstücke stammen von verschiedensten kristallinen, metamorphen, siliziklastischen und karbonatischen Formationen, die ihrerseits wieder aus verschiedenen Mineralien zusammengesetzt sind. Dazu gesellen sich als Einzelmineralkörner Quarz, Albit, Kalifeldspat, Muskovit, Biotit, Chlorit, Schwerminerale und z. T. Pyrit. Tonminerale, bzw. Schichtsilikate finden sich, sofern vorhanden, in der Matrix und in sehr geringem Ausmass in Form von authigenem Illit, bedeutender jedoch in teilweise zersetzten Feldspattrümmern. Der Gehalt an Calcit variiert stark, ist jedoch bei den meisten Sandsteinen gering.

Auch die feinkörnigen Sedimente - tonige und mergelige Siltsteine, siltige, feinsandige Mergel - gehören zu den Lithareniten oder feldspatreichen Lithareniten. Sie weisen jedoch im Vergleich zu den Sandsteinen relativ mehr Quarz und weniger Gesteinsbruchstücke auf.

Bei der Analyse des Mineralbestandes der Sandsteine und feindetratischen Sedimente zeigte sich, dass Rinnengürtel- und Durchbruch-Sandsteine überwiegend aus Quarz, Albit und Kalifeldspat bestehen (Beil. 8 und Fig. 7) wobei, wie oben beschrieben, ein Teil dieser Minerale von Gesteinsbruchstücken stammt. Letztere sind auch für den relativ hohen Tonmineralanteil ("**TOAK**" in Fig. 7: enthält alle Schichtsilikate, d. h. Tonminerale, Glimmer und Akzessorien = Schwerminerale u. a.) verantwortlich. Hingegen beruhen bei den Uferwall- und den Schwemmebenen-Sedimenten die Tonmineralanteile auf der effektiven Tonmatrix. Der Calcitgehalt stammt einerseits von Gesteinsfragmenten, andererseits in den Sandsteinen von Calcit und in den Mergeln der Schwemmebenen vor allem von Calcit anreichernden Bodenbildungsprozessen.

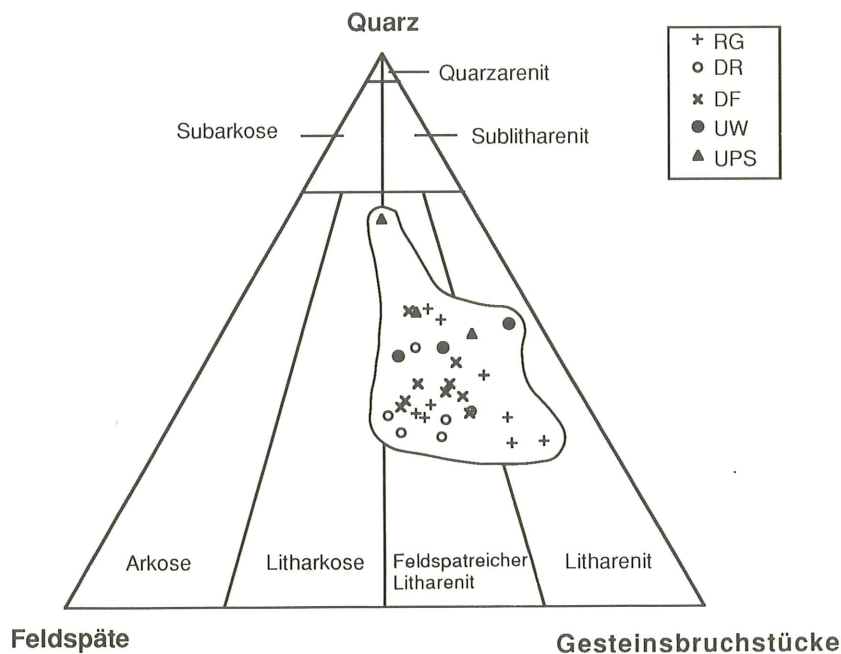


Fig. 6: Petrografische Zusammensetzung der Proben aus den verschiedenen Architektur-Elementen im Dreiecksdiagramm nach FOLK (1974)

Der Anteil der Tonmatrix ist, wie aus der quantitativen Dünnschliff-Analyse hervorgeht, in den Sandsteinen der Rinnengürtel und der Durchbruchsfächer und -rinnen effektiv gering. In den Uferwall- und Schwemmebenen-Sedimenten nimmt echte tonige Matrix in jedem Fall einen beträchtlichen Anteil der Gesteinszusammensetzung ein.

Korngrösse und Sortierung

Die Rinnengürtel-Proben sind überwiegend mittelkörnige (Mittelwert 0.29 mm, vgl. Beil. 10), seltener fein- oder grobkörnige Sandsteine (Fig. 8). Ihre Sortierung ist entweder gut oder mittelgut. Die Proben der Durchbruchsrinnen sind selten Feinsandsteine, hauptsächlich mittelkörnige Sandsteine, aber mit einem kleineren Mittelwert (0.21 mm). Die Sortierung ist häufig gut und demnach generell besser als in den Rinnengürtel-Sandsteinen. Die Sandsteine der Durchbruchsfächer sind feinkörnig und vor allem mittelgut sortiert. Die untersuchten Schwemmebenen- und Uferwall-Gesteine sind schlecht sortierte tonige Grobsilt- bis Feinsandsteine.

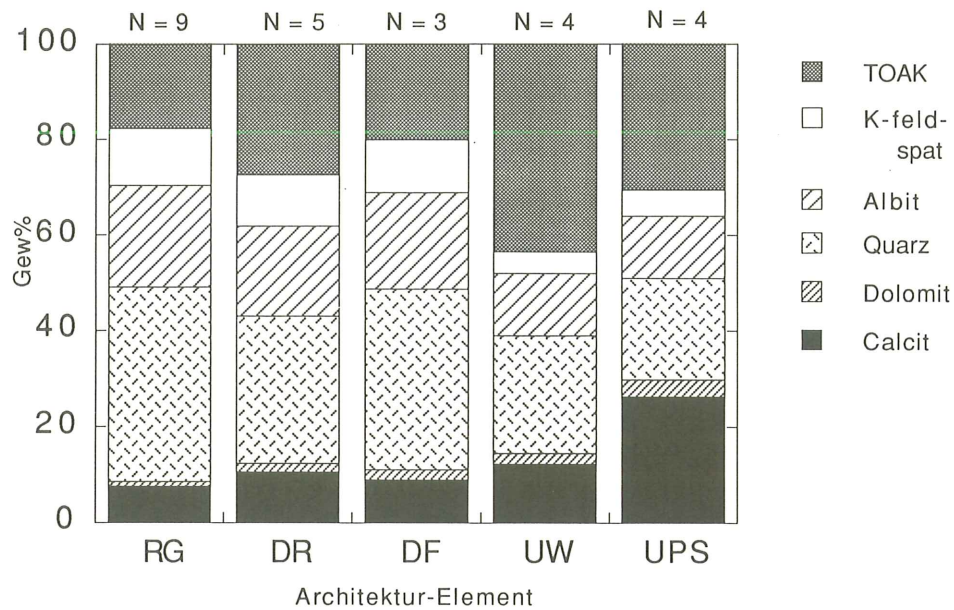


Fig. 7: Mittlere mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen Architektur-Elemente

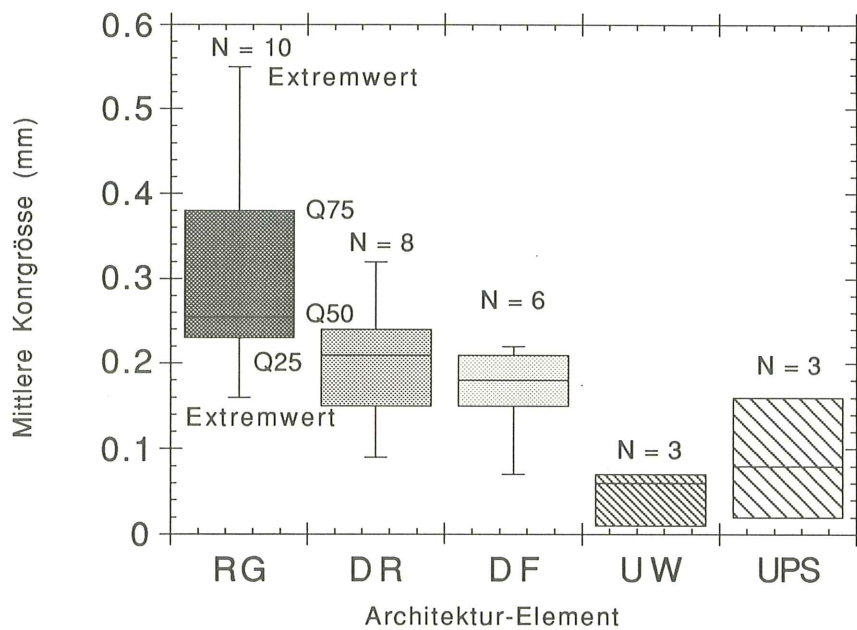


Fig. 8: Abhängigkeit der mittleren Korngrösse von den Architektur-Elementen

Schwermineralien

An 15 überwiegend feinkörnigen Sandsteinen verschiedener Architektur-Elemente wurde das Schwermineral-Spektrum ermittelt (Beil. 12). Alle Proben (74.55 - 121.20 m des oberen Profils) führen überwiegend Epidot. Darunter tritt in einigen Schichten hauptsächlich Apatit auf. Diese Schichten wechseln jedoch mit solchen ab, die ebenfalls überwiegend Epidot enthalten. Diese Vergesellschaftung lässt aufgrund der gängigen Molasse-Schwermineralspektren eine Einordnung vom Übergangsbereich unteres/oberes Chattien bis zum unteren Aquitanien zu, bzw. entspricht einer **Verfingung von Genfersee- mit Thunersee-Schüttung**.

2.2.3 Diagenese

Die mikroskopisch untersuchten Sandsteine sind verschiedenartig und in verschiedenem Ausmass verfestigt, bzw. zementiert. Einige weisen einen vollständig offenen Porenraum auf, viele zeigen eine teilweise Zementation, indem stellenweise ein paar Körner mit Calcit zu Inseln verkittet sind, und einzelne Sandsteine sind fast vollständig mit Calcit zementiert. Neben diesen Proben, wo der Calcitzement den Porenraum eines korngestützten Mosaikes füllt, treten tonige Sandsteine auf, bei denen ursprünglich Tonmatrix zusammen mit den Körnern abgelagert wurde oder durch pedogene Prozesse frühdiagenetisch von der Sedimentoberfläche infiltriert worden ist. Im allgemeinen sind die feinkörnigen besser zementiert als die mittel- und grobkörnigen Sandsteine.

Calcit-Zement

In den korngestützten Sandsteinen erscheint Calcit als intergranulärer, porenfüllender Zement. Bei geringer Zementation verbinden bis 2 mm grosse Calcitkristalle die Mineralkörner und Gesteinsbruchstücke. Bei stärkerer Zementation füllen randlich kleine (10 - 50 μm) und im Zentrum grössere Kristalle die Poren. Einzelne kalkige Gesteinsbruchstücke sind von syntaxialem Zement umgeben. In den tonmatrixhaltigen Proben, wie beispielsweise den Uferwall- und den Überschwemmungsebenen-Gesteinen, kittet mikritischer Calcit die Partikel zusammen. Calcit und Siderit ersetzen in einigen Fällen Feldspatkörner und Gesteinsbruchstücke.

Authigene Tonmineralien

Bei den Dünnschliffanalysen konnte illitischer Ton als weiteres authigenes Mineral neben Calcit, Siderit, Pyrit und Eisenoxide/-hydroxide im Porenraum festgestellt werden. Die Illitfasern sind brückenartig zwischen verschiedenen Körnern oder in Rissen von Komponenten ausgebildet. Sie sind jedoch selten und ihr Beitrag zur Zementation ist gering.

Kompaktion

Viele Mineralkörner- und Gesteinsbruchstücke weisen kleine Risse auf oder sind in einigen Fällen als Folge der Kompaktion während der Diagenese zerbrochen. Stellenweise können auch Drucklösungskontakte zwischen einzelnen Komponenten sowie aufgefächerte Glimmer festgestellt werden.

Lösungsporosität

Die meisten Proben enthalten in der Menge ihrer detritischen Komponenten eine Anzahl Feldspatkörner und Gesteinsbruchstücke, die teilweise gelöst sind. Sie sind vorwiegend in den matrixfreien, untergeordnet auch in matrixführenden Sandsteinen zu finden.

Diagenese-Abfolge

Die gegenseitigen Beziehungen zwischen neugebildeten Mineralphasen und Porenraum lassen folgende Interpretation der Diagenese Geschichte zu:

- Die in den detritischen Komponenten durch Kompaktion entstandenen Risse enthalten z. T. authigenen Ton, d. h. die Kompaktion ist älter als die Tonmineral-Entstehung.
- Calcizementkristalle treten im ehemaligen intergranulären Porenraum auf sowie selten auch in Rissen von Gesteinsbruchstücken. Kein Calcit wurde in den Lösungs-poren innerhalb der Komponenten festgestellt. Doch reicht die Anzahl der beobachteten Lösungs-poren nicht, um eine sichere Altersbeziehung zwischen Calcizementation und Lösung zu bewerkstelligen.
- An den Calcizementkristallen konnten nirgends Lösungsanzeichen, sondern nur glatte Oberflächen erkannt werden, sodass kein Beweis für eine Zementlösung vorliegt. Demzufolge kann die in vielen Proben beträchtliche intergranuläre Porosität nicht durch Lösung entstanden sein, sondern stellt eine primäre Porosität dar.
- **Zusammenfassend** sind die Sandsteine der Bohrung Burgdorf die Produkte einer einfachen Diagenese Geschichte mit Kompaktion und nachfolgender calcitischer Zementation sowie z. T. Lösung von Feldspäten und Gesteinsbruchstücken. Im Vergleich mit den Sandsteinen der Bohrung Langenthal (vgl. Fototafeln Beil. 16 - 19 in KELLER et al. 1990) zeigten sich weniger Lösungs-poren und eine deutlich geringere Zementation.

2.2.4 Porosität und Permeabilität

In diesem Kapitel sollen die Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität, Calcit-zement, Tonmatrix, Kornsortierung und -grösse und Architektur-Elementen aufgezeigt werden.

Die Porositäten wurden auf zwei Arten gemessen (NTB 90-41):

- Im Auftriebsverfahren wird an Probenzylindern die **Gesamtporosität** (absolute Porosität) gemessen, d. h. die Gesamtheit aller Poren, sowohl kommunizierende, als auch abgeschlossene Poren (Beil. 9).
- Bei der quantitativen Dünnschliff-Auswertung (Beil. 10) werden nur die mit blau gefärbtem Epoxiharz gefüllten Poren gezählt, also solche, die miteinander in Verbindung stehen (**offene oder effektive Porosität**).

Dementsprechend sind bei den Burgdorf-Proben die absoluten Porositäten stets höher als die ausgezählten offenen Porositäten (Fig. 9). Übersteigt bei ihnen die Gesamtporosität 15 %, ist auch die offene Porosität mindestens 10 %, d. h. mit zunehmender Gesamtporosität stehen die Poren mehr und mehr miteinander in Verbindung. Wird die Gesamtporosität grösser als 20 %, kommunizieren mindestens 75 % der Poren miteinander, was meistens eine Permeabilität von >1000 md zur Folge hat.

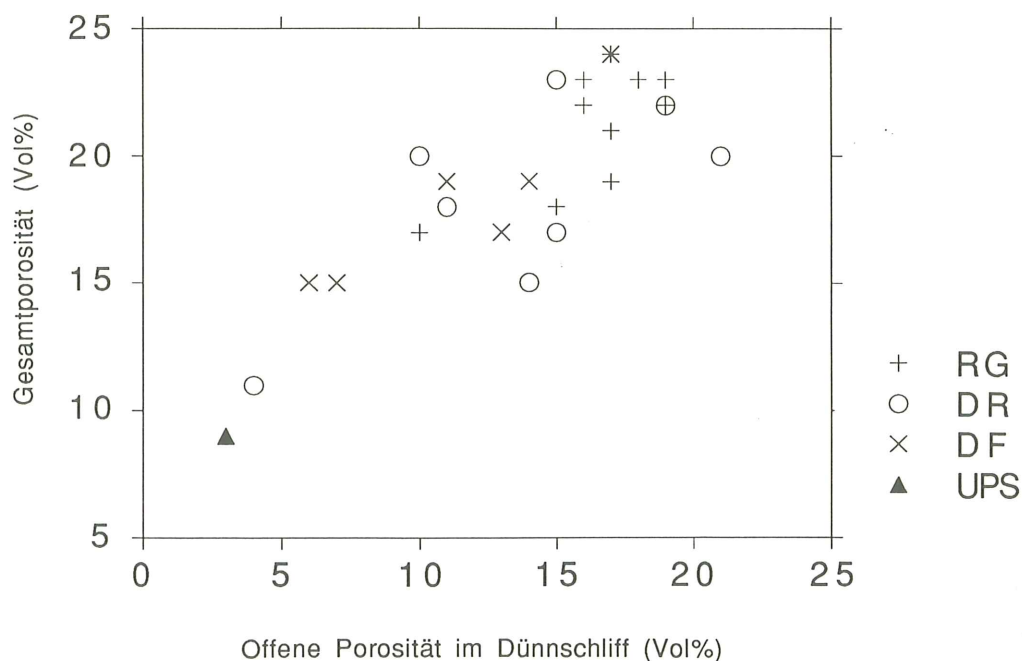


Fig. 9: Vergleich von Gesamtporosität und offener Porosität

Porosität - Calcizement und Tonmatrix

Wie bereits die Untersuchungen der Bohrungen Langenthal (Fig. 40 in KELLER et al. 1990) zeigten, hängen die offene und die absolute Porosität der mehr oder weniger matrixfreien Sandsteine eindeutig vom Ausmass der calcitischen Zementation ab. Enthält eine Probe mehr als 10 % Calcizement, so ist ihre offene Porosität kleiner als 10 %. Diese Tatsache lässt sich bei den Burgdorf-Proben nur indirekt bestätigen. Mit einer Ausnahme enthalten alle Proben weniger als 10 % Calcizement und weisen demzufolge eine offene Porosität auf, die grösser als 10 % ist - wenn sie zudem praktisch keine Tonmatrix enthalten (Fig. 10).

Ein Vergleich der Gesamtporositäten in Proben der 5 Architektur-Elemente zeigt deutliche Unterschiede (Fig. 11). Die Rinnengürtel-Sandsteine weisen durchschnittlich 20.7 % (vgl. Beil. 9), die Sandsteine der Durchbruchsrinnen 20.4 % und diejenigen der Durchbruchsfächer 18.5 % auf, wogegen die Uferwallproben nur 8.2 % und die der Schwemmebene nur 6.4 % aufweisen.

Einen deutlichen Einfluss auf die Porosität übt auch die Tonmatrix aus und zwar in den naturgemäss tonigen oder mergeligen Proben der Architektur-Elemente UW und UPS. Nimmt sie mehr als 10 % ein, sinkt die offene Porosität unter 5 % (Fig. 12).

Aus der Spezifizierung der Porosität in verschiedene Porentypen (Beil. 11) geht klar hervor, dass fast ausnahmslos intergranuläre Poren dominieren. Somit hängt die Porosität in Sandsteinen wie bereits ausgeführt, hauptsächlich vom Grad der Calcit-Zementation des primären Porenraumes ab. Im Gegensatz zu den Langenthal-Proben sind Lösungsporen in Feldspäten und Lithoklasten völlig nebensächlich, aber Risse in Körnern sind in mehreren Proben relativ häufig.

Permeabilität

Die an den Probenzylindern gemessenen Permeabilitäten der Rinnengürtel-Sandsteine variieren zwischen 6 und 5660 md (Mittelwert 1969 md), diejenigen der Durchbruchsrinnen-Proben zwischen 6 und 3084 md (Mittelwert 1017 md) und die der Durchbruchsfächer zwischen 3 und 1310 md (Mittelwert 361 md). Hingegen wies keine der 35 Proben des Uferwalls und der Schwemmebene eine messbare Permeabilität auf (Beil. 9). Das heisst die Durchschnitts- und Extremwerte nehmen vom Rinnengürtel zur Durchbruchsrinne, zum Durchbruchsfächer und zu Uferwall und Schwemmebene sukzessive ab.

Die Abhängigkeit der Permeabilität von der Gesamtporosität wird aus Figur 13 ersichtlich. Oberhalb 15 % nimmt mit zunehmender Porosität die Permeabilität im Durchschnitt zu. Trotzdem können Proben mit gleicher Porosität sehr unterschiedliche Permeabilitäten aufweisen. Zum einen ist die Korngrösse dafür verantwortlich, indem die feinkörnigeren Sandsteine kleinere Poren und weniger offene Durchgänge besitzen. Zum anderen beeinträchtigen auch geringe Tonmatrix-Anteile oder kleine, fleckhaft verteilte Calcizementbereiche die Durchlässigkeit.

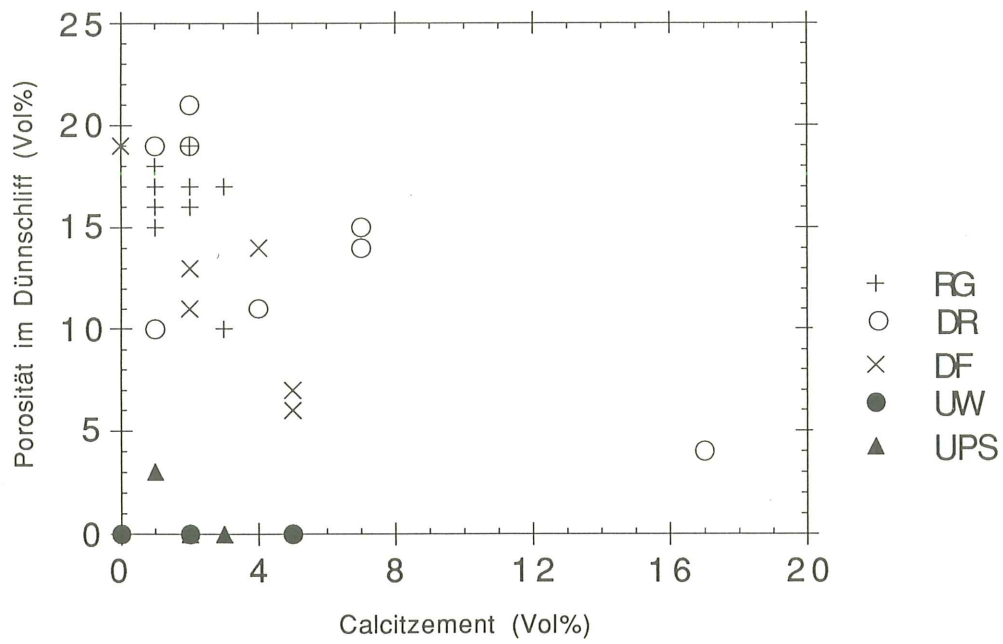


Fig. 10: Abhängigkeit der offenen Porosität vom Gehalt an Calcitzement

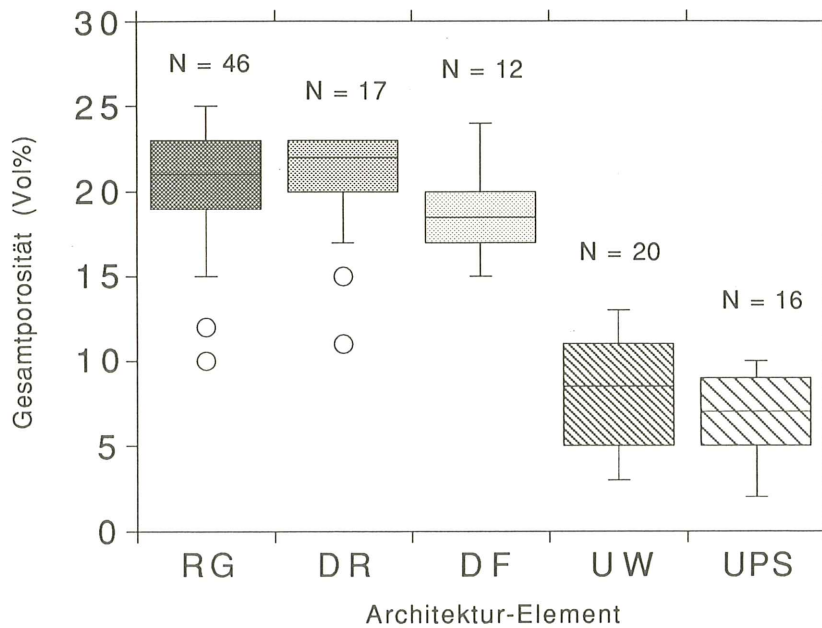


Fig. 11: Abhängigkeit der Gesamtporosität vom Architektur-Element

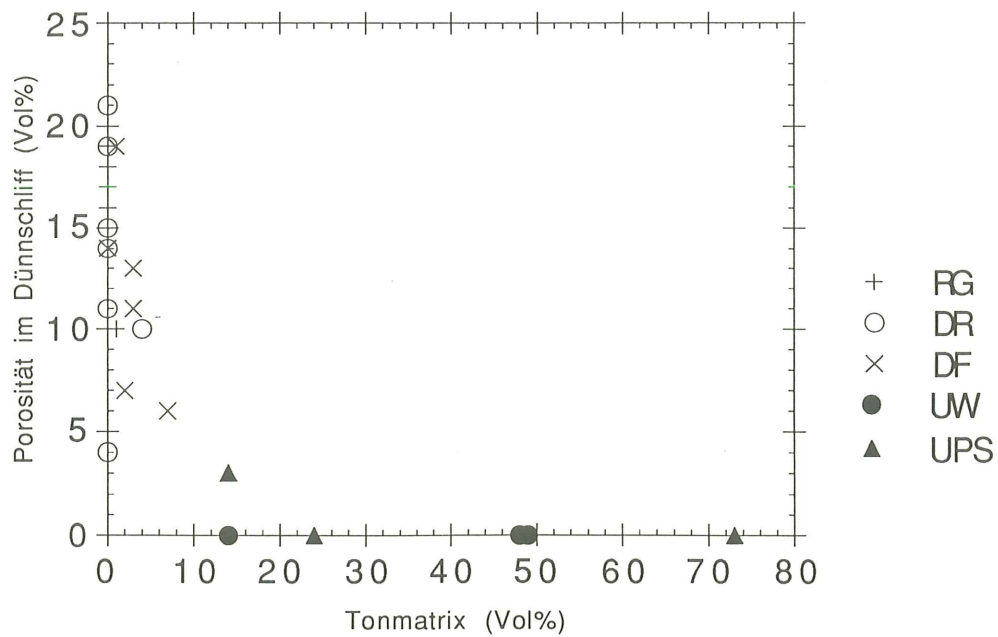


Fig. 12: Abhängigkeit der offenen Porosität vom Tonmatrix-Anteil

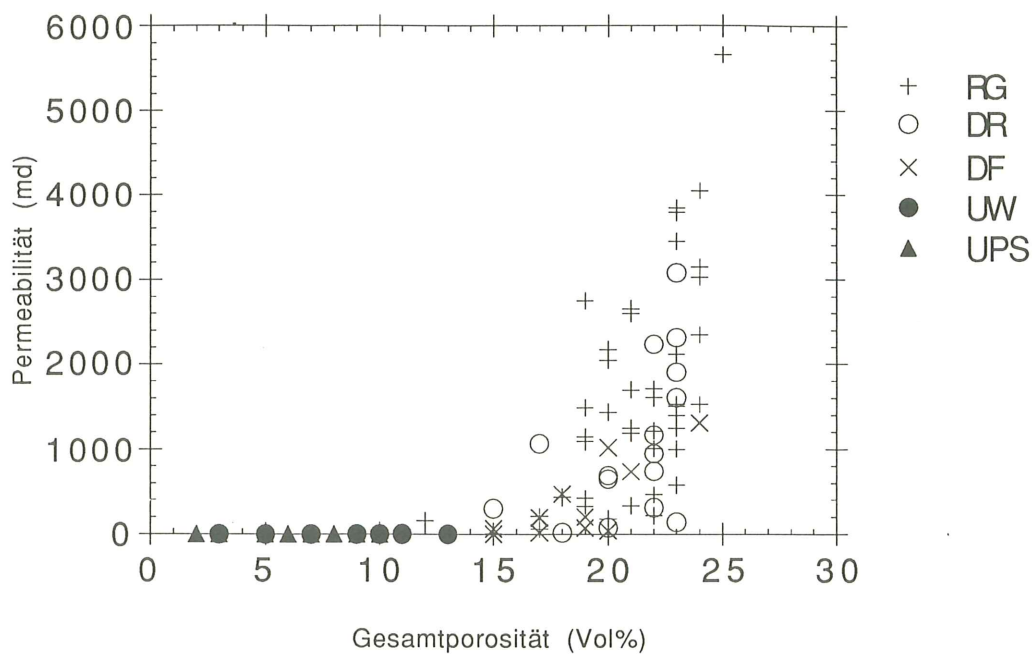


Fig. 13: Abhängigkeit der Permeabilität von der Gesamtporosität (Lithologie: RG, DR, DF = Sandsteine; UW, UPS = tonig, mergelige Silt- bis Feinsandsteine)

2.3 Zusammenfassung: Abhängigkeit der mineralogischen und petrophysikalischen Werte von den Architektur-Elementen

2.3.1 Rinnengürtel (RG)

Insgesamt wurden acht Rinnengürtel-Sedimentkörper von der 2 m mächtigen, einphasigen bis zur 17 m mächtigen, mehrphasigen, komplexeren Rinnenfüllung untersucht. Sie bestehen überwiegend aus mittelkörnigen, selten aus grob- oder feinkörnigen Sandsteinen, die vorherrschend massig, in einigen Fällen rippel- oder planarstrukturiert sind. Meistens liegen sie auf feinkörnigen, tonigen Sedimenten der Schwemmebene oder aber auf Sandsteinen von Durchbruchsfächern oder -rinnen, die jedoch ihrerseits auf tonigen Ablagerungen lagern (Beil. 1). Oben gehen sie in tonige Böden der Schwemmebene oder selten in mergelige Uferwall-Sedimente über.

