Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio

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

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 13

Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse

und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrungen Langenthal

Bern, 1990

Erscheint auch als
NAGRA Technischer Bericht 90-41

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio

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

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 13

Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse

und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrungen Langenthal

B. KELLER
H.-R. BLÄSI
N. H. PLATT
P. S. MOZLEY
A. MATTER

Geologisches Institut, Universität Bern

Bern, 1990

Erscheint auch als
NAGRA Technischer Bericht 90-41

Zusammenfassung

Die gezielte sedimentologische Untersuchung der distalen jüngeren Unteren Süsswassermolasse ("Aquitan") in natürlichen Aufschlüssen hat gezeigt, dass in diesen terrestrischen Ablagerungen im wesentlichen vier Faziestypen vorkommen, die auch in Bohrungen (Langenthal, Weiach und Schafisheim) nachgewiesen werden können. Diese bauen wohl unterscheidbare Sedimentkörper auf, die durch ihren genetischen Ursprung, ihre spezifischen Geometrien, petrographischen (Korngrösse und mineralogische Zusammensetzung) wie auch petrophysikalischen (Porosität P, Permeabilität k) Eigenschaften charakterisiert sind und daher als die Architektur-Elemente der distalen USM bezeichnet werden. Es sind dies: RG Rinnengürtel; DFR Durchbruchsfächer und -rinnen; UW Uferwälle und distale Überschwemmungssande; UPS Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen sowie LAK lakustrische Ablagerungen. Die einzelnen Architektur-Elemente zeigen einen stark heterogenen Aufbau, der einerseits von primären sedimentologischen Unterschieden (v.a. hydrodynamische Sortierung), andererseits von diagenetischen Veränderungen (v.a. differentielle Zementation) herrührt. In der distalen USM kommen Rinnengürtel (Architektur-Element RG) sowohl von bodenfrachtreichen als auch von suspensionsfrachtreichen Mischfrachtrinnen vor. Die in der USM dominanten Rinnengürtel bodenfrachtreicher Mischfrachtrinnen sind generell breiter (ca. 150-1500m) und kontinuierlicher als diejenigen suspensionsfrachtreicher Paläorinnen (Breite ca. 40-100m), sind aber auch vielfach amalgamiert und stehen häufig miteinander in erosivem Kontakt.

Aufgrund der petrographischen und petrophysikalischen Eigenschaften lassen sich die Architektur-Elemente in ein sandiges Gerüst aus Rinnensandsteinkörpern mit angrenzenden Durchbruchsfächern und -rinnen (durchschnittliche offene Porosität 13.1 (RG) und 8.6% (DFR), durchschnittliche Permeabilität 486md (RG) und 5md (DFR)) sowie in eine tonig-siltige Matrix (Einbettungssediment praktisch ohne offene Porosität und messbare Permeabilität) der Schwemmebene gruppieren. Der ansehnliche Gesamttongehalt der arenitischen Architektur-Elemente des Gerüsts (Rinnengürtel sowie Durchbruchsfächer und -rinnen) kann auf den hohen Tongehalt der Gesteinsbruchstücke zurückgeführt werden.

Gegen die Alpen und gegen Westen zu ist generell mit einer Zunahme der Breite, der Kontinuität und der Verbundenheit ("Interconnectedness") der Rinnengürtel zu rechnen. Die primären Porositäten und Permeabilitäten dagegen nehmen gegen den Beckennordrand und gegen Osten hin ab, wobei die regional unterschiedliche Diagenese und Tektonisierung einen grossen sekundären Einfluss ausüben.

SUMMARY

Sedimentological study at outcrop and quarry exposures of distal alluvial deposits in the upper part of the Lower Freshwater Molasse ("Aquitan") has revealed four principal facies. The same facies may also be recognised in boreholes (Langenthal, Weiach, Schafisheim) penetrating the continental succession. These facies make up distinct sediment bodies, or "architectural elements", which may be characterised by their different geometries, and by their petrographic and petrophysical properties: grain size and mineralogical composition; porosity P and permeability k.

Each architectural element may be assigned to a particular depositional setting: Meander Belt RG (MB); Crevasse Splays and Crevasse Channels DFR (CS), Levees and Distal Splays UW (LS), Overbank, Paleosols and Swamps UPS (OPS) and Lacustrine LAK (LAC). The individual architectural elements show strong heterogeneity, resulting both from primary sedimentological differences (particularly in hydrodynamic sorting) and from diagenetic modification (notably through variable cementation).

Meander belt sandstones in the distal Lower Freshwater Molasse reflect the occurrence of two types of mixed load channels. Those with a higher bed load component were dominant in the Lower Freshwater Molasse, producing laterally extensive and longitudinally continuous sandstone bodies 150-1500 m in width. Rarer channels with a higher suspended load component deposited complex amalgamated sandstone bodies 40-100 m in width, commonly in erosive contact with each other.

Architectural modelling permits consideration of the distal Lower Freshwater Molasse in terms of a sandy framework, comprising the channel sandstone bodies, each in contact with their associated crevasse splay and crevasse channel sandstones (median porosity 13.1% (RG) and 8.6% (DFR), median permeability 486md (RG) and 5md (DFR)), and a muddy-silty matrix consisting of interbedded floodplain sediments (practically without measurable porosity and with much lower permeability). The anomalously high total mud content of the sandstone units chiefly reflects the elevated mud content of the incorporated lithic rock fragments.

Comparison with the morphologies of modern alluvial systems suggests that channel sandstone bodies in the Lower Freshwater Molasse are likely to show greater longitudinal continuity, greater width and a higher degree of interconnectedness in an upstream direction (i.e. in proximal areas towards the west and towards the Alpine chain). Conversely, primary depositional porosities and permeabilities of the sandstone units are likely to decrease downstream towards more distal areas in the east and at the northern margin of the basin, although regional differences in tectonic style and diagenesis will also exert a major control on the petrophysical and hydrological properties in any given area.

RESUME

L'étude sédimentologique d'affleurements et de carrières dans la partie supérieure de la molasse d'eau douce inférieure ("Aquitan") montrant des dépôts alluviaux distaux a mis en évidence quatre faciès principaux. Ceux-ci ont aussi pu être reconnus dans des forages (Langenthal, Weiach, Schafisheim) traversant les niveaux continentaux. Ces faciès rassemblent des corps sédimentaires différents (éléments architecturaux) qui peuvent être caractérisés par leurs géométries et leurs propriétés pétrographiques et pétrophysiques: granulométrie, composition minéralogique, porosité (P) et perméabilité (k).

Chaque élément architectural peut-être rapporté à un type de dépôts particulier: lits des méandres RG, dépôts de crevasse et chenal de crevasse DFR, levée naturelle et crevasse distale UW, dépôt d'inondation, de paléosol et de marais UPS ainsi que dépôt lacustre LAK. Les éléments architecturaux individuels montrent de fortes hétérogénéités résultant de différences sédimentologiques originelles (en particulier le tri hydrodynamique) et de modifications diagénétiques (notamment par des cimentations différentes).

Dans la molasse d'eau douce inférieure distale, les grès des lits des méandres reflètent la présence de deux types de chenaux avec un transport mixte des sédiments. Ceux présentant des lits de sédiments plus importants sont dominants dans la molasse d'eau douce inférieure, produisant des corps gréseux étendus latéralement et continus longitudinalement de 150 à 1500m de largeur. Plus rarement des chenaux avec un taux de matériaux en suspension plus élevé déposent des amalgames complexes de corps gréseux de 40 à 100m de large, généralement en contact érosif les uns avec les autres.

Les modélisations architecturales permettent de considérer la molasse d'eau douce distale comme une structure sableuse comprenant: les corps gréseux de chenaux chacun en contact avec leurs cônes de débordement latéral et grès de chenaux de débordement associés (porosité médiane 13.1% (RG) et 8.6% (DFR), perméabilité médiane 486md (RG) et 5md (DFR)); et une matrice argilo-silteuse constituée de dépôts de réseaux de débordements interstratifiés (pratiquement sans porosité mesurable et une perméabilité très diminuée). L'importance, anormale, de la fraction argileuse des unités gréseuses reflète principalement le taux élevé d'argiles présent dans les fragments de roches incorporées.

La comparaison avec la morphologie des systèmes fluviatiles actuels suggère que dans la molasse d'eau douce inférieure les corps gréseux de chenaux semblent avoir une plus grande continuité longitudinale, une plus grande largeur et un plus haut degré d'interconnection en amont (c'est-à-dire: dans les régions proximales vers l'ouest et vers la chaîne alpine). Inversement, la porosité et la perméabilité primaire de dépôts des unités gréseuses semblent diminuer en aval vers une zone plus distale à l'est et en bordure nord du bassin, bien que les différences régionales de style tectonique et de diagenèse doivent aussi exercer un contrôle majeur sur les propriétés pétrophysiques et hydrologiques dans une zone donnée.

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG		I
SUMMARY		II
RESUME		III
INHALTSVERZEICHNIS		IV
VERZEICHNIS DER FIGUREN IM TEXT		VI
VERZEICHNIS DER TABELLEN IM TEXT		X
BEILAGENVERZEICHNIS		XI
1	**EINLEITUNG**	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2	Vorgehen	1
2	**DIE UNTERE SÜSSWASSERMOLASSE**	5
2.1	Überblick der Ablagerungsgeschichte	5
2.2	Stratigraphie	6
2.3	Lagerung und Verbreitung	7
3	**SEDIMENTOLOGIE DER UNTEREN SÜSSWASSERMOLASSE**	9
3.1	Methoden	9
3.1.1	Konzept der Architektur-Elemente und der Hierarchie der Architektur	9
3.1.2	Vorgehen	10
3.2	Lithofazies	10
3.2.1	Fazies 1: Mittel- und Grobsandsteine	11
3.2.2	Fazies 2: Fein- und Mittelsandsteine	15
3.2.3	Fazies 3: Grobsilt- und Feinsandsteine	16
3.2.4	Fazies 4: Schlammsteine und Mergel	23
3.2.5	Faziesmodell der mittelländischen USM	27
3.3	Architektur-Elemente	32
3.3.1	Rinnengürtel (RG)	32
3.3.2	Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR)	33
3.3.3	Uferwälle und distale Überschwemmungssande (UW)	34
3.3.4	Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS)	34

3.4	Anwendung des Konzepts der Architektur-Elemente auf die Bohrungen Langenthal, Weiach und Schafisheim	41
3.4.1	Lage der Bohrungen	41
3.4.2	Stratigraphische Beziehungen der USM in den Bohrungen	41
3.4.3	Kurzbeschreibung der Bohrungen	42
3.4.4	Die Architektur der USM in den Bohrungen	46
3.5	Gesamtarchitektur der Unteren Süsswassermolasse	52
3.5.1	Räumliche Ausdehnung der Architektur-Elemente	54
3.5.2	Geometrie des Architektur-Elementes Rinnengürtel (RG)	55
3.5.3	Kontakte und Verbindungen der Rinnensandsteine ("Interconnectedness")	60
3.5.4	Modellvorstellungen	62
4	**SEDIMENTPETROGRAPHIE**	64
4.1	Einleitung	64
4.2	Laborprogramm und Methodik	64
4.3	Zusammensetzung und Textur	68
4.4	Diagenese	74
4.5	Porosität und Permeabilität	75
5	**MINERALOGISCHE UND PETROPHYSIKALISCHE CHARAKTERISIERUNG DER ARCHITEKTUR-ELEMENTE IN DER USM**	84
5.1	Rinnengürtel	84
5.2	Durchbruchsfächer und -rinnen	87
5.3	Uferwall und distale Überschwemmungssandsteine	89
5.4	Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen	90
6	**SCHLUSSFOLGERUNGEN**	93
LITERATURVERZEICHNIS		97

VERZEICHNIS DER FIGUREN IM TEXT

Seite

Fig. 1: Geologische Übersichtskarte des Schweizerischen Molasse-Beckens und Lage der Untersuchungsgebiete (KELLER, im Druck). 3

Fig. 2: Sammelprofil des Schweizerischen Molasse-Beckens (aus KELLER 1990, zusammengestellt nach 1) HAQ et al. 1987; 2) BERGGREN et al. 1985; 3) MATTER et al. 1980, DIEM 1986, KELLER 1989; 4) HAQ et al. 1987; 5) neue Priabonian/Rupélian-Grenze nach ODIN & MONTANARI 1989). 5

Fig. 3: Biostratigraphische Einordnung und lithologische Korrelation der Unteren Süsswassermolasse im schweizerischen Mittelland (aus NAGRA 1988). 7

Fig. 4: Übereinandergestapelte Rinnengürtel (RG) aus mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen. Zwischengeschaltet sind heterolithische Uferwall-Sedimente (UW), Schlammsteine und Mergel der Ueberschwemmungsebene (UPS) sowie tafelige Sandsteine von Durchbruchsfächern. Natürlicher Aufschluss entlang der Emme bei Gerlafingen (SO). 13

Fig. 5: Rinnensandsteinkörper (RG) mit einer lateralen Ausdehnung > 100m. Grube bei St. Urban (LU). Massstab: 2m (Pfeil). 17

Fig. 6: Vertikales prismatisches Gefüge mit erkennbaren einzelnen Wurzelspuren (Pfeil) in einem pedogenisierten, tafeligen Sandsteinabschnitt eines Durchbruchsfächers (DFR). Tongrube bei Pieterlen (BE). Massstab: 30cm. 17

Fig. 7: Kleiner Sandsteinkörper einer Durchbruchsrinne (DFR) geht lateral (Pfeile) in Sandsteine von Durchbruchsfächern über; darüber mächtiger Rinnenfüllungskomplex (RG) aus mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen. Der untere Teil der Sequenz besteht aus roten und grauen, lokal gefleckten Schlammsteinen und Mergeln der Überschwemmungsebene (UPS) sowie eingeschalteten Sandsteinbänken (DFR). Grube bei Roggwil (BE). 19

Fig. 8: Tafelförmige Sandsteinbänke von Durchbruchsfächern, eingeschaltet in Sedimente der Ueberschwemmungsebene; Pfeil zeigt Ausschnitt von Figur 6. Tongrube bei Pieterlen (BE). 21

Fig. 9: Bunt gefleckte, z.T. laminierte rötliche Mergel und Schlammsteine der Ueberschwemmungsebene (UPS) mit einer grauen Grobsilt- bis Feinsandsteinbank mit Kletterrippeln (UW: Uferwall-Ablagerung). Grube bei St. Urban (LU). Massstab: Feldbuch = 30cm. 25

Fig. 10: Die schichtparallele Farbbänderung ("Horizonation", HOLE [1961]) bei Schlammsteinen der Ueberschwemmungsebene widerspiegelt die verschiedenen Oxydationszustände infolge des fluktuierenden Grundwasserspiegels während der Bodenbildung: grau = reduzierend, schlecht entwässert; rot = oxidierend, gut drainiert. Grube bei Roggwil (BE). Massstab = 2m. 25

Fig. 11: Geomorphologische und sedimentäre Charakteristika sowie Ablagerungsformen von Bodenfracht-, Mischfracht- und Suspensionsfracht-Rinnen (nach GALLOWAY 1977). 29

Fig. 12: Vereinfachtes Faziesmodell für den Bereich des distalen Hauptentwässerungssystems der USM im nördlichen Vorlandbecken. 31

Fig. 13: Die verschiedenen Architektur-Elemente der distalen Unteren Süsswassermolasse. 35

Fig. 14: Wechsellagerung von Sandsteinbänken mit Schlammsteinen und Mergeln bei einem geringen Sandstein/Ton-Verhältnis. Grube bei Radelfingen (BE). 37

Fig. 15: Wechsellagerung von Sandsteinbänken der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) mit Schlammsteinen und Mergeln der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) bei einem hohen Sandstein/Ton-Verhältnis; mit kleiner Füllung einer Durchbruchsrinne (DFR) (Pfeil). Grube bei Schüpfen (BE). Massstab: Mächtige Sandsteinbank = 2m (Doppelpfeil). 39

Fig. 16: Charakteristischer ziegelroter Tonhorizont mit vertikalen Wurzelspuren (Paläoboden). Grube bei Radelfingen (BE). Massstab: Hammer = 35cm. 43

Fig. 17: Rote, sandige Tonhorizonte (Paläoböden) in Wechsellagerung mit dünnbankigen und pedogenisierten Sandsteinbänken der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR). Grube bei Schüpfen (BE). Massstab: 2m. 43

Fig. 18: Histogramm der kumulativen Mächtigkeit der verschiedenen Architektur-Elemente in den gekernten Abschnitten der untersuchten Bohrungen (vgl. Tab. 1). 51

Fig. 19: Der hypothetische Modellblock zeigt den heterogenen Aufbau der distalen USM im megaskopischen Bereich. Nebst den verschiedenen Architektur-Elementen ist auch das typische Erscheinungsbild von Klüften berücksichtigt. Diese sind nur in den kompetenten Sandsteinen gut ausgebildet, da die Deformation in den inkompetenten Lagen plastisch kompensiert wurde. 53

Fig. 20: Histogramm der beobachteten Mächtigkeiten einphasiger und amalgamierter Rinnensandsteine in der distalen Unteren Süsswassermolasse. 54

Fig. 21: Graphische Darstellung der beobachteten (x=y) und auf grund empirischer Relationen (y=0.55x) ermittelten Rinnengeometrien der distalen Unteren Süsswassermolasse. 56

Fig. 22: Graphische Darstellung der Beziehung Rinnentiefe / Rinnengürtelbreite für sinusförmige bis mäandrierende Flusssysteme und Ableitung der in der distalen Unteren Süsswassermolasse zu erwartenden Rinnengürtelgeometrien (umgezeichnet und ergänzt nach FIELDING & CRANE [1987]). 57

Fig. 23: Schematische Darstellung der dreidimensionalen Geometrien, der lateralen Zusammenhänge und der internen Schichtung von Rinnengürteln in Abhängigkeit der Sedimentfracht. Im Hauptentwässerungssystem der distalen Unteren Süsswassermolasse dominierten bodenfrachtreiche Mischfrachtrinnen. Daneben kamen auch klassische suspensionsfrachtreiche Mischfrachtrinnen vor (umgezeichnet nach GALLOWAY & HOBDAY [1983]). 60

Fig. 24: Darstellung des Grades der Verbundenheit von Rinnengürteln als Funktion der Nettosandfraktion. Die Ordinate gibt die Zahl der Rinnengürtel an, die jeweils als Gruppe miteinander in Verbindung stehen. Die Nettosandfraktion ist der Quotient der Gesamtmächtigkeit des Lithosoms geteilt durch die Gesamtmächtigkeit aller Rinnensandsteine (nach FIELDING & CRANE [1987]). 61

Fig. 25: Der Modellblock veranschaulicht eine hypothetische Verteilung der für die distale Untere Süsswassermolasse hergeleiteten Rinnengürtel. 62

Fig. 26: Hypothetisches Architekturmodell und Permeabilitätsverteilung in der distalen Unteren Süsswassermolasse. 63

Fig. 27: Beziehung zwischen röntgenographisch ermitteltem Gesamtmineralgehalt (inkl. Tonmineralien in Gesteinsbruchstücken) und Tonmatrix (inkl. Grobglimmer) im Dünnschliff für die verschiedenen Architektur-Elemente. 66

Fig. 28: Vergleich zwischen röntgenographisch und im Dünnschliff bestimmtem Gesamtkarbonatgehalt. 67

Fig. 29: Vergleich zwischen Gesamtporosität und im Dünnschliff resp. mittels Bildanalyse ermittelter Porosität. 68