Mineralogische Zusammensetzung

Die mittlere Zusammensetzung (und Extremwerte) der Sandsteine sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Die Mineralgehalte variieren entsprechend dem Spektrum der verschiedenen Gesteinsbruchstücke. Jedoch sind sie homogener zusammengesetzt als die Langenthal-Proben. Beispielsweise weichen die Extremwerte der Quarz- oder der Albit-Gehalte viel weniger voneinander ab. Der mittlere Calcitgehalt (Calcitcement und kalkige Gesteinsbruchstücke) der Sandsteine beträgt 8 % bei einem Range von 4 - 9 %. Der Calcitcementanteil beträgt minime 1 - 3 %, wobei er in nicht quantitativ ausgezählten Proben um wenige Prozente höher sein kann. Im Gegensatz dazu enthielten die Langenthal-Sandsteine 0.3 - 23.3 % Calcitcement. Demzufolge fällt die mittlere Permeabilität in den Burgdorf-Proben viel höher aus.

	Mittelwert in % n = 9	Extremwerte in %
Quarz	39	31 / 57
Albit	21	15 / 26
Kalifeldspat	12	6 / 17
Calcit	8	4 / 9
Dolomit	1	0 / 3
Tonminerale, Glimmer und Akzessorien	19	7 / 37

Tab. 1: Mineralogische Zusammensetzung der Rinnengürtel-Sandsteine

Porosität und Permeabilität

Obschon der Gehalt an Calcizement nur geringfügig variiert, sind beträchtliche Unterschiede in Porosität und Permeabilität festzustellen (Tab. 2). Verantwortlich dafür sind Differenzen in der Körnigkeit, der Packungsdichte der Körner und dem Calcizement, bei dem bei diesen geringen Mengen kleine Unterschiede viel bedeuten.

	Mittelwert n = 46	Extremwerte
Gesteinsdichte gcm ⁻³	2.09	1.97 / 2.33
Korndichte gcm ⁻³	2.63	2.57 / 2.74
Gesamtporosität %	20.7	10 / 25
Permeabilität md	1969	6 / 5660

Tab. 2: Porosität und Permeabilität der **Rinnengürtel-Sandsteine**

Ein besonders prägnantes Resultat geht aus den Messungen hervor: Die Permeabilitätsverteilung einer jeden Rinnenfüllung ist gleich, ungeachtet der Mächtigkeit der Rinne und der Grösse der Permeabilität. Die Permeabilität ist im mittleren Teil des Rinnenkörpers am grössten und nimmt gegen die Basis und das Dach auf den niedrigsten Wert hin ab (vgl. Fig. 14). Bei mehrphasigen Rinnenfüllungen (z. B. 91.25 - 103.10 m und 109.45 - 116.74 m) zeigt sich zu jeder Sohlfläche hin eine Permeabilitätsverminderung. Bewirkt wird diese Herabsetzung vor allem durch die, wenn in einigen Fällen auch nur geringfügig, bessere Zementation im Kontakt zu den hangenden und liegenden undurchlässigen Schichten.

Unterschiede zu den Rinnengürtel-Proben von Langenthal

Extreme Unterschiede zu den Messresultaten der Langenthal-Proben bestehen im Ausmass der Calcizementation und der davon abhängigen Permeabilität. Die Mittel- und Maximalwerte der Permeabilität sind bei den Proben von Burgdorf ungefähr dreimal höher.

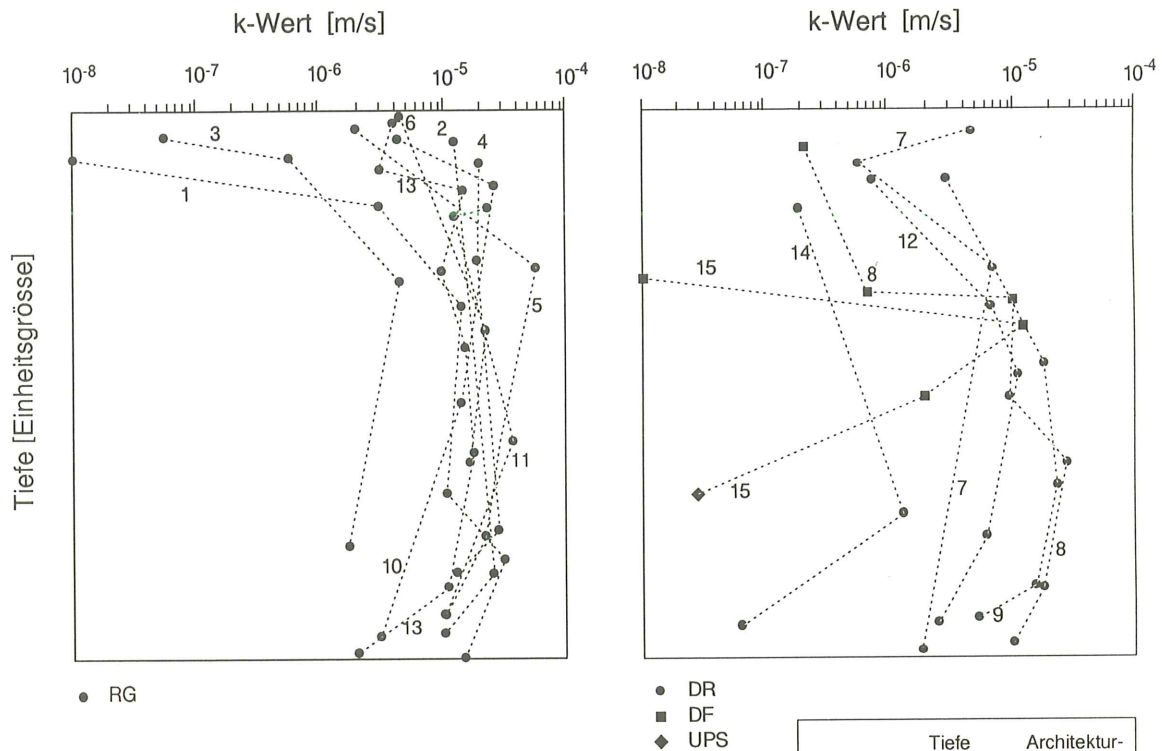


Fig. 14: Permeabilität in Architektur-Elementen (Laborwerte), links in Rinnengürteln, rechts in Durchbruchsrinnen/Durchbruchsfächern. Die einzelnen Sandsteinkörper wurden zum Vergleich in der Vertikalen zu einer Einheitsgrösse gestreckt (= Höhe der Darstellung). Die einzelnen Probenstellen behalten dabei ihre relative Position innerhalb der einzelnen Architektur-Elemente bei.

	Tiefe	Architektur-Element
1	90.5 - 99.2	RG
2	99.2 - 103.2	RG
3	109.3 - 113.0	RG
4	113.0 - 117.5	RG
5	121.0 - 125.5	RG
6	143.3 - 148.0	RG
7	148.0 - 150.0	DF
8	159.3 - 163.0	DR/DF
9	166.1 - 169.3	DR
10	177.7 - 181.9	RG
11	186.3 - 190.6	RG
12	193.5 - 195.7	DR
13	222.6 - 229.0	RG
14	229.0 - 231.6	DR
15	239.9 - 242.7	UPS/DF

2.3.2 Durchbruchsrinnen (DR)

Die Sedimentkörper der Durchbruchsrinnen unterscheiden sich von denen der Rinnengürtel vor allem durch ihre geringere Mächtigkeit von durchschnittlich 2 m. Insgesamt wurden Proben aus vier Rinnen untersucht. Sie bestehen aus Mittelsandsteinen oder selten aus Fein- bis Mittelsandsteinen, die meist Grossrippel- oder planare Schrägschichtung aufweisen. Sie liegen stets auf tonigen Sedimenten der Schwemmebene oder des Uferwalls und werden von Sedimenten irgendeines Architektur-Elementes überlagert.

Mineralogische Zusammensetzung

Die Sandsteine weisen die in Tabelle 3 aufgelisteten mittleren Zusammensetzungen und Extremwerte auf. Im Vergleich mit den Proben des Rinnengürtels fällt der mittlere Tonmineral-Glimmer-Akzessorien-Gehalt auf Kosten des Quarzes höher aus. Höher ist auch der Karbonatgehalt wie auch der Calcit-zement-Anteil, der im Mittel 5 % beträgt (Beil. 10).

	Mittelwert in % n = 5	Extremwerte in %
Quarz	31	26 / 35
Albit	19	15 / 22
Kalifeldspat	11	6 / 16
Calcit	11	9 / 15
Dolomit	2	1 / 3
Tonmineralien, Glimmer und Akzessorien	27	16 / 36

Tab. 3: Mineralogische Zusammensetzung der **Durchbruchsrinnen-Proben**

Porosität und Permeabilität

Obschon im Mittel die Gesamtporosität praktisch gleich und die offene Porosität nur 2 % kleiner ist als bei den Rinnengürtel-Sandsteinen (Tab. 4), verringert sich wegen der stärkeren Zementierung die durchschnittliche Permeabilität um ein Drittel, der Höchstwert fast um die Hälfte.

	Mittelwert n = 17	Extremwerte
Gesteinsdichte gcm ⁻³	2.10	2.02 / 2.38
Korndichte gcm ⁻³	2.64	2.61 / 2.72
Gesamtporosität %	20.4	11 / 23
Permeabilität md	1017	6 / 3084

Tab. 4: Porosität und Permeabilität der **Durchbruchsrinnen-Proben**

Ansonsten existieren wieder beträchtliche Unterschiede bei den einzelnen Porositäts- und Permeabilitätswerten, wobei die tiefen Werte eindeutig von den kalkigen und/oder feinkörnigen Sandsteinen stammen.

Die Permeabilitätsverteilung ist in den Durchbruchsrinnen-Sedimentkörpern gleich wie in den Rinnengürtel-Sequenzen: In der Mitte die höchsten und gegen die Basis und das Dach zu die tiefsten Permeabilitätswerte (Fig. 14).

Wegen der Trennung von Durchbruchsrinne und -fächer in zwei Architektur-Elemente ist ein direkter Vergleich mit den Resultaten der **Langenthal-Proben** nicht möglich.

2.3.3 Durchbruchsfächer (DF)

Die Durchbruchsfächer bilden 2 - 3 m mächtige flächenhafte Sedimentkörper im proximalen Bereich oder 20 - 50 cm mächtige Schichten im distalen Bereich. Die mächtigeren bestehen aus strukturlosen, fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen, die dünneren Bänke aus Feinsandsteinen. Die Durchbruchsfächer liegen überwiegend auf tonigen Sedimenten der Schwemmebene und je einmal auf einem Durchbruchsrinnen- und einem Rinnengürtel-Sandstein. Überlagert werden sie entweder von Uferwall-Ablagerungen oder von pedogenen tonigen Sedimenten sowie bei 148 m und 183 m von einem Sandsteinkörper des Rinnengürtels.

Mineralogische Zusammensetzung

Die drei analysierten Sandsteine (Tab. 5) stammen aus der gleichen Sandsteinbank (241.07, 241.45 und 241.90 m). Mineralogisch variieren sie im wesentlichen nur im Calcitgehalt und im Tonmineralien-Glimmer-Akzessorien-Anteil. Letzterer beruht in der Probe 241.07 m und 241.45 m vor allem auf Gesteinsbruchstücken, wogegen er in der tiefsten Probe effektiv grösstenteils von der Tonmatrix stammt (Beil. 10 und 8). Auch der Calcizementgehalt nimmt von der obersten zur tiefsten Probe zu.

	Mittelwert in % n = 3	Extremwerte in %
Quarz	38	36 / 40
Albit	20	18 / 23
Kalifeldspat	11	9 / 13
Calcit	9	1 / 16
Dolomit	2	1 / 3
Tonmineralien, Glimmer und Akzessorien	20	10 / 29

Tab. 5: Mineralogische Zusammensetzung der **Durchbruchsfächer-Proben**

Porosität und Permeabilität

Entsprechend verschieden sind auch die Porositäts- und Permeabilitätswerte dieser drei Proben (Tab. 6). Von der obersten bis zur tiefsten Probe dieser einen Bank nimmt die Gesamtporosität von 24 auf 15 %, die der offenen Porosität von 19 auf 6 % und demzufolge die Permeabilität von 1310 auf 3 md ab. Verantwortlich für diese Werte ist die Korngrößenabnahme innerhalb der Bank, die invers gradiert ist. Der durchlässige obere, schlecht zementierte Sandstein ist mittelkörnig. Zuunterst liegt ein zementierter tonmatrixführender Grobsilt- bis Feinsandstein, der nur schwach permeabel ist.

	Mittelwert n = 12	Extremwerte
Gesteinsdichte gcm ⁻³	2.16	1.97 / 2.30
Korndichte gcm ⁻³	2.65	2.60 / 2.72
Gesamtporosität %	18.5	15 / 24
Permeabilität md	361	3 / 1310

Tab. 6: Porosität und Permeabilität der **Durchbruchsfächer-Proben**

Währenddem der Mittelwert der Gesamtporosität und derjenige der offenen Porosität aller Durchbruchsfächerproben gegenüber den Rinnen um weitere ca. 2 % tiefer liegt, geht die durchschnittliche Permeabilität der Proben von 1017 md bei den Durchbruchsrinnen auf 361 md bei Durchbruchsfächern zurück. Dies ist begründet durch die kleineren Poren in den feinkörnigeren Sandsteinen und die zugleich höheren Zement- und Matrixanteile.

Unterschiede zu den Proben aus Durchbruchsfächern und -rinnen von Langenthal

Was sich bei den Rinnengürtel-Proben zeigt, gilt auch für diese Proben: Sie weisen im Gegensatz zu denen von Langenthal durchschnittlich weniger Calcizement und weniger Tonmatrix auf und demzufolge merklich höhere Porositäten und Permeabilitäten.

2.3.4 Uferwälle (UW)

Aus 9 verschiedenen Abfolgen von Uferwallsedimenten wurden 20 Proben, überwiegend mergelige Grobsilt- bis Feinsandsteine, seltener Mergel, Silt- oder Feinsandsteine, petrophysikalisch untersucht. Die meisten zeigen Kleinrippelschichtung, teilweise mit Kletterrippeln oder Entwässerungsstrukturen. Die geringmächtigen (20 - 50 cm), oft repetierten Bänke sind überwiegend in tonige oder mergelige Sedimente der Schwemmebene eingeschaltet oder folgen auf Mittelsandsteine von Rinnenkörpern.

Mineralogische Zusammensetzung

Die Uferwall-Proben unterscheiden sich wesentlich von den bis jetzt beschriebenen Sandsteinen, indem sie aus einem matrixgestützten und nicht aus einem porösen, mehr oder weniger zementierten, korngestützten Komponentenverband bestehen. Dementsprechend sind die Quarz- und Feldspatgehalte deutlich niedriger (Tab. 7), wogegen sparitischer und mikritischer Calcizement, vor allem aber der Tonmineralien- und Glimmer-Anteil erheblich höher ausfallen.

	Mittelwert in % n = 4	Extremwerte in %
Quarz	25	18 / 33
Albit	13	11 / 17
Kalifeldspat	5	1 / 9
Calcit	12	9 / 18
Dolomit	2	1 / 4
Tonmineralien, Glimmer, und Akzessorien	44	29 / 59

Tab. 7: Mineralogische Zusammensetzung der **Uferwall-Proben**

Porosität und Permeabilität

Die gemessene Gesamtporosität ist im allgemeinen gering (Tab. 8). Sie beruht auf sehr kleinen Poren, die bei den normalen quantitativen Dünnschliffanalysen nicht festgestellt werden können. Zudem wies keine der Proben eine messbare Permeabilität auf.

	Mittelwert n = 20	Extremwerte
Gesteinsdichte gcm ⁻³	2.43	2.28 / 2.61
Korndichte gcm ⁻³	2.65	2.59 / 2.70
Gesamtporosität %	8.2	3 / 13
Permeabilität md	0	0 / 0

Tab. 8: Porosität und Permeabilität der **Uferwall-Proben**

Unterschiede zu den Uferwall-Proben von Langenthal

Die Proben von Burgdorf weisen ein anderes Calcit/Tonmineralverhältnis, d. h. weniger Calcit und mehr Tonmatrix auf, was jedoch keinen Einfluss auf Porosität und Permeabilität hat, denn die mittlere Gesamtporosität der Langenthal-Proben beträgt ebenfalls 8 % und die Permeabilität lag unterhalb der Messgrenze.

2.3.5 Überschwemmungsebenen, Paläoböden und Sümpfe (UPS)

Generell verzahnen sich in der Überschwemmungsebene fein- und feinstkörnige Ablagerungen, die nach der Sedimentation vielfältigen pedogenetischen Prozessen ausgesetzt sind. Der gleichen diagenetischen Entwicklung unterliegen jedoch auch die, in die Pedogenese einbezogenen obersten Abschnitte der bereits beschriebenen Elemente, d. h. neben siltigen Mergeln gehören auch tonige oder mergelige Mittelsandsteine zu den Schwemmebenen-Sedimenten. Entsprechend vielfältig sind die Lithologien der 16 untersuchten Proben (Beil. 7).

Mineralogische Zusammensetzung

Allen Proben gemeinsam ist ein relativ hoher Tonmatrix- und Calcitgehalt, die im Mittel zusammen 59 % betragen (Tab. 9). Jedoch variiert der Calcitanteil beträchtlich, was auf Unterschieden in der pedogenetischen Kalkanreicherung (Calicheknollen) beruht.

	Mittelwert in % n = 4	Extremwerte in %
Quarz	21	18 / 26
Albit	13	11 / 14
Kalifeldspat	6	3 / 8
Calcit	26	13 / 43
Dolomit	4	2 / 8
Tonminerale, Glimmer, und Akzessorien	33	21 / 38

Tab. 9: Mineralogische Zusammensetzung der **Schwemmebenen-Proben**

Porosität und Permeabilität (Tab. 2.10)

Die Sedimentproben der Schwemmebene besitzen Porositäten zwischen 2 und 10 % (Beil. 9). Keine der 16 Proben wies eine messbare Permeabilität auf.

	Mittelwert n = 16	Extremwerte
Gesteinsdichte gcm ⁻³	2.49	2.41 / 2.60
Korndichte gcm ⁻³	2.66	2.60 / 2.71
Gesamtporosität %	6.4	2 / 10
Permeabilität md	0	0 / 0

Tab. 10: Porosität und Permeabilität der **Schwemmebenen-Proben**

2.3.6 Zusammenfassung, Porosität und Permeabilität der Architektur-Elemente

Das 212 m mächtige USM-Profil der Bohrung M 1400 zeichnet sich durch einen wiederholten Wechsel von 1 - 17 m mächtigen Sandsteinkörpern aus Rinnengürteln, Durchbruchrinnen und -fächern mit bis 15 m mächtigen, vorwiegend mergeligen Abschnitten aus Uferwall- und Schwemmebenen-Sedimenten aus.

Die Sandsteinkörper sind heterogen strukturiert und nicht homogene Gebilde. Das äussert sich in sehr unterschiedlichen Porositäten und Permeabilitäten innerhalb eines Körpers, aber auch von einem zum anderen. Die absoluten Porositäten aller Sandsteinproben der drei Sandstein-Architektur-Elemente variieren von 10 - 25 %, die offenen Porositäten von 4 - 21 % und die Permeabilitäten von 3 - 5660 md. Verursacht werden die verschiedenen Werte durch unterschiedliche Sortierung, Korngrösse und Porengrösse, Kompaktion, Anteil an Calcizement und Tonmatrix. Trotz der verschiedenen Werte weisen alle Rinnengürtel- und Durchbruchsrinnen-Sandsteinkörper, ungeachtet deren Mächtigkeit, eine gleichartige Permeabilitätsverteilung auf: nämlich Höchstwerte im mittleren Bereich, sowie oben und unten bis um ca. 1 Grössenordnung niedrigere Werte (Fig. 14). Die durchlässigen Sandsteinabschnitte werden stets von mergeligen Schichten begrenzt, die nur geringe Porositäten und keine messbare Permeabilität aufweisen.

3 HYDROGEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

3.1 Lugeon-Versuche (M 2200) und hydraulische Beobachtungen während der Bohrphase (M 1400)

Die 250 m tiefe Bohrung M 1400 des Erdsondenfeldes Burgdorf (vgl. Fig. 4) durchteuft 38 m Quartär und darunter eine horizontal liegende Schichtabfolge der Unteren Süßwassermolasse. Die Untere Süßwassermolasse besteht hier aus einer Wechsellagerung von Sandstein-, Siltstein- und Mergellagen unterschiedlicher Mächtigkeit, welche lateral gut korrelierbar sind (s. Kap. 5).

Die Bohrung M 1400 ist wie ihre benachbarten Bohrungen nur beschränkt standfest und zeigte nach einer ersten Bohrphase (150 m) schon mehrere substantielle Bohrlochrandausbrüche (vgl. Kaliber-Log der Fig. 15). Diese Verhältnisse hatten zur Folge, dass die in der benachbarten Bohrung M 2200 durchgeführten Lugeon-Tests aufgrund von Packer-Umläufigkeiten kaum quantitativ auswertbar sind. Eine Zusammenstellung der Resultate der besseren Testabschnitte (mit geringen Packer-Umläufigkeiten) zeigt Tabelle 11. Bei der Interpretation der hydraulischen Durchlässigkeiten dieser Tabelle

Tiefe Test-Intervall (m ab OKT ¹⁾)	Gemessene Lugeon-Einheiten	Hydraulische Durchlässigkeit (m/s)
105 - 110	6.4	9.6 E-07
110 - 115	12	1.8 E-06
115 - 120	11	1.65 E-06
120 - 125	6	9 E-07
125 - 130	7	1.0 E-06
130 - 135	6	9 E-07
135 - 140	7.6	1.14 E-06
140 - 145	(0.1)	(1.5 E-08)
145 - 150	2.8	4.2 E-07
149 - 154	2.4	3.6 E-07
155 - 160	(0.006)	(9 E-10)
160 - 165	1	1.5 E-07
170 - 175	1.8	2.7 E-07
179 - 202	(0.052)	(7.8 E-09)

Tab. 11: Resultate der auswertbaren Lugeon-Tests in der Bohrung M 2200.
1): OKT = 563.3 m ü. M.

ist zu berücksichtigen, dass auch für gute Testabschnitte die **Lugeon-Durchlässigkeiten mit grossen Fehlern behaftet** sind. Diese grossen Unsicherheiten beruhen darauf, dass das transiente Fliess- und Druckverhalten während eines Lugeon-Versuchs unberücksichtigt bleibt, und dass darum die hydraulische Interpretation dieser (geotechnischen) Versuche auf stark vereinfachenden hydrogeologischen Annahmen beruhen muss.

Eine **Lugeon-Einheit** entspricht der während 10 Minuten unter einem Differentialdruck von 10 bar injizierten Wassermenge pro Bohrmeter in l/min. Für die Auswertung der Lugeon-Versuche wurde von der Annahme ausgegangen, dass eine solche Einheit bei kleinen Lugeon-Werten (1 - 50) ungefähr einem K-Wert von $1.0 - 2.0 \cdot 10^{-7}$ m/s entspricht (DE MARSILY 1986).

Die Lugeon-Versuche des Bereiches 55 - 81 m der Bohrung (M 2200) sind nicht auswertbar, da in diesem Intervall die Bohrung stark "ausgeschlagen" wurde und keine dichten Packersitze gefunden werden konnten. Der Bereich 81 - 105 m wurde nicht getestet, da dieser aus Stabilitätsgründen während der Bohrphase zementiert werden musste.

In einer Distanz von je etwa 10 m zur Bohrung M 1400 befinden sich die 200 m tiefen Energiesonden-Bohrungen E 2100 und E 2200. Diese Bohrungen sind nahezu über die gesamte Strecke mit grobem Kies verfüllt (Ausnahme: E 2200 nicht mit Kies verfüllt von 39.5 - 45.5 m u. T.) und schliessen demzufolge alle Aquifere kurz. Obwohl diese Bohrungen vor dem Bohren von M 1400 abgeteuft und verfiltert wurden, konnten vom Bohrmeister **während des Abteufens der Testbohrung M 1400 stark unterschiedliche Wasserspiegel gemessen** werden. Diese Messungen wurden allmorgendlich mittels Lichtlot im Bohrgestänge durchgeführt. Da das Bohrgestänge über Nacht jeweils aus Sicherheitsgründen zurückgezogen wurde (i. a. auf 12 m über Bohrsohle) und gegenüber der Formation schnell abdichtete, entsprechen die Niveaus dieser Lichtlotmessungen in etwa Piezometer-ähnlichen Standrohrspiegelhöhen unterschiedlicher Bohrabschnitte. Dies gilt so lange, als die Durchlässigkeiten der Testintervalle nicht allzu klein sind (s. Kap. 3.4) und sich über Nacht wirkliche Gleichgewichte einstellen. Die entsprechenden Messdaten sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Aus Tabelle 12 geht klar ein sinkender Wasserspiegel mit zunehmender Bohrlochtiefe hervor. Bei einer Bohrteufe von 150 - 250 m konnte im **offenen** Bohrloch (inklusive Verrohrung bis 41.5 m unter OKT) unter statischen Bedingungen ein relativ konstanter Wasserspiegel im Bereich von 36 - 37 m ab OKT gemessen werden, welcher auch in etwa demjenigen in den Bohrungen E 2100 und E 2200 entspricht.

Diese Beobachtungen implizieren, dass (i) die Strecke bis 150 m ab OKT aufgrund einer relativ hohen Transmissivität den Gesamtwasserspiegel in der offenen Bohrung kontrolliert, und dass (ii) die lateralen Durchlässigkeiten unterhalb 150 m ab OKT relativ schlecht sind (kein starker Einfluss des Wasserspiegels der Bohrungen E 2100 und E 2200).

Messdatum	Messzeit	Bohrtiefe (m ab OKT ¹⁾)	Wasserspiegel (m ab OKT)
31.5. - 10.6.91		15.0 - 120.0	35.57 - 36.83
11.6.91	07:30	126.00	37.44
12.6.91	07:30	141.20	36.89
14.6.91	12:00	150.10	37.02
17.6.91	12:05	156.10	43.14
18.6.91	07:15	165.10	44.56
19.6.91	07:20	177.60	41.95
20.6.91	07:30	188.60	40.66
21.6.91	07:30	200.60	42.11
22.6.91	07:55	215.60	41.61
24.6.91	13:00	221.60	42.24
25.6.91	07:15	227.60	46.12
26.6.91	07:15	239.05	47.71
27.6.91	06:20	251.12	47.71

Tab. 12: Abstichmessungen im **Bohrgestänge** während der Bohrphase (Bohrung M 1400), vgl. Erläuterungen im Text
1): OKT = 563.3 m ü. M.

3.2 Fluid-Logging in der Bohrung M 1400

3.2.1 Zielsetzung der Untersuchungen

Das Ziel der zusätzlichen hydrogeologischen Felduntersuchungen in der Bohrung M 1400 bestand nun darin, mit einer möglichst effizienten Methodik die durchbohrte Abfolge der USM hydrogeologisch zu charakterisieren. Hierbei war nicht nur die Gesamtdurchlässigkeit dieser Formation von Interesse, sondern speziell auch die **räumliche Verteilung der einzelnen wasserleitenden Schichten mit ihren spezifischen hydrogeologischen Eigenschaften** (hydraulische Durchlässigkeiten, hydraulische Potentiale, laterale Heterogenität und Ausdehnung), da diese für den Transport von Schadstoffen ausschlaggebend sind. Da solche Fliesspfade mit Packerversuchen nur schwer oder mit grossem Aufwand lokalisierbar und quantifizierbar sind, sollten in der Bohrung M 1400 sogenannte "Fluid-Logging" Methoden auf ihre Einsatzbarkeit in der USM hin angewendet und ausgetestet werden. Diese Methoden werden im Abschnitt 3.3.2 kurz beschrieben.