Fig. 30: Petrographische Zusammensetzung der Proben aus den verschiedenen Architektur-Elementen im Dreiecksdiagramm nach FOLK (1974). 69

Fig. 31: Das Dreiecksdiagramm veranschaulicht den hohen Komponentenanteil in den verschiedenen Architektur-Elementen. 69

Fig. 32: Mittlere mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen Architektur-Elemente. 70

Fig. 33: Abhängigkeit des Tonmatrix-Anteils von den verschiedenen Architektur-Elementen. 71

Fig. 34: Tonmineralogische Zusammensetzung (Fraktion <2µ) der verschiedenen Architektur-Elemente. 71

Fig. 35: Abhängigkeit der mittleren Korngrösse von den verschiedenen Architektur-Elementen. 73

Fig. 36: Glimmergehalt der verschiedenen Architektur-Elemente. 73

Fig. 37: Vergleich von Gesamtporosität und offener Porosität. 76

Fig. 38: Abhängigkeit der durchschnittlichen Gesamtporosität (Medianwert) vom Architektur-Element. 76

Fig. 39: Vergleich der Minus-Zementporosität in den Sandsteinen des Rinnengürtels (RG), der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) sowie der Überschwemmungsebene (UPS). 77

Fig. 40: Abhängigkeit der offenen Porosität vom Gehalt an Calcitzement. 78

Fig. 41: Abhängigkeit der offenen Porosität vom Tonmatrix-Anteil. 78

Fig. 42: Histogramm der relativen Häufigkeit der verschiedenen Porentypen in den Architektur-Elementen. 79

Fig. 43: Durchschnittliche Permeabilität in den vier Architektur-Elementen. 81

Fig. 44: Permeabilitäts-Porositäts-Diagramm. 82

Fig. 45: Abhängigkeit der Permeabilität vom Calcitzement. 82

Fig. 46: Permeabilität und Gesamtporosität der Rinnengürtel-Sandsteine in Abhängigkeit der Sedimentstrukturen. 83

Fig. 47: Übersicht der Eigenschaften der verschiedenen Architektur-Elemente in der distalen Unteren Süsswassermolasse (Abkürzungen für Korngrössen: t Ton, si Silt, fs Feinsand, ms Mittelsand, crs Grobsand). 95

VERZEICHNIS DER TABELLEN IM TEXT

Seite

Tab. 1: Geometrische Daten der Sandsteinkörper und Sandsteinanteile in den untersuchten Aufschlüssen. 33

Tab. 2: Kumulative Mächtigkeiten der einzelnen Architektur-Elemente in den gekernten Abschnitten der untersuchten Bohrungen (vgl. Beilagen 1-4). Die Daten der Bohrung Schafisheim wurden aufgrund von Kernphotographien interpretiert. 50

Tab. 3: Beobachtete und aufgrund empirischer Relationen ermittelte Rinnengeometrien der distalen USM. 59

Tab. 4: Gliederung der Sandsteine des Rinnengürtels und der Durchbruchsfächer und -rinnen aufgrund der Porosität und des Zementgehaltes. 80

Tab. 5: Mineralogische Zusammensetzung der Rinnengürtel-Sandsteine. 84

Tab. 6: Porosität und Permeabilität der Rinnengürtel-Sandsteine. 85

Tab. 7: Mineralogische Zusammensetzung der Durchbruchsfächer- und -rinnen-Sandsteine. 87

Tab. 8: Porosität und Permeabilität der Durchbruchsfächer- und -rinnen-Sandsteine. 88

Tab. 9: Mineralogische Zusammensetzung der Uferwall-Proben. 89

Tab. 10: Porosität und Permeabilität der Uferwall-Proben. 90

Tab. 11: Mineralogische Zusammensetzung der Proben der Überschwemmungsebene. 91

BEILAGENVERZEICHNIS

Beilage 1: Sedimentologisches Profil der Bohrung Langenthal RB101, mit Genese und Architektur-Elementen.

Beilage 2: Sedimentologisches Profil der Bohrung Langenthal RB102, mit Genese und Architektur-Elementen.

Beilage 3: Sedimentologisches Profil der Bohrung Langenthal RB103, mit Genese und Architektur-Elementen.

Beilage 4: Sedimentologisches Profil der Bohrung Weiach mit Genese und Architektur-Elementen.

Beilage 5: Legende zu den sedimentologischen Profilen.

Beilage 6: Probenliste: Lithologie und Struktur.

Beilage 7: Sedimentologisches Profil Langenthal RB101, mit Ergebnissen der Labor- und Dünnschliff-Untersuchungen.

Beilage 8: Sedimentologisches Profil Langenthal RB102, mit Ergebnissen der Labor- und Dünnschliff-Untersuchungen.

Beilage 9: Sedimentologisches Profil Langenthal RB103, mit Ergebnissen der Labor- und Dünnschliff-Untersuchungen.

Beilage 10: Mineralgehalte: Röntgen- und Coulomat-Bestimmungen.

Beilage 11: Porosität, Permeabilität, Gesteins- und Korndichte.

Beilage 12: Mineralogisch-petrographische Modalbestände der Gesteinsproben: Dünnschliff-Auszählungen.

Beilage 13: Porositätstypen: Resultate der Dünnschliff-Auszählungen.

Beilage 14: Mengenverhältnisse der Tonmineralien in der Fraktion <2µ.

Beilage 15: Zusammensetzung der Schwermineral-Proben (Fraktion 0.06-0.4mm).

Beilage 16: Fototafel: Poren in Gesteinen des Uferwalls und der Überschwemmungsebene.

Beilage 17: Fototafel: Poröse und zementierte Sandsteine des Rinnengürtels und des Durchbruchsfächers.

Beilage 18: Fototafel: Authigene Minerale.

Beilage 19: Fototafel: Lösungsporosität in Komponenten.

Beilage 20: Liste der untersuchten Lokalitäten mit Koordinaten.

Beilage 21: Laborprogramm

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die vorliegende Studie ist der Untersuchung der Unteren Süsswassermolasse (USM) im zentralen und östlichen Schweizerischen Molasse-Becken gewidmet und soll in folgenden Fragen und Themenkreisen Aufschluss geben:

- Wie kann die Fazies der Unteren Süsswassermolasse charakterisiert werden und welche Fazieseinheiten lassen sich in der Unteren Süsswassermolasse ausscheiden?

- Welches sind die zu erwartenden räumlichen (lateralen und vertikalen) Beziehungen der verschiedenen Fazieseinheiten? Welche geometrischen Parameter sind aufgrund von Feldbeobachtungen und Berechnungen erfassbar?

- Wie kann die grossräumige zwei- und dreidimensionale Geometrie der Unteren Süsswassermolasse im Untersuchungsgebiet prognostiziert werden? Wie weit ist es möglich, den Aufbau der nicht direkt der Beobachtung zugänglicher Unteren Süsswassermolasse der zentralen und östlichen mittelländischen Molasse vorauszusagen?

- Was für petrophysikalische (Porosität, Permeabilität) und petrographische Eigenschaften (Korngrösse und mineralogische Zusammensetzung) weisen die verschiedenen, am Aufbau der Unteren Süsswassermolasse beteiligten Fazieseinheiten auf?

- Welche Beziehungen bestehen zwischen den Fazieseinheiten einerseits und den petrographisch-petrophysikalischen Eigenschaften andererseits?

- Welche diagenetischen Veränderungen haben die Sedimente erlitten und welchen Einfluss hat die Diagenese auf die petrographisch-petrophysikalischen Eigenschaften und somit auf die potentiellen Fliesswege?

Die Resultate dieses Berichts sollen eine geeignete Grundlage, aber auch ein Wegweiser für weiterführende, detailliertere Untersuchungen in der Unteren Süsswassermolasse darstellen. Deshalb beinhaltet er auch theoretische sowie methodische Erläuterungen.

1.2 Vorgehen

Im Herbst 1989 wurden an repräsentativen Aufschlüssen der Unteren Süsswassermolasse im zentralen und nordöstlichen Mittelland Felduntersuchungen durchgeführt, die eine weitergehende sedimentologisch-fazielle Beurteilung des Ablagerungssystems der Unteren Süsswassermolasse ermöglichen sollten. Die bearbeiteten Aufschlüsse sind in Beilage 20 aufgelistet und auf der geologischen Übersichtskarte (Fig. 1) ist die Lage der Untersuchungsgebiete eingezeichnet.

Einen wesentlichen Beitrag zu den vorliegenden Untersuchungen lieferten drei Bohrungen in der oberen Unteren Süsswassermolasse, die 1989 bei Lotzwil südlich Langenthal (BE) abgeteuft wurden. Diese bis zu 100m tiefen Kernbohrungen wurden am Geologischen Institut der Universität Bern detailliert sedimentologisch bearbeitet (KELLER et al.1989) und lieferten das Probenmaterial für die nachfolgenden Laboruntersuchungen. Ebenfalls mitberücksichtigt und neu bearbeitet wurden die Rohdaten der NAGRA-Bohrungen Weiach (MATTER et al. 1988a) und Schafisheim (MATTER et al. 1988b), welche die Untere Süsswassermolasse in unterschiedlicher Mächtigkeit durchteuften.

Die im Rahmen des umfangreichen Analyseprogramms angewandten verschiedenartigen Labormethoden sollen Auskunft geben über

- die petrographische Zusammensetzung,
- die Korngrössen und die Sortierung,
- den Grad und die Art der Zementation,
- die primären und sekundären Porositäten sowie
- die Permeabilität

der Gesteine der Unteren Süsswassermolasse. Die Probenentnahme erfolgte gezielt auf der Basis der eingehenden Faziesanalyse nach dem Konzept der Architektur-Elemente und der Grössenhierarchie der Architektur.

Fig. 1: Geologische Übersichtskarte des Schweizerischen Molasse-Beckens und Lage der Untersuchungsgebiete (KELLER im Druck).

ALPINES VORLAND
OBERE SÜSSWASSER-MOLASSE
OBERE MEERES-MOLASSE
UNTERE SÜSSWASSER-MOLASSE
UNTERE MEERESMOLASSE UND HELVET. FLYSCHE
HELVET. PALÄOGEN
QUARTÄR
UNTER-OLIGOZÄN DES RHEIN-GRABENS (vorw. marin)
KRISTALLINES GRUNDGEBIRGE UND EXTERNE MASSIFE
0
50 km
N
PLATEAUJURA
FALTENJURA
RHEINTAL GRABEN
BASEL
BODENSEE
BECKEN
ZÜRICH
HÖRNLI
MOLASSE-
DECKEN
NAPF
BERN
ALPINE
LÉMAN
GENEVE

2 DIE UNTERE SÜSSWASSERMOLASSE

2.1 Überblick der Ablagerungsgeschichte

Die Untere Süsswassermolasse (USM) ist die zweitälteste lithostratigraphische Gruppe des Schweizerischen Molasse-Beckens (Fig. 2) und besteht aus einer recht vielfältigen Abfolge kontinentaler Ablagerungen. Die Sedimentation der Unteren Süsswassermolasse begann im südlichen Beckenteil vor ca. 30 Mio. Jahren (Grenze Rupélian/Chattian) mit der Regression des Meeres der Unteren Meeresmolasse (UMM) (LEMCKE 1984; DIEM 1986). Sie dauerte das ganze Chattian (ob. Oligozän) und Aquitanian (unt. Miozän) über an und endete vor ca. 22 Mio. Jahren (Wende Aquitanian/Burdigalian) mit der Transgression der Oberen Meeresmolasse.

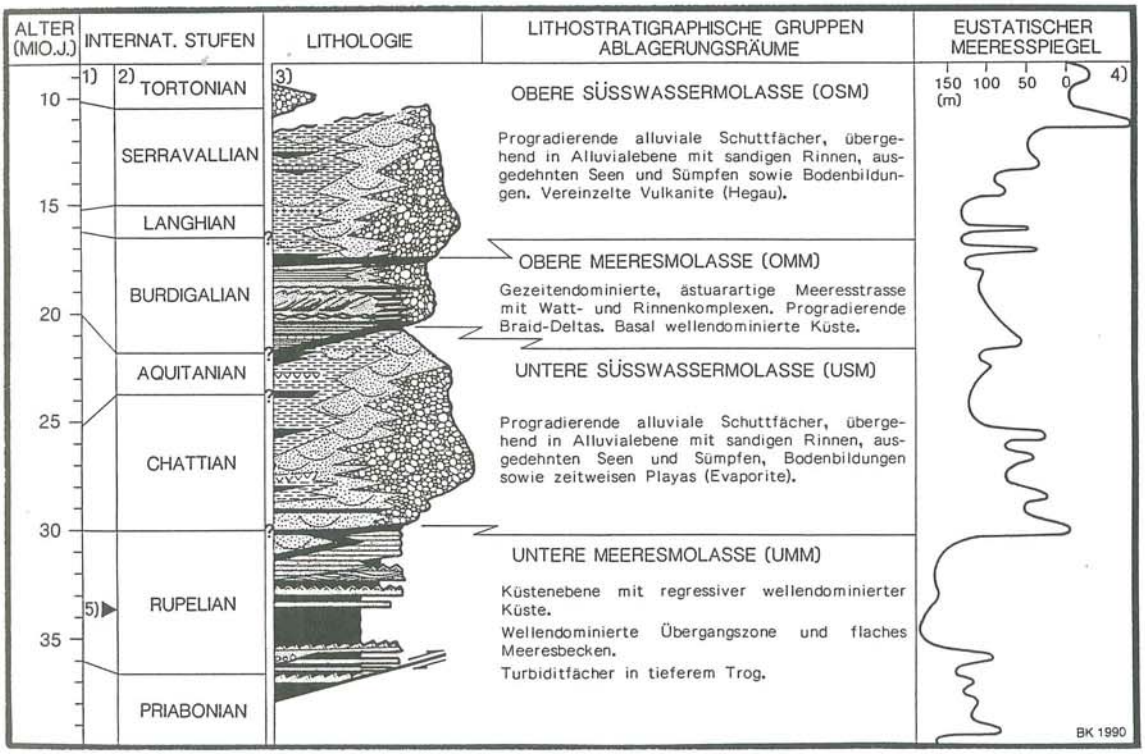


Fig. 2: Sammelprofil des Schweizerischen Molasse-Beckens (aus KELLER 1990, zusammengestellt nach 1) HAQ et al. 1987; 2) BERGGREN et al. 1985; 3) MATTER et al. 1980, DIEM 1986, KELLER 1989; 4) HAQ et al. 1987; 5) neue Priabonian/Rupélian-Grenze nach ODIN & MONTANARI 1989).
In der vorliegenden Arbeit werden die internationalen Stufennamen mit den englischen Endungen -ian verwendet, um Verwechslungen mit der alten Schweizerischen Stratigraphie zu vermeiden. Da für letztere bis heute tw. noch kein sinnvoller Ersatz vorliegt und um Verwechslungen auszuschliessen, werden diese ohne Endsilben und zwischen Anführungszeichen verwendet ("Chatt", "Aquitan" etc.).

Nach dem Rückzug des UMM-Meeres nach Osten blieb im Molasse-Becken eine flache, von kleineren Schuttfächern gesäumte Flussebene zurück, in der vorwiegend rötliche und bunte Feinsedimente mit Einschaltungen von Sandsteinen der Flussrinnen zur Ablagerung gelangten (Untere Bunte Molasse, Molasse rouge; vgl. HABICHT 1987). Die verstärkte Hebung der Alpen während dem oberen Oligozän (TRÜMPY 1985) führte zu ausgeprägter Reliefbildung einerseits und verstärkter Subsidenz im Vorlandbecken andererseits. Dadurch verlagerte sich das Ablagerungszentrum zunehmend vom Alpenrand weg und die Sedimentation griff rasch nach Norden über (HEIM 1919; RIGASSI 1977; HOMEWOOD et al. 1986).

Infolge der nun kräftigeren Erosion und der gesteigerten Transportkraft der Flüsse bauten am damaligen Alpennordrand gewaltige radiale Schuttfächer mit verwilderten Flusssystemen in das Molasse-Becken vor. Bereits auf der Höhe des heutigen Alpenrandes ist in der subalpinen Unteren Süsswassermolasse ein Übergang hin zu anastomosierenden Flusstypen beobachtbar, was als Hinweis für ein niedrigeres Gefälle und eine nachlassende Transportenergie gedeutet werden kann. Auch existieren Anhaltspunkte dafür, dass die Stromrinnen teilweise bereits in derart proximaler Position in eine beckenparallele Richtung eingeschwenkt haben. Von den konglomeratischen Schuttfächern bis zu den alpenfernen Teilen der Schwemmebene im Norden nahmen Gefälle und Transportenergie und folglich auch die durchschnittliche Korngrösse beständig ab.

Das alpine Vorlandbecken wurde von frei mäandrierenden Flüssen generell nach Osten in die Paratethys entwässert, teilweise aber auch nordwärts in die raurakische Senke (BÜCHI & SCHLANKE 1977). Die Küstenlinie der westlichen Paratethys bewegte sich im Chattian und Aquitanian auf der Höhe von München (PAULUS 1963).

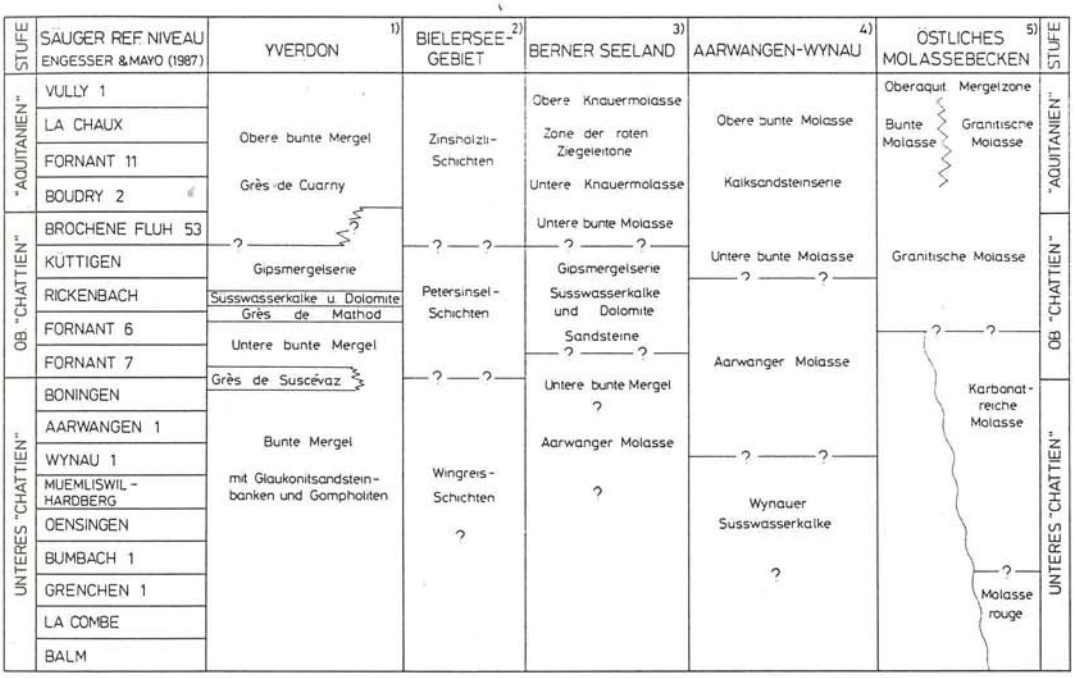
In der Schwemmebene akkumulierten nebst den Sanden der Rinnengürtel auch feinkörnige Uferwall- und Überschwemmungsablagerungen sowie Sumpf- und Bodenbildungen (dunkle und bunte Mergel und Siltsteine). Im alpenfernen Beckenteil lagen zudem zeitweise Sümpfe und ausgedehnte Seen (Wynauer Süsswasserkalk, Molasse à charbon; Zusammenstellung in HABICHT 1987), wo im westlichen Beckenteil sogar Gips abgeschieden wurde (Molasse grise à gypse). Gesamthaft gesehen bildet der ältere Teil der Unteren Süsswassermolasse ("Chatt") am Beckensüdrand eine nach oben gröber werdende ("coarsening-upwards") Mega-Sequenz. Gegen das obere "Aquitan" hin ist dann eine Beruhigung der Sedimentation feststellbar, was sich in einer nach oben feiner werdenden ("fining-upwards") Mega-Sequenz niederschlug. Die Ablagerung der Unteren Süsswassermolasse wurde vor etwa 22 Mio. Jahren durch den Vorstoss des Meeres der Oberen Meeresmolasse in das alpine Vorland beendet, wobei die heterochrone Transgression schrittweise von Südwesten auf das Becken übergriff (BERGER 1985; KELLER 1989).

2.2 Stratigraphie

Der gegenwärtige Wissensstand über die Stratigraphie der Unteren Süsswassermolasse im Untersuchungsgebiet ist bereits in MÜLLER et al. (1984), NAEF et al. (1985) sowie in NAGRA 1988 zusammengefasst. Da für

die vorliegende Studie keine zusätzlichen stratigraphischen Untersuchungen vorgenommen wurden, sei diesbezüglich auf die oben zitierte Literatur sowie HABICHT (1987) verwiesen. Eine zusammenfassende Darstellung gibt Figur 3 wieder.

Die untersuchten Aufschlüsse und Bohrungen liegen in der jüngeren Unteren Süsswassermolasse, im "Aquitan" und umfassen somit die informellen lithostratigraphischen Einheiten der sog. "Oberen bunten Molasse", der "Zone der roten Ziegeleitone" und der angrenzenden "Knauermolassen" sowie der "oberaquitanen Mergelzone" (vgl. dazu HABICHT 1987).



1) JORDI (1955), KISSLING (1974), LOBRINUS & BUCHER (1985)

2) SCHAER (1967)

3) SCHUPPLI (1950), SCHLANKE et al (1978)

4) SCHUPPLI (1952b)

5) SCHLANKE (1974) und Profilaufnahme von MATTER & KELLER (siehe Fig 5.31)

Zusätzliche biostratigraphische Angaben nach ENGESSER & MAYO (1987) und ENGESSER (pers. Mitt. 1987)

Fig. 3: Biostratigraphische Einordnung und lithologische Korrelation der Unteren Süsswassermolasse im schweizerischen Mittelland (aus NAGRA 1988).

2.3 Lagerung und Verbreitung

Durch das nordostwärtige Einfallen des Schweizerischen Molasse-Beckens bedingt, ist die Untere Süsswassermolasse heute im westlichen Mittelland grossräumig aufgeschlossen (Fig. 1), kommt aber auch in der Molasse des Jura vor. Im zentralen und östlichen Mittelland dagegen tritt die Untere Süsswassermolasse nur am Nord- und Südrand (Subalpine Molasse) des Beckens als schmaler Streifen an die Oberfläche.

Im Querprofil zeigen die Ablagerungen der Unteren Süsswassermolasse einen keilförmigen Sedimentkörper, der am Südrand steil gefaltet, verschuppt und teilweise als Decken nach Norden überschoben ist (Subalpine Molasse). Durch die höheren Subsidenz- und Akkumulationsraten bedingt, erreicht die Untere Süsswassermolasse am Beckensüdrand eine Mächtigkeit von mehr als 4200m (FREI 1979). Gegen Norden zu, in der mittelländischen Molasse, wird sie zunehmend geringmächtiger und keilt im Jura aus.

Im Bereich des Alpenrandes bildet die Untere Süsswassermolasse das Hangende der Unteren Meeresmolasse. Weiter gegen Norden, unter dem Mittelland und im Jura, lagert sie direkt auf der geringmächtigen Bohnerz-Formation (Siderolithikum), die hier auf dem verwitterten und verkarsteten mesozoischen Untergrund unterschiedlichen Alters liegt (BÜCHI et al. 1965).

3 SEDIMENTOLOGIE DER UNTEREN SÜSSWASSERMOLASSE

3.1 Methoden

3.1.1 Konzept der Architektur-Elemente und der Hierarchie der Architektur

Um die Natur des vielgestaltigen Aufbaus und die detaillierte dreidimensionale Architektur eines Gesteinskörpers besser modellieren zu können, wurden die bestehenden Fazies-Konzepte in jüngerer Zeit intensiv weiterentwickelt und verbessert. Aus dem Blickwinkel der angewandten Geologie stehen dabei die Heterogenitäten eines Lithosoms (Gesteinskörper mit uniformem oder uniform heterogenem lithologischem Charakter; besteht aus genetisch verwandten Ablagerungen) im Zentrum des Interesses. Denn diese bestimmen im wesentlichen die Verteilung der Porosität, die räumlichen Ausdehnungen und Verbindungen von Fliesswegen oder undurchlässigen Barrieren etc.

In den verfeinerten Konzepten kommt dem hierarchischen Aufbau eines Gesteinskörpers eine übergeordnete Bedeutung zu, der auf der Basis folgender zwei Grundvorstellungen erklärt werden kann (MIALL 1988a):

a) **Konzept der Architektur-Elemente**
Ein Architektur-Element ist ein Gesteinskörper, der durch seine Geometrie, seinen faziellen Aufbau und seine spezifische Grössenordnung charakterisiert wird. Architektur-Elemente sind Produkte einzelner Prozesse oder Abfolgen, beziehungsweise Familien von Prozessen in einem Ablagerungssystem.

b) **Konzept der Grössenhierarchie der Architektur**
Die am Aufbau eines Lithosoms beteiligten Lithofazies und Strukturen decken ein weites Spektrum physikalischer Grössenordnungen ab. Diese stehen in einer spezifischen hierarchischen Beziehung zueinander und reichen von der Grösse von Einzelkörnern über Kleinrippeln bis hin zu Fazies-Assoziationen ganzer Ablagerungssysteme.

Die Architektur eines Ablagerungskomplexes schliesst also die Untersuchung der Geometrie und der internen Anordnung des Gerüsts (z.B. Rinnenkomplexe) und des umgebenden Einbettungsediments (z.B. Ablagerungen der Schwemmebenen) mit ein. Die Anordnung, die Ausdehnung und die gegenseitige Verbindung ("interconnectedness") der Gesteinskörper, insbesondere der sandigen Architektur-Elemente, spielen eine wichtige Rolle bei der Analyse von Grundwassersystemen.

Die vorliegende Studie orientiert sich an diesen neuen Konzepten, wobei prinzipiell folgende vier Grössenordnungen der Fazies-Architektur zu beachten sind (nach HALDORSEN & LAKE 1984):

1) **Mikroskopische Skala (ca. $<10^{-1}$m):**
Grössenbereich vom Dünnschliff bis hin zu einzelnen Sedimentstrukturen (Rippeln, Dünen etc.).
USM-Studie: Dünnschliff- und Laboruntersuchungen.

2) **Makroskopische Skala (ca. $n \cdot 10^0$–$n \cdot 10^1$m):**
Bereich einzelner Architektur-Elemente, einzelner Bohrkerne und durchschnittlicher Oberflächenaufschlüsse; kann oft direkt beobachtet werden.
USM-Studie: Sedimentologische Feld- und Kernaufnahmen.

3) **Megaskopische Skala (ca. $n \cdot 10^2$–$n \cdot 10^3$m):**
Grösse eines Modellblocks, Korrelation zwischen benachbarten Bohrungen; kann nur selten in weiträumigen Aufschlüssen oder grossen Gruben direkt beobachtet werden.
USM-Studie: Berechnung und Ausarbeitung der räumlichen Modelle und Beziehungen zwischen den verschiedenen Architektur-Elementen.

4) **Gigaskopische Skala (ca. $>10^4$m):**
Ausdehnung und räumlicher Aufbau einer ganzen Formation.
USM-Studie: Die grossräumigen Beziehungen der gesamten Unteren Süsswassermolasse wurden im gegebenen Rahmen nicht weiter untersucht. Darunter würden erweiterte seismisch-, litho-, bio- und chronostratigraphische Untersuchungen im ganzen Schweizerischen Molasse-Becken fallen.

Jede dieser Grössenordnungen von Gesteinskörpern weist nun ihre spezifische räumliche Anordnung der Heterogenitäten mit ihren unterschiedlichen Porositäten, Fliesswegen, Barrieren etc. auf, die es zu ergründen gilt.

3.1.2 Vorgehen

Um die geologischen und petrophysikalischen Eigenschaften eines Lithosoms im Detail zu verstehen und zu modellieren, muss dieses zuerst in seine verschiedenen hierarchischen Elemente zerlegt werden. Danach werden die Heterogenitäten auf jeder Grössenstufe separat erfasst und analysiert. Das vollständige Gesamtbild des Lithosoms ergibt sich aus der Summe der Eigenschaften der am Aufbau beteiligten und puzzleartig zusammengefügten Elemente. Nur dieses Vorgehen ergibt eine ausreichende Datenbasis für weiterführende Modellierungen.

3.2 Lithofazies

In den untersuchten Aufschlüssen und Bohrungen im zentralen und nordöstlichen Mittelland können vier wesentliche Lithofaziestypen ausgeschieden werden. Es sind dies:

Fazies 1: Mittel- und Grobsandsteine;
Fazies 2: Fein- und Mittelsandsteine;
Fazies 3: Grobsiltsteine und Feinsandsteine;
Fazies 4: Schlammsteine und Mergel.

Nebst diesen nachfolgend beschriebenen Typen kommen in der Unteren Süsswassermolasse aber auch weitere Lithofazien vor, die vor allem an lakustrische Ablagerungsräume gebunden sind. Beispiele dafür finden

wir in den älteren Teilen der Unteren Süsswassermolasse in der Westschweiz (z.B. KISSLING 1974; FASEL 1986) und zuweilen sogar im proximaleren Beckenbereich (z.B. HABICHT 1945; FASEL 1986).

3.2.1 Fazies 1: Mittel- und Grobsandsteine

Mittel- und Grobsandsteine bilden meist massive Bänke von 2-15m Mächtigkeit. Gelegentlich zeigt diese Fazies einen schwachen "fining-upwards" Trend, der dann meist im Dach der Sandsteinkomplexe ausgeprägt ist. Sonst aber ist die Korngrössenverteilung erstaunlich homogen. Diese Sandsteine beginnen generell über einer scharfen, meist welligen Erosionsdiskordanz und haben an der Basis zuweilen Sohlmarken. In den basalen 50cm finden sich häufig schlecht gerundete, tonige Aufarbeitungsgerölle (intraformationelle Gerölle) von grünlicher Farbe mit 1-2cm Durchmesser. Im Bohrkern RB 102 (Langenthal) bilden diese intraformationellen Gerölle ein 20cm dickes Sohlenpflaster (Beilage 2, bei 61.7m Teufe).

Die Fazies der Mittel- und Grobsandsteine kann direkt von feinkörnigeren Sedimenten (Fazies 3 und 4) überlagert sein oder bildet amalgamierte, mehrphasige Einheiten, wie z.B. der 9m mächtige Sandstein in der Bohrung RB 101 (Beilage 1, 89-98m).

Mitunter können auch grossmassstäbliche, flachwinklige Schrägschichtungen mit Sethöhen von bis zu 2m, gelegentlich auch mehr, beobachtet werden. Trogförmige Schrägschichtungen im Dezimeterbereich sind vor allem in den Bohrkernen leicht kenntlich, finden sich nebst den ebenfalls häufigen, strukturlos erscheinenden Sandsteinen aber auch in den natürlichen Aufschlüssen. Verschiedenenorts weisen diese Mittel- und Grobsandsteine auch wellige, flach einfallende interne Erosionsdiskordanzen auf.

Da die Ziegeleigruben in ausgesuchten mergel- und tonreichen Zonen der Unteren Süsswassermolasse angelegt sind, trifft man dort die unerwünschten Sandsteinkörper wesentlich seltener an als in natürlichen Aufschlüssen und Bohrungen. So bilden die Sandsteine dieser Fazies z.B. am linken Emmeufer bei Gerlafingen (SO) eine rund 30m hohe Felswand (Fig. 4), die durch eine mehrstöckige Abfolge aufgebaut wird. Diese Abfolge besteht aus bis zu 6m mächtigen, übereinander gestapelten Sandsteineinheiten, die voneinander durch relativ dünne, 0.2-2m dicke Schichten feinkörniger Sedimente getrennt sind. Die minimale beobachtete laterale Ausdehnung der Fazies der Mittel- und Grobsandsteine beträgt 50m.

Interpretation

Die sedimentologischen Merkmale der Fazies der Mittel- und Grobsandsteine lassen diese als Ablagerungen fluviatiler Rinnen interpretieren. Als kennzeichnend können insbesondere die scharfen Erosionskontakte der Rinnensohle, die Sohlenpflaster mit Tongeröllen sowie die vorherrschenden, unter starken unidirektionalen Strömungen entstande-

nen Grossrippeln erwähnt werden. Die für Rinnenfüllungen bezeichnenden "fining-upwards" Sequenzen sind vermutlich vor allem infolge der geringen primären Korngrössenunterschiede meist wenig ausgeprägt. Wie oben ausgeführt, liegen die beobachteten Rinnenablagerungen meist als mächtigere, tabulare, lateral ausgedehnte und teilweise amalgamierte Sandsteinkörper vor (z.B. St. Urban [LU] [Fig. 5] oder Roggwil [BE] [Fig. 7]), weshalb - abgesehen von den mit den Durchbruchsfächern assoziierten Durchbruchsrinnen (Kap. 3.2.2) - nur in wenigen Fällen die aussagekräftigen Rinnenquerschnitte direkt beobachtet werden können. So fand sich in der Mergelgrube Fisibach (AG) eine ca. 5m mächtige Rinnenfüllung vor, die einen eindeutigen Prallhang und gegenüber entsprechende Gleithangablagerungen zeigte. In diesem Fall lässt sich auf einen gewundenen bis mäandrierenden Flussverlauf schliessen. Die zuweilen beobachtbaren flachwinkligen Schrägschichtungen (Epsilon-Schrägschichtung) sind als Gleithangablagerungen von Flussschleifen interpretierbar (JACKSON 1978; COLLINSON & THOMPSON 1982; Fig. 4 [Gerlafingen]) und deuten ebenfalls auf gewundene bis mäandrierende Rinnen hin.

Wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben, widersprechen die weitgehende Abwesenheit sowohl von heterolithischer (aus verschiedenen Sedimenten zusammengesetzt, z.B. Sandstein/Schlammstein Wechsellagerung) Epsilon-Schrägschichtung als auch von "fining-upwards" Sequenzen der Interpretation sinusförmiger oder mäandrierender Paläorinnen in der Unteren Süsswassermolasse nicht, da sie in vielen mäandrierenden Flüssen fehlen (JACKSON 1978).

Die Mächtigkeit einzelner Rinnensandsteine (d.h. die Ablagerungen einer einzelnen Rinne) übersteigt kaum 6m (Tab. 2). Dickere Sandsteinkörper zeigen generell interne Erosionsflächen, die auf eine Amalgamierung der Rinnenfüllungen hindeuten. Die seitliche Flussverlagerung und die damit verbundene laterale Gleithanganlagerung führte im Verlaufe der Zeit zur Ablagerung von ausgedehnten Sandsteinkörpern, den sogenannten Rinnen- oder Mäandergürteln. Bei genügender Subsidenz und mehr oder weniger lagestabilen Rinnen entstanden mehrstöckige, amalgamierte Rinnenkomplexe.

Fig. 4: Übereinandergestapelte Rinnengürtel (RG) aus mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen. Zwischengeschaltet sind heterolithische Uferwall-Sedimente (UW), Schlammsteine und Mergel der Überschwemmungsebene (UPS) sowie tafelige Sandsteine von Durchbruchsfächern. Natürlicher Aufschluss entlang der Emme bei Gerlafingen (SO).

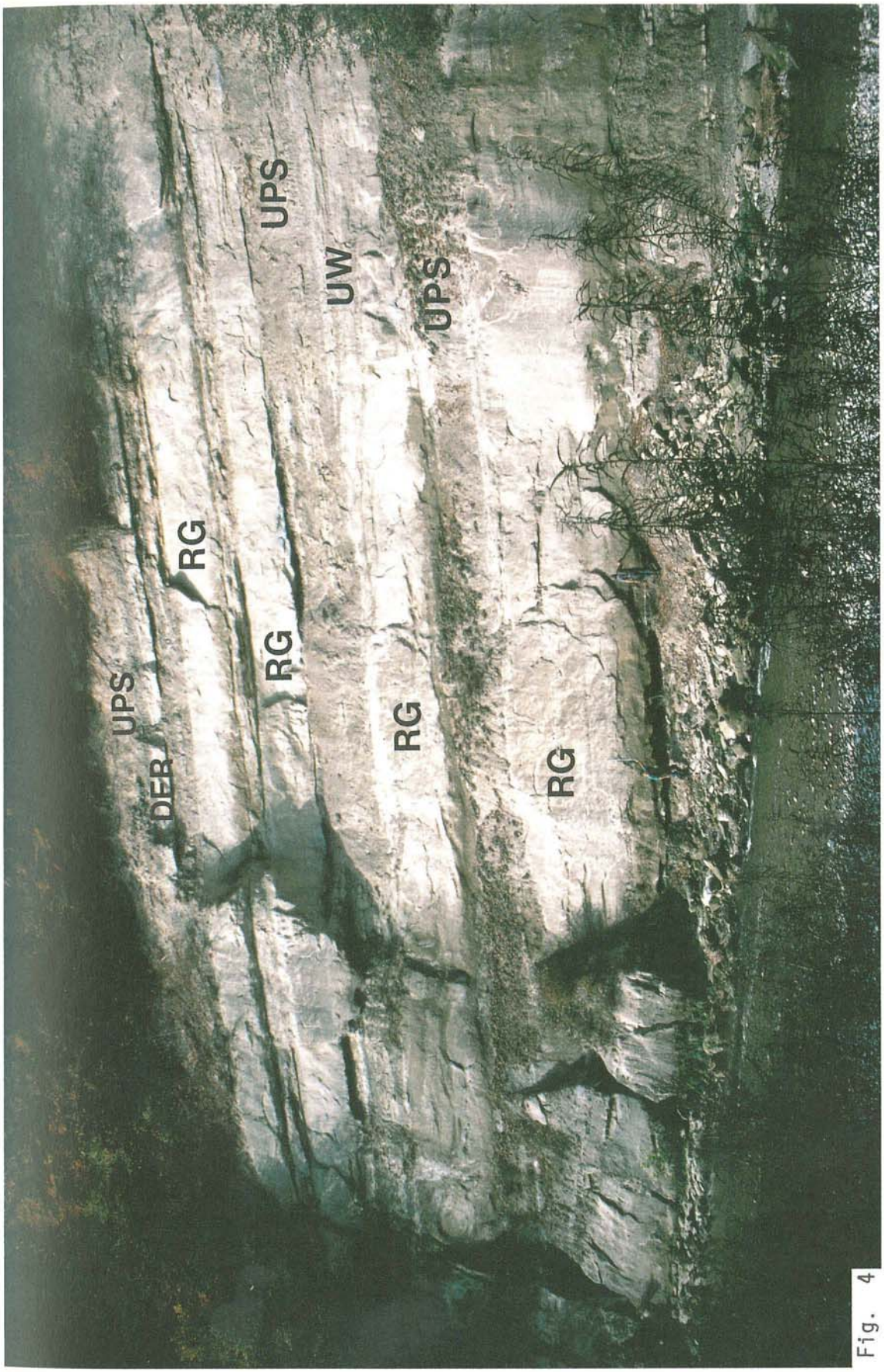


Fig. 4

3.2.2 Fazies 2: Fein- und Mittelsandsteine

Die Fein- und Mittelsandsteine treten als 1-2m dicke, tabulare Sedimentkörper mit scharfer, planarer Basis auf (Fig. 7). Kleinere, im Schnitt zuweilen leicht asymmetrische, mittelsandige und linsenartige Sandsteinkörper von bis zu 4m Höhe und 10m Breite treten zuweilen in einem direkten Zusammenhang mit diesen tabularen Sandsteinen auf und gehen seitlich in diese über (Fig. 7 und 8). In den Bohrkernen erscheint die Lithofazies der Fein- und Mittelsandsteine häufig strukturlos, mitunter finden sich aber auch Kreuzschichtungen im Dezimeterbereich sowie ebene Laminationen. Gegen das Hangende hin sind diese Sandsteine häufig marmoriert und zeigen in einigen Fällen auch gut entwickelte blockige oder prismatische Gefüge (Fig. 6) mit zylindrischen Hohlräumen von 1-2mm Durchmesser, die mit roten Tonen aus dem Hangenden verfüllt sind. Dazu gesellen sich bis 25cm tiefe prismatische Risse planarer Gestalt. Im Aufschluss können die tabularen Gesteinskörper der Fein- und Mittelsandsteine lateral über mehr als 100m verfolgt werden.