Da es bei den Versuchen von Burgdorf primär um methodische Fragestellungen ging, wurde die quantitative Auswertung der Fluid-Logging-Daten nur mit beschränktem Aufwand durchgeführt. Die hier vorgestellten hydrogeologischen Parameter entsprechen einer Grobauswertung ("Quick-Look-Auswertung"), wie sie standardmässig in den Feldberichten der Nagra zur Anwendung kommt und nicht einer verfeinerten Detail-Auswertung. Der Fehlerbereich in den Transmissivitätswerten bei Fluid-Logging-Grob-auswertungen liegt für Formationen wie der USM bei etwa einer halben Grössenordnung. Bei einer Detail-Auswertung können (quantifizierbare) Fehler von kleiner als einem Faktor 2 erreicht werden. Diese Fehler entsprechen denjenigen aus Packer-Versuchen.

Nahezu alle bisherigen Untersuchungen mittels Fluid-Logging-Methoden (vgl. Abschn. 3.3.2) beziehen sich auf Kluft-Grundwasserleiter. **Da bisher kaum Erfahrungen mit Leitfähigkeits-Logging in porösen Grundwasserleitern bestanden, sollte die Anwendbarkeit dieses Testverfahrens in der USM von Burgdorf exemplarisch ausgetestet werden.**

Die beiden in der Bohrung M 1400 eingesetzten Fluid-Logging-Methoden wurden aus sicherheitstechnischen Überlegungen (Bohrlochstabilität) während unterschiedlicher Bohrstände durchgeführt. Während das Packer-Flowmeter am 13.6.1991 bei einer Bohrteufe von 150 m eingesetzt wurde, kam das dynamische Leitfähigkeits-Logging am 27. und 28.6.1991 bei der Schlussteufe von 251 m zum Einsatz. Eine detaillierte Beschreibung der Testbedingungen des Packer-Flowmeter- und Leitfähigkeits-Logging findet sich in Feldberichten (LAVANCHY 1991, LÖW 1991).

3.2.2 Übersicht der Fluid-Logging-Methoden (Packer-Flowmeter-Logging, Leitfähigkeits-Logging)

Der **Begriff "Fluid-Logging"** umfasst in seinem klassischen Sinn alle Logging-Methoden, die durch Messung physikalischer oder dynamischer Parameter der Bohrloch-Flüssigkeit Rückschlüsse auf die Lage von Wasserfliesswegen erlauben. Die gemessenen Fluid-Parameter umfassen entweder direkte Messungen der Fliessraten im Bohrloch mit Flowmeter-Sonden oder die Messung der elektrischen Leitfähigkeit und Temperatur der Bohrlochflüssigkeit mit Leitfähigkeits- und Temperatur-Sonden. Solche Logs werden seit langem in hydrogeologischen und erdölgeologischen (hier unter dem Begriff "production logging") Untersuchungen gefahren und stellen in dieser Art nichts Neues dar.

Das **Prinzip des Packer-Flowmeter-Logging** besteht darin, die im Bohrloch herrschenden vertikalen Fliessraten in verschiedenen Teufen möglichst präzise zu bestimmen und aus der Differenz dieser Fliessraten durchlässige Zonen zu lokalisieren und zu quantifizieren. Bei der Entwicklung des Packer-Flowmeters stand im Vordergrund, die Ansprechschwelle des Gerätes weiter herabzusetzen und die Abhängigkeit der Flussmessung vom Bohrlochdurchmesser zu eliminieren. Prinzipiell besteht das Gerät

aus einem Propeller-Flowmeter und einem Packer mit zylindrischem Innenrohr. Setzt man den Packer, so isoliert man nicht wie im klassischen Packer-Versuch ein Testintervall, sondern zwingt den gesamten Fluss durch dieses Innenrohr mit kleinem Durchmesser. Auf diese Art reduziert man die Ansprechschwelle des Gerätes auf etwa 0.2 - 0.3 l/min.

Das **Prinzip des (dynamischen) Leitfähigkeits-Logging** besteht darin, die Bohrung mit einer Flüssigkeit zu spülen, die eine andere Leitfähigkeit hat als das Formationswasser und anschliessend unter dynamischen Bedingungen (d. h. unter Pumpbetrieb) zu verschiedenen Zeiten Leitfähigkeits-Profile der Bohrlochflüssigkeit über die gesamte Bohrstrecke zu messen. Die sich an Zuflussstellen ausbildenden Leitfähigkeits-Peaks werden anschliessend bezüglich der volumetrischen Zuflussraten und der Formationswasser-Leitfähigkeit quantitativ ausgewertet (s. u.).

Da Packer-Flowmeter- und Leitfähigkeits-Sonden verschiedene Empfindlichkeiten bezüglich der messbaren Fliessraten im Bohrloch haben, ergänzen sich die beiden Fluid-Logging-Methoden gegenseitig und ermöglichen so, einzelne Zuflussstellen im Bereich einer Transmissivität von 10^{-3} bis 10^{-10} m²/s zu testen. In Burgdorf wurden sowohl die Packer-Flowmeter-Methode, wie die dynamische Leitfähigkeits-Methode eingesetzt.

Seit längerer Zeit arbeiten verschiedene Institutionen an der qualitativen und quantitativen **Weiterentwicklung der Fluid-Logging Methoden**. So wurden verschiedene hochauflösende Flowmeter-Sonden (HESS 1986, YOUNG & WALDROP 1989) und neue Auswertverfahren (HUFSCHMIED 1983, PAILLET et al. 1987, REHFELDT et al. 1989, SCHELLSCHMIDT & HAENEL 1987) entwickelt, die nicht nur eine exakte Lokalisierung von Fliesswegen in gering durchlässigen Formationen, sondern auch eine Quantifizierung der hydraulischen Parameter (Transmissivität, hydraulisches Potential) dieser Fliesswege erlauben (unvollständige Review in TAYLOR et al. 1990).

Seit mehreren Jahren arbeitet auch die Nagra mit ihren Kontraktoren und Partnern erfolgreich an einer Weiterentwicklung der Fluid-Logging-Methoden, da diese eine effektive und kostengünstige Alternative zu in Serie durchgeführten Packertests darstellen. Neben der Weiterentwicklung von hochauflösenden Packer-Flowmetern (BLÜMLING & HUFSCHMIED 1989) wurden im Rahmen von NAGRA-Arbeiten insbesondere auch grosse Fortschritte in der Durchführung und quantitativen Auswertung von elektrischen Leitfähigkeits-Logs erzielt (TSANG & HUFSCHMIED 1988, LÖW et al. 1991).

Packer-Flowmeter- und Leitfähigkeits-Logging wurde in verschiedenen Seicht- und Tiefbohrungen der Nagra während der letzten 5 Jahre sowohl testmässig wie operationell eingesetzt. Aus systematischen Vergleichen mit unabhängigen Packertest-Resultaten konnte gezeigt werden, dass die mit beiden Methoden bestimmten Kluft-Transmissivitäten im Bereich bis $1E^{-9}$ m²/s sehr gut übereinstimmen (TSANG et al. 1990, KELLEY et al. 1991). In einem 100 m langen "synthetischen Bohrloch" (Stahlrohr mit Zuflussstellen) im Felslabor Grimsel wurde das Leitfähigkeits-Logging unter kontrollierten Bedingungen und unterschiedlichen Spülungsflüssigkeiten (Salz-

wasser, Bohrschlamm) ausgetestet (BLÜMLING 1990). Andere im Felslabor Grimsel durchgeführten Pilotversuche zeigen zudem, dass das Leitfähigkeits-Logging auch erfolgreich zur Charakterisierung von Kluft-Netzwerken eingesetzt werden kann (KELLEY & LÖW 1992). Aufgrund all dieser Resultate wird zur Zeit dieses Verfahren, ebenfalls mit guten Resultaten, systematisch für die Standortuntersuchungen der Nagra am Wellenberg eingesetzt (GUYONNET et al. 1992).

Die Fluid-Logging-Methodik wird in zunehmendem Masse auch für Standortuntersuchungen nicht-radioaktiver Deponien in der Schweiz und in Deutschland (z.B. GUYONNET & LÖW 1991, HECKEL 1990) und wissenschaftlicher Untersuchungen (KTB-Bohrung: REIFENSTAHL & STÖBER 1989) eingesetzt.

3.2.3 Packer-Flowmeter-Logging in M 1400

3.2.3.1 Test-Bedingungen

Während beider Testphasen waren die obersten 41.5 m (Quartär) mit einem doppelten Casing ausgerüstet. Aufgrund von Kaliber- und Flowmeter-Messungen (s. u.) kann geschlossen werden, dass das innere Plastik-Casing schon während der ersten Testperiode defekt war. Im Gegensatz zu möglichen Undichtigkeiten des äusseren Stahl-Casings (unzementiert) haben diese Leckagen jedoch keinen Einfluss auf die Bestimmung der hydraulischen Formationsparameter.

Vor der Durchführung des Packer-Flowmeter-Logging wurde die Bohrung mit Frischwasser klargespült und zur Planung der Packersitze sowohl ein Salinitäts-/Temperatur-Log wie ein Kaliber-Log gefahren (Fig. 15). Diese Figur zeigt klar den Defekt im inneren Casing und die Existenz von substantiellen Bohrlochrand-Ausbrüchen (41.5 - 52 m, 63 - 68 m, 84 m, 138 - 141 m ab OKT). Da sich diese Ausbrüche in den Temperatur- aber nicht in den Leitfähigkeits-Logs widerspiegeln, geben diese Logs einen Hinweis darauf, dass in "ungepumptem Zustand" keine starken vertikalen Flüsse innerhalb des Bohrintervalls 41.5 - 150 m auftreten.

Die Flowmeter-Messungen wurden sowohl im Ruhezustand (**Run 1: ohne Injektion**) wie **unter kontinuierlicher Injektion (Run 2)** durchgeführt. Aufgrund der geologischen Kernaufnahme und des Kaliber-Logs wurden 8 Messstationen im unverrohrten Bohrlochabschnitt festgelegt.

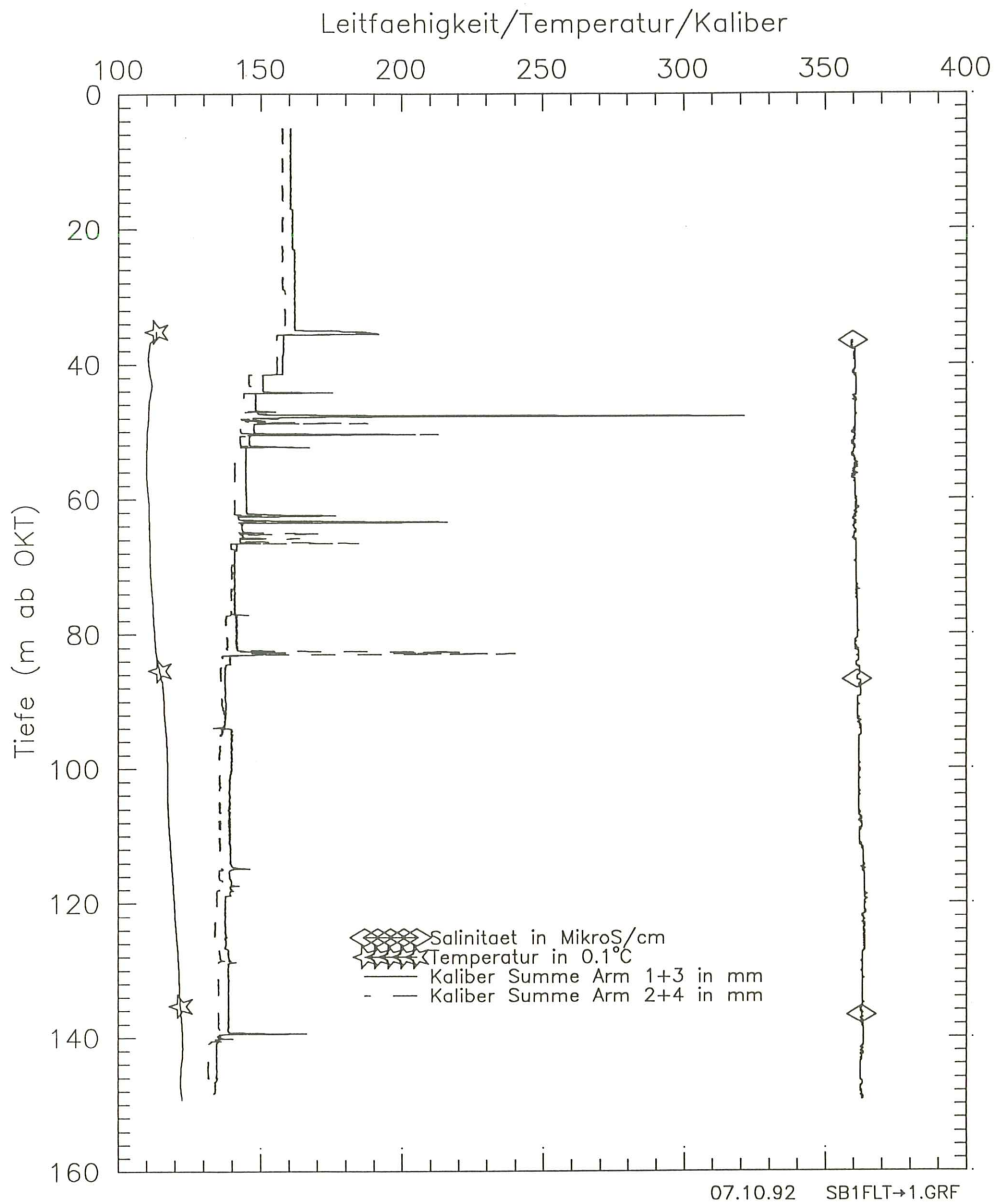


Fig. 15: Packer-Flowmeter-Logging: Elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und Kaliber (statische Messung vor Injektion)

3.2.3.2 Messdaten des Packer-Flowmeter-Versuchs

Messstationen, Messzeiten und gemittelte Messresultate beider Flowmeter-Runs sind in Tabelle 13 und Figur 17 zusammengestellt. Die Propeller-Umdrehungen (pro Sekunde) entsprechen gemittelten Werten während einer Messdauer von ca. 200 s in einer Messposition; die Bohrloch-Flüsse Q_i wurden anhand dieser Rohdaten und einer Gerätekalibration ermittelt.

Alle 4 ersten Überblicks-Messungen des **Runs 1** (Ruhezustand) ergaben keine messbaren Fließraten. Darum wurden nicht alle 8 Messstationen im unverrohrten Bohrlochabschnitt während dieser Testphase erfasst. Die Daten des Runs 1 belegen, dass im Ruhezustand keine starken vertikalen Flüsse innerhalb des Bohrabschnitts 41.5 bis 150 m auftreten.

Run 2 hatte zum Ziel, die Verteilung der Abflüsse aus dem Bohrloch ins Gestein unter einer maximal möglichen Injektionsrate innerhalb der Kalibrationsbreite des Packer-Flowmeters (0 - 80 l/min) zu bestimmen. Die anfängliche Injektionsrate von 52 l/min musste nach 2 Stunden auf 32 l/min reduziert werden, da der Wasserspiegel bis OKT angestiegen und das Wasser dann aus dem Bohrlochmund ausgetreten wäre. Die mittels Druckaufnehmer, respektive Flowmeter bestimmten Wasserspiegel im Bohrloch und Injektionsraten sind in Figur 16 dargestellt. Rund 1 Stunde nach Beginn der Injektion von 32 l/min wurden die Flowmeter-Messungen bei einem annähernd stabilen

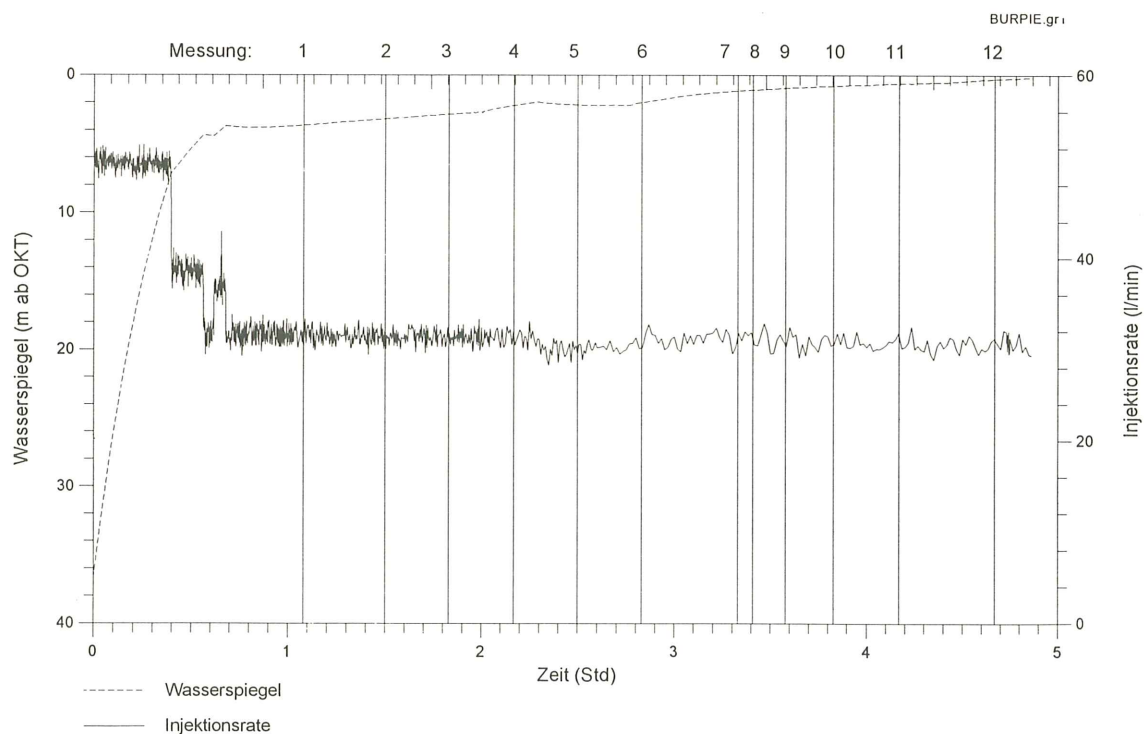


Fig. 16: Packer-Flowmeter-Logging: Wasserspiegel und Injektionsrate

Run	Zeit	Messtiefe (m ab OK Rohr)	Rotation (RPS)	Bohrloch-Fluss Q_i (l/min)
1	11:50	40.0 ^{*)}	0.0	0.0
1	12:05	45.2	0.0	0.0
1	12:25	81.0	0.0	0.0
1	13:00	120.0	0.0	0.0
2	16:05	33.5 ^{*)}	13.5	(27.4)
2	15:45	40.0 ^{*)}	6.5	(12.7)
2	15:20	45.2	11.9	24.0
2	16:25	53.2	12.0	24.2
2	16:45	67.5	11.5	23.2
2	17:05	81.0	11.3	22.7
2	17:40	108.0	6.0	11.6
2	17:35	120.0	4.3	8.0
2	17:50	128.0	2.9	5.1
2	18:05	142.5	1.6	2.3
2 (Rep.)	18:25	108.0	6.0	11.6
2 (Rep.)	18:55	45.2	12.2	24.6

Tab. 13: Gemittelte Messdaten der Packer-Flowmeter-Messungen vom 13.6.92
RPS = revolutions per second
*): Messung innerhalb des Casings (Rohrschuh bei 41.5 m)

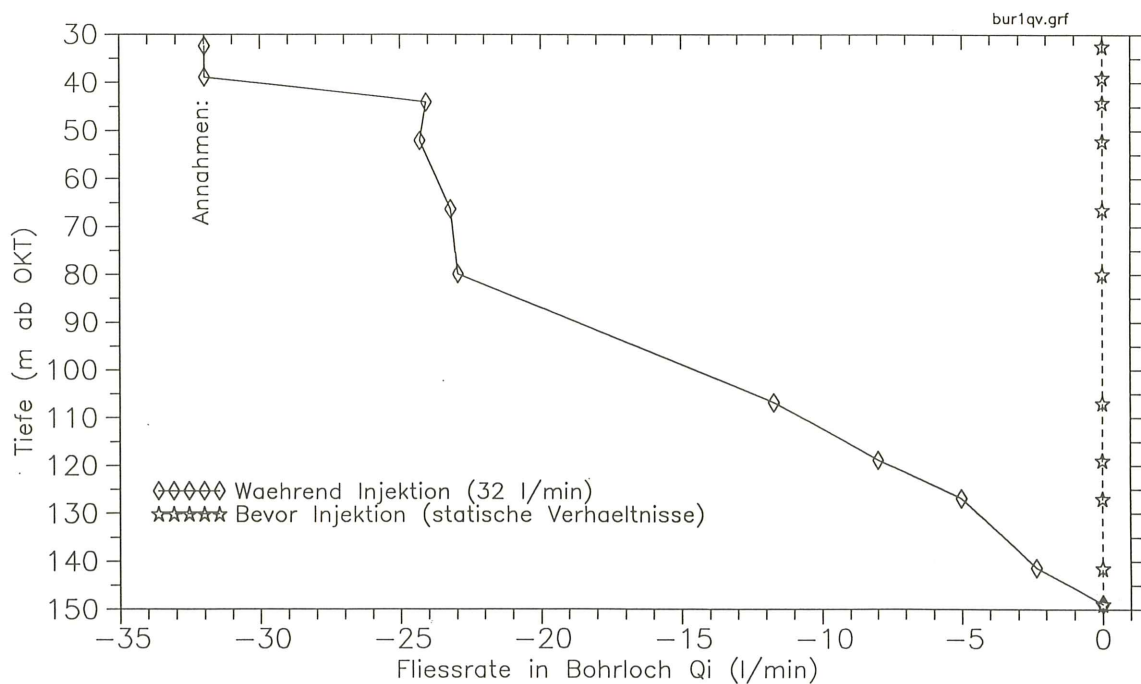


Fig. 17: Packer-Flowmeter-Logging: FlieBssrate im Bohrloch vor und während der Injektion

Wasserstand (4 m unter OKT) begonnen. Dieser erhöhte sich im Laufe der Messungen bis auf OKT (Fig. 16). Für diese Daten ergibt sich nach der Methode von Cooper-Jacob (COOPER & JACOB 1946) und einer Speicherkapazität von $1E-6$ eine Gesamttransmissivität des Intervalls 41.5 (?) bis 150 m von $2E-5 \text{ m}^2/\text{s}$. Die obere Intervalltiefe ist mit einer Unsicherheit behaftet, da auch das äussere Casing während den Versuchen möglicherweise undicht war und somit auch Bohrstrecken oberhalb 41.5 m in diese Gesamttransmissivität miteingehen.

Während der Injektion in M 1400 wurden gleichzeitig die Wasserspiegel in den Bohrungen E 2100 und E 2200 beobachtet. Diese reagierten nach ca. 4 Minuten und erreichten einen maximalen Anstieg von 0.21 (E 2100), resp. 0.74 m (E 2200). Mögliche Erklärungen für diese markanten Unterschiede im Reaktionsverhalten sind (i) laterale Heterogenitäten in den Durchlässigkeiten der einzelnen wasserleitenden Schichtglieder, (ii) vertikale Kurzschlüsse (Verbindungen) mit tieferen Wasserleitern innerhalb der Filterkiese in E 2100 und E 2200 und (iii) starke positive Skin-Effekte (durch den Bohrvorgang erniedrigte Durchlässigkeit in der näheren Bohrlochumgebung) der Bohrung M 1400 (unwahrscheinlich).

Die einzelnen Flowmeter-Messwerte in M 1400 (Tab. 13 u. Fig. 17) zeigen:

- Undichtigkeiten des inneren Casings oberhalb und unterhalb von 33.5 m OKT (bei den Casing-Stationen 33.5 m und 40 m müsste ein Fluss gemessen werden, der der Injektionsrate von 32 l/min entspricht)
- unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit von 0.1 - 0.3 l/min klar abnehmende und reproduzierbare Bohrloch-Flüsse mit zunehmender Tiefe zwischen 45.2 und 142.5 m ab OKT.

3.2.3.3 Auswertung der Packer-Flowmeter-Daten

Die Daten der Tabelle 13 wurden mittels des Programms KPFLOW (HUFSCHMIED 1983, THOMPSON 1990) bezüglich Transmissivität und hydraulischem Potential der einzelnen Messintervalle (Tiefenabschnitte) zwischen zwei Messstationen und der statistischen Signifikanz und Fehlerbreiten dieser Parameter ausgewertet. Tiefenabschnitte stellen hierbei nicht geologische Schichten, sondern die Abschnitte zwischen den einzelnen Messstationen dar.

Die Datenauswertung in KPFLOW beruht grundsätzlich wiederum auf der transienten Gleichung von Cooper-Jacob. Die Transmissivitäten der Tiefenabschnitte werden aufgrund der differentiellen Fließraten zwischen Run 1 und 2 und der entsprechenden Änderung im Bohrloch-Wasserspiegel pro Abschnitt bestimmt. Da alle Messstationen während des Runs 1 keine Flüsse zeigten, ergibt sich, dass alle Abschnitte innerhalb der Messgenauigkeit dasselbe hydraulische Potential von 36.5 m ab OKT (526.8 m ü. M.) aufweisen. Eine Messgenauigkeit von 0.1 l/min (0.3 l/min) führt bei der oben bestimmten Gesamt-Transmissivität von $2E-5 \text{ m}^2/\text{s}$ und den vorliegenden Testbedingungen zu einem Potentialfehler von 0.12 m (0.36 m).

Messintervall (m ab OKT)	Hydraulische Durchlässigkeit K (1E-6 m/s)	Transmissivität T (1E-6 m ² /s)	Wasserspiegel (m ab OKT)
41.5 - 45.2	1.4	5.2	36.5
45.2 - 53.2	ND	ND	ND
53.2 - 67.5	0.044	0.64	36.5
67.5 - 81.0	0.01	0.13	36.5
81.0 - 108.0	0.28	7.5	36.5
108.0 - 120.0	0.19	2.3	36.5
120.0 - 128.0	0.23	1.8	36.5
128.0 - 142.5	0.11	1.6	36.5
142.5 - 150.0	0.19	1.4	36.5

Tab. 14: Mittlere Durchlässigkeiten, Transmissivitäten und Potentiale aus Packer-Flowmeter-Logging (ND = Nicht bestimmbar, da unterhalb des Auflösungsvermögens des Gerätes)

Die in der Tabelle 14 zusammengestellten mittleren Intervall-Durchlässigkeiten und Transmissivitäten liegen im Bereich von 1.4E-6 bis 1E-8 m/s, resp. 1.3E-7 bis 7.5E-6 m²/s. Die höchstdurchlässigen Bereiche liegen direkt unterhalb des Casings (unsicherer Wert, da äusseres Casing möglicherweise undicht ist) und im Intervall 81 - 108 m.

3.2.4 Dynamisches Leitfähigkeits-Logging in der Bohrung M 1400

3.2.4.1 Test-Bedingungen

Als erster Schritt der dynamischen Fluid-Logging-Messungen vom 27. und 28. Juni 1991 wurde die auf eine Endteufe von 251 m verlängerte Bohrung M 1400 mit einer Salzlösung von 2800 µS/cm gespült. Dieses Flushing geschah durch das Bohrgestänge mit einer Rate von ca. 100 l/min und einem Volumen von 6 m³. Die Wahl von Salzwasser als Spülmittel erfolgte, weil das Formationswasser (ca. 600 µS/cm) und auch die in die Formation teilweise verlorene Bohrspülung (ca. 360 µS/cm) relativ niedrige Leitfähigkeiten aufweisen und die Leitfähigkeitsmethode möglichst grosse Leitfähigkeitskontraste verlangt. Anschliessend wurden auf einem Niveau von 49.7, respektive 49.45 m ab OKT eine Grundfoss-Pumpe mit Quarz-Druckaufnehmer installiert und **zwei Referenz-Leitfähigkeits-Logs (Log 1 und 2)** gefahren.

liert und zwei **Referenz-Leitfähigkeits-Logs (Log 1 und 2)** gefahren.

Da aufgrund der Wasserspiegel-Beobachtungen während des Bohrens (Kapitel 3.2) und der Logs 1 und 2 von einem variablen Formations-Potential zwischen 35 und 47 m ab OKT ausgegangen werden musste, wurde die Planung des Fluid-Logging-Versuchs darauf ausgelegt, sowohl die variablen Schicht-Potentiale als auch die einzelnen Schicht-Transmissivitäten zu bestimmen. Diese Zielsetzung wurde durch ein **2-phases Vorgehen** erreicht.

In **Phase 1** wurde der Bohrloch-Wasserspiegel schrittweise abgesenkt und nach jedem Absenk-Schritt ein Leitfähigkeits-Log gefahren (**Log 3-7**). Aus der qualitativen Entwicklung der Zu- (und Weg-) Flüsse zum (vom) Bohrloch bei unterschiedlichen Wasserspiegelständen im Bohrloch konnte so in dieser ersten Phase für jede wasserleitende Schicht Unter- und Obergrenze des Potentials bestimmt werden. Anschliessend wurde in einer **Phase 2** unter einer maximalen Absenkung aus allen durchlässigen Lagen Wasser gefördert und unter konstanten Fliessbedingungen eine Serie von Logs für die Bestimmung der individuellen Schicht-Zuflüsse (und Schicht-Transmissivitäten) gefahren (**Log 8-13**). Da mit zunehmender Testdauer die Bohrloch-Stabilität abnahm, konnten die Logs 12 und 13 nur noch partiell für die Auswertung beigezogen werden (Verklemmen und Verstopfen der Messsonden).