Interpretation

Aufgrund ihrer Querschnitte lassen sich die linsenförmigen Sandsteinkörper als kleinere Rinnen interpretieren. Die seitlichen Übergänge dieser kleinmassstäblichen Rinnenfüllungen in ausgedehnte tabulare Sandsteinbänke deutet darauf hin, dass diese Fazies die sedimentologische Aufzeichnung kurzlebiger Überschwemmungsereignisse darstellt. Da die Rinnenfüllungen mehrheitlich symmetrische Querschnitte ohne erkennbare laterale Anlagerung zeigen (z.B. Schüpfen [BE] [Fig. 15] oder Roggwil [BE] [Fig. 7]), kann davon ausgegangen werden, dass die Paläostromrinnen überwiegend gerade waren. Daneben existieren aber auch asymmetrische Querschnitte, die auf einen eher sinusförmigen Verlauf der Rinne hindeuten.

Aufgrund der Geometrie und der faziellen Eigenschaften können die beschriebenen Sedimentkörper mit Uferwalldurchbruchsablagerungen verglichen werden, wie sie z.B. aus dem Perm von Südafrika durch STEAR (1983) vorgestellt wurden. Nach dieser Interpretation markieren die einfachen, mehr oder weniger symmetrischen Rinnen mit ihren konkaven Unterseiten den Bereich des Uferwalldurchbruchs (Durchbruchsrinnen, "crevasse channels") (GHOSH 1987), wogegen die tabularen Sandsteine proximalen, rasch sedimentierten Hochwasserablagerungen in der Schwemmebene entsprechen, die als Durchbruchsfächer ("crevasse splay") bezeichnet werden. Die Marmorierung (Fleckung, engl. "mottling") im oberen Teil dieser Sandsteinbänke wie auch die Präsenz vertikaler Röhren und Risse weisen auf beginnende Durchwurzelung ("Pediturbation") und wiederholte Austrocknung während längerer sedimentationsfreier Zeiten zwischen den einzelnen Flutereignissen hin.

3.2.3 Fazies 3: Grobsilt- und Feinsandsteine

Grobsiltsteine und Feinsandsteine treten als 10-50cm mächtige, ebenfalls tabulare Sedimentkörper auf, die lateral über mehr als 10-30m verfolgt werden können. Diese feinkörnigen Sedimente sind gewöhnlich marmoriert und es können sowohl im Feld als auch in den Bohrkernen (Langenthal [BE]: Bohrung RB 103, Beilage 3) häufig diffuse, ziegelrote eisenhaltige Zonen von ca. 0.5-1.5m Mächtigkeit beobachtet werden. Kleinmassstäbliche Sedimentstrukturen wie ebene Laminationen, Strömungsrippeln, Kletterrippeln, Wulstschichtung, Belastungs- und Entwässerungsstrukturen sind in dieser Fazies der Grobsiltsteine und Feinsandsteine weit verbreitet.

Interpretation

Die Fazies der Grobsiltsteine und Feinsandsteine lässt sich als suspensionsreiche Hochwasserablagerungen erklären. Die rasche Sedimentation der feinkörnigen Sedimente auf die wassergetränkte, schlammige Flussebene führte zur Dichteumkehr und zu instabiler Schichtung, was eine nachträgliche Störung des Ablagerungsgefüges und die Bildung von Wulstschichtung, Belastungs- und Entwässerungsstrukturen begünstigte. Ebenfalls Zeugen von hohen Sedimentationsraten während der Hochwasser sind die in diesen Ablagerungen häufigen Kletterrippeln. Aufgrund dieser faziellen Merkmale und der Gemeinschaft mit den zwischengelagerten Schlammsteinen und Mergeln kann die Fazies der Grobsiltsteine und Feinsandsteine als Hochwasserablagerungen im Bereich der Uferwälle interpretiert werden.

Die eisenschüssigen Horizonte sind vermutlich nicht als Produkte einer oberflächennahen Pedogenese anzusehen, sondern viel mehr als sogenannte Grundwasser-Laterite ("Plinthite", GOLDBERY & BEYTH [1984]) zu deuten, die unter dem Einfluss eines fluktuierenden Grundwasserspiegels entstanden sind.

Fig. 5: Rinnensandsteinkörper (RG) mit einer lateralen Ausdehnung > 100m. Grube bei St. Urban (LU). Massstab: 2m (Pfeil).

Fig. 6: Vertikales prismatisches Gefüge mit erkennbaren einzelnen Wurzelspuren (Pfeil) in einem pedogenisierten, tafeligen Sandsteinabschnitt eines Durchbruchsfächers (DFR). Tongrube bei Pieterlen (BE). Massstab: 30cm.

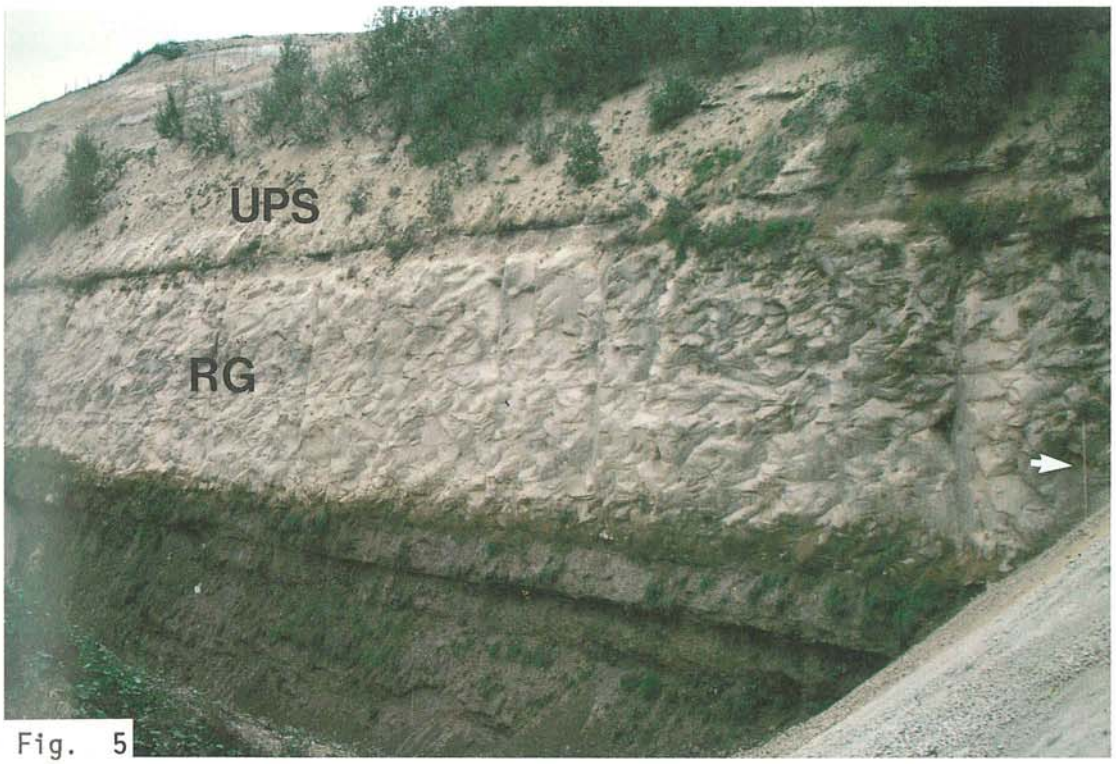


Fig. 5

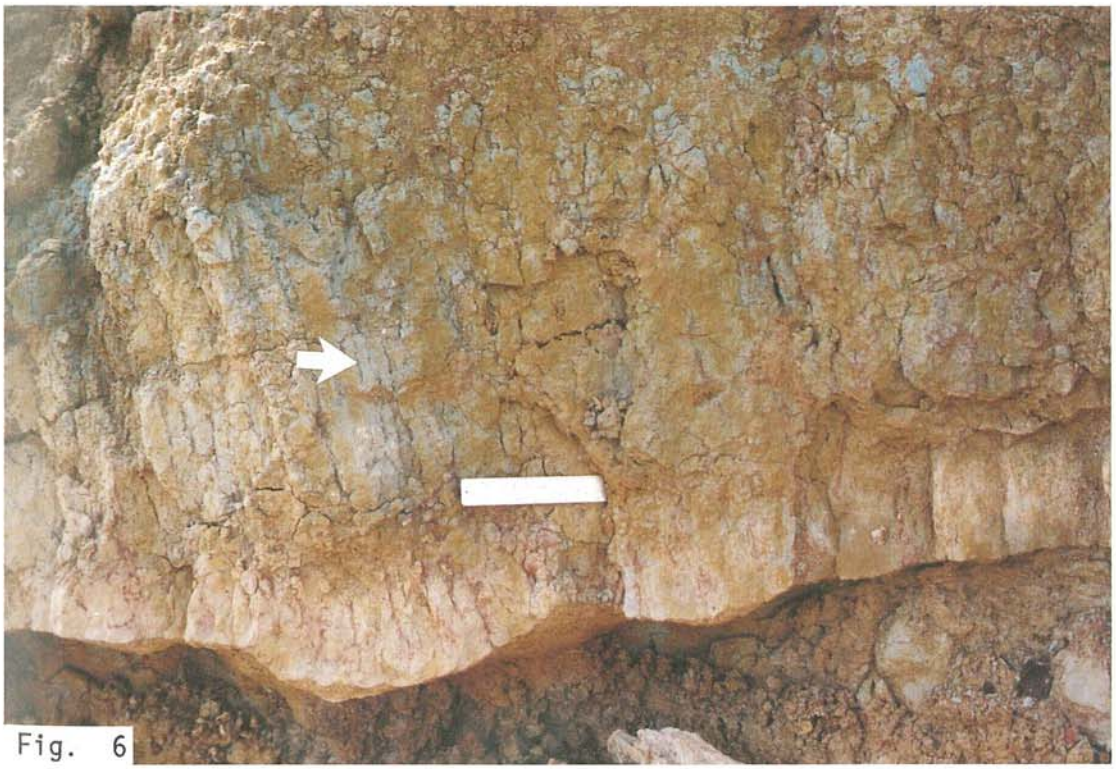


Fig. 6

Fig. 7: Kleiner Sandsteinkörper einer Durchbruchsrinne (DFR) geht lateral (Pfeile) in Sandsteine von Durchbruchsfächern über; darüber mächtiger Rinnenfüllungskomplex (RG) aus mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen. Der untere Teil der Sequenz besteht aus roten und grauen, lokal gefleckten Schlammsteinen und Mergeln der Überschwemmungsebene (UPS) sowie eingeschalteten Sandsteinbänken (DFR). Grube bei Roggwil (BE).

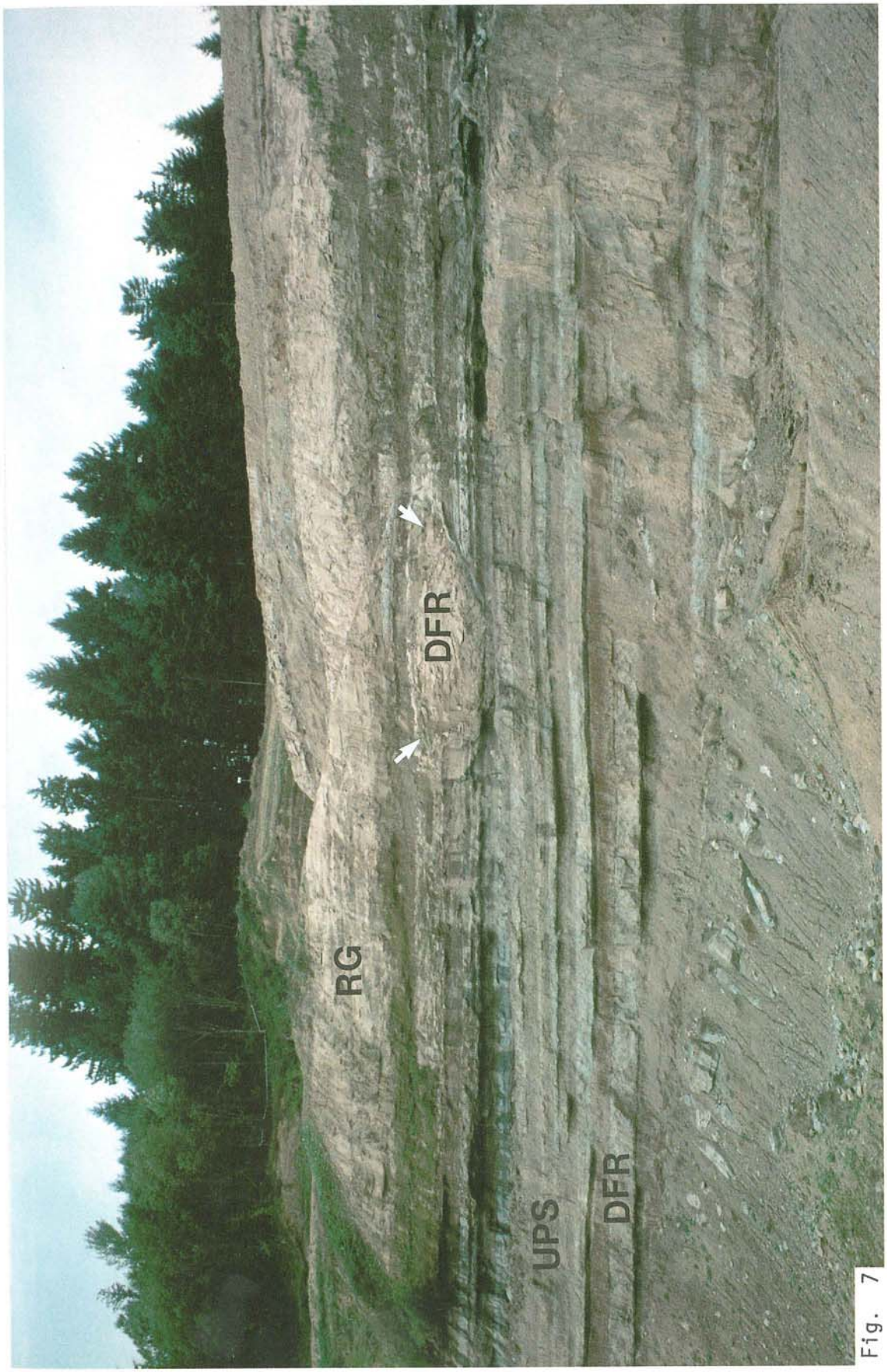


Fig. 7

Fig. 8: Tafelförmige Sandsteinbänke von Durchbruchsfächern, eingeschaltet in Sedimente der Überschwemmungsebene; Pfeil zeigt Ausschnitt von Figur 6. Tongrube bei Pieterlen (BE).

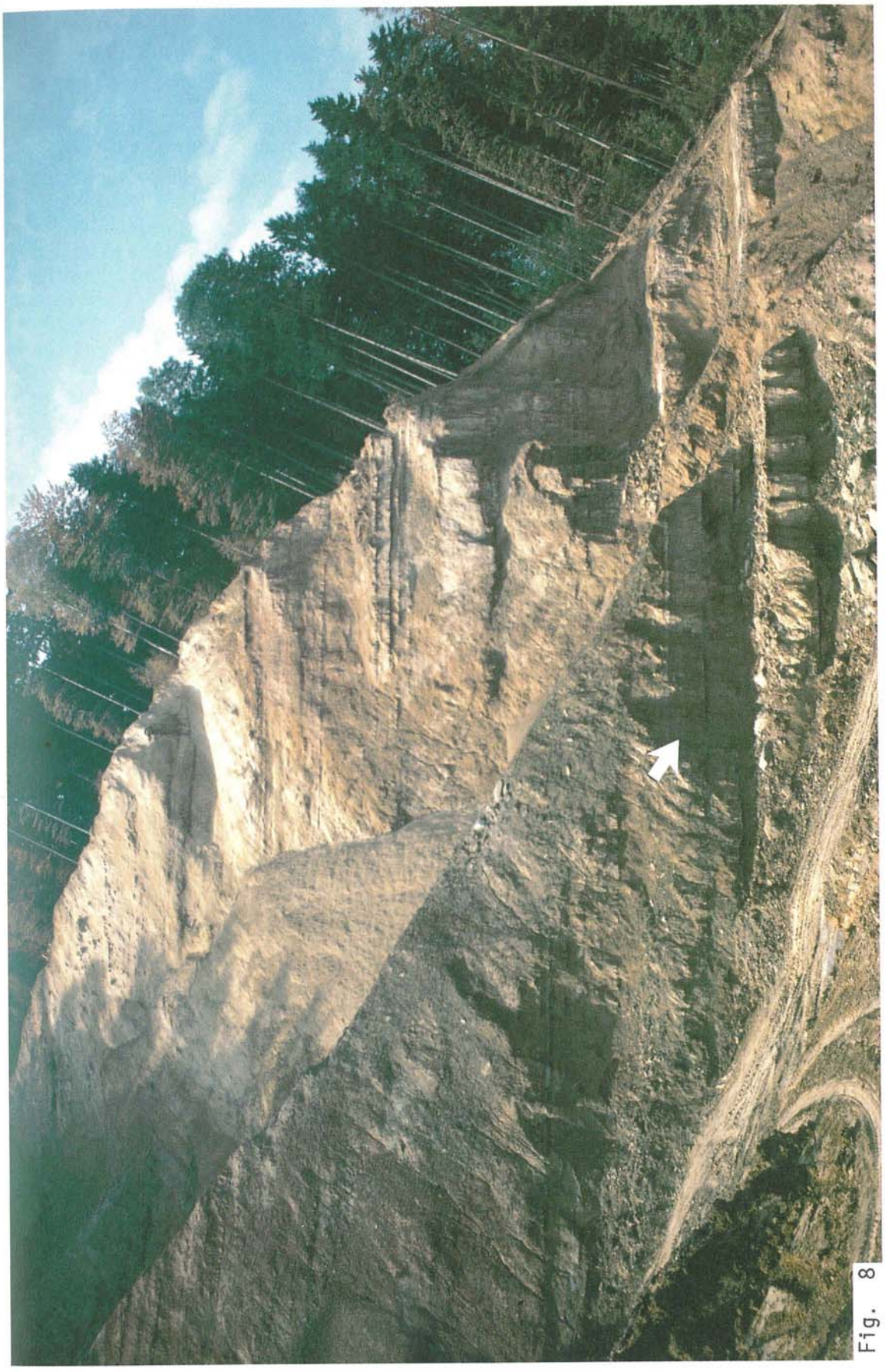


Fig. 8

3.2.4 Fazies 4: Schlammsteine und Mergel

In verschiedenen untersuchten Lokalitäten (z.B. Radelfingen [BE], Fisibach [AG], Eglisau [ZH]) baut die Fazies der Schlammsteine und Mergel bis zu 50% der beobachteten Profilhöhen auf, obwohl einzelne Einheiten selten mächtiger als 2m sind. Diese Feinsedimente sind mitunter laminiert, sonst aber überwiegend stark marmoriert (Fig. 9). Die Farben dieser Fleckung im Zentimeter-Bereich variiert von beige über grün- und hellgrau bis fleisch- und blutrot sowie purpur. Dunkelgraue bis schwarze Mergelhorizonte von bis zu 30cm Mächtigkeit gehören meist zum Erscheinungsbild der Fazies der Schlammsteine und Mergel und können auch in den Bohrkernen gut beobachtet werden. Sie zeigen häufig pedogene Rutschspiegelung ("Slickensides", YAALON & KALMAR [1978]).