Die Absenkungen, Pumpraten und Logging-Zeiten sind in Figur 18 dargestellt.

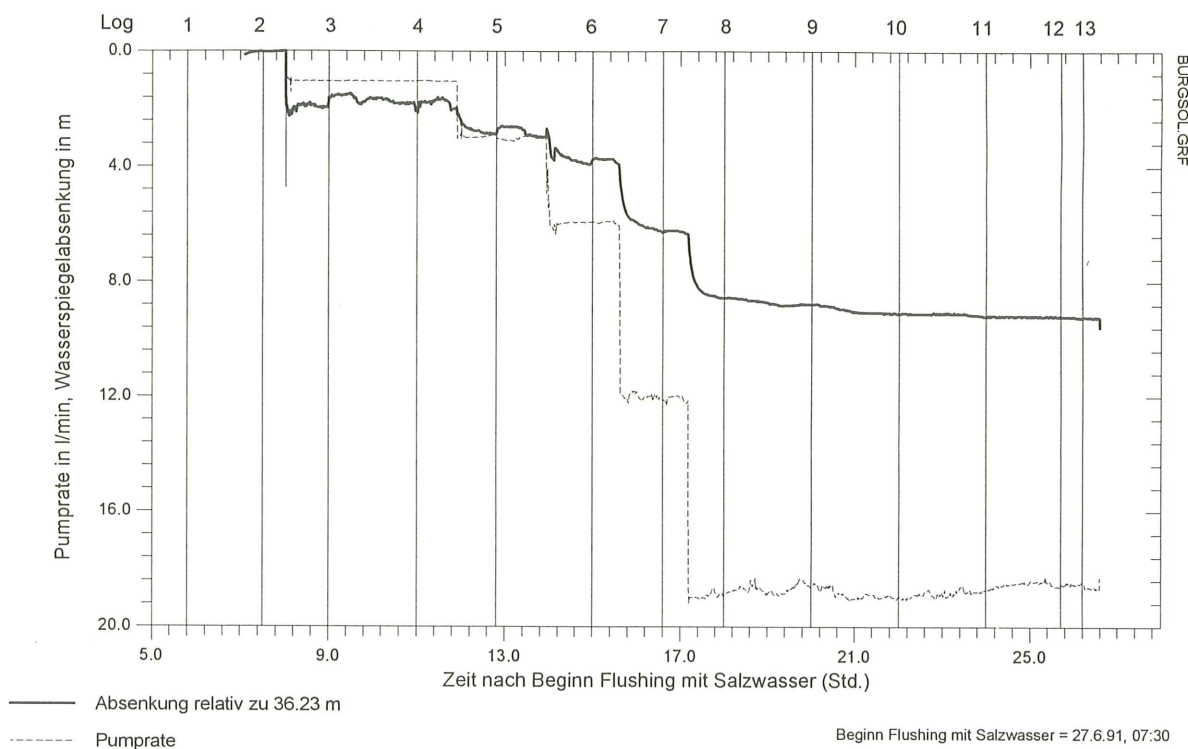


Fig. 18: Dynamisches Leitfähigkeits-Logging: Pumprate, Absenkung und Logging-Zeiten

3.2.4.2 Messdaten des dynamischen Leitfähigkeits-Logging

Figur 19 zeigt die gemessenen und auf 20°C normierten **elektrischen Leitfähigkeiten** der Bohrlochflüssigkeit als Funktion der Tiefe für **Phase 1**. Wie aus der **Figur 19** ersichtlich ist, bilden sich schon unter statischen Bedingungen Zufluss"peaks" aus (bei ca. 85 m und 190 m), was ein direkter Hinweis auf nicht-konstante Schicht-Potentiale ist. Die Peaks sind "negativ", da der Grundwert der beim Flushing eingesetzten Salzlösung höher als die Zufluss-Konzentration ist. Als Funktion der Absenkung (Pumprate) bilden sich in der Folge weitere Zuflussstellen aus (u. a. bei 146 m) und ändern sich die Fliessrichtungen einzelner Zuflüsse (Änderung der Asymmetrierichtung der Peaks bei 85 und 188 m). Die Umkehr von Fliessrichtungen im Bohrloch ist wahrscheinlich auch für die anomale Peak-Entwicklung (Wandern der Peak-Spitze) bei 85 und 188 m verantwortlich.

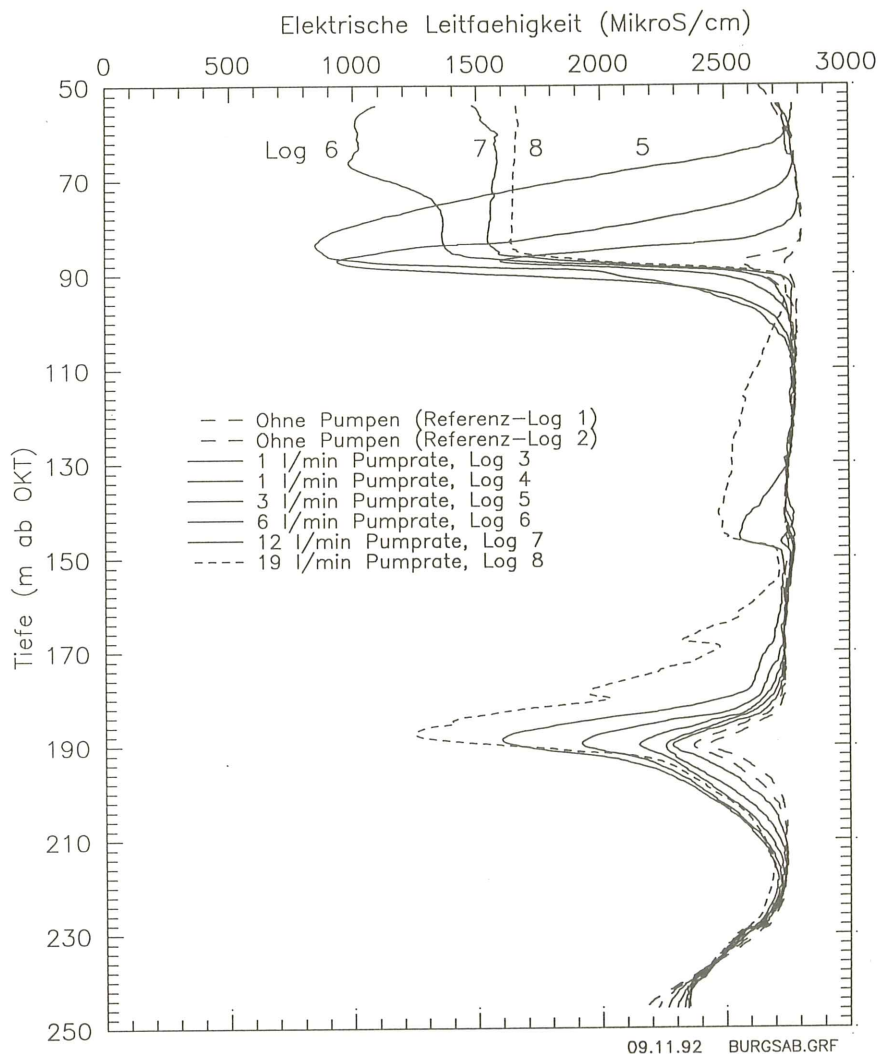


Fig. 19: Dynamisches Leitfähigkeits-Logging: Referenz-Logs und Logs der Phase 1 (verschiedene Pumpraten)

Die Leitfähigkeits-Logs der **Phase 2** zeigt die **Figur 20**. Diese unter maximalen und relativ konstanten Absenkungsbedingungen (43.9 - 44.4 m ab OKT) gemessenen Leitfähigkeits-Logs (Log 8 - 13) wurden im folgenden für eine quantitative Analyse der Zufluss-Stellen verwendet.

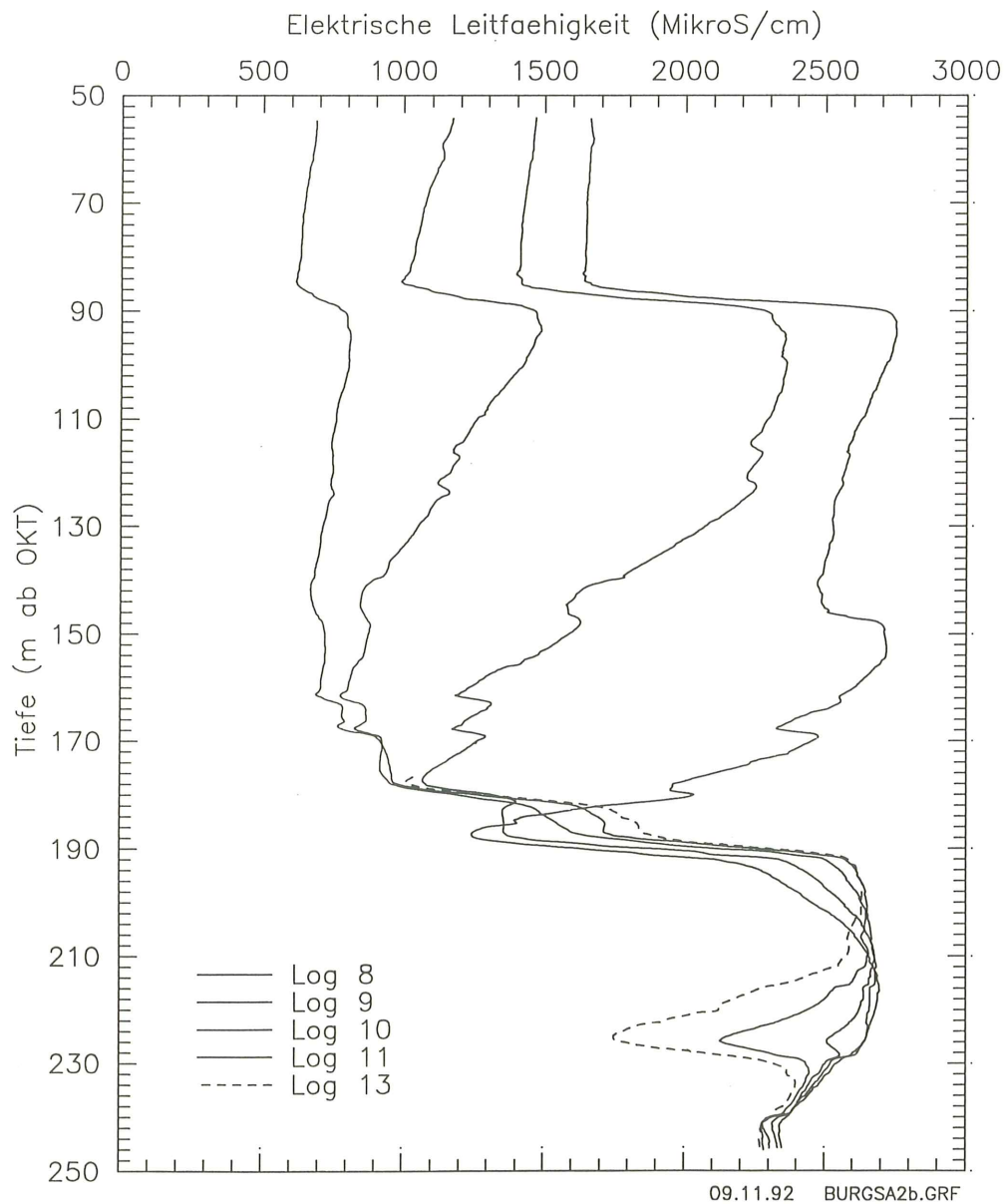


Fig. 20: Dynamisches Leitfähigkeits-Logging: Logs der Phase 2 (konstante Pump-rate von 19 l/min)

3.2.4.3 Auswertung der dynamischen Leitfähigkeits-Logging-Daten

Die aus den Beobachtungen der Figur 19 resultierenden Schichtpotentiale und Zufluss-Positionen (in m ab OKT) sind in Tabelle 15 zusammengestellt.

Position Zufluss (m ab OKT)	Wasserspiegel des Zuflusses (m ab OKT)	
	Minimale Tiefe	Maximale Tiefe
85	35	36.2
96	ND	ND
115	39.1	41.4
122	39.1	41.4
140	41.4	43.6
146	38	39.1
162	41.4	43.6
167.5	41.4	43.6
178	41.4	43.6
188	35	36.2
227	43.9	44.4
240	41.4	43.6

Tab. 15: Wasserspiegel und Position diskreter Zuflussstellen aus Fluid-Logging-Daten (ND = nicht bestimmbar)

Wie ein Vergleich mit Tabelle 12 (Abstichmessungen im Bohrgestänge) zeigt, stimmen die aus beiden Methoden abgeschätzten Schicht-Wasserspiegel teilweise überein. Unterschiedliche Potentiale sind in vorliegender Situation grundsätzlich nicht erstaunlich, da beide Methoden aus verschiedenen Gründen (Undichtigkeit des Bohrgestänges, Potential-Beeinflussung durch Bohren/Flushing, Infiltration und Rückfluss des Flushing-Fluids) nur eine Abschätzung der Potentiale erlauben.

Ein Vergleich der Zufluss-Positionen mit der geologischen Kernaufnahme (Beil. 1) zeigt, dass **fast alle mit dem Fluid-Logging bestimmten durchlässigen Zuflussstellen im Bereich von Rinnengürteln** (grobkörnige Sandsteine) liegen (Ausnahmen: DR/DF bei 162 m, DR bei 167.5 m). Die ermittelte Lage der Zuflussstellen ist vereinbar mit dem Kernbefund. Die vorliegende und andere Fluid-Logging-Anwendungen zeigen, dass mittels dynamischem Leitfähigkeits-Logging alle kritischen Fliesswege ausserordentlich effektiv und exakt lokalisiert werden können.

Im weiteren zeigen die Leitfähigkeits-Logs, dass bei den durchlässigen Rinnengürteln ein grosser Teil der gesamten Schichtmächtigkeit am Aufbau der Zufluss-Peaks betei-

ligt ist und die Zuflüsse nicht, wie bei Kluft-Grundwasserleitern, punktförmigen Charakter aufweisen.

Für die quantitative Bestimmung der Zuflussraten aus den Leitfähigkeits-Logs wurden in einem ersten Schritt die gemessenen Leitfähigkeiten nach Gleichung 3-1 (aus TSANG et al. 1990) in äquivalente NaCl-Konzentrationen umgerechnet:

$$\sigma = 1870 C - 40 C^2 \quad (3-1)$$

mit: σ = elektrische Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$
 C = NaCl-Konzentration in kg/m^3

Die Grundidee der quantitativen Auswertung besteht nun darin, dass die zeitliche Entwicklung dieser transformierten Konzentrationsprofile im Bohrloch durch eine eindimensionale advective-dispersive **Transportgleichung** (Gleichung 3-2) beschrieben werden kann.

$$k C_{xx} - v C_x = C_t \quad (3-2)$$

mit: k = Dispersions-Koeffizient in der Bohrung
 v = lineare Advektions-Geschwindigkeit in der Bohrung
 C = Elektrolyt-Konzentration in der Bohrung
tiefgestelltes $x, t = 1$. Ableitung nach Tiefe x , resp. Zeit t
tiefgestelltes $xx = 2$. Ableitung nach Tiefe x

Dieser Ansatz führt bei Wasser- und Salzlösungen in nur schwach reaktiven Formationen (Kristallin-Gesteine, Karbonate, Tone, Mergel, Sandsteine) zu sehr guten Übereinstimmungen zwischen Mess- und Modelldaten (z. B. LÖW et al. 1989, KELLEY et al. 1991). In der Umgebung einer viskosen Tonspülung (BLÜMLING 1990, GUYONNET et al. 1992) oder stark löslicher Evaporite (GUYONNET & LAVANCHY 1992) ist dieser Modellansatz nur noch beschränkt einsetzbar.

Die Bestimmung der **Zufluss-Parameter** (volumetrische Zuflussrate q und Konzentration C des zufließenden Porenwassers) pro Zuflussstelle i kann grundsätzlich mit zwei verschiedenen Methoden durchgeführt werden:

- Iterative Angleichung der simulierten Modellresultate an die Messwerte unter Variation der Zuflussparameter q_i und C_i . Diese Angleichung beruht auf einem Finite-Differenzen Transport-Simulator (Programm BORE; HALE & TSANG 1988). Die Angleichung ("Fitting") kann entweder manuell oder, neu, mittels eines automatischen Verfahrens unter Berücksichtigung von Parameter-Korrelationen und -Kovarianzen (Programm STARBORE; LÖW et al. 1992) durchgeführt werden.
- Analytische Bestimmung der Bohrlochflüsse Q_i zwischen den Zuflussstellen und Ermittlung von q_i aus den entsprechenden Differenzen der Q_i -Werte (Programm MOMENT; LÖW et al. 1991).

Für die vorliegende Kurzauswertung wurde primär das schnelle **analytische Verfahren** mit dem Programm MOMENT **eingesetzt** und durch wenige Simulationen mit BORE verifiziert. Neben der Bestimmung der q_i -Werte liefert MOMENT die über die gesamte Logging-Strecke gemittelte Konzentration des zufließenden Porenwassers als Funktion der Zeit ($C_m(t)$) und BORE (für zeitlich konstante Porenwasserkonzentrationen) die Schicht-spezifischen C_i -Werte.

Ein Vergleich der gemessenen und simulierten Logs 9 - 11 (Log 8 wurde als Anfangsbedingung in die Simulation eingegeben) zeigt Figur 21. Der Fit könnte wohl durch zusätzliche manuelle oder automatisierte Parameter-Verfeinerungen noch verbessert werden, ist jedoch schon in seiner vorliegenden Form als gut zu bezeichnen. Die aus den Analysen resultierenden Zufluss-Parameter sind in Tabelle 16 zusammengestellt.

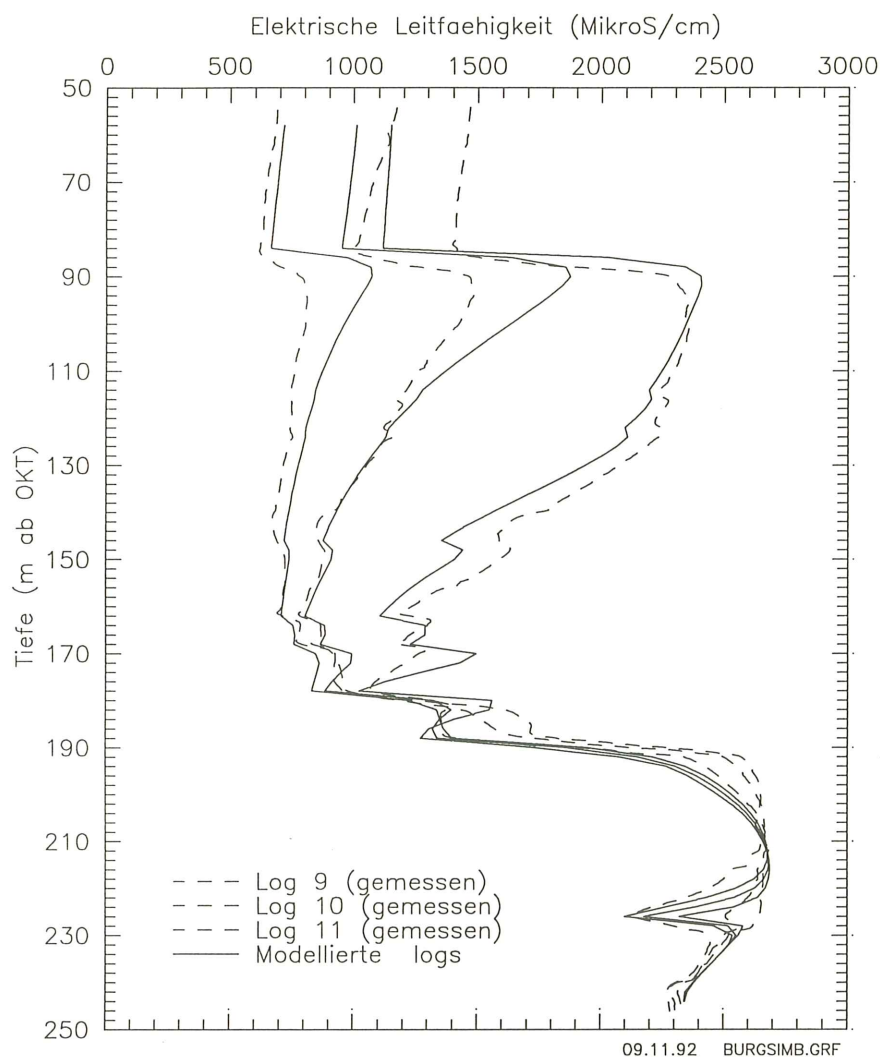


Fig. 21: Dynamisches Leitfähigkeits-Logging: Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Logs

Position Zu- fluss (m ab OKT)	Zufluss-Rate q_i MOMENT (1E-5 m ³ /s)	Zufluss-Rate q_i BORE (1E-5 m ³ /s)	Zufluss-Konz. C_i BORE (kg/m ³)
85	7.1	12	0.23
115	1.2	0.2	0.32
122	1.2	0.3	0.32
146	0.67	1.2	0.32
162	0.5	1.7	0.32
167.5	0.5	1.2	0.32
178	3	1	0.32
188	0.5	0.17	0.32
227	0.67	0.2	1.0

Tab. 16: Zufluss-Raten und -Konzentrationen aus dynamischen Leitfähigkeits-Messungen, ermittelt mit den Programmen MOMENT und BORE

Position Zu- fluss (m ab OKT)	Zufluss-Mächtigkeit H (m)	Transmissivität T BORE (1E-6 m ² /s)	Hydraul. Durch- lässigkeit K BORE (1E-6 m/s)
85	RG 5.6	23	4.11
115	RG 8.4	1.8	0.21
122	RG 4.8	2.7	0.56
146	RG 5.0	3.3	0.66
162	DR/DF 3.5	17	4.86
167.5	DR 2.8	12	4.29
178	RG 4.0	9.7	2.43
188	RG 6.2	0.25	0.04
227	RG 7.0	5.6	0.80

Tab. 17: Transmissivitäten aus dynamischen Leitfähigkeits-Messungen.
Sieben der neun Zuflusspunkte liegen gemäss geologischer Kerninterpretation in Rinnengürteln (RG).

Wie Tabelle 16 zeigt, wurden für die quantitative Grobanalyse nur die wichtigsten Zuflüsse berücksichtigt. Da sich die q_i -Werte linear auf die Transmissivitäten fortpflanzen, diese jedoch logarithmisch verteilt sind, spielen Unterschiede in den Zuflüssen um wenige 100 % keine sehr grosse Rolle. Die volumetrisch gemittelte Zufluss-Konzentration variiert nach MOMENT zwischen 0.42 kg/m^3 (Log 8) und 0.25 kg/m^3 (Log 11).

Basierend auf den BORE-Zuflussraten der Tabelle 16 und den "best-guess" Potential-Absenkungen aus Tabelle 15 und Figur 18 wurden, wiederum mittels der Gleichung von Cooper-Jacob, Zufluss-spezifische Transmissivitäten ermittelt (Speicherkoefizient $S = 1\text{E-}6$). Die ermittelten Werte (Tabelle 17) liegen zwischen $2\text{E-}5$ und $2\text{E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$. Für die Bestimmung von Schicht-Durchlässigkeiten K muss eine Schicht-Mächtigkeit H abgeschätzt werden, für die vertikal gemittelte K -Werte von Interesse sind. Im vorliegenden Fall wurde die Mächtigkeit der produzierenden Sandstein-Einheiten für H eingesetzt. Aufgrund der Kurzauswertung der Logging-Daten kann vermutet werden, dass die einzelnen produzierenden Sandstein-Einheiten mehr oder weniger über ihre gesamte Mächtigkeit durchlässig sind (mit Ausnahme der Randbereiche, vgl. Fig. 14) und intern keine stark präferenziellen Fliesswege aufweisen.

3.3 Beurteilung der Fluid-Logging-Resultate und Schlussfolgerungen

3.3.1 Vergleich von Packer-Flowmeter- und Leitfähigkeits-Logging

Figur 22 stellt die mittels Packer-Flowmeter- und dynamischem Leitfähigkeits-Logging ermittelten Transmissivitäten einander gegenüber und vergleicht diese mit den Transmissivitäts-Abschätzungen aus den Lugeon-Versuchen (vgl. Kap 3.2). Es wurde hierbei berücksichtigt, dass die Packer-Flowmeter- und Lugeon-Transmissivitäten - im Gegensatz zu den Daten des dynamischen Leitfähigkeits-Logging - nicht spezifischen faziellen Architektur-Elementen (z. B. Rinnengürteln), sondern einem Intervall zwischen zwei Packersitzen entsprechen. Die Übereinstimmung der Transmissivitäten beider Fluid-Logging-Methoden ist sehr gut (maximaler Unterschied Faktor 3), insbesondere auch wenn mit den Unsicherheiten von aufwendigeren transienten Packerversuchen verglichen wird (bis Faktor 5 in diesem Transmissivitäts-Bereich). Die Abweichungen der Lugeon-Test-Resultate sind - wie zu erwarten - deutlich höher.

Die Aussagen beider Fluid-Logging-Methoden bezüglich der Potentiale sind nicht konsistent. Dies könnte mit der zeitlichen Verzögerung beider Messserien und entsprechenden Änderungen in der hydraulischen Situation oder mit der geringeren Ansprechschwelle des Packer-Flowmeters im Vergleich zur Auflösung des dynamischen Leitfähigkeits-Logging zusammenhängen.

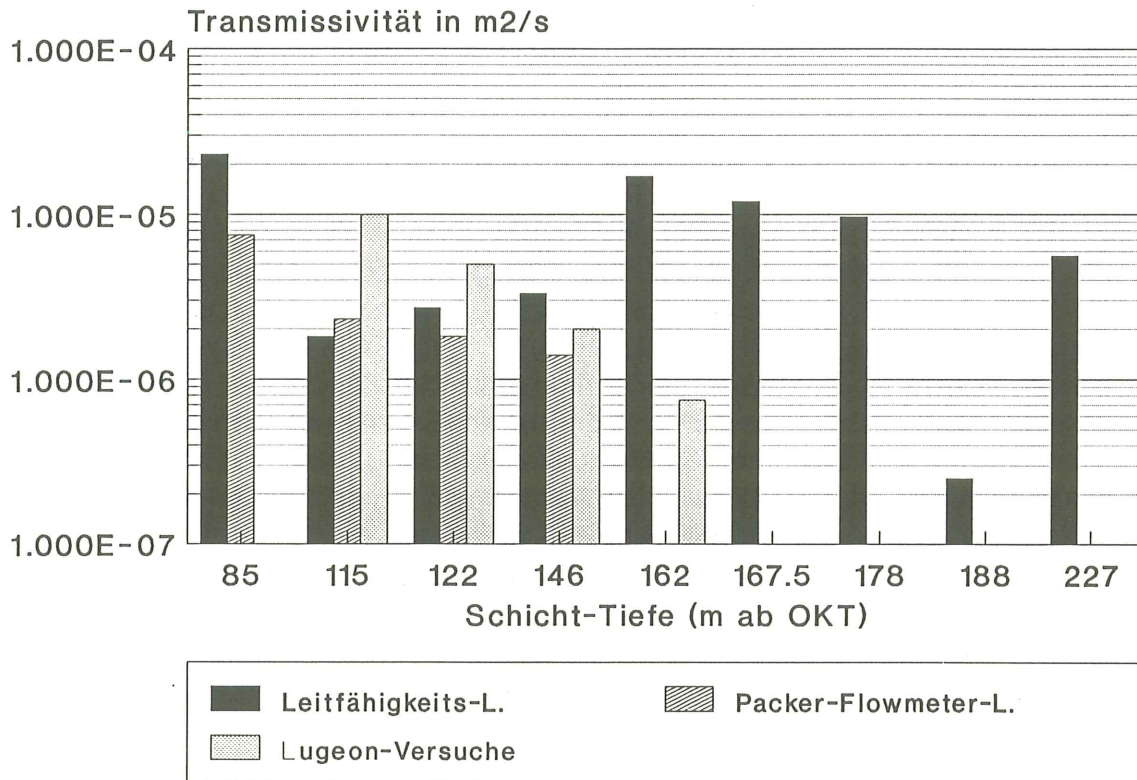


Fig. 22: Fluid-Logging und Lugeon-Test-Resultate: Vergleich der Transmissivitäts-werte

3.3.2 Schlussfolgerungen

Bezüglich des eingesetzten Testverfahrens kann aufgrund der vorliegenden Resultate klar die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich beide Fluid-Logging-Methoden für eine rasche und zuverlässige Charakterisierung der durchlässigen Bereiche (v. a. Rinnengürtel) in der USM eignen. **Welches Verfahren für mögliche zukünftige Standortuntersuchungen eingesetzt werden soll, ist primär von den Durchlässigkeits-Verhältnissen der jeweiligen Bohrung abhängig.** Folgende Faustregel kann hierbei benutzt werden:

- Falls aus dem zu testenden Bohrlochintervall mit machbaren Pump- und Absenkraten (respektive Injektion) mehr als ca. 5 l/min gefördert (resp. injiziert) werden können ($5E-3 \text{ m}^2/\text{s} > T_{\text{tot}} > 1E-7 \text{ m}^2/\text{s}$), ist die Packer-Flowmeter-Methode zu empfehlen.