In den roten Horizonten sind subvertikale, subzylindrische und unregelmässige planare Flecken von 1-3cm Durchmesser sowie dünnere, röhrenförmige oder schnurförmige Strukturen von hellgrüner Farbe und ca. 1mm Durchmesser überall häufig. Dazu gesellen sich in verschiedenen Horizonten unregelmässig rundliche Kalkknollen von 1-2cm Durchmesser (z.B. im Bohrkern RB 103, Beilage 3), wobei oft auch eine Art Brekzienbildung auftritt. In dieser Fazies treten auch immer feine vertikale prismatische Risse und Spalten planarer Form auf, die zuweilen bis 2m tief sind. Mächtigere Abfolgen dieser Fazies zeigen in der Vertikalen komplexe Farbwechsel und -variationen (Fig. 10). Einzelne ausgeprägte rote oder schwarze Horizonte können lateral bis über 150m verfolgt werden.

Interpretation

Aufgrund der grossen lateralen Ausdehnung kann davon ausgegangen werden, dass diese Fazies im weiträumigen, flussferneren Teil der Überschwemmungsebene durch vertikale Aggradation entstanden ist. Das mitunter laminierte Feinsediment wurde durch die Hochwasser herbeigeführt und aus der Suspension abgesetzt. Heute sind die primären Sedimentgegefüge jedoch meist zerstört (Bioturbation), und es finden sich lediglich bunte marmorierte Schlammsteine und Mergel. Die Assoziation von vertikaler Fleckung und Rissen sowie von feinen, schnurförmigen Strukturen im Zentimeterbereich ist typisch für Wurzelaktivität, woher die Entschichtung ("Pedoturbation," ALLEN & WRIGHT [1989]) als Folge von Bioturbation in einem Boden gedeutet werden kann. Ebenfalls möglich ist eine Entschichtung infolge wiederholter Expansion und Schrumpfung von Tonen ("Slickensides", YAALON & KALMAR [1978]), was als "Argilliturbation" (ALLEN & WRIGHT [1989]) bezeichnet wird.

Die vielerorts beobachtete vertikale Farbvariation oder Horizontierung erklärt sich durch die Entwicklung komplexer, sich überlagernder Bodenprofile. Die verschiedenen Farben reflektieren dabei die verschiedenen Oxidationsstufen (Fe^{2+}, Fe^{3+}) des Eisens (BUURMAN 1980), die in einem Zusammenhang mit den Fluktuationen des Grundwasserspiegels steht (ALLEN & WRIGHT 1989).

So entstanden die grauen Horizonte unter reduzierenden Bedingungen (Fe^{2+}) in wassergesättigten Zonen, wogegen die dunkelgrauen und schwarzen ebenfalls unter reduzierenden Bedingungen in sumpfigen Bereichen gebildet wurden und ihre Farbe der Erhaltung von organischem Material verdanken. Die allgegenwärtige Rutschspiegelung ist ein in der Literatur gut dokumentiertes Merkmal derartiger schlecht entwässerter, tonreicher Böden ("Vertisols", YAALON & KALMAR [1978]).

Demgegenüber sind die roten Farben charakteristisch für oxidierte Verwitterungsprofile und die Bildung von pedogenen Karbonatknollen ("Calcrete", "Caliche") ist eine weitverbreitete Erscheinung von Bodenbildungen im semiariden Klimabereich (GOUDIE 1973, 1983; ESTEBAN & KLAPPA 1983). Diesen verschiedenen Morphologien der Paläoböden in der Unteren Süsswassermolasse liegen unterschiedliche hydrologische Verhältnisse und Reifegrade der Bodenbildung zugrunde, wobei vor allem auch die Lage des Grundwasserspiegels in der Flussebene von Bedeutung ist:

- Brekziierte, oxidierte und karbonatreiche ("Calcrete", "Caliche") Horizonte weisen generell auf semiaride Bedingungen und einen relativ tiefen Grundwasserspiegel hin.

- Im Gegensatz dazu reflektieren die dunklen Horizonte schlecht entwässerte Ablagerungsräume mit einem hohen Grundwasserspiegel, in denen Sümpfe und vermutlich auch flachgründige Seen entstehen konnten. In diesen Milieus wurde die Erhaltung von organischem Material begünstigt, woher die schwarze Farbe rührt.

Fig. 9: Bunt gefleckte, z.T. laminierte rötliche Mergel und Schlammsteine der Überschwemmungsebene (UPS) mit einer grauen Grobsilt- bis Feinsandsteinbank mit Kletterrippeln (UW: Uferwall-Ablagerung). Grube bei St. Urban (LU). Massstab: Feldbuch = 30cm.

Fig. 10: Die schichtparallele Farbbänderung ("Horizonation", HOLE [1961]) bei Schlammsteinen der Überschwemmungsebene widerspiegelt die verschiedenen Oxydationszustände infolge des fluktuierenden Grundwasserspiegels während der Bodenbildung: grau = reduzierend, schlecht entwässert; rot = oxidierend, gut drainiert. Grube bei Roggwil (BE). Massstab = 2m.

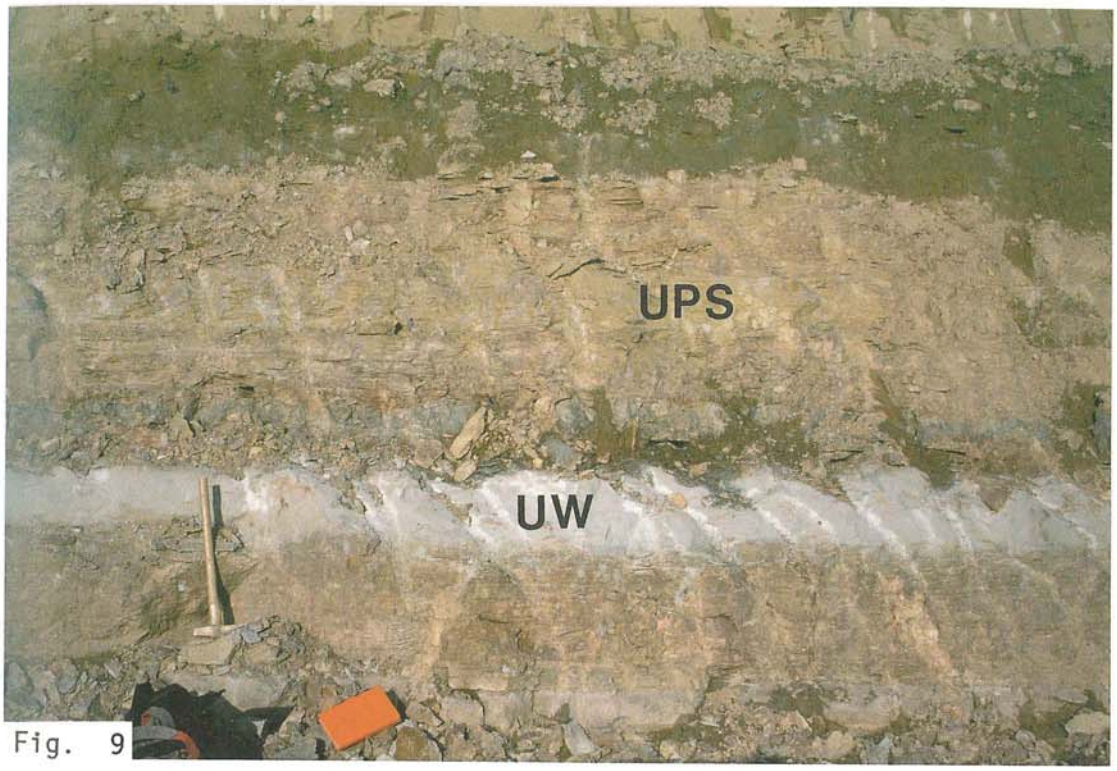


Fig. 9

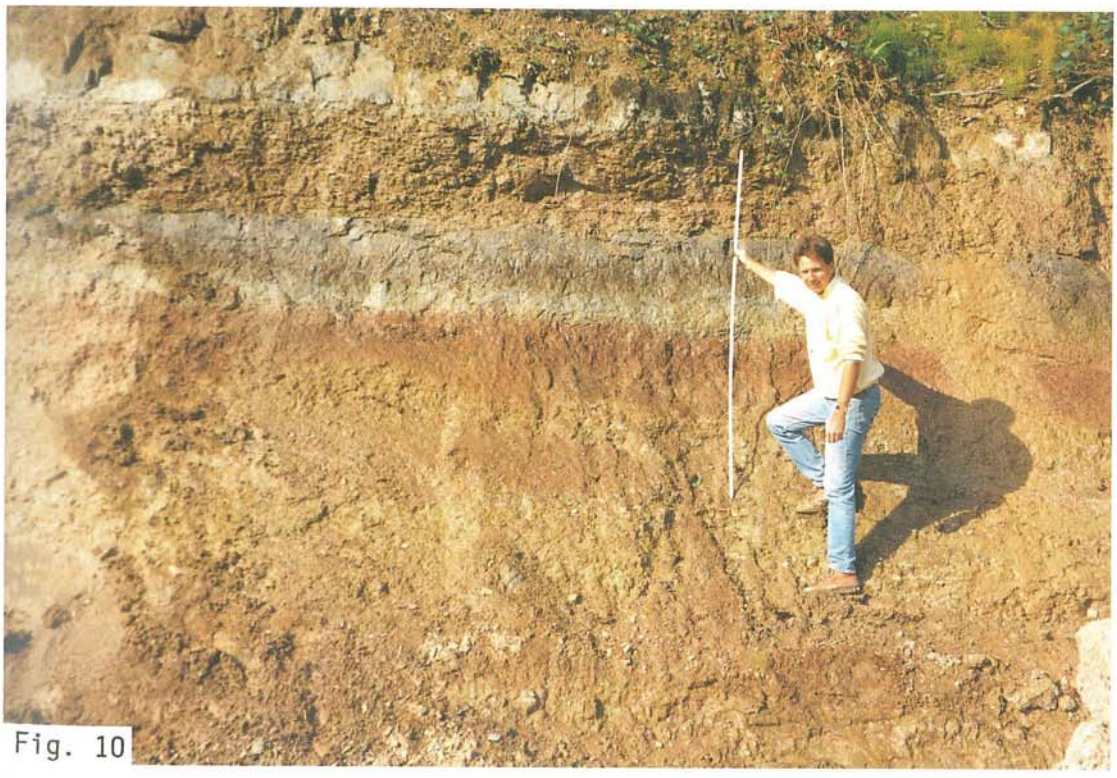


Fig. 10

Die beobachteten Variationen der Bodentypen können einerseits auf saisonale oder längerfristige klimatische Änderungen und die damit verbundenen Fluktuationen des Grundwasserspiegels zurückgeführt werden. Andererseits besteht auch die Möglichkeit einer Koexistenz von verschiedenen Typen in der Flussebene. Derartige Bodenvergesellschaftungen ("Catenas", ALLEN & WRIGHT [1989]) entstehen unter ähnlichen klimatischen Bedingungen aus gleichartigem Ausgangsmaterial aufgrund der unterschiedlichen Lage des Grundwasserspiegels. Sie lassen sich durch laterale Änderungen der Durchlässigkeit (sandige, tonige Bereiche) oder der Entwässerung, aber auch durch ein Relief erklären. Als gut entwässert wären dabei sandige Uferwälle oder auch Flussterrassen mit positiven Relief anzusehen, während in der suspensionsfrachtreichen und tiefer gelegenen Schwemmebenen ein eher hoher Grundwasserspiegel angenommen werden kann. Erst ein eingehenderes Studium der Vergesellschaftung der Paläoböden würde aber eine weiterführende Rekonstruktion der Paläohydrologie in der Schwemmebene ermöglichen. Aufgrund der Morphologie und der unterschiedlichen Horizontierung bestimmter Schichten, im Speziellen von Caliche- und Calcrete-Bildungen, können der Reifegrad und die Dauer der Pedogenese abgeschätzt werden. Die Zeitdauer der Bodenbildung in einer Schwemmebene wird oft mit einem minimalen Entstehungszeit von 10'000 Jahren angegeben. Reife Calichebildungen benötigen aber noch längere Zeiträume (vgl. BIRKELAND 1984). Die in der Unteren Süsswassermolasse häufig vorkommenden Bodenprofile mit nur untergeordneter Caliche-Bildung können sowohl durch eine zu hohe Aggradationsrate als auch durch ungünstige klimatische Voraussetzungen (kühler und/oder humider) erklärt werden.

3.2.5 Faziesmodell der mittelländischen USM

Um eine geeignete Grundlage für die weiterführende Analyse der Unteren Süsswassermolasse zu erhalten, ist es vonnöten, die Beobachtungen und Interpretationen der Lithofazies in einem Faziesmodell zusammenzufassen.

Bei der Interpretation von fluviatilen Ablagerungen steht die Frage nach den jeweiligen Paläoflusstypen im Zentrum des Interesses. Denn diese bestimmen in komplexem Zusammenspiel mit anderen Faziesfaktoren (tektonische Aktivität und Subsidenz, Klima etc.) weitgehend die Heterogenität und die Architektur eines Lithosoms.

Wie bereits ausgeführt, können die untersuchten Paläorinnen der Unteren Süsswassermolasse als sinusförmig bis mäandrierend charakterisiert werden (Kap. 3.2.1). Angesichts dieser Interpretation müssen wir uns aber auch vor Augen halten, dass in rezenten, natürlichen Flusssystemen jeweils eine ganze Palette kontinuierlicher Übergänge zwischen den verschiedenen, von RUST (1978) vorgeschlagenen Grundtypen (mäandrierend, anastomosierend, verwildert und gerade) beobachtbar ist. Folglich können auch die Ablagerungsprodukte der verschiedenen Flusstypen eine entsprechende Vielfalt aufweisen, weshalb in fossilen Flussablagerungen oftmals beträchtliche fazielle Variationen der Grundmuster angetroffen werden (JACKSON 1978, MIALL 1985).

Auf der einen Seite stehen hier die graduellen Änderungen, denen ein fliessendes Gewässer vom Ursprungsgebiet in den Bergen bis hin zur Mündung ins Meer resp. in einen See unterworfen ist. Dieser Wandel,

der meist von verwilderten über anastomosierende bis hin zu mäandrierenden Flusssystemen führt, wird vor allem von der Abflussmenge, der Sedimentfracht (Menge und Korngrössenverteilung), dem Gefälle und der Art der Vegetationsbedeckung gesteuert (MIALL 1981, 1985).

Im Falle der Unteren Süsswassermolasse können wir für das distale axiale Entwässerungssystem also generell von sinusförmigen bis mäandrierenden Rinnen ausgehen. Flussaufwärts, gegen den alpenrandnahen Bereich treten dann vorerst anastomosierende und im Bereich der Schuttfächer verwilderte Flusstypen auf (z.B. FREI 1979).

Andererseits können auch innerhalb eines engen geomorphologischen Bereichs eine ganze Palette verschiedenartiger Rinnentypen koexistieren (GALLOWAY & HOBDAY 1983), so z.B. im axialen Entwässerungssystem eines Beckens, wie es die distale Untere Süsswassermolasse darstellt. Hier finden sich z.B. die aus den Hauptrinnen austretenden, meist suspensionsreicheren Durchbruchsrinnen. Je nach Ursprungsgebiet und Gefälle weisen die Nebenflüsse ebenfalls ein weites Spektrum von Rinnentypen auf. Selbst die Hauptrinne kann entlang ihres Verlaufs lokal beträchtlichen Änderungen unterworfen sein, wobei hier vor allem der Einfluss der verschiedenen einmündenden Nebenflüsse (MIALL 1985) oder die Erosion in einen extrem sandigen oder tonigen Untergrund zur Geltung kommt (GALLOWAY & HOBDAY 1983).

Für die Interpretation und Kategorisierung eines fluviatilen Systems stellt der Rinnentyp des Hauptentwässerungssystems die Grundlage erster Ordnung dar.

Typisierung der Paläoflüsse

Aufgrund seiner Untersuchungen an rezenten Flüssen kam SCHUMM (1972) zum Schluss, dass die Geometrie des Rinnenquerschnitts im Wesentlichen durch das Verhältnis zwischen der Bodenfracht und der Suspensionsfracht bestimmt wird. Auf diesen Erkenntnissen Schumm's aufbauend erarbeiteten GALLOWAY (1977) und GALLOWAY & HOBDAY (1983) eine neue qualitative Klassifikation für fossile Flusssysteme (Fig. 11), die eine bessere Vorhersage von Flussablagerungen ermöglicht und daher auch in der vorliegenden Studie angewendet wird.

Der Grossteil der untersuchten Rinnenfüllungen (Fazies 1: Mittel- und Grobsandsteine) in der Unteren Süsswassermolasse fällt insbesondere durch das Fehlen der für die klassischen mäandrierenden Flüsse charakteristischen hetereolithischen Epsilon-Schrägschichtung sowie der "fining-upwards" Sequenzen auf. Die Füllungen der Rinnen bestehen vorwiegend aus Mittel- bis Grobsand mit Grossrippeln und zeigen überwiegend schwach erosive, wellige Basen.

Fig. 11: Geomorphologische und sedimentäre Charakteristika sowie Ablagerungsformen von Bodenfracht-, Mischfracht- und Suspensionsfracht-Rinnen (nach GALLOWAY 1977).

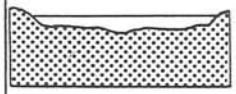
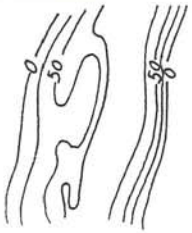
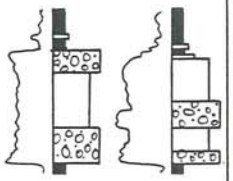
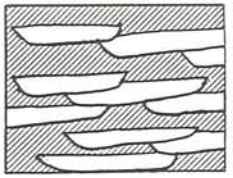
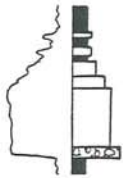
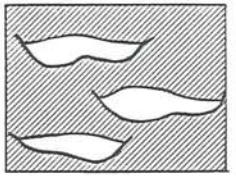
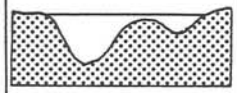
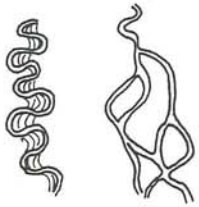
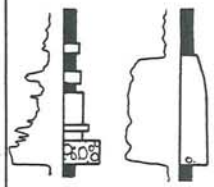
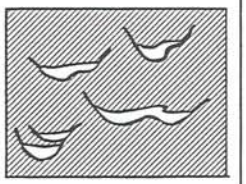
RINNEN-TYP	ART DER RINNENFÜLLUNG	RINNENGEOMETRIE			INTERNER AUFBAU		LATERALE BEZIEHUNGEN
		QUERSCHNITT	AUFSICHT	SAND-ISOLITHEN	SEDIMENTGEFÜGE	VERTIKALSEQUENZ	
BODENFRACHT-RINNE	vorwiegend Sand	 Verhältnis Breite/Tiefe gross mittleres bis schwaches Relief an der Rinnensohle	gerade bis schwach gewunden	 breite, durchgehende Gürtel	Sedimentfüllung durch vertikale Aggradation dominiert	 unregelmässig, fining-upwards schlecht entwickelt	 multilaterale Rinnenfüllungen übersteigen die Ablagerungen der Schwemmebene volumenmässig
MISCHFRACHT-RINNE	Mischung aus Sand, Silt und Schlamm	Verhältnis Breite/Tiefe mittel hohes Relief an der Rinnensohle	gewunden, sinusförmig gekrümmt	komplexe, typisch wulstartige Gürtel	Sedimentfüllung sowohl durch seitliche Anlagerung als auch durch vertikale Aggradation	 verschiedenartige, gut entwickelte fining-upwards Profile	 mehrphasige Rinnenfüllungen sind gegenüber den Ablagerungen der Schwemmebene volumenmässig untergeordnet
SUSPENSIONSFRACHT-RINNE	vorwiegend Silt und Schlamm	 Verhältnis Breite/Tiefe klein hohes Relief an der Rinnensohle mit steilen Flanken, auch Segmente mit mehrfachem Talweg	 stark gewunden bis anastomosierend	Schnürsenkel-Sande oder Sandlinsen	Sedimentfüllung durch seitliche Anlagerung dominiert (symmetrisch oder asymmetrisch)	 Sequenz durch feines Material dominiert, daher vertikale Trends tw. verwischt	 multilaterale Rinnenfüllungen sind umgeben von volumenmässig dominierenden Ablagerungen der Schwemmebene

Fig. 11

Aufgrund des hohen Sandanteils und des recht groben Materials kann generell auf bodenfrachtreiche Rinnen geschlossen werden (GALLOWAY & HOBDAY 1983). Diese Diagnose wird durch die meist welligen Rinnensohlen mit schwachem Relief bestärkt, die sich auf die Tendenz von bodenfrachtreichen Flüssen zurückführen lässt, nicht allzusehr in die Tiefe, sondern bevorzugt lateral zu erodieren.

Die doch merklichen Ton- und Siltanteile der Rinnensandsteine deuten aber darauf hin, dass es sich weder um typische Bodenfracht- noch um ausgeprägte Mischfracht-Rinnen (Fig. 11) handelt. Vielmehr liegen in den distalen Paläo-Hauptrinnen der Unteren Süsswassermolasse Zwischenglieder in Form bodenfrachtreicher Mischfrachtrinnen vor.

Ihre Ablagerungen bestehen vorwiegend aus Fein- bis Mittelsand, woher sie eher den grobkörnigen bodenfrachtreichen Mischfracht-Rinnen zugeordnet werden können. Infolge der stärkeren lateralen Wanderung bilden derartige Rinnen relativ breite, multilaterale und amalgamierte Mäander- resp. Rinnengürtel mit tabularen Geometrien (GALLOWAY & HOBDAY 1983), wie sie in der distalen Unteren Süsswassermolasse vorkommen.

Daneben existieren aber auch Rinnenfüllungen mit deutlichen, teilweise heterolithischen Gleithangablagerungen sowie begrenzten lateralen Geometrien und recht ausgeprägten, trogförmigen Sohlen (Radelfingen und oberer Bereich der Grube Rapperswil). Diese sind als Ablagerungen eher stabiler mäandrierender Mischfracht-Rinnen zu deuten und zeigen auch die hierfür typischen "fining-upwards" Sequenzen (GALLOWAY & HOBDAY 1983).

Zusammenfassend können wir festhalten, dass im distalen, axialen Hauptentwässerungssystem der Unteren Süsswassermolasse mittel- bis grobsandige Ablagerungen von mäandrierenden, bodenfrachtreichen Mischfracht-Paläorinnen dominieren. Die Eigenschaften dieser Zwischenformen liegen zwischen denen der typischen Mischfracht- und der Bodenfrachtrinnen und lassen eher tabulare Geometrien erwarten (Fig. 11). Volumenmässig dürften dabei die Rinnensandsteine gegenüber den sie umgebenden Ablagerungen der Schwemmebene (Fazies 3 und 4) zurücktreten. Daneben kommen im selben Lithosom auch Ablagerungen von klassischen mäandrierenden Mischfracht-Rinnen vor.

Das Zusammenvorkommen dieser zwei verschiedenen Typen von sinusförmigen bis mäandrierenden Rinnentypen in der distalen Unteren Süsswassermolasse kann durch eine Koexistenz von Flüssen mit unterschiedlicher Wasser- und/oder Sedimentfracht erklärt werden, wie sie für Haupt- und einmündende Zufuhr- oder Nebenrinnen unterschiedlicher Natur (Herkunft, Gradient) gegeben ist. Andererseits besteht auch die Möglichkeit, dass einzelne Hauptrinnen flussabwärts gewissen Änderungen unterworfen sind, die insbesondere durch die Art der einzelnen Zuflüsse oder die Beschaffenheit des Untergrundes, in denen das Flussbett liegt, hervorgerufen werden. Ausserdem haben auch klimatische Wechsel sowie regionale tektonische Unterschiede (differentielle Subsidenz) einen starken Einfluss auf die Flusstypen. Mit den genannten Kategorien von Paläostromrinnen der Unteren Süsswassermolasse stehen auch die bereits beschriebenen kurzlebigen Durchbruchsrinnen der Fazies 2 (Kap. 3.2.2) in Verbindung.

Das Modell

Die vorangehenden Betrachtungen können in einem generalisierten Faziesmodell für die distale Untere Süsswassermolasse zusammengefasst werden (Fig. 12).

Demnach bauen die bodenfrachtreichen Mischfracht-Rinnen des Hauptentwässerungssystems infolge der relativ freien lateralen Migration recht breite mittel- bis grobsandige Rinnengürtel auf. Die Uferwalldurchbrüche ("crevasse splays") sind meist gut entwickelt und enthalten besonders in den Durchbruchsrinnen ("crevasse channels") signifikante Anteile von Bodenfrachtsediment.

Aufgrund des höheren Sandanteils in den rinnennahen Bereichen liegt dort der Grundwasserspiegel im allgemeinen recht tief, was sich im Falle der Unteren Süsswassermolasse in den oxidierten, karbonatreichen Bodenbildungen mit Brekzien- und Calichebildungen widerspiegelt.

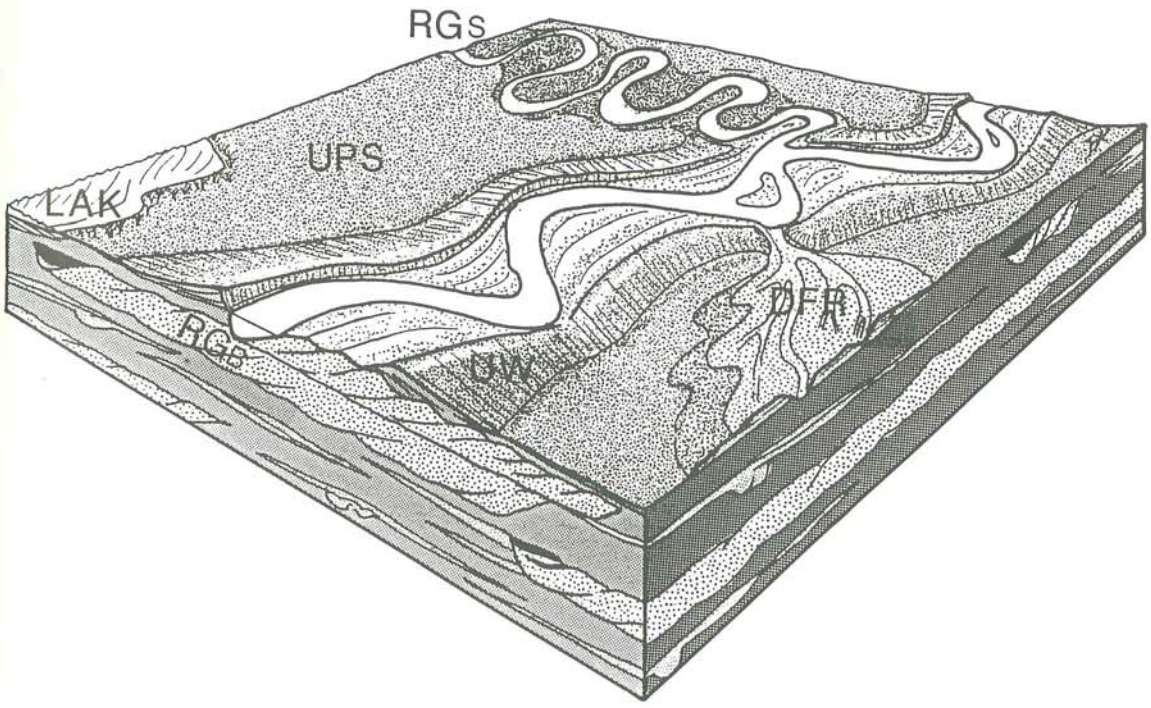


Fig. 12: Vereinfachtes Faziesmodell für den Bereich des distalen Hauptentwässerungssystems der USM im nördlichen Vorlandbecken.
Es bedeuten: RG Rinnengürtel, s suspensionsfrachtreiche Mischfrachtrinnen, b bodenfrachtreiche Mischfrachtrinnen, DFR Durchbruchsfächer und -rinnen, UW Uferwälle und distale Überschwemmungssande, UPS Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen, LAK lakustrische Ablagerungen.

Demgegenüber sprechen die organisch reichen Ablagerungen der Schwemmebene mit ihren Vertisols und Rutschspiegelungen ("Slickensides") für schlecht entwässerte Bereiche mit einem erhöhten Grundwasserspiegel, wie sie im distalen, ton- und siltreichen Teil der Schwemmebene zu erwarten sind. Zusammen mit dem Vorhandensein von unterschiedlich oxidierten und marmorierten ("mottled") Uferwallsedimenten belegen diese dunklen, in sumpfigem Milieu entstandenen Sedimente den doch recht hohen Suspensionsanteil im Hauptentwässerungssystem der distalen Unteren Süsswassermolasse und untermauern damit die Interpretation von bodenfrachtreichen Mischfracht-Rinnen.

3.3 Architektur-Elemente

Die vorgestellten vier Hauptfaziestypen bilden in der Unteren Süsswassermolasse (USM) wohl unterscheidbare Fazies-Assoziationen, die sich durch ihre charakteristischen Geometrien und ihre spezifischen Grössenordnungen im Bereich der makroskopischen Skala (Kap. 3.1) zu Architektur-Elementen zusammengefassen lassen.

Aufgrund der sedimentologischen Studien in Ziegeleigruben und an natürlichen Aufschlüssen war es möglich, für den distalen Teil der Unteren Süsswassermolasse im Untersuchungsgebiet vier hauptsächliche Architektur-Elemente auszuscheiden (Fig. 13). Zu diesen gesellt sich in der Bohrung Weiach ein fünftes, hier nicht näher besprochenes Element in Form lakustrischer Ablagerungen. Es sind dies:

RG Rinnengürtel (Meander Belt MB);
DFR Durchbruchsfächer und -rinnen (Crevasse Splays and Channels CS);
UW Uferwälle und distale Überschwemmungssande (Levees and distal Splays LS);
UPS Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (Overbank, Paleosols and Swamps);
LAK lakustrische Ablagerungen (Lacustrine Deposits LAC) (nur in der Bohrung Weiach).

Die zugehörigen geometrischen Daten sind für jede Lokalität in Tabelle 1 zusammengestellt.

3.3.1 Rinnengürtel (RG)

An verschiedenen Orten konnten Ausschnitte isolierter Rinnen- oder Mäandergürtel beobachtet werden (z.B. Schüpfen, St. Urban). Daneben existieren aber auch Aufschlüsse (Gerlafingen, Bremgarten [BE]), in denen die Sandsteine der Rinnengürtel übereinandergestapelt vorkommen und dann bis über 50m mächtige, mehrstöckige Rinnengürtelkomplexe bilden. Derartige mehrstöckige Komplexe deuten darauf hin, dass die Stromrinnen teilweise bevorzugten Fliesswegen folgten und daher die Mäandergürtel möglicherweise auf engerem geographischem Raum gehäuft auftreten (Kap. 3.5). Als Kontrollfaktoren für die bevorzugte Lage der Mäandergürtel kommen einerseits tektonisch-strukturell vorgezeichnete Wege in Frage. Andererseits dürfte sich auch um eine Gleichgewichtslage zwischen dem Sedimenteintrag aus dem alpinen Liefergebiet und der Absenkungsrate handeln.

Parameter (Meter)	LOKALITÄT							
	Schüpfen (BE)	Rapperswil (BE)	Radelfingen (BE)	Pieterlen (BE)	Roggwil (BE)	St. Urban (LU)	Gerlafingen (SO)	Fisibach (AG)
Rinnengürtel (RG)								
maximale Mächtigkeit	8	6	2.5	2.5	7	9	6	4
minimale Mächtigkeit	6	2.5	2.5	2.5	2		3	
maximale Breite								
minimale Breite	40	40	60	50	100	50	60	
Richtung								40
Durchbruchsrinnen (DR)								
maximale Mächtigkeit	2	3.5	2.7		4	2		
minimale Mächtigkeit	1.8	0.5	2.6		1		1	
maximale Breite	4.5	15	5		10			
minimale Breite	5.5				6		3	
Richtung	50		110		280		0	
Durchbruchsfächer (DF)								
maximale Mächtigkeit	2.5	1.5	1.5	1.4	2	1.3	1	1
minimale Mächtigkeit	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.15	0.2	0.2
maximale Breite	>150	>150	>150					
minimale Breite	20		150	50	100	80	60	
geschätzter Sandanteil	67	50	25	33	22		67	28
Verhältnis RG/DFR	1:8	1:8	1:8	1:4	1:9		8:1	1:6

Tab. 1: Geometrische Daten der Sandsteinkörper und Sandsteinanteile in den untersuchten Aufschlüssen.

3.3.2 Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR)

Die Fein- und Mittelsandsteine bilden Sedimentkörper mit vorwiegend tafeligen, mitunter auch rinnenförmigen Geometrien. Die tafelförmigen Sandsteine können dabei jeweils über mehr als hundert Meter verfolgt werden und sind vermutlich bis weit über einen Kilometer zusammenhängend. Sie repräsentieren Ablagerungen einzelner Uferwalldurchbruchs-Ereignisse und sind gemeinhin als Durchbruchsfächer zu interpretieren. Vereinzelte interne Erosionsflächen deuten jedoch auf eine zeitweilige Amalgamierung hin. Bei den direkt damit verbundenen kleinmassstäblichen Rinnensandsteinen dürfte es sich um zugehörige Durchbruchsrinnen handeln. Diese sind bei mehr oder weniger geradem Verlauf vielleicht einige hundert Meter lang und stehen am Durchbruchspunkt mit den Sandsteinen der Rinnengürtel (RG) in Verbindung.

Der Anteil dieser Durchbruchssande am Aufbau der Unteren Süsswassermolasse ist recht unterschiedlich. In einigen Tongruben (z.B. Radelfingen; Fig. 14) sind sie gegenüber den Feinsedimenten, relativ selten, wogegen andernorts metermächtige Sandsteine dieses Typus mit ebenso mächtigen Feinsedimenten wechsellagern (z.B. Schüpfen; Fig. 15). Zwischen diesen zwei Extremen können alle Übergänge in der relativen Häufigkeit der Durchbruchssande beobachtet werden. Diese Varia-

tionen im Verhältnis Sandstein/Feinsediment reflektieren vorab die unterschiedlichen Distanzen zum aktiven Rinnengürtel, wobei die nahen Bereiche viel öfters geflutet wurden als die entfernteren. Zudem nimmt mit zunehmender Distanz auch die Transportkraft der uferübertretenden Wassermassen und damit auch die Menge und die Korngrösse des mitgeführten Sediments ab. Daher nehmen die einzelnen Sandsteinbänke gegen die Schwemmebene hin auch in der Mächtigkeit ab und keilen allmählich aus. Der fluviatile Proximalitätstrend äussert sich generell in einer Abnahme der Häufigkeit wie auch der Mächtigkeit und der Korngrösse der abgelagerten Sandsteine.

3.3.3 Uferwälle und distale Überschwemmungssande (UW)

Die Vergesellschaftung kleinrippelgeschichteter Sandstein- und Grobsiltbänke mit marmorierten Feinsedimenten ist typisch für Ablagerungen der Uferwälle und der proximalen Schwemmebene. Die genannten Sedimente wurden während uferübertretender Hochwasser relativ rasch aus der Suspension, untergeordnet auch als Bodenfracht abgelagert. Während die dünnen (10-50cm) Überschwemmungssande der Schwemmebene wohl über Hunderte von Metern durchhalten können, verfingern diejenigen der Uferwälle über etwas kürzerere Distanz mit den Feinsedimenten der Schwemmebene. Sie lassen sich aber durchwegs weiter als 10-30m verfolgen.

3.3.4 Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS)

Die feinkörnigen Sedimente - Mergel, Silt- und Schlammsteine - bilden gewöhnlich bis 2m mächtige, lateral sehr persistente und weit verfolgbare Einheiten. Sie wurden im distalen Bereich der Uferwälle und vorab in ausgedehnten Schwemmebenen abgelagert und sind infolge der dort niedrigen Akkumulationsraten stark bioturbiert.

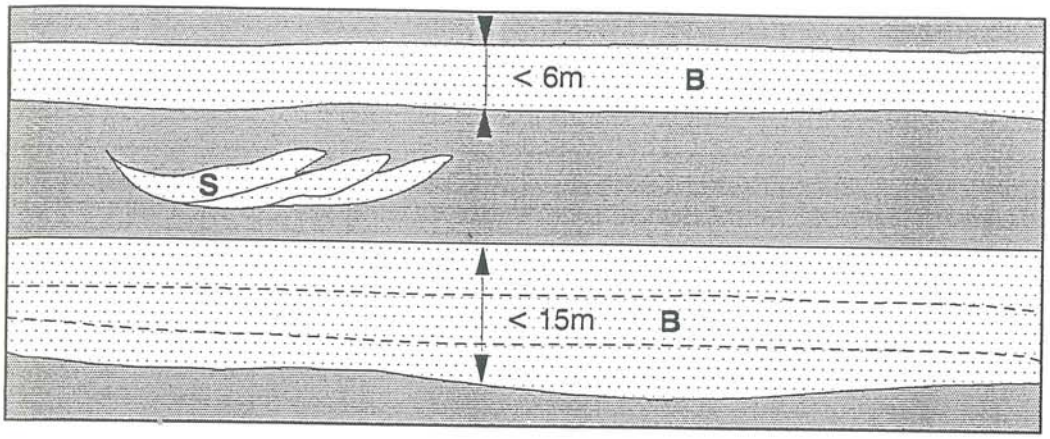
Vor allem in den Tongruben stellen die charakteristischen hellroten Schlammsteinbänke (Fig. 16 und 17) praktische Markierungshorizonte dar, da sie über mehr als 100m verfolgbar sind.