- Falls geringer durchlässige Teststrecken ($5E-4 \text{ m}^2/\text{s} > T_{\text{tot}} > 1E-10 \text{ m}^2/\text{s}$) mit Pump-raten im Bereich von bis zu ca. 5 l/min getestet und die einzelnen Fliesswege lokalisiert und charakterisiert werden sollen, ist die leicht aufwendigere Leitfähigkeits-Methode zu empfehlen.

Eine sequentielle Kombination beider Methoden kann für Bohrungen mit starken, tiefenabhängigen Durchlässigkeits-Änderungen ebenfalls ins Auge gefasst werden.

Bezüglich der **lokalen hydrogeologischen Verhältnisse** im Erdsondenfeld von Burgdorf können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Rinnengürtel der USM weisen im betesteten Tiefenbereich (50 - 250 m ab OKT) Transmissivitäten im Bereich von $2E-5$ bis $2E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ auf. Die entsprechenden hydraulischen Durchlässigkeiten liegen zwischen $4E-6$ bis $4E-8 \text{ m/s}$. Da jedoch nicht alle Rinnengürtel zur Ausbildung von klaren Zuflussstellen im Fluid-Logging geführt haben, ist für vereinzelte Rinnengürtel auch eine tiefere Durchlässigkeit zu erwarten. Als Funktion der Tiefe kann in der Bohrung M 1400 keine Durchlässigkeits-Abnahme beobachtet werden.
- Über relativ kurze vertikale Distanzen (mehrere dam) können relativ grosse Potentialdifferenzen (im m-Bereich) beobachtet werden.
- Die zwischen den Rinnengürteln liegenden Architektur-Elemente (ton- und siltreichere Überflutungssedimente) wirken als effektive hydraulische Barrieren, die keinen Ausgleich der starken Potentialunterschiede zwischen den einzelnen Rinnengürtel erlauben.
- Die Rinnengürtel wirken als poröse Grundwasserleiter. Da die Mächtigkeiten relativ gering sind, genügen die bisherigen (punktförmigen) Lösungsansätze für eine quantitative Auswertung der Leitfähigkeits-Logs.

4 PETROPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Ziel der Messkampagne

Im Erdsondenfeld Burgdorf wurden die Bohrungen M 1400, M 2100, E 2100 und E 2200 (vgl. Situation und Übersicht über die Daten in Fig. 3 u. 4) petrophysikalisch vermessen. Mit Ausnahme der gekernten Bohrung M 1400 handelt es sich um Rotary-Spülbohrungen, wobei E 2100 und E 2200 zum Zeitpunkt der Messung bereits verrohrt waren.

Die **Hauptziele** der Messkampagne und der Auswertung der petrophysikalischen Messresultate waren die **Beantwortung folgender Fragen**:

- Welche faziellen Architektur-Elemente oder welche Gruppen von faziellen Architektur-Elementen lassen sich mit petrophysikalischen Methoden erkennen und gegeneinander abgrenzen, d. h. ohne begleitende geologische Aufnahmen? (vgl. Kap. 4.4.3).
- Lassen sich die petrophysikalischen Logs zu Korrelationszwecken verwenden? Lassen sich aus den verfügbaren Logs Aussagen über die laterale Ausdehnung einzelner Einheiten gewinnen? (Kap. 4.4.2).
- Können mit Hilfe der Logs Aussagen über den strukturellen Aufbau des Untergrundes gemacht werden, d. h. können allenfalls vorhandene Störungen aufgefunden werden? (Kap. 4.4.2).

Eine zentrale Rolle spielt die Ausscheidungsmöglichkeit der Rinnensandsteine, da diese potentielle Grundwasserträger sind. Die Bohrung M 1400, die als einzige sowohl petrophysikalisch vermessen als auch detailliert geologisch aufgenommen (vgl. Kap. 2) und hydrogeologisch getestet wurde (vgl. Kap. 3), konnte in einem gewissen Sinne als "Eichbohrung" benützt werden.

Die Logs der 4 Bohrungen sind in den Beilagen 1, 3, 5 und 6 wiedergegeben. Von den 4 vermessenen Bohrlöchern waren die Bohrungen E 2100 und E 2200 bei der petrophysikalischen Vermessung bereits verrohrt, die Bohrungen M 1400 und M 2100 waren noch offen. Von den beiden offenen Bohrungen standen nur von M 1400 geologische Aufzeichnungen zur Verfügung, weshalb eine direkte Parallelisierung der Logs mit dem geologischen Bohrbefund auf diese Bohrung beschränkt ist. M 1400 wurde sowohl petrophysikalisch vermessen, detailliert geologisch aufgenommen und hydrogeologisch getestet.

4.2 Messausrüstung, Messbedingungen und Darstellung der Daten

Die petrophysikalischen **Messungen** in den Bohrungen im Erdsondenfeld Burgdorf wurden **am 12. April 1991** (Bohrungen E 2200, E 2100 und M 2100) **und am 28. Juni 1991** ausgeführt (M 1400).

Die Ausrüstung der Firma BPB INSTRUMENTS LTD u. CO GmbH für die petrophysikalische Messung der Bohrlöcher bestand im wesentlichen aus einem Fahrzeug (Mercedes 307), einer Winde mit 800 m Messkabel, der Regeleinheit für die Winde, einem Sonden-Computer-Interface, einem Laptop-Computer mit Thermo-Plotter und den beiden Sonden DD3 und NN1. Das eingesetzte Messkabel hatte einen Durchmesser von 1/8" (= 3.175 mm), war stahlbewehrt und verfügte über einen Leiter für die Strom- und Datenübertragung. Mit diesem Kabel können verschiedene Sonden, mit einer oder mehreren Funktionen, verbunden werden.

Es kamen die Sonden **DD3** (DUAL DENSITY) und **NN1** (DUAL NEUTRON) zum Einsatz. Die Messungen wurden von der tiefsten, erreichbaren Teufe bis zum Rohrschuh durchgeführt. Zur Optimierung der Datenqualität wurde eine Messgeschwindigkeit von 2.25 m/min gewählt. Die gemessenen Parameter und deren Bezeichnung in den Beilagen 1, 3, 5 und 6 können der Tabelle 18 entnommen werden.

Messung	Sonde und Log-Darstellung	
	Sonde DD3: DUAL DENSITY	Sonde NN1: DUAL NEUTRON
Kaliber	CALIPER FROM DENSITY TOOL (alle Bohr.)	CALIPER FROM DENSITY TOOL (M 1400, M 2100)
Natürl. Gamma-Strahlung	GAMMA FROM DENSITY TOOL (alle Bohr.)	GAMMA FROM NEUTRON TOOL (alle Bohrungen)
Gamma-Gamma-Dichte	- BED RESOLUTION DENSITY und LONG SPACED DENSITY (E 2100, E 2200) - COMPENSATED DENSITY (M 1400, M 2100)	
Neutron-Porosität	-	- SHORT SPACED NEUTRON und LONG SPACED NEUTRON (E 2100, E 2200) - SANDSTONE NEUTRON-POROSITY (SST. N-POR., M 1400, M 2100)

Tab. 18: Messparameter, eingesetzte Sonden und Benennung der Logs (vgl. Beilagen 1, 3, 5 und 6)

4.3 Messmethoden

Die einzelnen Messmethoden werden in folgender Ordnung beschrieben:

- Prinzip und geologische Relevanz der Messung
- Kalibrierung
- Korrekturen

4.3.1 Kaliber (Sonde DD3)

Prinzip und geologische Relevanz der Messung

Der Kaliberarm der DD3-Sonde wird dazu benutzt, das Gerät gegen die Bohrlochwand zu drücken und gleichzeitig den Durchmesser der Bohrung zu messen. Eventuelle Auskesselungen werden ebenfalls registriert. Der Kaliberarm liegt dicht am Gerät an, bevor die Messung beginnt. Nach Erreichen der gewünschten Tiefe wird er durch einen Elektromotor geöffnet. Jede Bewegung des Arms wird nun auf ein Potentiometer übertragen. Jede Änderung des Widerstandes verursacht in der nachfolgenden Schaltung eine Änderung der Frequenz, die über das Messkabel übertragen wird.

Die Kaliber-Messung gibt Aufschluss über **Ausbrüche aus der Bohrlochwand**. Diese treten **bei nicht standfesten Gesteinen**, so v. a. in schlecht verkitteten Gesteinen (z. B. tonreiche Mergel, aber auch sehr schlecht zementierte Sandsteine), insbesondere aber auch **bei Schichtübergängen** auf.

Kalibrierung

Nachdem der Kaliberarm der Sonde geöffnet wurde, werden nacheinander Kalibrier-
ringe mit bekanntem Durchmesser angebracht. Die verschiedenen Durchmesser und die dazugehörigen Zählraten werden miteinander in Relation gesetzt, um eine Interpolation zwischen jeweils zwei der insgesamt 11 Kalibrierwerte möglich zu machen.

Korrekturen

Es sind keine Korrekturen notwendig.

4.3.2 Messung der natürlichen Gamma-Strahlung (Sonden DD3 u. NN1)

Prinzip und geologische Relevanz der Messung

Das Gamma-Ray-Log ist die Aufzeichnung der natürlichen Radioaktivität der durchbohrten Formationen. Diese wird hauptsächlich durch den Zerfall von Kalium-40 und radioaktiver Elemente der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen verursacht. Zur Detektion wurden Szintillationszähler mit Natriumiodid-Kristallen verwendet. Jedes Ereignis wird als Impuls durch das Messkabel übertragen und summiert als Impulse/Sekunde auf einem Datenträger aufgezeichnet.

Da die erwähnten radioaktiven Elemente besonders in Tonmineralien auftreten, zeigt das Gamma-Ray-Log in der Regel die Lage von **Gesteinsschichten mit erhöhtem Tonmineralgehalt** durch erhöhte Messwerte an. In der USM der Region Burgdorf sollten Gamma-Ray-Logs gefahren werden, damit die an Tonmineralien armen Sandsteine der Rinnengürtel von den tonreicheren Gesteinstypen der übrigen faziellen Architektur-Elemente unterschieden werden können.

Die Gamma-Ray-Logs lieferten auch in den mit PVC verrohrten Bohrungen gut brauchbare Daten.

Kalibrierung

Unterschiedliche Gamma-Ray-Messsysteme haben verschiedene Empfindlichkeiten gegenüber der Gamma-Strahlung, z. B. verursacht durch unterschiedliche Kristallgrößen (Natriumiodid) oder unterschiedlich empfindliche Photomultiplier. Deswegen kann es vorkommen, dass zwei Gamma-Ray-Sonden in der gleichen Formation möglicherweise unterschiedliche Zählraten messen. Da dies nicht akzeptabel ist, wurde eine Standardisierung für Messfirmen entwickelt. Dieses System basiert auf einer Standard Gamma-Ray-Einheit, dem "**API Gamma Ray Unit**" (American Petroleum Institute). Ein API ist definiert als 1/200 der Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Gamma-Messwert von Zonen hoher und niedriger Radioaktivität in einem Testbohrloch in Houston, Texas.

Der Auftragnehmer (BPB INSTRUMENTS LTD u. CO GmbH) hat dieses Bohrloch mehrmals gemessen und einem Standard-Radium-Kalibrator einen festen API-Wert zugeordnet. Mit diesem Kalibrator ist es möglich, den Houston Standard auf alle Gamma-Sonden der Firma zu übertragen.

Korrekturen

Um Gamma-Ray-Messungen aus einem weiten Bereich von verschiedenen **Bohrlochdurchmessern** und unterschiedlichen **Spülungsdichten** vergleichbar zu machen, ist es notwendig, einen willkürlichen Standard für diese, die Messung beeinträchtigenden

Parameter zu definieren. Die Sonde der BPB hat einen Nominaldurchmesser von 5" und eine Spüldichte von 1.0 g/cm^3 festgesetzt. Für abweichende Verhältnisse können Korrekturen vorgenommen werden.

Verrohrung, gleich welcher Art, schwächt die Gamma-Ray-Messung ab. Es waren nur qualitative Korrekturen möglich.

4.3.3 Gamma-Gamma-Dichte (Sonde DD3)

Prinzip und geologische Relevanz der Messung

Eine Gamma-Teilchen mittlerer Energie emittierende, radioaktive Quelle wird am unteren Ende der Sonde angeschraubt. Das sich darüber befindliche Szintillations-Detektor-System registriert die ankommenden Gamma-Teilchen. Die von der Quelle emittierten Teilchen kollidieren mit den Elektronen in der bestrahlten Formation, werden gestreut und schliesslich absorbiert. Je grösser die Elektronendichte der Formation ist, desto grösser ist die Anzahl der Kollisionen und Absorptionen von Teilchen, bevor sie den Detektor erreichen können.

Zwei Detektoren werden benutzt mit jeweils einem kurzen Abstand zur Quelle (**BRD** = Bed Resolution Density) und einem langen Abstand zur Quelle (**LSD** = Long Spaced Density). Messungen des Detektors mit dem grossen Abstand werden für die **Berechnung des "Compensated Density Logs"** benutzt. Der Grad der Kompensation ist in Beilage 1 und 3 als DENSITY CORRECTION dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Korrekturen dort am grössten sind, wo KALIBER oder GAMMA RAY Ausschläge zeigen. Messungen des Detektors mit dem kleinen Abstand zur Quelle sind viel mehr von der unmittelbaren Umgebung des Bohrlochs geprägt und deswegen weniger geeignet für quantitative Messungen, bieten aber eine höhere vertikale Auflösung.

Die Zählraten der Szintillationszähler und die Elektronendichte der durchteuften Gesteinsschichten sind zueinander umgekehrt proportional. Da für die meisten Minerale die Elektronendichte direkt proportional der Brutto-Gesteinsdichte ist, ergibt sich eine **Dichte-Abfolge der durchteuften Schichten**. Die Porosität wird dabei nicht berücksichtigt, weshalb weitere Logs (Neutron-Porosität) beigezogen werden müssen, damit verlässliche Interpretationsresultate erhalten werden können.

In den verrohrten Bohrungen des Sondenfeldes Burgdorf (E 2100 und E 2200) konnten keine quantitativ verwendbaren Daten gewonnen werden. Insbesondere war es unmöglich, die Kiesauffüllung zu kompensieren, welche hinter der PVC-Verrohrung eingebracht worden war.

Kalibrierung

Die Detektoren verschiedener DD3-Sonden können unterschiedliche Empfindlichkeiten haben. Aus diesem Grund ist eine Kalibrierung mit bekannter Massendichte, sowohl für die LSD als auch für die BRD, notwendig. In der Praxis wird dies in einem Wasserbecken und mit einem Aluminiumblock durchgeführt. Den beiden Kalibratoren sind Zahlenwerte zugeordnet, die sogenannten Standard Density Units (**SDU's**). Vereinfacht kann man sagen, die SDU's seien Zählraten, die die Sonde bei diesen bekannten Dichten messen soll. Stimmen die Zählraten mit den SDU's nicht überein, werden sie mit einem Faktor, dem Normierungsfaktor, multipliziert. Diese normalisierten Zählraten sind die Grundlage für die Berechnung der Dichte.

Korrekturen

Es ist wichtig, bei der Konstruktion und Anwendung der Sonde, den Effekt von Kaliberschwankungen auf die Messung so klein wie möglich zu halten. Aus diesem Grund wird das Gerät gegen die Bohrlochwand gepresst. Die Detektoren und die Quelle sind mit Kollimatoren versehen. An der Seite, mit der die Sonde die Bohrlochwand berührt, sind Fenster in den die Detektoren und die Quelle umgebenden Kollimatoren angebracht. Trotzdem sind verschiedene Korrekturen notwendig, bevor die endgültigen Ergebnisse in g/cm^3 ausgegeben werden können:

Bohrlochdurchmesser:

Informationen von Kaliber- und BRD-Log werden für die entsprechenden Korrekturen verwendet.

Spülungsdichte:

Beeinflusst die Dichtemessung. Dies wird bei der Berechnung der kompensierten Dichte berücksichtigt.

Gamma-Ray:

Die Dichte-Detektoren sind auch empfindlich bezüglich der natürlich vorkommenden Gamma-Strahlung. Bedingt durch die Kollimatoren müssen aber nur 50 % der natürlichen Gamma-Ray-Zählraten von denen der Dichte subtrahiert werden.

4.3.4 Neutronen-Porosität (Sonde NN1)

Prinzip und geologische Relevanz der Messung

Das Neutron-Log ist die Messung der Wasserstoff-Konzentration in der, die Sonde umgebenden Formation. Neutronen sind elektrisch neutrale Teilchen mit einer Masse, die weitgehend mit der des Wasserstoffatoms identisch ist.

Ein Neutronen emittierender Americium/Beryllium-Strahler wird unten an der NN1-Sonde befestigt. Die beiden weiter oben liegenden ^3He -Detektoren sind in der Lage, dort ankommende Neutronen zu registrieren. Die emittierten Neutronen sind Neutronen hoher Energie (hohe Geschwindigkeit) und müssen zuerst auf "thermische Energie" verlangsamt werden, bevor sie von den ^3He -Zählrohren wahrgenommen werden können. Dieser Prozess der Verlangsamung wird hauptsächlich verursacht durch elastische Kollisionen mit Atomen gleicher Masse, wie z. B. dem Wasserstoffatom. Millisekunden nach dem Verlassen der Quelle sind die Neutronen soweit verlangsamt (thermischer Zustand), dass sie von den verschiedensten Elementen, hauptsächlich aber vom Chlor, eingefangen werden können.

Nach der Übertragung der beiden Zählraten (gemessen von den beiden Detektoren mit längerem und kürzerem Abstand zum Strahler), wird vom Computer das Verhältnis dieser beiden Werte berechnet. Dieses Verhältnis steht in Relation zu dem Weg der Neutronen, um ein thermisches Energieniveau zu erreichen. Hierdurch wird es möglich, einen gewissen Grad an Linearität und Kaliberunabhängigkeit zu erreichen, wie es mit einer Sonde mit nur einem Detektor nicht möglich ist.

Kompensierte Neutronen-Logs werden aufgezeichnet als scheinbare Sandstein-Porosität, Kalkstein-Porosität oder Dolomit-Porosität.

Tiefe Zählraten sind indikativ für eine **hohe Wasserstoff-Konzentration** und umgekehrt. Wasserstoff ist im Gestein in erster Linie in Form von Wasser vorhanden (**Wasser in Poren, an Minerale gebunden oder als Bestandteil von Mineralstrukturen**, v. a. bei Tonmineralien), tritt aber auch in Öl oder Gas auf.

Kalibrierung

Wie bei anderen radioaktiven Messungen auch, variiert die Empfindlichkeit der NN1-Sonde von Gerät zu Gerät.

Um eine Sonde zu kalibrieren, wird als erstes ein Koeffizient definiert, der die Zählraten in Standard Neutron Units (**SNU's**) konvertiert. SNU's sind interne BPB-Kalibrationseinheiten. Um beide Detektoren zu kalibrieren, werden zwei Nylonblöcke benutzt. Das

Verfahren ist für beide Detektoren identisch. Nylon ist ein guter Moderator und thermalisiert einige der den Strahler verlassenden Neutronen, die damit von den Detektoren wahrgenommen werden können. Aus den bekannten Kalibrator SNU's und den gemessenen Zählraten werden Koeffizienten ermittelt, mit denen es möglich ist, jede gemessene Zählrate in SNU's umzurechnen.

Der Industrie-Standard ist aber nicht ein Log in SNU's, sondern in Kalkstein-Porositätseinheiten. BPB hat Systeme entwickelt, mit denen es möglich ist, SNU's in diese Einheiten umzurechnen. Hierzu wurden verschiedene Materialien mit bekannter Porosität gemessen und mit den Ergebnissen aus Messungen im Neutron Calibration Pit in Houston (Texas) verglichen.

Korrekturen

Es wurden Fels-Matrix und Kaliber-Korrekturen für die Bohrungen M 1400 und M 2100 durchgeführt (SST. N-POR [CAL. CORRECTED]). Die hierzu notwendigen Kaliberdaten stammen von der DD3-Messung.

4.4 Interpretation der Messdaten

4.4.1 Technische Voraussetzungen

Die Bohrung M 2100 war unverrohrt von Endteufe bis 42 m, so dass in dieser Bohrung **quantitative Messungen möglich waren**.

Die **Bohrung M 1400** war bis zu einer Tiefe von 41.5 m mit Stahl (Aussenrohr) und bis 42 m mit PVC (Innenrohr) verrohrt, der Rest der Bohrstrecke bis Endteufe war offen. In dieser unverrohrten Bohrung (Messstrecke) herrschten ideale Bedingungen vor, die kalibrierte und **quantitative Messungen** ermöglichten.

In den verrohrten Bohrungen E 2100 und E 2200 konnten aus den im folgenden beschriebenen Gründen **keine quantitativen Logs** erzeugt werden:

Die Bohrungen waren verrohrt (4 1/2" i.D PVC Rohre) und der Ringraum mit Kies verfüllt. Die vorhandenen **Kaliber-Messungen** geben lediglich den Innendurchmesser des PVC-Rohrs und seine Kontinuität an, weshalb die nötigen Kaliber-Korrekturen zur Kompensation der Gamma-Gamma-Dichte nicht berechnet werden konnten. Bezüglich der natürlichen **Gamma-Strahlung** muss mit einer Abschwächung des GAMMA RAY's bei der Messung im verrohrten Bohrloch gerechnet werden, denn PVC und Kies sind einerseits nur schwache γ -Strahler, absorbieren aber andererseits einen Teil der vom Fels ausgesandten Strahlung. Eine quantitative Auswertung der gemessenen Dichte-

Werte (**Gamma-Gamma-Dichte**) ist auch deshalb nicht sinnvoll, da die Messung eine Dichte ergibt, die sich aus den Dichten des PVC's, der Kiesschüttung (einschliesslich des Wassers in den Poren) und der Gesteins-Formation zusammensetzt. Im Falle der **Neutron-Porosität** wirken sich PVC und das Wasser in der Kiehinterfüllung als zusätzliche Neutronen-Moderatoren zwischen Sonde und Formation aus. PVC ist durch die Anwesenheit von Wasserstoffatomen und die Kiesschüttung hauptsächlich durch die Anwesenheit von Wasser in seinen Poren ein effektiver Moderator. Eine Kompensation dieses nicht konstanten Effekts ist aus den gleichen Gründen wie bei der Dichte-Messung nicht möglich.

Die gemessenen Daten in den verrohrten Bohrungen sind also nur von qualitativer Natur.

4.4.2 Aussagen zum strukturellen Aufbau des Erdsondenfeldes Burgdorf

Im Erdsondenfeld Burgdorf sind für 5 Bohrlöcher detaillierte Daten verfügbar (vgl. Tabelle in Figur 4), so dass zwischen diesen Bohrungen Schichtkorrelationen möglich sind. Das Kaliber-Log hat nur in den unverrohrten Bohrungen M 1400 und M 2100 eine geologisch relevante Aussagekraft. Ebenso konnten die Gamma-Gamma-Dichte und die Neutron-Porosität nur für diese 2 Bohrungen quantitativ korrigiert werden. Von den petrophysikalischen Logs eignet sich vor allem das Log "natürliche Gamma-Strahlung", das in vier Bohrungen gefahren wurde, für qualitative Quervergleiche zwischen den Bohrungen. Der Vorteil, dass dieses Log auch in den verrohrten Bohrungen verwendbare Resultate erbringt, macht es zu einem kostengünstigen Korrelationsinstrument.

Die in der Bohrung M 1400 ausgeschiedenen sandigen Einheiten lassen sich in allen vier gemessenen Bohrungen wiedererkennen. Insbesondere zeigen die drei im Westen des Erdsondenfeldes liegenden Bohrungen M 2100, E 2100 und E 2200 eine sehr ähnliche Verteilung der natürlichen Gamma-Strahlung. Die Peaklagen in M 1400 sind gegenüber diesen drei Bohrungen mehrmals leicht versetzt (vgl. Diskussion unter "Störungen").

Unter Berücksichtigung aller relevanten Daten lassen sich Hinweise für das lokale **Schichteinfallen** gewinnen. Aus den Fotosätzen der Bohrungen M 1400 und M 2200 lässt sich bei Vergleich der Tops von sandigen Einheiten ableiten, dass in M 1400 die Schichten um ca. 1.5 m tiefer liegen. Analog liegen die Peaks der natürlichen Gamma-Strahlung in den westlichen drei geloggtten Bohrungen ebenfalls um mindestens diesen Betrag höher als in der östlich gelegenen Bohrung M 1400. Dies lässt sich auch in Figur 23 erkennen, wo entsprechende Peaks in der Bohrung M 1400 tiefer liegen. Die Peaks der Bohrungen E 2100 und M 2100 liegen praktisch gleich tief, in der Bohrung E 2200 liegen sie aber um 1 m tiefer. Aus diesen Eckdaten lässt sich ein lokales Einfallen der Schichten von ca. 10° gegen ESE ableiten.

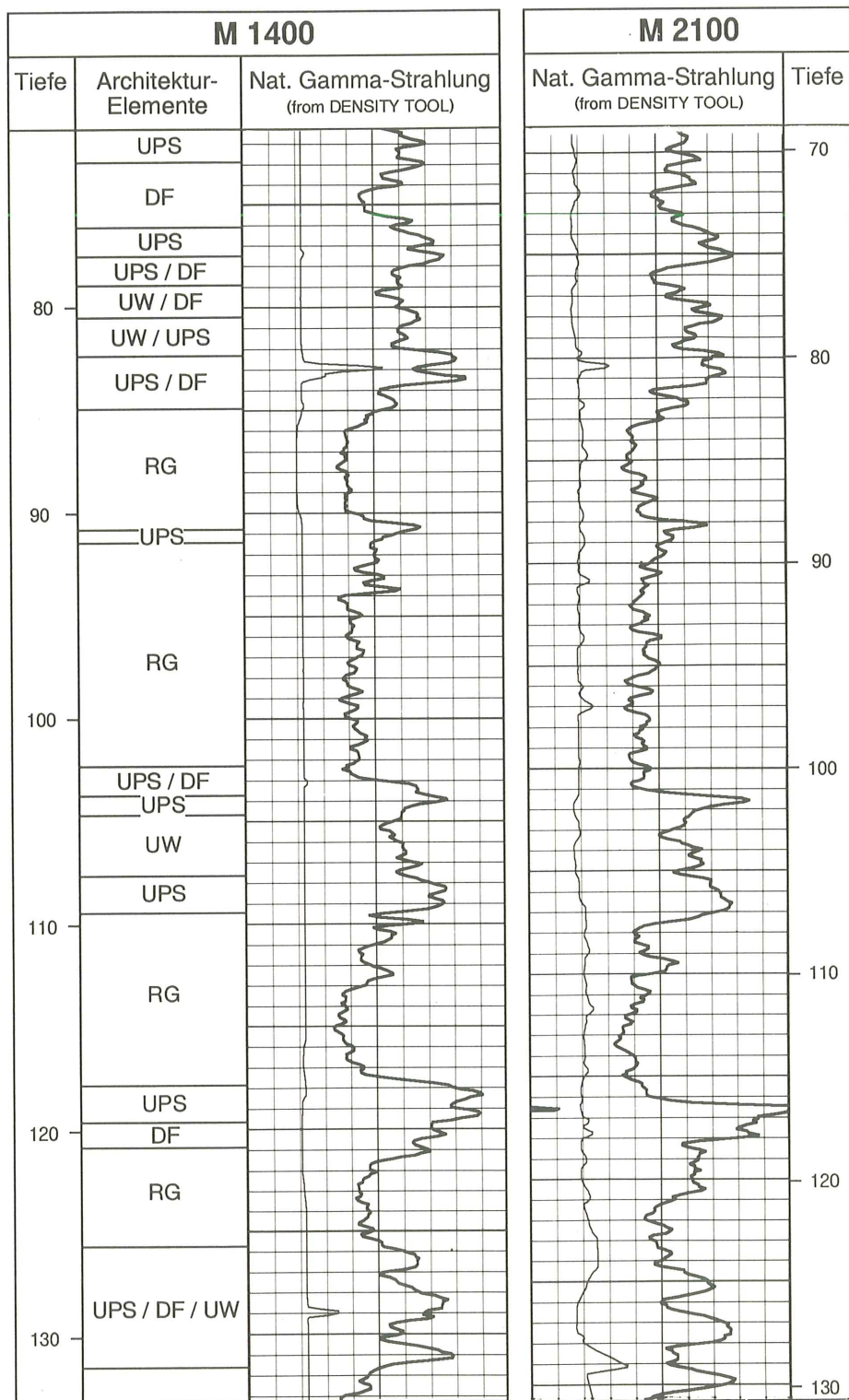


Fig. 23: Versatz von Peakabfolgen zwischen den Bohrungen M 1400 und M 2100. Der Schichtausfall wird als Abschiebung in M 1400 zwischen einer Teufe von 110 m bis 117 m gedeutet. Aus den Kernfotografien ist eine Störung bei 114.9 m bekannt. Abkürzungen siehe Figur 5.