In den meisten Fällen sind aber auch in mächtigen Feinsedimentbänken immer wieder dünne, 5-20cm dicke und völlig bioturbierte Feinsandsteinbänke zwischengeschaltet. Diese sind als biogen entschichtete Überschwemmungs- oder distale Durchbruchssande zu deuten und können in der Schwemmebene noch in hunderten, vielleicht sogar tausenden von Metern Entfernung von den Hauptrinnen auftreten.

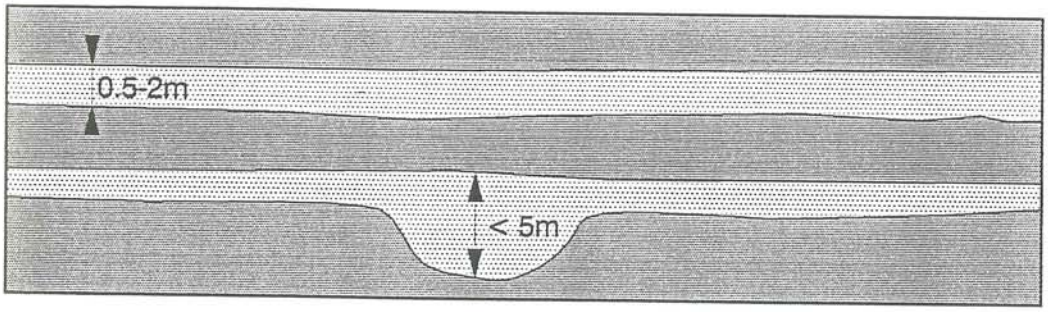
Während sedimentationsfreier Zeiten breiteten sich in diesen distalen Ablagerungsräumen eine Vegetationsdecke aus. Zusammen mit den bodenbewohnenden Organismen sorgte dieser Pflanzenbewuchs für eine völlige Bioturbation und führte zur Entschichtung und Durchmischung des Sediments, aber auch zu beginnender Bodenbildung.

Fig. 13: Die verschiedenen Architektur-Elemente der distalen Unteren Süsswassermolasse.

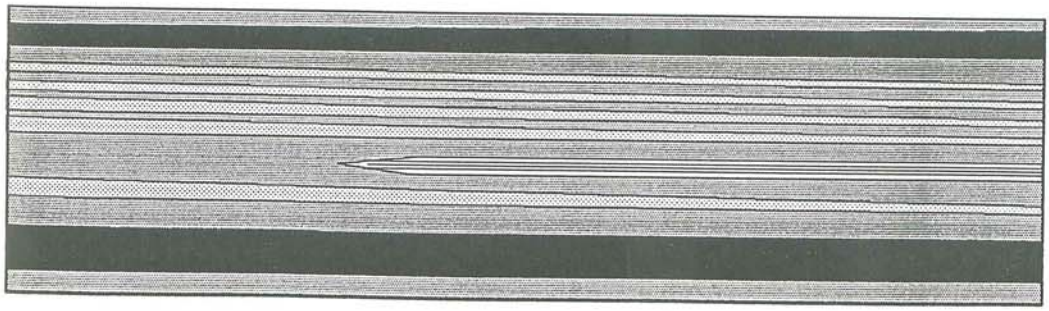
ARCHITEKTUR-ELEMENTE DER USM



RG Rinnengürtel, einfache und amalgamierte
B bodenfrachtreiche, S suspensionsfrachtreiche Rinnen



DFR Durchbruchsfächer und Durchbruchsrinnen



UW Uferwälle und distale Überschwemmungssande (punktiert)
UPS Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen
LAK lakustrische Ablagerungen (horizontal schraffiert) Fig. 13

Fig. 14: Wechsellagerung von Sandsteinbänken mit Schlammsteinen und Mergeln bei einem geringen Sandstein/Ton-Verhältnis. Grube bei Radelfingen (BE).

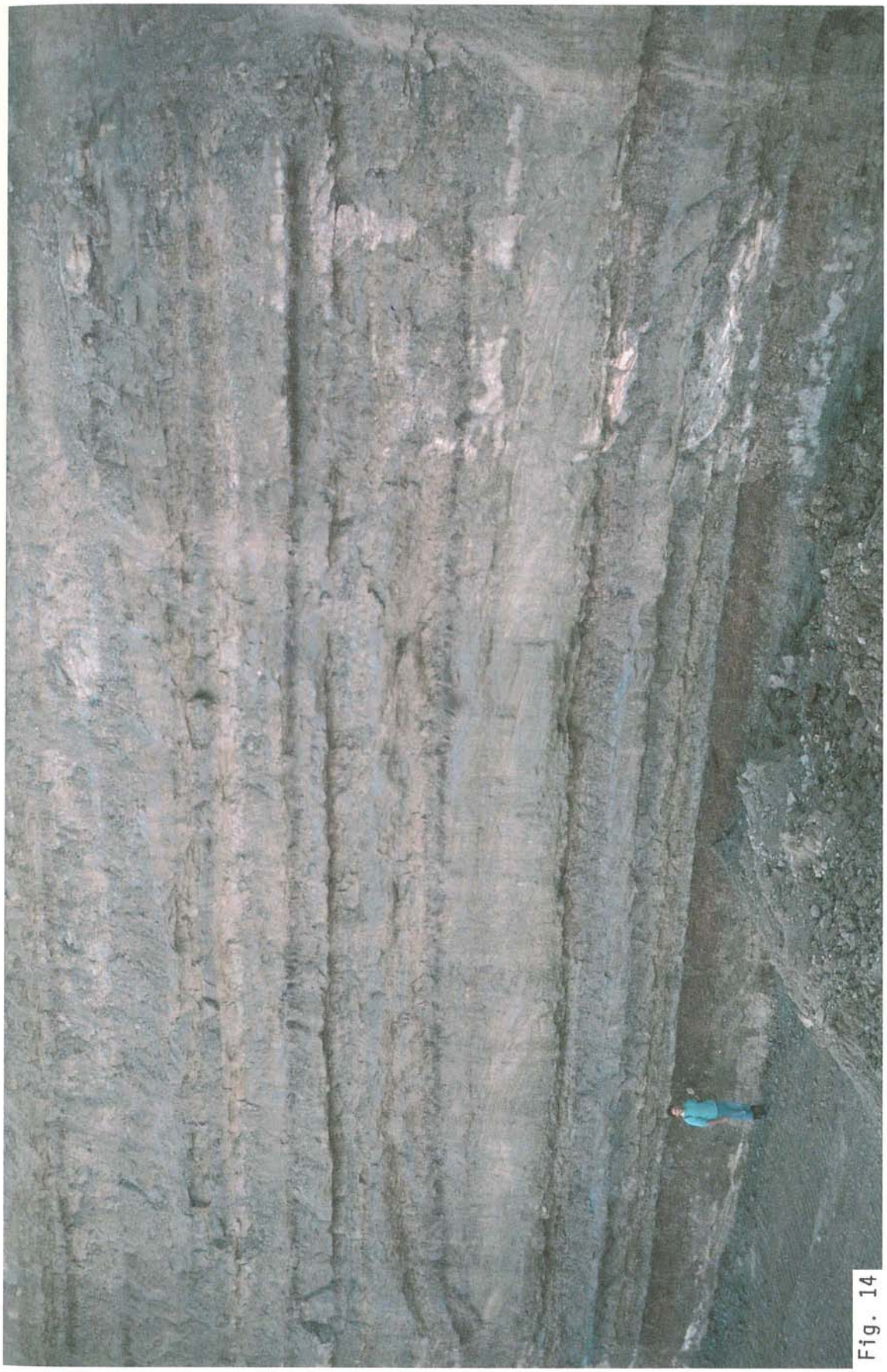


Fig. 14

Fig. 15: Wechsellagerung von Sandsteinbänken der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) mit Schlammsteinen und Mergeln der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) bei einem hohen Sandstein/Ton-Verhältnis; mit kleiner Füllung einer Durchbruchsrinne (DFR) (Pfeil). Grube bei Schüpfen (BE). Massstab: Mächtige Sandsteinbank = 2m (Doppelpfeil).

Fig. 15

3.4 Anwendung des Konzeptes der Architektur-Elemente auf die Bohrungen Langenthal, Weiach und Schafisheim

3.4.1 Lage der Bohrungen

Für weiterführende Untersuchungen (Petrographie, Porosität, Permeabilität, Diagenese) und zur Verifikation des für die Untere Süsswassermolasse ausgearbeiteten Konzeptes der Architektur-Elemente standen auch verschiedene Bohrungen zur Verfügung.

Weiach und Schafisheim

Zum Einen sind dies die zwei NAGRA-Bohrungen Weiach (ZH) und Schafisheim (AG), welche die Untere Süsswassermolasse in unterschiedlichen Mächtigkeiten durchstiessen. Von diesen Bohrungen stand auch umfangreiches Kern- und Probenmaterial zur weiteren Bearbeitung bereit. Die Auswertungen dieser Bohrungen sind in den technischen Berichten MATTER et al. (1988a) (Weiach) und MATTER et al. (1988b) (Schafisheim) dokumentiert.

Die Bohrung in Weiach durchteufte eine 2020m mächtige sedimentäre Abfolge aus quartären, tertiären und mesozoischen Ablagerungen, bevor sie in einer Tiefe von 2020.40m in das Grundgebirge eindrang. Die Untere Süsswassermolasse wurde zwischen 37.0 und 177.27m erbohrt.

In Schafisheim beträgt die Mächtigkeit der über dem Grundgebirge gelegenen quartären, tertiären und mesozoischen Sedimente 1490m. Die Untere Süsswassermolasse stand zwischen 244m und 566m Teufe an, wobei lediglich das Intervall zwischen 290m und 315m gekernt wurde.

Langenthal

Zusätzlich erfuhren auch drei Bohrungen aus der Region Langenthal (BE) eine detaillierte Untersuchung. Diese Bohrungen wurden im Zusammenhang mit dem Bau eines Hochwasser-Entlastungsstollens bei Lotzwil entlang einer NW-SW verlaufenden Linie in einem Abstand von 400 bis 800m niedergebracht, wobei der Bohrplatz RB101 in der Mitte, RB102 im Nordwesten und RB103 im Südwesten liegt (genaue Koordinaten Beilage 20). Die Bohrungen waren zwischen 90 und 120m tief, wovon die oberen 15-32m aus Quartärablagerungen und der Rest aus Unterer Süsswassermolasse bestand.

3.4.2 Stratigraphische Beziehungen der USM in den Bohrungen

Da sich aus den bearbeiteten Bohrungen kein biostratigraphisch verwertbares Fossilmaterial bergen liess, kann eine Alterseinstufung lediglich auf lithostratigraphischen Überlegungen versucht werden.

So führten die lithostratigraphischen Anhaltspunkte sowie Schwermineral-Daten zum Schluss, dass die Untere Süsswassermolasse in der Boh-

rung Weiach vermutlich dem obersten Viertel der Unteren Süsswassermolasse und damit wohl dem "Aquitan" (vgl. Legende Fig. 2) im lithostratigraphischen Sinn zuzuschreiben sind (MATTER et al. 1988a).

Die Untere Süsswassermolasse in der Bohrung Schafisheim ist ebenfalls mit der lateral an die Oberfläche ausstreichenden oberen Unteren Süsswassermolasse korrelierbar und dürfte daher ebenfalls dem "Aquitan" angehören (MÜLLER et al. 1984).

Aufgrund der Untersuchungen von ERNI & KELTERBORN (1948) kann die in der Region Langenthal erbohrte Untere Süsswassermolasse dem obersten "Aquitan", der sog. "oberen bunten Molasse" zugeordnet werden (Fig. 3). Ein Vergleich der Schwermineralvergesellschaftungen aus der Bohrung Langenthal mit den Daten von MAURER et al. (1982) lässt leider keine Schlüsse zu.

Durch den Vergleich der lithologischen Abfolgen und unter Berücksichtigung des regionalen Schichtfallens konnten die stratigraphischen Beziehungen dieser drei Langenthaler Bohrungen verifiziert werden. Dabeu stellte sich heraus, dass die am südlichsten gelegene Bohrung RB103 wesentlich jünger ist als die beiden anderen und ihre Basis ca. 120m über dem Dach der mittleren Bohrung RB101 liegt.

Berechnungen zufolge überlappen sich der untere Teil der Bohrung RB101 und der obere Teil der nördlichsten Bohrung RB102 um ca. 40m. Diese zwei Bohrungen zeigen im gemeinsamen Abschnitt zudem eine sehr ähnliche Fazies, was eine entsprechende stratigraphische Korrelation bestätigt.

3.4.3 Kurzbeschreibung der Bohrungen

Schafisheim

In dem zwischen 290m und 315m gekernten Abschnitt fand sich zwischen 300-303m ein mittelkörniger Sandstein, in dem zwischen 303.3-303.8m Konglomerat- oder Brekzienhorizonte eingeschaltet sind. Ein weiterer, etwas feinerer massiver Sandstein findet sich zwischen 291-295m. Der Rest dieses gekernten Abschnitts wird durch marmorierte Mergel und Schlammsteine aufgebaut, die gewöhnlich brekziiert sind und selten zentimetergrosse Karbonatknollen enthalten. Dazu gesellen sich rippellaminierte Siltsteine und bioturbierte feine Sandsteine. Im Bohrklein (Cuttings) fanden sich auch Charophyten-Oogonien, verkalkte Reproduktionsorgane von Süsswasser-Kalkalgen (MATTER et al. 1988b).

Fig. 16: Charakteristischer ziegelroter Tonhorizont mit vertikalen Wurzelspuren (Paläoboden). Grube bei Radelfingen (BE). Massstab: Hammer = 35cm.

Fig. 17: Rote, sandige Tonhorizonte (Paläoböden) in Wechsellagerung mit dünnbankigen und pedogenisierten Sandsteinbänken der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR). Grube bei Schüpfen (BE). Massstab: 2m.

Fig. 16

Fig. 17

Weiach

Die Untere Süsswassermolasse der Bohrung Weiach enthält verschiedene mächtigere Sandsteineinheiten, so zwischen 141-151m mit kreuzgeschichteten Sandsteinen, verschiedenen Konglomeratlinsen und einem einmetrigen rotierten Block aus dunkelgrauem, laminiertem Siltstein. Des weiteren fanden sich Sandsteine zwischen ?116-124m, 131-135m, hier mit Brekzien-/Konglomerathorizonten, dann zwischen 40-?43m, 58-71m, 78-91m und 100-114m.

Gewöhnlich zeigen diese Sandsteine interne Erosionsflächen, Kreuz- und Kleinrippelschichtung. Die mitunter schlechte Kernqualität und die damit verbundenen Kernverluste können auf eine schlechte Verfestigung und eine schwache Zementation zurückgeführt werden. Aus den Kernbeschreibungen in MATTER et al. (1988) (Beilage 6.2a) geht auch hervor, dass es sich hier vorwiegend um tonig-siltige Sandsteine handelt. Die Photographien der Kerne zeigen, dass die Sandsteine von mittel- bis hellgrauer Farbe und damit dunkler als diejenigen der Bohrungen von Langenthal sind. In den Beschreibungen sind im weiteren Kletterrippeln vermerkt, die vor allem gegen das Dach der Sandsteineinheiten hin vorkommen. Diese mittelsandigen Kletterrippeln lassen sich leicht von solchen in Uferwallsequenzen unterscheiden, die in Siltsteinen oder Feinsandsteinen auftreten, so z.B. in den Bohrungen von Langenthal.

Einige der Sandsteineinheiten zeigen schwach entwickelte "fining-upwards" Sequenzen, so z.B. zwischen 58m und 71m, die aber interne Erosionsdiskordanzen aufweisen und daher teilweise amalgamiert sind. Aufgrund der Kernphotographien kann zudem geschlossen werden, dass die Korngrösse teilweise gröber ist als in den Bohrungen von Langenthal. Die schlechtere Konsolidierung, der höhere Ton- und Siltanteil, die häufigeren Kleinrippeln und die besser entwickelten "fining-upwards" Sequenzen lassen auf eine etwas andere Gesamtpetrographie der Rinnengürtel (RG) schliessen als in der Bohrung Langenthal. Als Ursache dieser faziellen Verschiedenheiten können primäre Unterschiede im Charakter der Paläorinnen vermutet werden (Kap. 3.2.5), wobei es sich hier eher um suspensionsreiche (Ton und Silt) Mischfrachtrinnen handeln dürfte.

Der Rest des Kerns besteht aus einem Wechsel von 0.5-1m dicken, feinkörnigen, massiven oder eben laminierten Sandsteinen, kleinrippelgeschichteten Siltsteinen und stark gefleckten Mergeln und Schlammsteinen. Letztere enthalten lokal isolierte oder verwachsene Karbonatknollen, die vermutlich pedogenen Ursprungs sind. Isolierte, zentimetergrosse Calcrete-Knollen finden sich in verschiedenen Tiefen. Horizonte mit verwachsenen oder angehäuften Knollen konnten zwischen 48-49m, sowie bei 77m und 128m beobachtet werden. Ab 90m Bohrtiefe sind auch dunkle Schlammsteinhorizonte relativ häufig.

Die Abfolge zwischen 136m und 140m besteht aus dunkelgrauen Siltsteinen, die an der Basis stark laminiert sind. Gegen das Hangende hin wird diese Lamination zunehmend undeutlicher und im Dach sind diese Siltsteine durch Bioturbation völlig entschichtet. Diese Fazies liess sich nur in dieser Bohrung beobachten und repräsentiert vermutlich eine episodische, möglicherweise auf saisonale Schwankungen zurückzuführende Suspensionsablagerung in einem See, der sich in einem schlecht drainierten Bereich der Schwemmebene entwickelte.

Langenthal

Bohrung RB 101

In dieser Bohrung (Beilage 1) finden sich mehrere mittelkörnige Sandsteineinschaltungen von mehr als 2m Mächtigkeit, so zwischen 37-43, 48-50m, 68-73m, hier mit einem konglomeratischen Horizont bei 71.6m, sowie zwischen 76-83m, 89-98m, 101-106m, 115-118m. Diese mächtigeren Sandsteine zeigen Kreuzschichtungen, planare Transcurrent-Laminationen und zuweilen kommen darin auch Quarzit-Gerölle von bis zu 1cm Durchmesser vor. Tonige Aufarbeitungsgerölle von grauer oder grüner Farbe lassen sich als Sohlenpflaster oder einfach im basalen Teil der Sandsteinbänke beobachten. Der Rest des Kerns wird durch marmorierte Mergel, Schlamm- und Siltsteine gebildet. Diese sind vergesellschaftet mit 10-80cm mächtigen Feinsandsteinen mit scharfer Basis und 20-50cm dicken Siltsteinen mit Kleinrippellaminationen, ebener und welliger Lamination sowie Gekröseschichtung. Bei 52m befindet sich ein 10cm dicker Schlammstein von grauer bis purpurner Farbe.