Im strukturellen Aufbau des Erdsondenfeldes sind einzelne **Störungen** festzustellen. Einerseits wurden in den Kernfotografien der Bohrungen M 1400 und M 2200 tatsächlich Kleinstörungen (aufgrund der Einfallwinkel vermutlich Abschiebungen) festgestellt, so durch deutlichen Schichtversatz (M 1400: 63.2 m, M 2200: 129.05 m) oder durch Rutschharnische (M 1400: 114.9 m, M 2200: 133.7 m).

Auch beim Vergleich der Logs "natürliche Gamma-Strahlung" lassen sich Störungen erkennen. Es lässt sich beobachten, dass zwischen den Bohrungen ganze Peakabfolgen gegeneinander versetzt sind, d. h. einzelne kurze Log-Abschnitte der einen Bohrung auf der anderen fehlen. Dieser Befund kann auch zwischen den beiden ca. 8 m auseinanderliegenden, gekernten Bohrungen M 1400 und M 2200 anhand der Kernfotos beobachtet werden, die eine analoge Versetzung der Peakabfolgen zeigen. Dabei passt die Architektur-Element-Abfolge der nicht gemessenen Bohrung M 2200 gut zu den Gamma-Logs der näheren Bohrungen M 2100, E 2100 und E 2200. Die Versetzung der Peakabfolgen ist ein deutliches Anzeichen für tektonische Schichtausfälle (beim Durchfahren von Abschiebungen) oder tektonische Schichtrepetitionen (beim Durchfahren von Aufschiebungen). So sind in M 1400 bei ca. 62 m und zwischen 110 m bis 117 m (vgl. Fig. 23) deutliche Schichtausfälle im Log um je ca. 1 m erkennbar gegenüber den westlichen Bohrungen. Diese Schichtausfälle werden als Abschiebungen in M 1400 gedeutet. In praktisch identischer Tiefenlage können in M 1400 auch Abschiebungen in den Kernfotos beobachtet werden. Andererseits weisen die westlichen Bohrungen gegenüber der Bohrung M 1400 im Tiefenbereich von 130 bis 140 m eine Lücke von ca. 1 m auf. Auch in der gekernten, aber nicht geloggten Bohrung M 2200 konnten bei 129 und 133.7 m Tiefe Kleinstörungen festgestellt werden.

Es konnten keine zusätzlichen Störungen aufgefunden werden, für die nicht schon Hinweise auch in den Bohrkernen aufzufinden waren.

Für eine drei-dimensionale Aufschlüsselung der geologischen Verhältnisse sind diese Daten aber ungenügend. Einerseits fehlen die Fallazimute der Störungen, andererseits sind die Versatzbeträge zu gering, um klare Erkenntnisse gewinnen zu können. Es gibt deshalb eine Vielzahl von möglichen 3-D-Geometrien.

4.4.3 Lokalisierung der Lithofazies-Typen resp. der faziellen Architektur-Elemente in M 1400 mit petrophysikalischen Interpretationsmethoden

4.4.3.1 Allgemeines und Vorgehen

Allgemein lassen sich mit Bohrlochgeophysik Gesteinseinheiten gegeneinander abgrenzen, die sich in Methode-spezifischen physikalischen Messparametern unterscheiden. Die direkte Ableitung eines lithologischen Profils anhand der petrophysikalischen Messdaten ist in den Bohrungen ohne geologische Aufnahme (in Burgdorf die drei Bohrungen M 2100, E 2100, und E 2200) allerdings nur mittels Kenntnissen über die geologische Relevanz der Messmethoden und petrophysikalischen Interpretationsmethoden möglich. Auf die geologische Relevanz der einzelnen Messmethoden wurde bereits bei der Besprechung in Kapitel 4.3 kurz eingegangen.

M 1400 ist die einzige Bohrung, von der sowohl detaillierte geologische Kernbeschreibungen als auch petrophysikalische Messungen vorliegen. Eine gegenseitige Einpassung der Daten ist also nur in dieser Bohrung möglich.

Im Rahmen eines "Blindtestes" wurde die Bohrung M 1400 zusätzlich unabhängig von der geologischen Aufnahme nach petrophysikalischen und sedimentologischen Gesichtspunkten ausgewertet. **Ein Vergleich der erhaltenen Resultate mit denjenigen der geologischen Aufnahme ermöglicht somit eine Beurteilung der Aussagekraft der angewandten petrophysikalischen Interpretationsmethoden.**

In der Bohrung zeigen sich 18 **Kaliberausweitungen** von grösser als 1 inch (bis max. 3 inch). Diese liegen zum grossen Teil in tonig-mergeligen Schichten, häufig im Bereich ausgesprochener Parallellamination. Nur einzelne Ausweitungen liegen in sandigen Einheiten, wobei sie an ausgeprägte Schichtgrenzen gebunden sind.

4.4.3.2 Datenauswahl, Datenqualität und Datenaufbereitung

Die zur Verfügung stehenden Logdaten der natürlichen Gamma-Strahlung, der Gamma-Gamma-Dichte (kompensierte Dichte) und der Neutron-Porosität wurden mittels Digitalisieren von den Originallogs (Massstab 1:200) in ein interaktives Log-Evaluationsprogramm (Petrosys PEP) eingegeben. Die Dateneingabe kann auch mittels industriüblicher Computerbänder (LAS Format), ASCII-Datendateien oder interaktiv vorgenommen werden.

Um eine möglichst hohe Auflösung der Datendichte aufrechtzuerhalten, wurde ein (Digitalisier-) Intervall von 0.10 m gewählt. Ein Vergleich zwischen den Originallogs und den digitalisierten Logs zeigt lediglich minimale Unterschiede.

Werden die Kaliber-Logs mit den Logs der kompensierten Dichte (Gamma-Gamma-Dichte) und der Neutron-Porosität verglichen, so lässt sich erkennen, dass auch nach den Dichte- und Kaliber-Korrekturen die Datenqualität in Abschnitten mit hohen Kaliberabweichungen mehrheitlich unbefriedigend ist und auf den entsprechenden Logs unbrauchbare Messwerte liefert. Diese Abschnitte wurden bei der Bestimmung der Lithologien (Lithofazies-Typen) nicht berücksichtigt.

4.4.3.3 Analyse und Interpretation der Logs (Methodik)

Die auf den Logs dargestellten Messwerte resultieren aus dem kombinierten Einfluss einer grossen Anzahl von geologischen (sedimentologischen), petrophysikalischen und instrumentspezifischen Parametern, wie z. B. Korngrösse und Mineralogie, Porosität und Wassersättigung, "Washout" (Ausbrüche der Bohrlochwand) und Eindringtiefe der Messungen. Oft erlaubt nur eine Kombination mehrerer Methoden und Parameter, ein eindeutiges Resultat zu erhalten. Crossplots sind ein Mittel, um die gegenseitige Abhängigkeit von zwei Parametern zu studieren.

Die Parameter, die in klastischen Sedimenten einen dominierenden Einfluss auf die Messergebnisse haben, sind Tongehalt und Porosität. Diese dominierenden Parameter werden vom Log der natürlichen Gamma-Strahlung, von "Porositäts"-Logs wie Gamma-Gamma-Dichte (Brutto-Dichte), Neutron-Porosität und, falls verfügbar, Sonic-Laufzeit erfasst. Im weiteren können auch Messungen des elektrischen Widerstands beigezogen werden.

Lithofazies

Zusammen mit dem Log der natürlichen Gamma-Strahlung gehört im allgemeinen die Kombination von Porositäts-Logs, z. B. das Log der Neutron-Porosität mit dem Log der Gamma-Gamma-Dichte (oder der Porosität, abgeleitet aus der Gamma-Gamma-Dichte, siehe unten) zu den gebräuchlichsten Methoden zur Bestimmung der Lithofazies oder Lithologie. Das Vorkommen von Tonstein bis feinem Siltstein (Shale) kann allerdings die Interpretation beeinträchtigen.

Die Neutron-Dichte-Kombination (vgl. Beil. 2, Kolonne d) separiert sich bei Vorkommen von tonigen Sedimenten, da das Dichte-Log indirekt auf die Formationsporosität reagiert, während das Neutronen-Log nicht nur auf den Wasserstoff in der Porenflüssigkeit, sondern auch auf den gebundenen Wasserstoff in Tonmineralien reagiert.

Bei klastischen Sedimenten kann das Mass der Separierung zwischen den Logs der Neutron-Porosität und der Porosität, abgeleitet aus der Gamma-Gamma-Dichte, unter Beizug v. a. des Logs der natürlichen Gamma-Strahlung, zur Lokalisierung von Sandsteinen, Siltsteinen und Tonsteinen herangezogen werden.

Porosität

Für die Bestimmung der Porosität ist das Log der Gamma-Gamma-Dichte von Belang. Die Porosität kann auch mit Hilfe des Sonic-Laufzeit-Logs evaluiert werden oder anhand des Widerstandslogs abgeschätzt werden (in Burgdorf nicht vorhanden).

Falls die Formation wassergesättigt ist und die Dichte der Matrix bekannt ist, ergibt sich die **Porosität** ϕ_D aus der Gamma-Gamma-Dichte nach der Formel (SCHLUMBERGER 1972):

$$\phi_D = (\rho_{ma} - \rho_b) / (\rho_{ma} - \rho_{fl})$$

ρ_{ma} = Dichte der "Matrix" (Korndichte)

ρ_b = Logwert

ρ_{fl} = Dichte der Spülungsflüssigkeit in der invadierten Zone

Da in der Bohrung M 1400 bei der Auswertung der Logs die durchschnittliche Korndichte nicht bekannt war, wurde ein Erfahrungswert für Sande, Sandsteine und Quarzite von $\rho_{ma} = 2.65 \text{ g/cm}^3$ angenommen (SCHLUMBERGER 1972). Die Spülungsflüssigkeit bestand aus Süßwasser, woraus sich eine Dichte von 1.0 g/cm^3 ergibt.

Bei der Anwesenheit von tonig-siltigen Sandsteinen (Ton und Silt im Porenraum; "dispersed shale") muss der **Porositätswert** korrigiert werden, gemäss der Formel:

$$\phi_{Dcor} = \phi_D - V_{sh}\phi_{Dsh}$$

V_{sh} = Volumenanteil der tonigen Sedimente ("Shale")

ϕ_{Dsh} = Porosität der tonigen Sedimente

ϕ_{Dsh} berechnet sich aus $(\rho_{ma} - \rho_{sh}) / (\rho_{ma} - \rho_{fl})$, wobei Dsh aus dem Log für die tonigen Sedimente abgelesen wird. Der Wert für ϕ_{Dsh} ist im allgemeinen sehr klein (< 0.2).

Logfazies

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Interpretation der Lithofazies aus den Logdaten ist die Logfazies. Die Logfazies kann als eine typische Logform definiert werden, welche eine Sedimentsequenz charakterisiert und es ermöglicht, diese von anderen zu unterscheiden. Die vertikale Korngrössenvariation führt zu charakteristischen Logformen, wofür eine spezielle Terminologie eingeführt wurde; so kann z. B. ein Gradient (oder eine Rampe) auf dem Logbild eine nach oben feiner oder gröber werdende Sequenz anzeigen.

Die Abfolge von Faziesseinheiten klastischer Sedimente, welche z. B. auf dem Log der natürlichen Gamma-Strahlung aufgezeichnet ist, kann sehr ähnlich dem Verwitterungsprofil im Aufschluss sein, und sie wird oft auf dieselbe Weise für die sedimentologische Interpretation benutzt. Sie bildet jedoch nur einen Teil der Daten für die sedimentologische Analyse.

Als **Grundformen von Logfaziesbildern** gelten die Glocken-Form, die Zylinder-Form und die Trichter-Form, die u. a. vom Log der natürlichen Gamma-Strahlung wiedergegeben werden können. Die Glocken-Form zeichnet sich auf dem Log der natürlichen Gamma-Strahlung durch nach oben im allgemeinen zunehmende Messwerte aus, während die Zylinder-Form mehr oder weniger gleichbleibende Werte zeigt. Demgegenüber zeichnet sich die Trichter-Form durch nach oben im allgemeinen abnehmende Messwerte aus.

Diese Logformen können übereinander zyklisch angeordnet sein, und eine bestimmte Anordnung oder Abfolge von Logfazieseinheiten kann gegebenenfalls zu einer **übergeordneten Logsequenz** gruppiert werden, die ein bestimmtes Ablagerungsmilieu widerspiegelt. Die einzelnen Logformen wie auch die übergeordneten Logsequenzen können gegebenenfalls grossmassstäblich wie auch kleinmassstäblich erkannt werden.

Architektur-Elemente

Als Ausgangspunkt zur Bestimmung der Architektur-Elemente bieten sich die meist mächtigeren (ca. 3 - 17 m) Sedimentkörper der **Rinnengürtel (RG)** an, die mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Logs **meist klar erkennbar** sind. Als schwieriger erweist sich dagegen die Abtrennung von Architektur-Elementen in den zwischengelagerten, ton- und siltreicheren Abschnitten, die Sedimente von Durchbruchsrinnen und -fächern (DR und DF), Uferwällen (UW) und Überschwemmungsebenen (UPS) enthalten können.

Allerdings lassen sich mit Hilfe v. a. der Logs der natürlichen Gamma-Strahlung und der Gamma-Gamma-Dichte auch in diesen Abschnitten ca. 2 - 3 m mächtige Sandsteinlagen erkennen, die den Architektur-Elementen DR und DF zugeordnet werden können. Im Gegensatz zu der geologischen Aufnahme, wo Sedimentstrukturen wie Kreuzschichtung oder Schrägschichtung eine Unterscheidung erlauben, können aufgrund der verfügbaren Logs **Durchbruchsfächer und -rinnen** nicht unterschieden werden. Aus diesem Grunde werden sie **als Element DFR** zusammengefasst.

Für eine weitergehende und verfeinerte Unterscheidung von Architektur-Elementen in den ton- und siltreicheren Abschnitten zwischen den Rinnengürtel-Sedimenten wurden die Fazies- und Elementabfolgen benutzt, wie sie in KELLER et al. (1990) erarbeitet wurden (**Uferwälle UW; Überschwemmungsebenen, Paläoböden und Sümpfe UPS**). **Zur Erkennung dieser Abfolgen** und deren Grenzen auf den Logs - v. a. der natürlichen Gamma-Strahlung - **kann die Logfazies allenfalls weiterhelfen.**

Nach KELLER et al. (1990) besteht das Architektur-Element DFR grundsätzlich entweder aus geringmächtigen, isolierten Sandsteinbänken oder aus mächtigeren, gestapelten Einheiten. Die mächtigeren Einheiten besitzen jeweils eine erosive Basis. Die Hangdengrenze zu Sedimenten der Überschwemmungsebene (UPS) wird meist als scharf beschrieben. Demgegenüber ist die Basis der geringmächtigeren Sandsteinbänke unterschiedlich ausgebildet, je nachdem ob sie auf Sedimenten der Überschwemmungsebene (UPS) oder Uferwallsedimenten (UW) liegen. Im ersten Fall ist der Kontakt ein scharfer, im zweiten dagegen findet ein allmählicher Übergang statt. Wo iso-

lierte Sandsteine der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) von Uferwallsedimenten (UW) überlagert werden, ist der Kontakt zum Hangenden scharf. Bei Überlagerung dieser Sandsteine von Sedimenten der Überschwemmungsebene wird meist ein gradueller Übergang beobachtet.

Über Sedimenten der Überschwemmungsebene (UPS) oder der Rinnengürtel (RG) setzen die Uferwallablagerungen (UW) mit einem scharfen Kontakt ein. Dagegen gehen sie aus den Ablagerungen der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) eher graduell hervor. Der Übergang von Uferwallsedimenten (UW) zu Ablagerungen der Überschwemmungsebene (UPS) ist im allgemeinen graduell.

4.4.3.4 Ergebnisse der Logauswertung

Die zur Verfügung stehenden Logs wurden nach den im Kapitel 4.4.3.3 erläuterten Kriterien ausgewertet, wobei ein Schwergewicht auf die Bestimmung der Lithologie und der Architektur-Elemente gelegt wurde. Sandstein-Porositäten innerhalb der Architektur-Elemente wurden ebenfalls bestimmt.

Lithofazies

Mangels Kalibrierung der Logs durch die geologische Aufnahme (Blindtest!), wurden zur Bestimmung der Lithofazies zunächst die Beziehungen der Logs der natürlichen Gamma-Strahlung und der Gamma-Gamma-Dichte zueinander analysiert. Es zeigte sich dabei, dass sich die Sandstein-Abschnitte durch geringe Messwerte sowohl auf dem Log der natürlichen Gamma-Strahlung als auch auf dem Dichte-Log auszeichnen. Demgegenüber zeichnen sich die Tonsteine durch hohe Messwerte auf dem Log der natürlichen Gamma-Strahlung und verhältnismässig geringe Dichtewerte aus.

Ausgehend von diesen Beobachtungen wurde die Logseparation zwischen der Gamma-Gamma-Dichte und der Neutron-Porosität dazu benutzt, mit Hilfe des Petrosys PEP Evaluationsprogramms die Lithologien zu bestimmen. Um einen numerischen Vergleich zwischen den Logs der Gamma-Gamma-Dichte und der Neutron-Porosität zu ermöglichen, wurde die Porosität aus dem Dichtelog (ϕ_D) ermittelt (s. Kap. 4.4.3.3), nachdem die Abschnitte mit unbefriedigenden Dichte/Kaliber-Korrekturen ausgeblendet wurden. Aufgrund der Logseparation zwischen der Neutron-Porosität und der Porosität aus der Gamma-Gamma-Dichte (scheinbare Dichte-Porosität; Beil. 2) wurden vier Lithofazies-Typen unterschieden (siehe Tab. 19 u. Beil. 2: Typen 1, 2, 2.5, 3).

Im allgemeinen zeichnen sich die Sandsteine bei der Logkombination aus durch einen (positiven) Ausschlag der scheinbaren Dichte-Porosität nach höheren Werten, relativ zu den Werten der Neutron-Porosität, während sich die tonigeren Abschnitte durch einen (negativen) Ausschlag nach geringeren Werten erkennen lassen (siehe Beil. 2, e). Zusätzlich zu den vier Lithofazies-Typen, die mit Hilfe der Dichte-Neutron Logsepa-

ration (bis zu einem gewissen Grad arbiträr) definiert wurden, lassen sich Abschnitte isolieren, die zwar ebenfalls einen negativen Ausschlag zeigen, d.h. eine hohe Gesamtdichte besitzen, sich allerdings auf dem Log der natürlichen Gamma-Strahlung durch geringe Messwerte auszeichnen. In erster Näherung wurden diese als Abschnitte mit einem erhöhten Calcitanteil interpretiert (Lithofazies-Typ 3.5).

Das vollständige Lithofaziesprofil ist in Beilage 2 wiedergegeben.

Lithofazies-Typ (PEP)	Lithologie
1	Tonstein und sehr feiner bis feiner Siltstein
2	mittel bis grober Siltstein
2.5	sehr feiner bis feiner Sandstein
3	mittel bis grober Sandstein
3.5	kalkhaltige Sedimente

Tab. 19: Definition von Lithofazies-Typen

Architektur-Elemente

Zur Interpretation der Architektur-Elemente, so wie sie in KELLER et al. (1990) definiert wurden, dienten die Erkenntnisse, die aus der Lithofazies-Bestimmung sowie aus der Analyse der Logfazies (s. Kap. 4.4.3.3) gewonnen wurden. Ausgehend von den Sandsteinen der Rinnengürtel (RG) und der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) innerhalb der tonig-siltigeren Abschnitte wurde aufgrund der Logfazies-Veränderungen eine Verfeinerung der Unterteilung versucht. Die Ergebnisse sind in Beilage 2 dargestellt, wobei auch hier meistens für Abschnitte kleiner als ca. 2 m keine Zuordnung vorgenommen wurde und daher ein kombiniertes Element resultieren kann (z. B. DFR/UPS oder UPS/UW).

Sandstein-Porositäten

Die aus der Gamma-Gamma-Dichte errechneten Porositäten (ϕ_D) wurden bei Anwesenheit von tonig-siltigen Sandsteinen mit Hilfe des Logs der natürlichen Gamma-Strahlung korrigiert (ϕ_{Dcor}). Die (absoluten oder Gesamt-) Porositätswerte für die Elemente innerhalb der Architektur-Elemente sind in Figur 24 dargestellt. Im allgemeinen ist eine Zunahme der Sandstein-Porositäten von Sedimenten der Überschwemmungsebene (UPS) zu Sedimenten der Rinnengürtel (RG) festzustellen, und wie zu erwarten

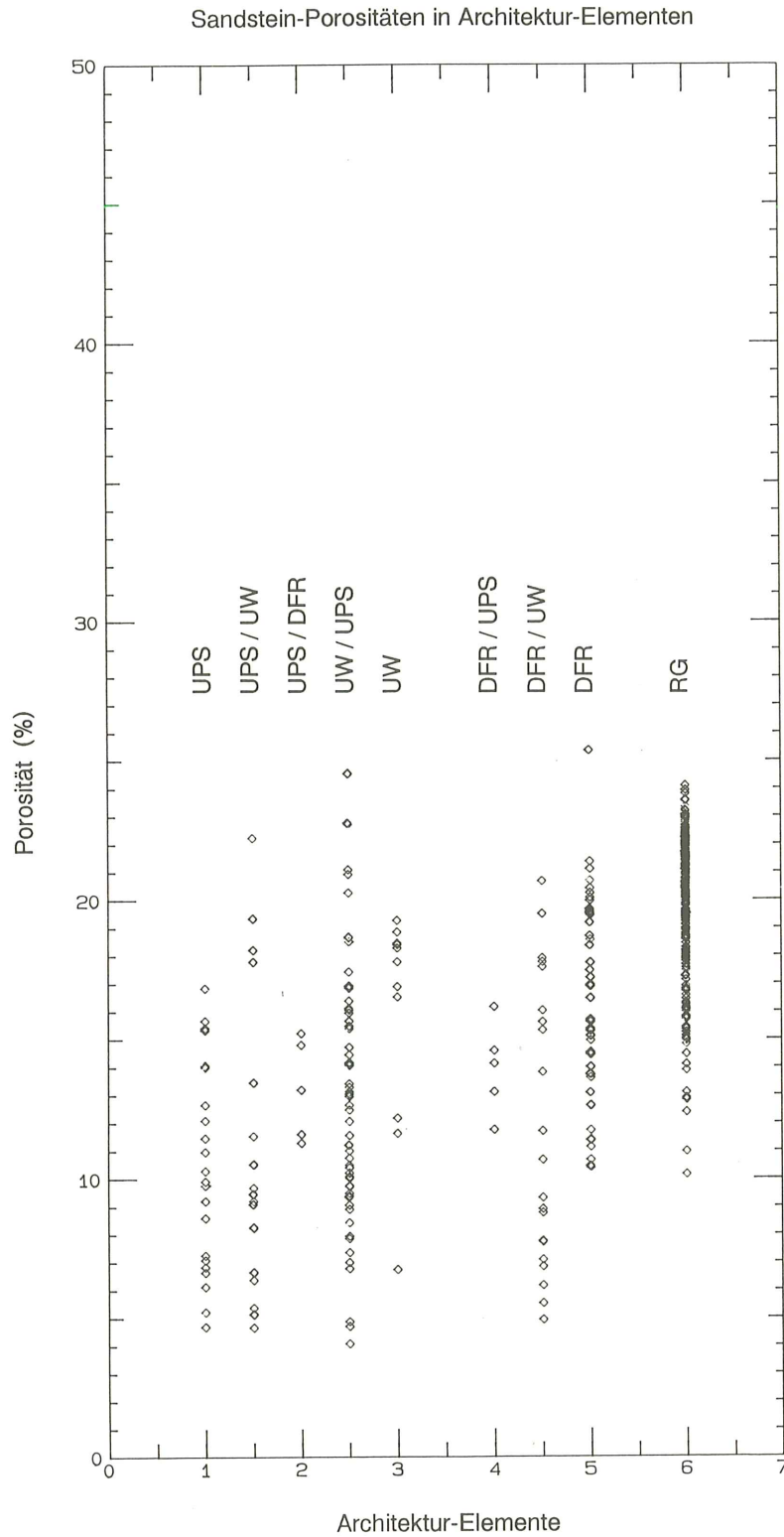


Fig. 24: Gesamtporositäten von Sandsteinen der verschiedenen Architektur-Elemente (petrophysikalische Interpretation)

ist, besitzen die Sandsteine der Rinnengürtel (RG) die höchsten Porositätswerte. Allerdings lassen sich auch für die Sandsteine der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) Werte von über 20 % ermitteln. Eine Assoziation der Sandsteine der DFR mit Sedimenten anderer Architektur-Elemente (z. B. DFR/UPS oder UPS/DFR) zeigt eine Tendenz zu geringeren Gesamt-Porositäten.

Ähnliches gilt auch für die Sandsteine, die in den Uferwallablagerungen (UW) und in der Überschwemmungsebene (UPS) vorkommen. Auch hier können allerdings die Porositäten zwischen 5 - 20 % variieren.

4.4.3.5 Vergleich der Ergebnisse aus der Logauswertung und der geologischen Aufnahme

Lithofazies

Ein Vergleich der Lithofazies-Bestimmung aus den petrophysikalischen Logs mit der Beschreibung aus der geologischen Aufnahme zeigt, gemäss der Korngrössenskala auf Beilage 1, für die PEP Lithofaziestypen 2.5 bis 3 im allgemeinen eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Dies lässt den Schluss zu, dass Sandstein-Abschnitte und -Intervalle mächtiger als ca. 1 m mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Logs erkannt werden können. Bemerkenswert ist der stellenweise erhöhte Detaillierungsgrad der Logs verglichen mit der sedimentologischen Erfassung der einzelnen Intervalle.

Die Kalibrierung der übrigen Lithofaziestypen mit der geologischen Aufnahme zeigt, dass der Lithofazies-Typ 2 nicht nur Siltsteine, sondern auch Feinsandsteine wiedergeben kann. Beim Lithofazies-Typ 3.5 hat sich gezeigt, dass die Annahme kalkhaltiger Sedimente berechtigt ist, doch lässt sich aufgrund der Logs nicht eindeutig zwischen Mergel-Sedimenten und calcithaltigen Sandsteinen unterscheiden.

Architektur-Elemente

Der Vergleich der interpretierten Architektur-Elemente aus den Logs mit der Interpretation aus der geologischen Aufnahme bestätigt im allgemeinen eine Übereinstimmung der Rinnengürtel (RG) und der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR), vgl. Beilage 2.

Diskrepanzen an der Basis der Abschnitte ergeben sich dort, wo aufgrund der Logevaluation kein eindeutiger Unterschied festzustellen ist, wie z. B. zwischen ca. 148.5 - 150 m, ca. 182 - 183 m, und ca. 229.5 - 231.5 m. An diesen Stellen überlagern, gemäss der Interpretation aus der geologischen Aufnahme, Sandsteine der Rinnengürtel (RG) die Sedimente der Durchbruchsfächer (DF) oder -rinnen (DR). Unterschiede zwischen diesen Architektur-Elementen ergeben sich bei geringmächtigeren Sandstein-Abschnitten auch dort, wo aufgrund der Logbilder sowohl RG, als auch DFR interpre-

tiert werden können, wie z. B. zwischen ca. 159.5 - 163.5 m, ca. 167.0 - 169.5 m und 193.5 - 195.5 m. Andererseits können sich auch Diskrepanzen im Dach der Rinnengürtelsedimente (RG) ergeben, die sich aus den relativ klaren Veränderungen der Lithofazies und des Logbildes ergeben, wie z. B. bei ca. 94 m oder bei ca. 187 m.

Im allgemeinen sind bei der Interpretation der petrophysikalischen Logs keine Ablagerungen der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) ausgeschieden worden, die weniger als 1 m mächtig erschienen. Zudem sind bei der Logevaluation nur solche Abschnitte als DFR bezeichnet worden, die gemäss der Lithofazies-Bestimmung einen Wert von 2.5 bis 3.5 aufweisen. Beim Vergleich der Resultate hat sich gezeigt, dass stellenweise Abschnitte mit einem Wert von 2.0 aufgrund der geologischen Aufnahme ebenfalls als Durchbruchsrinnen (DR) oder -fächer (DF) interpretiert werden können, wogegen sie bei der Logevaluation meist den Uferwallsedimenten (UW) zugeordnet wurden.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich mit Hilfe der Logs der natürlichen Gamma-Strahlung, sowie der Gamma-Gamma-Dichte und der Neutron-Porosität eine verlässliche Erkennung der Sandstein-Abschnitte vornehmen lässt.

Diskrepanzen bei der Analyse der Architektur-Elemente zwischen der Loginterpretation und der geologischen Aufnahme können dort entstehen, wo die Möglichkeiten der vorhandenen Logs beschränkt sind (z. B. keine Aussage der Logs über Sedimentstrukturen) oder wo das Bild verschiedener Architektur-Elemente auf den Logs identisch ist.

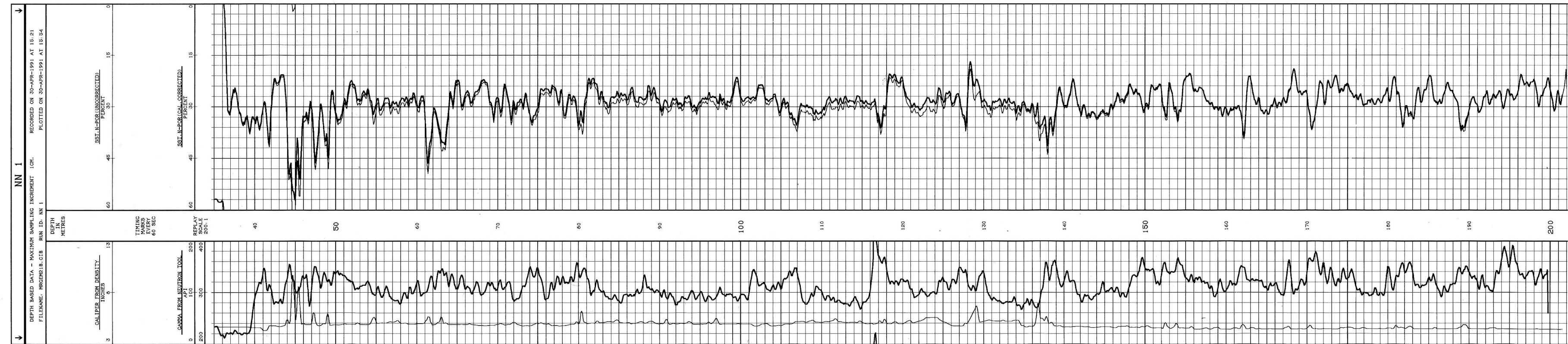
Andererseits ermöglichen die petrophysikalischen Logs über die ganze Profillänge das Erkennen von gross- und kleinmassstäblichen Sequenzen und, indirekt, von detaillierten Variationen der Gesteinsparameter, die die geologische Aufnahme ergänzen können.

LITERATURVERZEICHNIS

- ALLEN, J.R.L. 1970: A quantitative model of grain size and sedimentary structures in lateral deposits. *Geol. J.* 7, 129-146.
- BLÜMLING, P. 1990: Fluid Logging Test in viskoser Bohrspülung (Felslabor Grimsel). Unpubl. Nagra Interner Ber.
- BLÜMLING, P. & HUFSCHMIED, P. 1989: Fluid Logging in Tiefbohrungen. Nagra informiert 11/3+4, 24-38.
- COLLINSON, J.D. 1986: Alluvial sediments. In: READING, H.G. (Ed.): *Sedimentary environments and facies*. Blackwell Sci. Publ., Oxford, p.20-62.
- COOPER, H.H. Jr. & JACOB, C.E. 1946: A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well-field History. *Trans. amer. geophys. Assoc.* 27/4, 526-534.
- FOLK, R.L. 1974: *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill, Austin.
- GALLOWAY, W.E. & HOBDAI, D.K. 1983: *Terrigenous clastic depositional systems*. Springer, New York.
- GUYONNET, D. & LAVANCHY, J.M. 1992: Quick Look Report for the Electrical Conductivity and Packer Flowmeter Tests Performed in Borehole AN13, Bois de la Glaive, Interval 30 - 129 m. Unpubl. Auftragnehmerber. Colenco Power Consulting AG z.H. der Nagra.
- GUYONNET, D. & LÖW, S. 1991: Deponie Lybenstein, Kurzbericht über die Fluid-Logging Messungen in den Bohrungen KB1 und KB2. Unpubl. Auftragnehmerber. Colenco Power Consulting AG.
- GUYONNET, D., RIVERA, A., LÖW, S., JAQUET, O. & CORREA, N.R. 1993: Analysis of Wellenberg fluid-logging data from boreholes SB1, SB3, SB4 and SB6. Nagra Tech. Ber. NTB 92-01. Nagra, Wettingen.
- HALE, F.V. & TSANG, C.F. 1988: A code to compute borehole fluid conductivity profiles with multiple feed points. Nagra Tech. Ber. NTB 88-21. Nagra, Wettingen.
- HECKEL, U. 1990: Zwischenbericht über den Stand der Forschungsarbeiten auf dem Versuchsfeld 1, Jungingen/Zollernalbkreis. Forschungsvorhaben Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien. *Geol. Landesamt Bad.-Württemb., Freiburg i. Breisgau*.
- HESS, A.E. 1986: Identifying hydraulically-conductive fractures with a low velocity borehole flowmeter. *Canad. geotech. J.* 23/1, 69-78.

- HUFSCHMIED, P. 1983: Die Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockergesteins-Grundwasserleitern, eine vergleichende Untersuchung verschiedener Feldmethoden. Diss. ETH-Zürich Nr. 7397.
- KELLER, B., BLÄSI, H.-R., PLATT, N.H., MOZLEY, P.S. & MATTER, A. 1990: Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrungen Langenthal. Nagra Tech. Ber. NTB 90-41. Nagra, Wettingen.
- KELLEY, V. & LÖW, S. 1992: Analysis of a pilot crosshole fluid logging test at the BK-site, Grimsel test site. In: VOMVORIS, S. & FRIEG, B. (Ed.): Interpretation of crosshole hydraulic tests and a pilot fluid logging test for selected boreholes within the BK-site, Grimsel test Nagra Tech. Ber. NTB 91-09. Nagra, Wettingen.
- KELLEY, V.A., LAVANCHY, J.M. & LÖW, S. 1991: Transmissivities and heads derived from detailed analysis of Siblingen 1989 fluid logging data. Nagra Tech. Ber. NTB 90-09. Nagra, Wettingen.
- LAVANCHY, J.M. 1991: Nagra Quick Look Report for the Packer Flowmeter Campaign performed in Burgdorf Borehole M1400, Interval 41 - 150 m. Auftragnehmerber. Colenco Power Consulting AG z.H. der Nagra.
- LÖW, S., TSANG, C.-F., HALE, F. & HUFSCHMIED, P. 1991: The application of moment methods to the analysis of fluid electrical conductivity logs in boreholes. Nagra Tech. Ber. NTB 90-42. Nagra, Wettingen.
- LÖW, S. 1991: Nagra Quick Look Report for the Electrical Conductivity Test Performed in Burgdorf Borehole M14, Interval 54 - 246 m. Auftragnehmerber. Colenco Power Consulting AG z.H. der Nagra.
- LÖW, S., HÜRLIMANN, W., RIVERA, A. & CORREA, N.R. 1992: Inverse Modelling, Covariance and Uncertainty Analysis of Borehole Fluid Electrical Conductivity Logging Data.
- LÖW, S., McNEISH, J., & ANDREWS, R. 1989: Transmissivities and heads derived from detailed analysis of Leuggern 1987 fluid logging data. Auftragnehmerber. Colenco Power Consulting AG z.H. der Nagra.
- MARSILY, G. de 1986: Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers. Academic Press, London.
- MIALL, A.D. 1985: Architectural-element analysis: A new method of facies analysis appl Earth-Sci. Rev. 22, 261-308.
- PAILLET, F.L., HESS, A.E, CHENG, C.H. & HARDIN, E.L. 1987: Characterization of Fracture permeability with High-Resolution vertical flow measurements during borehole pumping. Ground Water 25/1, 28-40.

- REHFELDT, K.R., HUFSCHMIED, P., GELHAR, L.W. & SCHAEFER, M.E. 1989: The Borehole Flowmeter Technique for Measuring Hydraulic Conductivity Variability. Prepared for the Electrical Power Res. Inst. (EPRI), Palo Alto, Calif. USA.
- REIFENSTAHL, F. & STÖBER, I. 1989: Hydraulische Auswertung des Leitfähigkeits-Fluid-Logging und des Absenk-/Injektionstests in der Kontinentalen Tiefbohrung - VB1. Geol. Landesamt Bad.-Württemb., Freiburg i. Breisgau.
- SHELLSCHMIDT, R. & HAENEL, R. 1987: Influx and Water Loss in Openhole Sections of Boreholes Determined by Temperature Measurements. Borehole Temperature Logging, Thermal Flowmeter, Hydrodynamics, Mathematical Model, Bavarian Massif (Falkenberg), Bavaria, TK 25: Nr. 6139.
- SCHLUMBERGER 1972: Log Interpretation. Volume I - Principles. Schlumberger Limited, New York.
- SHUSTER, N.W. & STEIDTMANN, J.R. 1987: Fluvial sandstone architecture and thrust-induced subsidence, Northern Green River Basin, Wyoming. In: ETHRIDGE, F.G., FLORES, R.M. & HARVEY, M.D. (Ed.): Recent developments in fluvial sedimentology (p. 270-287). Spec. Publ. Soc. econ. Paleont. Mineral. 39.
- TAYLOR, K., WHEATCRAFT, S., HESS, J., HAYWORTH, J. & MOLZ, F. 1990: Evaluation of Methods for Determining the Vertical Distribution of Hydraulic Conductivity. Ground Water 28/1, 88-98.
- THOMPSON, B.M. 1990: KPFLOW - A Program to Analyze Borehole Flowmeter Data. Unpubl. Nagra Interner Ber.
- TSANG, C.F., HUFSCHMIED, P. & HALE, F.V. 1990: Determination of Fracture Outflow Parameters with a Borehole Fluid Conductivity Logging Method. Water Resour. Res. 26/4, 561-578.
- TSANG, C.-F. & HUFSCHMIED, P. 1988: A borehole fluid conductivity logging method for the determination of fracture inflow parameters. Nagra Tech. Ber. NTB 88-13. Nagra, Wettingen.
- WARNICK, P.D. & FLORES, R.M. 1987: Evolution of fluvial styles in the Eocene Wasatch Formation, Powder River Basin, Wyoming. In: ETHRIDGE, F.G., FLORES, R.M. & HARVEY, M.D. (Ed.): Recent developments in fluvial sedimentology (p. 303-311). Spec. Publ. Soc. econ. Paleont. Mineral. 39.
- YOUNG, S.C. & WALDROP, W.R. 1989: An Electromagnetic Borehole Flowmeter for Measuring Hydraulic Conductivity Variability. TVA Eng. Lab., Norris, Tennessee.



Bohrung		Geologische Daten	Petrophysikalische Daten	Hydrogeologische Daten
M 1400	Beilage 1	Architektur-Elemente, Kernfotos, Labordaten (Porosität, Durchlässigkeit, Calcit, Ton)	Kaliber, Natürliche Gamma-Strahlung, Kompensierte Dichte (Gamma-Gamma-Dichte), Neutron-Porosität	Fluid-Logging (Packerflowmeter-Logging, Leitfähigkeits-Logging)
	Beilage 2	—	Petrophysikalische Interpretation	—
M 2100	Beilage 3	—	wie Beilage 1	—
M 2200	Beilage 4	Architektur-Elemente, Kernfotos	—	—
E 2100	Beilage 5	—	wie Beilage 1	—
E 2200	Beilage 6	—	wie Beilage 1	—

Bohrung		Geologische Daten	Petrophysikalische Daten	Hydrogeologische Daten
M 1400	Beilage 1	Architektur-Elemente, Kernfotos, Labordaten (Porosität, Durchlässigkeit, Calcit, Ton)	Kaliber, Natürliche Gamma-Strahlung, Kompensierte Dichte (Gamma-Gamma-Dichte), Neutron-Porosität	Fluid-Logging (Packerflowmeter-Logging, Leitfähigkeits-Logging)
	Beilage 2	—	Petrophysikalische Interpretation	—
M 2100	Beilage 3	—	wie Beilage 1	—
M 2200	Beilage 4	Architektur-Elemente, Kernfotos	—	—
E 2100	Beilage 5	—	wie Beilage 1	—
E 2200	Beilage 6	—	wie Beilage 1	—

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 16 der Landeshydrologie und -geologie

nagra

TECHNISCHER BERICHT NTB 92 - 03

BOHRUNG M 2200: GEOLOGISCHE INTERPRETATION

USM Burgdorf

DAT.: Dez. 92

BEILAGE 4

LEGENDE GEOLOGIE

Strukturen

Massige Schichtung

Kreuzschichtung

Schrägschichtung

Rippelkreuzschichtung

Kletterrippeln

Parallellamination

Strukturen leicht versackt

Brekzierung

Belastungsmarken

Bioturbation

Rhizolite

Trockenrisse

Tongallen

Rotfleckung, Zu-/Abnahme

Schwarze Färbung

Grau-gelbe Fleckung

Vertikale Oxidationshöfe

Caliche

Rutschspiegelung

Korngrösse

Ton

< 2 Mikrometer

Silt

2 - 63

FS $\frac{f}{f}$

63 - 125

ms L U

125 - 250

ms L U

250 - 350

ms L U

350 - 500

crs L U

500 - 710

crs L U

710 - 1000

crs L U

1000 - 1410

crs L U

1410 - 2000

Architektur-Elemente

DF

Durchbruchsfächer

DR

Durchbruchsrinne

RG

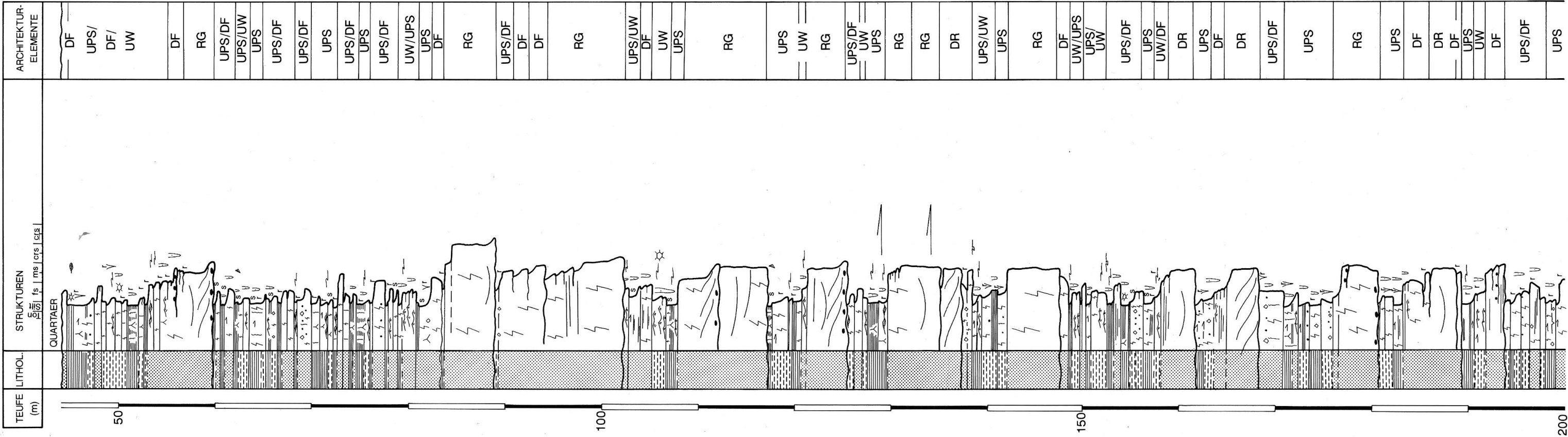
Rinnengürtel

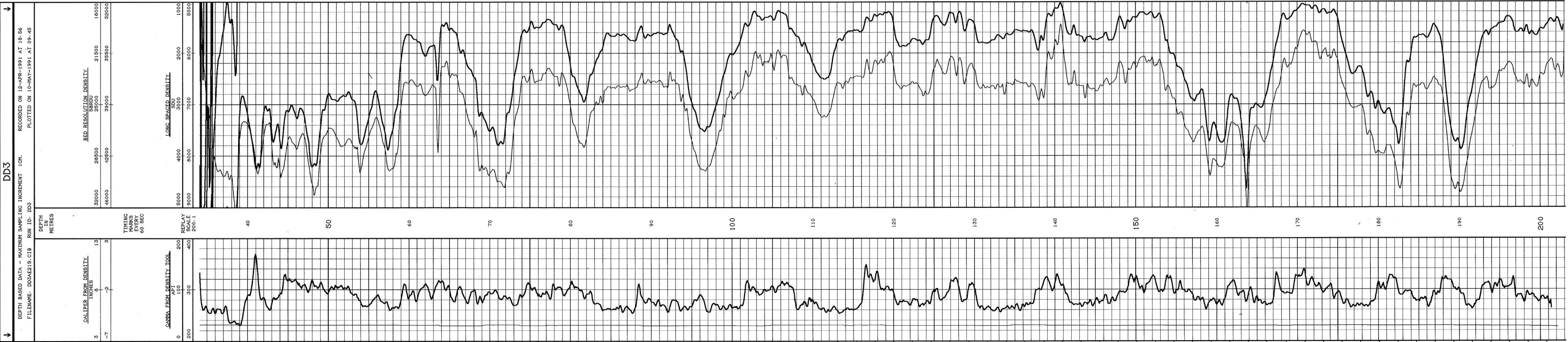
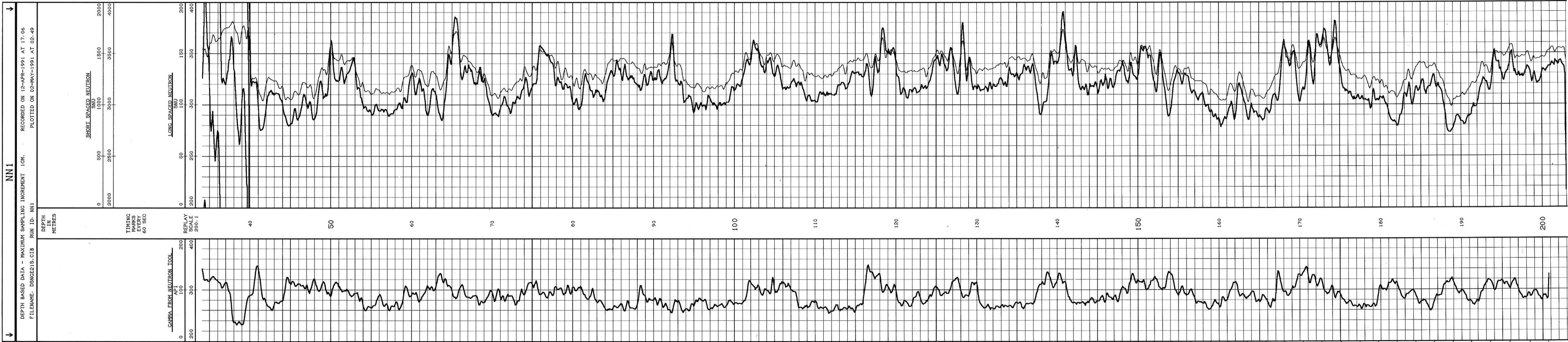
UPS

Überschwemmungsebene, Paläoboden, Sumpf

UW

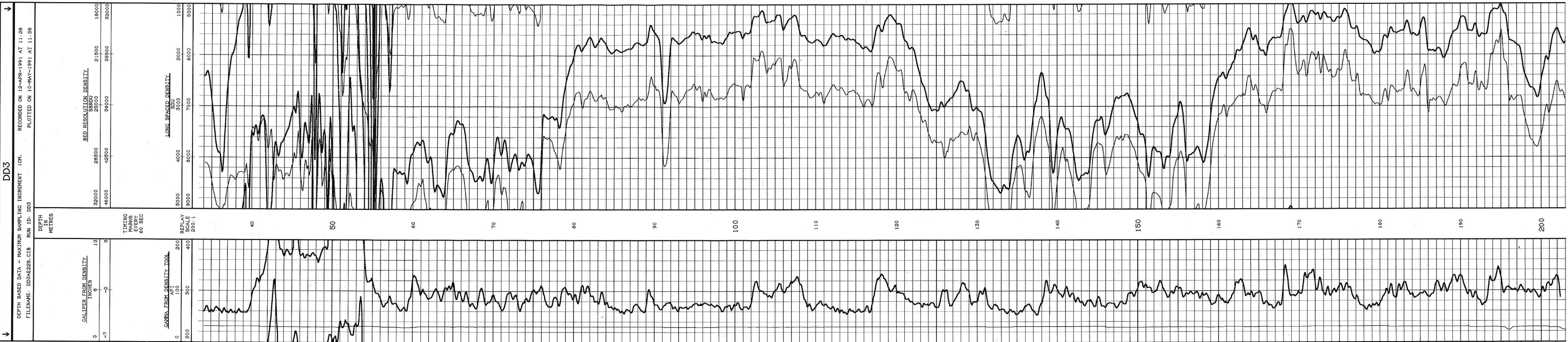
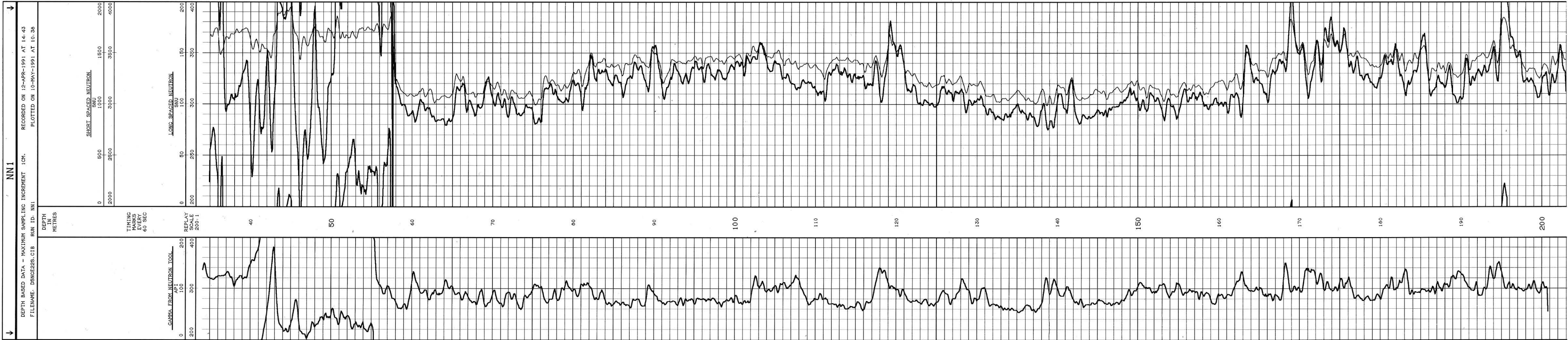
Uferwall





Bohrung		Geologische Daten	Petrophysikalische Daten	Hydrogeologische Daten
M 1400	Beilage 1	Architektur-Elemente, Kernfotos, Labordaten (Porosität, Durchlässigkeit, Calcit, Ton)	Kaliber, Natürliche Gamma-Strahlung, Kompensierte Dichte (Gamma-Gamma-Dichte), Neutron-Porosität	Fluid-Logging (Packerflowmeter-Logging, Leitfähigkeits-Logging)
	Beilage 2	—	Petrophysikalische Interpretation	—
M 2100	Beilage 3	—	wie Beilage 1	—
M 2200	Beilage 4	Architektur-Elemente, Kernfotos	—	—
E 2100	Beilage 5	—	wie Beilage 1	—
E 2200	Beilage 6	—	wie Beilage 1	—

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 16 der Landeshydrologie und -geologie		
nagra TECHNISCHER BERICHT NTB 92 - 03		
BOHRUNG E 2100: PETROPHYSIKALISCHE MESSUNGEN		
USM Burgdorf	DAT.: Dez. 92	BEILAGE 5



Bohrung		Geologische Daten	Petrophysikalische Daten	Hydrogeologische Daten
M 1400	Beilage 1	Architektur-Elemente, Kernfotos, Labordaten (Porosität, Durchlässigkeit, Calcit, Ton)	Kaliber, Natürliche Gamma-Strahlung, Kompensierte Dichte (Gamma-Gamma-Dichte), Neutron-Porosität	Fluid-Logging (Packerflowmeter-Logging, Leitfähigkeits-Logging)
	Beilage 2	—	Petrophysikalische Interpretation	—
M 2100	Beilage 3	—	wie Beilage 1	—
M 2200	Beilage 4	Architektur-Elemente, Kernfotos	—	—
E 2100	Beilage 5	—	wie Beilage 1	—
E 2200	Beilage 6	—	wie Beilage 1	—

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 16 der Landeshydrologie und -geologie		
nagra TECHNISCHER BERICHT NTB 92 - 03		
BOHRUNG E 2200: PETROPHYSIKALISCHE MESSUNGEN		
USM Burgdorf	DAT.: Dez. 92	BEILAGE 6

Teufe in m		Lithologie und Struktur
74.25	DF	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, ockergrau
74.75	DF	Feinsandstein, kalkig, strukturlos, ocker
148.09	DF	Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, ockergrau
148.38	DF	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, ockergrau
148.74	DF	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, ockergrau
149.92	DF	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, ockergrau
159.60	DF	Feinsandstein, kalkig, Rippelschichtung ocker
160.45	DF	Feinsandstein, kalkig, Rippelschichtung ockergrau
160.71	DF	Fein- bis Mittelsandstein, Rippelschichtung ockergrau
241.07	DF	Mittelsandstein, strukturlos ockergrau
241.45	DF	Feinsandstein, kalkig, strukturlos ockergrau
241.90	DF	Grobsilt- bis Feinsandstein, kalkig, strukturlos ockergrau
107.30	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, Kleinrippelschichtung ocker
107.40	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, Kleinrippelschichtung ocker
125.58	UW	Silt- bis Feinsandstein, mergelig, Kleinrippelschichtung ockergrau
150.70	UW	Siltstein, mergelig, Kleinrippelschichtung ocker
150.93	UW	Siltstein, mergelig, Kleinrippelschichtung grünlichgrau
217.45	UW	Silt- bis Feinsandstein, tonig, Kleinrippelschichtung, bunt
219.30	UW	Siltstein, mergelig, Kleinrippelschichtung, bunt
222.10	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, parallellaminiert, grau
232.08	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, parallellaminiert, lila
232.70	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, parallellaminiert, lila-grau
235.10w	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, parallellaminiert, bunt
235.10s	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, parallellaminiert, bunt
236.10w	UW	Mergel, siltig, feinsandig, Kleinrippelschichtung, bunt
236.10s	UW	Mergel, siltig, feinsandig, Kleinrippelschichtung, bunt
237.68w	UW	Feinsandstein, tonig, Kleinrippelschichtung, bunt
237.68s	UW	Feinsandstein, tonig, Kleinrippelschichtung, bunt
244.60w	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, Kleinrippelschichtung, bunt
244.60s	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, Kleinrippelschichtung, bunt
244.80w	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, Kleinrippelschichtung, bunt
244.80s	UW	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, Kleinrippelschichtung, bunt
76.47	UPS	Mergel, siltig, laminiert, bunt
77.65	UPS	Silt- bis Feinsandstein, tonig, laminiert, grau
91.25	UPS	Fein- bis Mittelsandstein, mergelig, laminiert, ockergrau
120.36	UPS	Siltstein, feinsandig, mergelig, laminiert, bunt
128.83	UPS	Siltstein, tonig, laminiert, grau
141.18	UPS	Mergel, siltig, feinsandig, Paläoboden, bunt
154.70	UPS	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig, Paläoboden, grau
155.26	UPS	Silt- bis Feinsandstein, mergelig, Paläoboden, bunt
170.56	UPS	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, Paläoboden, bunt
171.22	UPS	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig, Paläoboden, bunt
176.30	UPS	Mergel, siltig, Paläoboden, bunt
176.53	UPS	Siltstein, tonig, Paläoboden, rot
176.93	UPS	Mergel, siltig, feinsandig mit Kalkknollen, Paläoboden, bunt
183.30	UPS	Siltstein, feinsandig, tonig, Paläoboden, bunt
203.72	UPS	Siltstein, feinsandig, mit Kalkknollen, Paläoboden, braunrot
240.90	UPS	Silt- bis Mittelsandstein, mergelig, Paläoboden, bunt

Teufe in m		Lithologie und Struktur
85.08S	RG	Fein- bis Mittelsandstein, tonig, strukturlos, ockergrau
85.08W	RG	Fein- bis Mittelsandstein, tonig, strukturlos, ockergrau
88.67	RG	Grobsandstein, strukturlos, grau
90.35	RG	Grobsandstein, strukturlos, grau
92.10	RG	Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, ocker
93.70	RG	Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
96.71	RG	Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
97.88	RG	Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
99.45	RG	Mittel- bis Grobsandstein, strukturlos, ockergrau
100.30	RG	Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
102.70	RG	Grobsandstein, strukturlos, ockergrau
103.10	RG	Grobsandstein, kalkig, strukturlos, grau
109.60	RG	Fein- bis Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
109.45	RG	Fein- bis Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
110.40w	RG	Fein- bis Mittelsandstein, planare Schrägschichtung, ockergrau
110.40s	RG	Fein- bis Mittelsandstein, planare Schrägschichtung, ockergrau
112.30	RG	Fein- bis Mittelsandstein, planare Schrägschichtung, grau
113.38	RG	Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
114.18	RG	Mittelsandstein, strukturlos, grau
116.46	RG	Mittel- bis Grobsandstein, strukturlos, grau
116.74	RG	Mittelsandstein, strukturlos, grau
121.20	RG	Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, grau
122.20	RG	Mittelsandstein, strukturlos, grau
123.70	RG	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, grau
124.75	RG	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, grau
125.20	RG	Mittelsandstein, kalkig, Grossrippelschichtung, grau
143.30	RG	Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, bunt
145.20	RG	Mittelsandstein, strukturlos, grau
146.30	RG	Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
177.82	RG	Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, grünlichgrau
178.10	RG	Mittel- bis Grobsandstein, strukturlos, ockergrau
179.90	RG	Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
181.74	RG	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, ockergrau
187.07	RG	Mittelsandstein, strukturlos, grau
187.28	RG	Mittelsandstein, strukturlos, grau
188.91	RG	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, grau
190.36	RG	Mittel- bis Grobsandstein, kalkig, Grossrippelschichtung, grau
222.75	RG	Mittelsandstein, kalkig, Grossrippelschichtung, ockergrau
223.30	RG	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, ockergrau
223.54	RG	Mittel- bis Grobsandstein, geröllf., Grossrippelschichtung, ockergrau
224.50	RG	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, ockergrau
225.50	RG	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, ockergrau
226.60	RG	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, ockergrau
227.80	RG	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, ockergrau
228.08	RG	Mittelsandstein, geröllf., Grossrippelschichtung, ockergrau
228.92	RG	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, ockergrau

161.12	DR	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, ockergrau
161.79	DR	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, ockergrau
162.40	DR	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung, ockergrau
162.90	DR	Mittelsandstein, kalkig, Grossrippelschichtung, grau
166.48	DR	Feinsandstein, planare Schrägschichtung, ockergrau
167.56	DR	Mittelsandstein, planare Schrägschichtung, ockergrau
168.30	DR	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung ockergrau
168.86	DR	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung ockergrau
169.10	DR	Mittelsandstein, kalkig, Grossrippelschichtung grünlichgrau
193.80	DR	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig, Grossrippelschichtung ockergrau
194.35	DR	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung ockergrau
194.55	DR	Mittelsandstein, Grossrippelschichtung ockergrau
195.20	DR	Mittelsandstein, kalkig, Grossrippelschichtung ockergrau
195.65	DR	Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, grau
229.50	DR	Feinsandstein, kalkig, strukturlos, ockergrau
230.80	DR	Fein- bis Mittelsandstein, strukturlos, ockergrau
231.36	DR	Mittelsandstein, kalkig, strukturlos, grau

Teufe in Meter	Gesteinsbeschreibung		Calcit Gew %	Dolomit Gew %	Quarz Gew %	Albit Gew %	Kalifeld- spat Gew %	Tonmin. + Akzessor. Gew %
96.71	Mittelsandstein	RG	7	1	44	22	10	16
103.10	Grobsandstein, kalkig	RG	8	1	38	21	6	26
109.60	Fein- bis Mittelsandstein	RG	6	1	32	15	9	37
110.40	Fein- bis Mittelsandstein	RG	4	3	44	24	10	15
116.46	Mittel- bis Grobsandstein	RG	9	-	57	26	15	?
116.74	Mittelsandstein	RG	9	1	39	20	10	21
222.75	Mittelsandstein, kalkig	RG	8	-	45	23	17	7
228.08	Mittelsandstein, geröllf.	RG	8	1	31	18	14	28
228.92	Fein- b.Mittelsst., kalkig	RG	9	1	35	23	16	16

193.80	Fein- b.Mittelsst., kalkig	DR	9	1	30	22	16	22
194.55	Mittelsandstein	DR	10	2	29	17	7	35
195.20	Mittelsandstein, kalkig	DR	10	1	33	18	10	28
195.65	Mittelsandstein, kalkig	DR	15	2	26	15	6	36
229.50	Feinsandstein, kalkig	DR	9	3	35	22	15	16

241.07	Mittelsandstein	DF	1	3	40	18	9	29
241.45	Feinsandstein, kalkig	DF	10	2	36	20	11	21
241.90	Grobsilt-Feinsst., kalkig	DF	16	1	37	23	13	10

107.40	Grobsilt-Feinsst., mergelig	UW	9	1	18	13	vorh.	59
150.70	Siltstein, mergelig	UW	13	4	22	11	4	46
217.45	Silt- bis Feinsst. tonig	UW	9	3	33	17	9	29
236.10	Mergel, siltig, feinsandig	UW	18	1	25	11	4	41

141.18	Mergel, siltig, feinsandig	UPS	43	2	18	11	5	21
171.22	Grobsilt-Feinsst., mergelig	UPS	18	8	21	14	3	36
176.93	Siltstein, tonig	UPS	31	2	20	14	6	37
240.90	Silt- b.Mittelsst., mergelig	UPS	13	2	26	13	8	38

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 16 der Landeshydrologie und -geologie

nagra

TECHNISCHER BERICHT NTB 92 - 03

LABORUNTERSUCHUNGEN BOHRUNG M 1400: MINERALGEHALTE
(RÖNTGEN- UND COULOMATBESTIMMUNGEN)

USM Burgdorf

DAT.: Dez. 92

BEILAGE 8

Teufe in Meter	Gesteinsbeschreibung		Gesteins- dichte gcm ⁻³	Korn- dichte gcm ⁻³	Porosi- tät %	Permeabilität	
						md	ms ⁻¹
74.25	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig	DF	2.21	2.67	17	193	1.5 10 ⁻⁶
74.75	Feinsandstein, kalkig	DF	2.15	2.69	20	41	3.9 10 ⁻⁷
148.09	Mittelsandstein, kalkig	DF	2.16	2.64	18	471	4.5 10 ⁻⁶
148.38	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig	DF	2.26	2.66	15	65	6.2 10 ⁻⁷
148.74	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig	DF	2.07	2.63	21	732	6.9 10 ⁻⁶
149.92	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig	DF	2.17	2.62	17	195	1.8 10 ⁻⁶
159.60	Feinsandstein, kalkig	DF	2.21	2.66	17	23	2.2 10 ⁻⁷
160.45	Feinsandstein, kalkig	DF	2.14	2.64	19	74	7.0 10 ⁻⁷
160.71	Fein- bis Mittelsandstein	DF	2.09	2.61	20	1020	9.5 10 ⁻⁶
241.07	Mittelsandstein	DF	1.97	2.60	24	1310	1.2 10 ⁻⁵
241.45	Feinsandstein, kalkig	DF	2.16	2.66	19	200	1.9 10 ⁻⁶
241.90	Grobsilt- bis Feinsandstein, kalkig	DF	2.30	2.72	15	3	2.8 10 ⁻⁸

107.30	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.30	2.64	13	0	-
107.40	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.41	2.70	11	0	-
125.58	Silt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.47	2.66	7	0	-
150.70	Siltstein, mergelig	UW	2.42	2.69	10	0	-
150.93	Siltstein, mergelig	UW	2.40	2.65	9	0	-
217.45	Silt- bis Feinsandstein, tonig	UW	2.28	2.62	13	0	-
219.30	Siltstein, mergelig	UW	2.57	2.66	3	0	-
222.10	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.52	2.65	5	0	-
232.08	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.61	2.69	3	0	-
232.70	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.53	2.67	5	0	-
235.10w	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.42	2.60	7	0	-
235.10s	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.37	2.59	9	0	-
236.10w	Mergel, siltig, feinsandig	UW	2.53	2.62	3	0	-
236.10s	Mergel, siltig, feinsandig	UW	2.50	2.61	4	0	-
237.68w	Feinsandstein, tonig	UW	2.40	2.70	11	0	-
237.68s	Feinsandstein, tonig	UW	2.43	2.65	8	0	-
244.60w	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.39	2.64	10	0	-
244.60s	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.29	2.63	13	0	-
244.80w	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.42	2.64	8	0	-
244.80s	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UW	2.37	2.66	11	0	-

76.47	Mergel, siltig	UPS	2.51	2.67	6	0	-
77.65	Silt- bis Feinsandstein, tonig	UPS	2.43	2.66	9	0	-
91.25	Fein- bis Mittelsandstein, mergelig	UPS	2.43	2.68	9	0	-
120.36	Siltstein, feinsandig, mergelig	UPS	2.45	2.67	8	0	-
128.83	Siltstein, tonig	UPS	2.41	2.65	9	0	-
141.18	Mergel, siltig, feinsandig	UPS	2.60	2.68	3	0	-
154.70	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig	UPS	2.42	2.70	10	0	-
155.26	Silt- bis Feinsandstein, mergelig	UPS	2.57	2.71	5	0	-
170.56	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UPS	2.52	2.70	7	0	-
171.22	Grobsilt- bis Feinsandstein, mergelig	UPS	2.47	2.67	8	0	-
176.30	Mergel, siltig	UPS	2.54	2.68	5	0	-
176.53	Siltstein, tonig	UPS	2.47	2.63	6	0	-
176.93	Mergel, siltig, f.sandig m.Kalkknoll.	UPS	2.59	2.65	2	0	-
183.30	Siltstein, feinsandig, tonig	UPS	2.44	2.62	7	0	-
203.72	Siltstein, f.sandig, m. Kalkknollen	UPS	2.46	2.60	5	0	-
240.90	Silt- bis Mittelsandstein, mergelig	UPS	2.51	2.60	4	0	-

Teufe in Meter	Gesteinsbeschreibung		Gesteins- dichte gcm ⁻³	Korn- dichte gcm ⁻³	Porosi- tät %	Permeabilität	
						md	ms ⁻¹
85.08s	Fein- bis Mittelsandstein, tonig	RG	2.33	2.60	10	47	4.5 10 ⁻⁷
85.08w	Fein- bis Mittelsandstein, tonig	RG	2.29	2.61	12	159	1.5 10 ⁻⁶
88.67	Grobsandstein	RG	2.04	2.67	24	4050	3.8 10 ⁻⁵
90.35	Grobsandstein	RG	2.02	2.61	23	3850	3.7 10 ⁻⁵
92.10	Mittelsandstein, kalkig	RG	2.13	2.70	21	333	3.2 10 ⁻⁶
93.70	Mittelsandstein	RG	2.10	2.74	23	1510	1.4 10 ⁻⁵
96.71	Mittelsandstein	RG	2.06	2.67	23	1000	9.5 10 ⁻⁶
97.88	Mittelsandstein	RG	2.06	2.67	23	3450	3.3 10 ⁻⁵
99.45	Mittel- bis Grobsandstein	RG	2.04	2.69	24	1530	1.4 10 ⁻⁵
100.30	Mittelsandstein	RG	2.11	2.68	21	1250	1.2 10 ⁻⁵
102.70	Grobsandstein	RG	2.11	2.60	19	2930	2.8 10 ⁻⁵
103.10	Grobsandstein, kalkig	RG	2.18	2.68	19	1150	1.1 10 ⁻⁵
109.45	Fein- bis Mittelsandstein	RG	2.25	2.66	15	6	5.7 10 ⁻⁸
109.60	Fein- bis Mittelsandstein	RG	2.19	2.65	17	63	6.0 10 ⁻⁷
110.40s	Fein- bis Mittelsandstein	RG	2.06	2.64	22	360	3.2 10 ⁻⁶
110.40w	Fein- bis Mittelsandstein	RG	2.04	2.64	23	576	5.5 10 ⁻⁶
112.30	Fein- bis Mittelsandstein	RG	2.09	2.60	20	180	1.7 10 ⁻⁶
113.38	Mittelsandstein	RG	2.08	2.59	20	2050	2.0 10 ⁻⁵
114.18	Mittelsandstein	RG	2.10	2.67	21	1960	1.9 10 ⁻⁵
116.46	Mittel- bis Grobsandstein	RG	2.05	2.69	24	3030	2.8 10 ⁻⁵
116.74	Mittelsandstein	RG	2.04	2.65	23	1400	1.3 10 ⁻⁵
121.20	Mittelsandstein, kalkig	RG	2.16	2.60	17	208	1.9 10 ⁻⁶
122.20	Mittelsandstein	RG	1.97	2.61	25	5660	5.4 10 ⁻⁵
123.70	Mittelsandstein	RG	2.00	2.62	24	3150	3.0 10 ⁻⁵
124.75	Mittelsandstein	RG	2.07	2.59	20	2180	2.1 10 ⁻⁵
125.20	Mittelsandstein, kalkig	RG	2.07	2.65	22	1220	1.1 10 ⁻⁵
143.30	Mittelsandstein, kalkig	RG	2.15	2.61	18	440	4.2 10 ⁻⁶
145.20	Mittelsandstein	RG	2.00	2.61	23	2120	2.0 10 ⁻⁵
146.30	Mittelsandstein	RG	2.05	2.60	21	1700	1.6 10 ⁻⁵
177.82	Mittelsandstein, kalkig	RG	2.12	2.61	19	420	4.0 10 ⁻⁶
178.10	Mittel- bis Grobsandstein	RG	2.07	2.63	21	2660	2.6 10 ⁻⁵
179.90	Mittelsandstein	RG	2.05	2.63	23	1530	1.4 10 ⁻⁵
181.74	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig	RG	2.12	2.63	19	330	3.1 10 ⁻⁶
187.07	Mittelsandstein	RG	1.99	2.63	24	2350	2.3 10 ⁻⁵
187.28	Mittelsandstein	RG	2.03	2.63	23	1250	1.2 10 ⁻⁵
188.91	Mittelsandstein	RG	2.01	2.62	23	3790	3.6 10 ⁻⁵
190.36	Mittel- bis Grobsandstein, kalkig	RG	2.12	2.62	19	1090	1.0 10 ⁻⁵
222.75	Mittelsandstein, kalkig	RG	2.13	2.61	18	430	4.1 10 ⁻⁶
223.30	Mittelsandstein	RG	2.13	2.62	19	330	3.1 10 ⁻⁶
223.54	Mittel- bis Grobsandstein, geröllf.	RG	2.11	2.61	19	1490	1.4 10 ⁻⁵
224.50	Mittelsandstein	RG	2.05	2.61	22	1010	9.5 10 ⁻⁶
225.50	Mittelsandstein	RG	2.01	2.59	22	1610	1.5 10 ⁻⁵
226.60	Mittelsandstein	RG	2.03	2.59	22	1710	1.6 10 ⁻⁵
227.80	Mittelsandstein	RG	2.06	2.57	20	1440	1.3 10 ⁻⁵
228.08	Mittelsandstein, geröllf.	RG	2.06	2.61	21	1190	1.1 10 ⁻⁵
228.92	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig	RG	2.08	2.62	22	220	2.1 10 ⁻⁶

161.12	Mittelsandstein	DR	2.05	2.62	22	950	9.0 10 ⁻⁶
161.79	Mittelsandstein	DR	2.03	2.62	23	3084	2.9 10 ⁻⁵
162.40	Mittelsandstein	DR	2.02	2.61	23	2320	1.8 10 ⁻⁵
162.90	Mittelsandstein, kalkig	DR	2.17	2.62	17	1070	1.0 10 ⁻⁵
166.48	Feinsandstein	DR	2.05	2.63	22	311	2.9 10 ⁻⁶
167.56	Mittelsandstein	DR	2.02	2.63	23	1910	1.8 10 ⁻⁵
168.30	Mittelsandstein	DR	2.03	2.61	22	2240	2.1 10 ⁻⁵
168.86	Mittelsandstein	DR	2.05	2.66	23	1610	1.5 10 ⁻⁵
169.10	Mittelsandstein, kalkig	DR	2.11	2.64	20	690	6.5 10 ⁻⁶
193.80	Fein- bis Mittelsandstein, kalkig	DR	2.10	2.63	20	78	7.4 10 ⁻⁷
194.35	Mittelsandstein	DR	2.06	2.63	22	740	7.0 10 ⁻⁶
194.55	Mittelsandstein	DR	2.06	2.63	22	1170	1.1 10 ⁻⁵
195.20	Mittelsandstein, kalkig	DR	2.10	2.63	20	650	6.2 10 ⁻⁶
195.65	Mittelsandstein, kalkig	DR	2.23	2.63	15	301	2.6 10 ⁻⁶
229.50	Feinsandstein, kalkig	DR	2.17	2.63	18	22	2.1 10 ⁻⁷
230.80	Fein- bis Mittelsandstein	DR	2.10	2.72	23	144	1.3 10 ⁻⁶
231.36	Mittelsandstein, kalkig	DR	2.38	2.66	11	6	5.7 10 ⁻⁸

Teufe in Meter		Sortie- rung	Mittlere Korn- grös- se	mono- kri- stal- lin	Quarz- Poly- kri- stal- lin	to- tal	Feld- späte	Glim- mer	Gest.bruchst. Krist. metam. sili- zickl.	Karbo- nate	Opake Kör- ner	Schwer- minera- lien	Cal- cit Zement	Poro- sität	Ton- ma- trix
96.71	RG	G/MG	0.26	23	9	32	10	4	24	10	tr	tr	1	18	0
103.10	RG	MG	0.55	16	8	24	8	1	40	8	tr	tr	2	17	0
109.60	RG	G/MG	0.23	34	9	43	13	6	19	5	tr	tr	3	10	1
110.40S	RG	G/MG	0.17	33	5	38	11	5	19	5	1	1	2	19	0
116.46	RG	G	0.42	16	7	23	12	3	36	7	tr	tr	1	17	0
116.74	RG	G/MG	0.27	16	9	25	10	6	27	11	tr	tr	2	19	0
145.20	RG	MG	0.38	18	9	27	21	3	23	8	tr	1	1	16	0
222.75	RG	G	0.23	22	8	30	20	1	23	9	1	tr	1	15	0
228.08	RG	G	0.25	21	7	28	22	tr	22	8	tr	1	3	17	0
228.92	RG	MG	0.16	21	5	26	21	8	20	5	tr	tr	2	16	tr
Mittelwert			0.29	22	8	30	15	4	25	8	tr	tr	2	16	0
Min			0.17	16	5	23	8	tr	19	5	tr	tr	1	10	0
Max			0.55	34	9	43	22	8	40	11	1	1	3	19	1
N			10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

162.40	DR	G	0.24	18	9	27	14	2	24	11	tr	tr	1	19	tr
162.90	DR	G	0.32	18	8	26	18	1	22	11	tr	tr	7	15	0
193.80	DR	M	0.15	28	9	37	17	4	17	8	1	tr	1	10	4
194.55	DR	G	0.21	16	8	24	20	1	24	10	tr	tr	2	19	0
195.20	DR	G	0.21	19	5	24	24	1	20	8	tr	tr	2	21	0
195.65	DR	G	0.20	21	6	27	25	1	20	6	tr	tr	7	14	0
229.50	DR	MG	0.09	23	8	31	15	6	21	10	1	tr	4	11	tr
231.36	DR	G/MG	0.24	20	9	29	22	1	22	5	tr	tr	17	4	0
Mittelwert			0.21	20	8	28	19	2	21	9	tr	tr	5	14	tr
Min			0.09	16	5	24	14	1	17	5	tr	tr	1	4	0
Max			0.32	28	9	37	25	6	24	11	1	tr	17	21	4
N			8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	6	8

148.38	DF	MG	0.11	21	8	29	16	3	20	18	tr	tr	5	7	2
149.92	DF	MG	0.15	30	5	35	13	2	18	13	1	tr	2	13	3
160.45	DF	G/MG	0.15	23	7	30	16	1	16	15	4	tr	2	11	3
241.07	DF	G	0.22	20	9	29	14	2	30	3	1	1	tr	19	1
241.45	DF	MG	0.16	21	10	31	19	4	24	3	tr	1	4	14	0
241.90	DF	M	0.07	30	9	39	14	8	14	6	1	1	5	6	7
Mittelwert			0.14	24	8	32	15	3	20	10	1	tr	4	12	3
Min			0.07	20	5	29	13	1	14	3	tr	tr	tr	6	0
Max			0.22	30	10	39	19	8	30	18	4	1	5	19	7
N			6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	9

150.70	UW	S	0.01	18	4	22	2	6	4	15	tr	tr	2	0	48
222.10	UW	S	0.06	16	4	20	11	6	5	8	tr	tr	0	0	49
236.10W	UW	M	0.07	23	7	30	11	17	15	8	1	tr	5	0	14
Mittelwert			0.05	19	5	24	8	10	8	10	tr	tr	2	0	37
Min			0.01	16	4	20	2	6	4	8	tr	tr	0	0	14
Max			0.07	23	7	30	11	17	15	15	1	tr	5	0	49
N			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

91.25	UPS	S	0.16	27	12	39	9	1	30	1	tr	1	1	3	14
240.90	UPS	S	0.08	27	8	35	12	6	14	5	tr	1	3	0	24
176.93	UPS	S	0.02	9	5	14	3	3	3	tr	tr	tr	2	0	73
Mittelwert			0.09	21	8	29	8	3	16	2	tr	1	2	1	37
Min			0.02	9	5	14	3	1	3	tr	tr	tr	1	0	14
Max			0.16	27	12	39	12	6	30	5	tr	1	3	3	73
N			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Sortierung: SG = sehr gut, G = gut, MG = mittel gut, M = mittel,
S = schlecht, SS = sehr schlecht

Mittlere Korngrösse in mm, Modalbestände und Porosität (offene
Porosität) in %, tr = Spur

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 16 der Landeshydrologie und -geologie

nagra

TECHNISCHER BERICHT NTB 92 - 03

LABORUNTERSUCHUNGEN BOHRUNG M 1400: MINERALOGISCH-PETROGRAFISCHE
MODALBESTÄNDE DER GESTEINSPROBEN (BESTIMMUNGEN IN DÜNNSCHLIFFEN)

USM Burgdorf

DAT.: Dez. 92

BEILAGE 10

Teufe in Meter		Cal- cit- Ze- ment	abso- lute Poro- sität	DS- poro- sität	P O R O S I T Ä T S T Y P E N												
					intergran.		Klüf- te	un- diff.	intragranuläre Porosität								
					all- ge- mein	mi- kro in Ton			Feld- späte ma- kro		Litho- klaste ma- mi- kro		Karb.- Gest. ma- mi- kro		Risse in Kör- nern	Glim- mer	un- diff.
96.71	RG	1	23	18	80	0	0	0	0	0	2	10	0	0	5	2	1
103.10	RG	2	19	17	78	0	0	0	1	2	3	7	1	2	6	0	0
109.60	RG	3	17	10	86	0	0	0	1	0	1	9	0	0	1	2	0
110.40S	RG	2	22	19	85	0	0	0	1	3	1	7	0	0	2	1	0
116.46	RG	1	24	17	81	0	0	0	4	5	2	2	1	0	5	0	0
116.74	RG	2	23	19	80	0	0	0	1	0	3	5	0	1	7	3	0
145.20	RG	1	23	16	83	0	0	0	3	3	2	2	0	0	3	3	0
222.75	RG	1	18	15	68	0	0	0	2	1	6	1	0	0	20	2	0
228.08	RG	3	21	17	71	0	0	0	6	0	5	0	0	0	17	1	0
228.92	RG	2	22	16	70	0	0	0	4	0	5	1	0	0	20	0	0

162.40	DR	7	23	15	75	0	0	0	2	1	4	5	0	0	13	0	0
162.90	DR	7	17	15	70	0	0	0	6	0	5	2	0	0	17	0	0
193.80	DR	1	20	10	56	0	0	0	5	6	6	10	2	1	3	8	3
194.55	DR	2	22	19	73	0	0	0	2	5	3	1	1	0	13	2	0
195.20	DR	2	20	21	60	0	0	0	9	6	4	4	1	4	12	0	0
195.65	DR	7	15	14	51	0	0	0	5	2	5	1	0	1	29	4	2
229.50	DR	4	18	11	81	0	0	0	2	1	4	2	0	0	8	2	0
231.36	DR	17	11	4	49	0	0	0	9	1	6	5	0	1	29	1	0

148.38	DF	5	15	7	84	0	0	0	0	0	3	10	0	0	3	0	0
149.92	DF	2	17	13	77	2	0	0	5	0	2	5	0	0	8	1	0
160.45	DF	2	19	11	77	0	0	0	4	2	6	9	0	0	2	0	0
241.07	DF	tr	24	17	65	0	0	1	7	2	6	2	0	0	14	2	1
241.45	DF	4	19	14	77	0	0	0	2	0	8	2	0	0	10	1	0
241.90	DF	5	15	6	75	0	0	1	4	2	7	0	0	0	1	4	6

91.25	UPS	1	9	3	62	19	0	0	2	1	0	9	0	1	4	2	0
-------	-----	---	---	---	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Dünnschliff-Auszählungen, Angaben in %

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 16 der Landeshydrologie und -geologie

nagra

TECHNISCHER BERICHT NTB 92 - 03

LABORUNTERSUCHUNGEN BOHRUNG M 1400:
POROSITÄTSTYPEN

USM Burgdorf

DAT.: Dez. 92

BEILAGE 11

Probe (m)	Zirkon	Turmalin	Apatit	Rutil	Staurolith	Titannit	Epidot Kristalle	Epidot Aggregate	Klinozoisit	Zoisit	Allanit	Horblende	Disthen	Chloritoid	Prehnit	Andere	Total	Granat
74.55	2	1	4	0	0	0	39	20	29	3	0	0	0	0	1	1	100	6
91.25	5	1	4	1	0	0	20	42	25	0	0	1	0	1	0	0	100	20
96.71	4	1	4	0	0	0	22	57	11	0	0	0	0	0	0	1	100	23
109.40	1	3	17	0	0	5	17	21	31	1	0	0	0	0	1	3	100	3
113.38	5	0	8	0	0	3	32	19	31	2	0	0	0	0	0	0	100	34
121.20	2	1	5	0	0	3	21	38	26	3	0	0	0	1	0	0	100	16
145.70	4	7	63	0	0	12	5	1	7	1	0	0	0	0	0	0	100	17
148.74	9	2	6	0	0	5	44	11	19	4	0	0	0	0	0	0	100	109
154.70	2	8	58	1	0	14	10	1	5	1	0	0	0	0	0	0	100	31
166.48	5	4	11	0	0	5	38	14	20	2	0	0	0	1	0	0	100	17
193.50	4	4	37	0	0	6	33	5	11	0	0	0	0	0	0	0	100	11
203.72	7	3	5	0	0	8	25	3	42	1	0	0	0	6	0	0	100	83
231.36	11	2	22	0	0	3	34	4	16	1	2	0	1	4	0	0	100	54
233.30	4	4	9	0	0	10	37	7	26	1	0	0	0	2	0	0	100	59
240.90	5	3	29	0	1	1	29	4	29	0	0	0	0	0	0	0	100	31

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 16 der Landeshydrologie und -geologie

nagra

TECHNISCHER BERICHT NTB 92 - 03

LABORUNTERSUCHUNGEN BOHRUNG M 1400: PROZENTUALE
ZUSAMMENSETZUNG DER SCHWERMINERAL-PROBEN

USM Burgdorf

DAT.: Dez. 92

BEILAGE 12

Geologische Berichte Rapports géologiques Rapporti geologici

Vertrieb durch:

Landeshydrologie und -geologie, CH-3003 Bern

Nr.	1	1987	Tj. Peters, A. Matter, H.-R. Bläsi, A. Gautschi <i>Sondierbohrung Böttstein – Geologie</i>	Fr. 70.-
Nr.	2	1987	A. Escher, H. Masson, A. Steck <i>Coupes géologiques des Alpes occidentales suisses</i>	vergriffen
Nr.	3	1988	A. Pugin <i>Carte des isohypses de la base des sédiments du Quaternaire</i>	Fr. 10.-
Nr.	4	1988	M. Burkhard <i>Horizontalschnitt des Helvetikums der Westschweiz</i>	Fr. 10.-
Nr.	5	1988	A. Matter, Tj. Peters, Ch. Isenschmid, H.-R. Bläsi, H.-J. Ziegler <i>Sondierbohrung Riniken – Geologie</i>	Fr. 70.-
Nr.	6	1988	A. Matter, Tj. Peters, H.-R. Bläsi, J. Meyer, H. Ischi, Ch. Meyer <i>Sondierbohrung Weiach – Geologie</i>	Fr. 70.-
Nr.	7	1988	A. Escher <i>Structure de la nappe du Grand-Saint-Bernard entre le val de Bagnes et les Mischabel</i>	Fr. 10.-
Nr.	8	1988	A. Matter, Tj. Peters, H.-R. Bläsi, F. Schenker, H.-P. Weiss <i>Sondierbohrung Schafisheim – Geologie</i>	Fr. 70.-
Nr.	9	1989	Tj. Peters, A. Matter, H.-R. Bläsi, Ch. Isenschmid, P. Kleboth, Ch. Meyer, J. Meyer <i>Sondierbohrung Leuggern – Geologie</i>	Fr. 70.-
Nr.	10	1989	Tj. Peters, A. Matter, J. Meyer, Ch. Isenschmid, H.-J. Ziegler <i>Sondierbohrung Kaisten – Geologie</i>	Fr. 70.-
Nr.	11	1989	P. Jeanbourquin, M. Burri <i>La zone de Sion-Courmayeur dans la région du Simplon</i>	Fr. 10.-

- | | | | |
|--------|------|--|-----------|
| Nr. 12 | 1990 | H. Dronkert, H.-R. Bläsi, A. Matter
<i>Facies and Origin of Triassic Evaporites from the NAGRA Boreholes, Northern Switzerland</i> | Fr. 60.- |
| Nr. 13 | 1990 | B. Keller, H.-R. Bläsi, N.H. Platt, P.S. Mozley, A. Matter
<i>Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse</i> | Fr. 40.- |
| Nr. 14 | 1992 | P. Diebold, H. Naef, M. Ammann
<i>Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz (regionale Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen)</i> | Fr. 100.- |
| Nr. 15 | 1992 | A. Spicher (†)
<i>Verzeichnis der geologischen und tektonischen Karten und Kartenskizzen der Schweiz 1930-1950 (Neudruck)</i> | Fr. 20.- |