Bohrung RB 102

Mächtige Mittelsandsteine kommen in dieser Bohrung (Beilage 2) nur bei 58-62 und 84-88m vor. Der untere dieser Sandsteine zeigt klar erkennbare Kreuzschichtung während der obere ein Sohlenpflaster mit ungerundeten Komponenten von bis zu 6cm Durchmesser aufweist. Wie im Kern RB 101 besteht der übrige Teil aus gefleckten Mergeln, Schlamm- und Siltsteinen die mit rippellaminierten Siltsteinen und massigen Feinsandsteinen in einem Wechsel stehen. Zahlreiche dunkle Schlammsteinhorizonte finden sich bei 28m, 44m, 64m, 71m, 76m, 80m und 90m.

Bohrung RB 103

In diesem Bohrkern (Beilage 3) erreicht lediglich eine Sandsteinbank eine Mächtigkeit von mehr als 2m. Diese befindet sich bei 77-80m und ist weitgehend unkonsolidiert. Den Rest des Kerns bauen dunkelrote, stark gefleckte Schlammsteine mit Wurzelstrukturen sowie gerippelte Siltsteine auf. Zu denen gesellen sich dunkelrote, meist ebenfalls gefleckte Feinsandsteine. Einzelne oder zusammengewachsene pedogenetische Karbonatknollen kommen zahlreich in verschiedenen Horizonten vor, so bei 32m, 36m, 38m, 40.3m, 42-43m, 47-49m, 51m, 54m, 55m, 60m und 90m. Dunkelgraue Schlammsteine dagegen erscheinen bei 40.2m, 83m, 92m, 95m, 98m und 100m. Gesamthaft ist der Anteil der bis zu 8m mächtigen Schlammsteine in dieser Bohrung viel höher als in denjenigen von RB 101 und RB 102.

3.4.4 Die Architektur der USM in den Bohrungen

Das Studium der natürlichen Aufschlüsse erlaubte eine detaillierte, zwei- und dreidimensionale Einsicht in den lokalen faziellen Aufbau der Unteren Süsswassermolasse (Kap. 3.2). Diese Felduntersuchungen

dienten als Basis für die Ausscheidung von vier wesentlichen Architektur-Elementen für die distale Untere Süsswassermolasse (Kap 3.3). Für die Exploration und Erforschung des grossräumigen Aufbaus im mega- und gigaskopischen Bereich spielen die genannten Oberflächenaufschlüsse jedoch eine untergeordnete Rolle und die Hauptinformationen müssen aus Bohrungen und seismischen Daten gewonnen werden.

Aus diesem Grunde kommt der Beantwortung der Frage, ob sich die ausgeschiedenen Architektur-Elemente auch am Bohrkern - der ja nur im Bereich der mikroskopischen Skala einen dreidimensionalen Einblick gewährt - einwandfrei identifizieren lassen, eine übergeordnete Bedeutung zu.

So konnten die vier prinzipiellen Faziestypen (Kap. 3.2), die aufgrund des Studiums der Oberflächenaufschlüsse ausgeschieden wurden, auch in den bearbeiteten Bohrkernen von Langenthal, Schafisheim und Weiach wiedererkannt werden. Die Identifikation der verschiedenen Fazies erfolgte aufgrund lithofazieller Kriterien wie Sedimentstrukturen, Korngrösse, Bankmächtigkeit und Farbe. Die zugehörigen Faziesinterpretationen sind den Bohrprofilen beigefügt (Beilagen 1,2 und 3).

Aufgrund des Auftretens eines neuen Faziestyps in Form laminierter lakustrischer Siltsteine in der Bohrung Weiach (MATTER et al. 1988a) konnten die prinzipiellen, in den Oberflächenaufschlüssen ausgeschiedenen Architektur-Bausteine durch das Element LAK (von lakustrisch) ergänzt werden (vgl. Kap. 3.3).

RG: Rinnengürtel

Das Architektur-Element Rinnengürtel (RG) ist in den Bohrungen leicht kenntlich und bildet mittel- bis grobsandige Intervalle von durchwegs mehr als 2m Mächtigkeit. Während die Basis dieses Architektur-Elementes jeweils von einer scharfen Erosionsdiskordanz gebildet wird, findet im Dach über kurze Distanz (ca. 0.5m) ein gradueller, bioturbierter oder pedogenisierter Übergang zum Hangenden hin statt. Im Bohrkern zeigen die Sandsteine des Architektur-Elementes Rinnengürtel (RG) häufig trogförmige Schrägschichtung von Grossrippeln sowie interne Erosionsdiskordanzen. Oft finden sich bis zentimetergrosse Aufarbeitungsgerölle, gelegentlich auch Sohlenpflaster (aus Schlickgeröllen und Extraklasten?). In gewisser Beziehung sehen diese Rinnensandsteine (z.B. RB101: 67-73m) ähnlich aus wie dickere, mittelsandige Einheiten (z.B. RB101: 76-83m), die jedoch aufgrund der leicht geringeren Korngrösse sowie der häufigen internen Erosionsdiskordanzen als übereinandergestapelte Uferwalldurchbruchs-Sande (Architektur-Element DFR) interpretiert werden. Weitere Unterscheidungsmerkmale stellen jedoch auch die Korngrösse sowie die Sedimentstrukturen dar: Die Sandsteine der Rinnengürtel (Architektur-Element RG) sind generell gröber und haben weniger interne Erosionsdiskordanzen als das Architektur-Element UW (Uferwälle und distale Überschwemmungssande). Zudem zeigen die Ablagerungen der Rinnengürtel häufig Grossrippelschrägschichtungen und gele-

gentlich auch Sohlenpflaster. Gewöhnlich sind die Intervalle zwischen den Erosionsdiskordanzen im Architektur-Element Rinnengürtel auch mächtiger. Aufgrund dieser Unterscheidungsmerkmale können verschiedene mittelkörnige Sandsteineinheiten in den Bohrungen (z.B. RB101: 48-50m; RB102: 84-89m) als Ablagerungen von Durchbruchsrinnen (Architektur-Element DRF) gedeutet werden, da sie feinkörniger, teilweise unstrukturiert und die internen Erosionsdiskordanzen dicht übereinander folgen. Generell muss man jedoch davon ausgehen, dass es fazielle Grenzfälle gibt, die sich nicht mit voller Sicherheit zuordnen lassen.

DFR: Durchbruchsfächer und -rinnen

Das Architektur-Element DFR ist im allgemeinen recht unterschiedlich ausgebildet. Gesamthaft gesehen sind dessen Ablagerungen aber feinkörniger als die Sandsteine der Rinnengürtel (RG) und bestehen aus feinem bis mittelfeinem Sand. Im Vergleich mit den Rinnengürteln (RG) haben die Sandsteine der Durchbruchsrinnen (DFR) zudem häufige interne Erosionsdiskordanzen und sind meist kaum strukturiert.

Grundsätzlich besteht das Architektur-Element DFR entweder aus geringmächtigen isolierten Sandsteinbänken oder aus mächtigeren gestapelten Einheiten.

Die mächtigeren gestapelten Einheiten (z.B. RB101: 100-106, 76-82m) haben jeweils eine erosive Basis und bestehen im Dach jeweils aus rund einem halben Meter bioturbierter oder schwach gefleckter ("mottled") Feinsandsteine. Die Hangendgrenze zu gefleckten Mergeln der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (Architektur-Element UPS) ist recht scharf. Einzelne Sandsteinbänke haben im Dach zuweilen ein Relief (z.B. Trockenrisse bei RB101: 100m) oder werden von eckigen Tongeröllen (Aufarbeitungsgerölle aus der Überschwemmungsebene) überlagert (z.B. RB101: 76m).

Geringmächtige isolierte Bänke (z.B. RB101: 57-62m, 47-50m) treten oft repetiert auf, wobei sie durch dezimeterdicke Schlammstein- oder Mergelschichten voneinander getrennt sind. Die Basis dieser 0.5-2m dicken Bänke ist 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 Wechsel von rippellaminierten Feinsandsteinen zu massigen mittelkörnigen bis feinkörnigen Sandsteinen statt. Wo isolierte Sandsteine der Durchbruchsfächer von Uferwallsedimenten (UW) überlagert werden, ist der Kontakt zum Hangenden scharf. Häufiger sind die Bänke jedoch vollständig oder gegen das Dach hin leicht gefleckt und es besteht ein gradueller Übergang zu den Silt- und Schlammsteinablagerungen der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS).

UW: Uferwälle und distale Überschwemmungssande

Die Ablagerungen dieses Architektur-Elementes bilden im Bohrkern mehrfach repetitive Abfolgen aus dünnen, 10-20cm dicken Feinsand- oder

Siltsteinbänken und dünnen Zwischenlagen aus schwach marmorierten ("mottled") Schlammsteinlagen. Die einzelnen Sandsteinbänke beginnen meist über einer scharfen Basis und sind intern vielfach rippellaminiert oder eben laminiert. Im Dach der Bänke können häufig Kletterrippeln beobachtet werden, die - wie die ebenfalls verbreiteten Wulstschichtungen und Belastungsmarken - für eine rasche Sedimentation charakteristisch sind.

Über Sedimenten der Überschwemmungsebene (Architektur-Element UPS) oder der Rinnengürtel (RG) setzten die Uferwallablagerungen (UW) mit einem scharfem Kontakt ein, wogegen sie aus den Ablagerungen der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) eher graduell hervorgehen. Der Übergang zum Architektur-Element UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) ist infolge der Pedo- und Bioturbation und mit zunehmender Fleckung meist fliessend.

UPS: Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen

Aufgrund der auffallenden bunten pedogenen Horizonte ist das Architektur-Element UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) leicht erkennbar. Der Übergang aus den liegenden Architektur-Elementen ist normalerweise graduell und von einer zunehmenden Pedogenisierung gekennzeichnet. Die Grenze zum Hangenden ist jedoch generell recht scharf und erosiv.

Die Ablagerungen dieses Architektur-Elementes bestehen jeweils aus verschiedenen pedogenen Horizonten, die in mehrphasige pedogene Zyklen organisiert sind. Ein derartiger, 10-100cm mächtiger Zyklus zeigt gegen das Hangende eine Zunahme der Fleckung bis hin zu roten oder schwarzen Horizonten mit scharfer Obergrenze. Die Entstehung solcher Zyklen ist durch eine komplexe Überlagerung von Bodenprofilen, verschiedener vertikaler Aggradation, sowie Unterschieden im Relief und in der Entwässerung der Schwemmebene zu erklären.

Zusammenfassende Betrachtung über die Architektur in den untersuchten Bohrungen

Die Anteile der verschiedenen Architektur-Elemente in den erbohrten Sedimentabfolgen schwanken von Lokalität zu Lokalität (Tab. 1, Fig. 18).

So ist die Untere Süsswassermolasse in der Bohrung Weiach besonders sandreich: Der Anteil des Architektur-Elementes RG (Rinnengürtel) beträgt hier 50% der Gesamtmächtigkeit, derjenige aller Sandsteine gut 70%.

Im Gegensatz dazu sind die Langenthal-Bohrungen generell ärmer an Sand und der Anteil des Architektur-Elementes RG (Rinnengürtel) erreicht in der Bohrung RB101 ein Maximum mit 25% der totalen Mächtigkeit. In der Bohrung RB102 finden sich noch 6% Sandsteine der Rinnengürtel (RG) und in RB103 fehlt dieses Architektur-Element gar vollständig.

Bohrung	RG	DFR	UW	UPS	Lak	Total
Schafisheim	2.4 (9.7)	6.6 (26.6)	6.2 (25.0)	9.6 (38.7)	-	24.8 (100.0)
Weiach	64.9 (49.8)	22.4 (17.2)	11.7 (9.0)	27.8 (21.3)	3.5 (2.7)	130.3 (100.0)
Langenthal RB 101	22.5 (25.4)	28.2 (31.9)	15.0 (17.0)	22.7 (25.7)	-	88.4 (100.0)
RB 102	4.0 (5.7)	19.7 (27.9)	6.0 (8.5)	40.8 (57.9)	-	70.5 (100.0)
RB 103	-	31.1 (35.6)	10.8 (12.4)	45.4 (52.0)	-	87.3 (100.0)

RG Rinnengürtel
DFR Durchbruchsfächer und -rinnen
UW Uferwälle und distale Überschwemmungssande
UPS Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen
LAK Lakustrische Ablagerungen

Tab. 2: Kumulative Mächtigkeiten der einzelnen Architektur-Elemente in den gekernten Abschnitten der untersuchten Bohrungen (vgl. Beilagen 1-4). Die Daten der Bohrung Schafisheim wurden aufgrund von Kernphotographien interpretiert.

Ähnliche Unterschiede können auch bei den Anteilen der anderen Architektur-Elemente in den verschiedenen Bohrungen ausgemacht werden. So ist das Auftreten von Durchbruchsrinnen (Architektur-Element DFR) generell an diejenige Bohrung mit grösseren Anteilen an Rinnensandsteinen (RG) gebunden, so z.B. Weiach oder Langenthal RB101 und RB 102. In diesen Bohrungen hat dann auch das Architektur-Element DFR (Durchbruchsfächer und -rinnen) gemeinhin einen grösseren Anteil. Umgekehrt sind die Ablagerungen des Architektur-Elementes UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) in Bohrungen mit geringen Anteilen an Rinnenablagerungen (Architektur-Element RG) generell sowohl mächtiger (z.B. RB103) als auch häufiger und treten zusammen mit dünneren Durchbruchssanden (Architektur-Elemente DFR sowie teilweise UW), zahlreichen Karbonatknollen und dunklen Schlammsteinhorizonten auf.

Die lokal unterschiedliche Häufigkeit der einzelnen Architektur-Elemente kann dahin gedeutet werden, dass sie die unterschiedliche Distanz des jeweiligen Ablagerungsraumes zum Hauptentwässerungssystem reflektiert (Kap. 3.2.5).

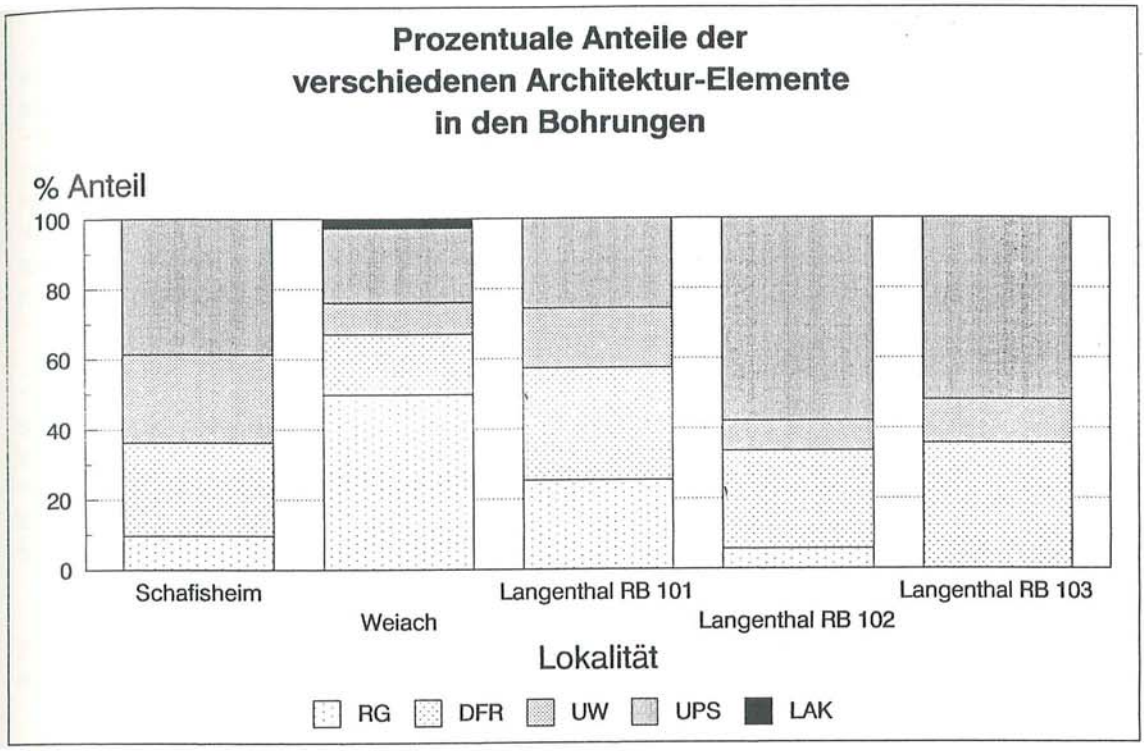


Fig. 18: Histogramm der kumulativen Mächtigkeit der verschiedenen Architektur-Elemente in den gekernten Abschnitten der untersuchten Bohrungen (vgl. Tab. 1).

So gelangten im Bereich des axialen Hauptentwässerungssystems über längere Zeiträume vorwiegend Rinnensandsteine (Architektur-Element RG) sowie Uferwalldurchbruchsrinnen und proximale -fächer (DFR) zur Ablagerung. Demgegenüber treten hier die eigentlichen Überschwemmungssande anteilsmässig in den Hintergrund. Zusammen mit ihnen kommen in der unmittelbar angrenzenden Schwemmebene relativ selten auch Paläoböden vor, die jedoch meist unreif sind und typische Merkmale schlecht entwässerter Bereiche aufzeigen.

In den marginalen Gebieten der Flussebene hingegen sind Rinnenablagerungen selten und Ablagerung von Uferwalldurchbrüchen sind dünner und weniger häufig. Die Überschwemmungssande enthalten mehr und reifere Paläoboden-Horizonte, deren Morphologien einerseits auf eine Ablagerung in besser entwässerten Bereichen (Rothorizonte und pedogene Kalkknollen), andererseits aber auch in schlecht entwässerten Gebieten mit Sümpfen und Seen hinweisen (dunkle Horizonte, Vertisols und laminierte lakustrische Siltsteine).

3.5 Gesamtarchitektur der Unteren Süsswassermolasse

In den vorangehenden Kapiteln wurden die Fazies (Kap. 3.2) und die Architektur (Kap. 3.3 und 3.4) der distalen Unteren Süsswassermolasse analysiert. Im Konzept des hierarchischen Aufbaus eines Lithosoms betreffen diese Untersuchungen vor allem die Grössenordnung der makroskopischen Skala (ca. $n \cdot 10^0$-$n \cdot 10^1$m, Kap. 3.1.1), teilweise auch den unteren Bereich der megaskopischen Skala (ca. 1 bis $2 \cdot 10^2$m). In Figur 19 ist der heterogene Aufbau der USM dieser Grössenordnung in einem hypothetischen Modellblock mit den verschiedenen Architektur-Elementen schematisch dargestellt.

Die einzelnen Architektur-Elemente selbst haben ebenfalls einen heterogenen Aufbau auf der Stufe der unteren makroskopischen (wenige $n \cdot 10^0$m) und vor allem der mikroskopischen Skala (ca. $<n \cdot 10^{-1}$m). Die petrophysikalischen und petrographischen Eigenschaften, Heterogenitäten und diagenetischen Veränderungen in dieser Grössenskala und ihre Beziehungen zu den höheren hierarchischen Stufen sind Gegenstand der folgenden Kapitel (4 und 5).

Für eine geologisch-technische Gesamtbeurteilung der distalen USM ist aber auch der Aufbau der Lithosoms in der mega- und gigaskopischen Skala von grosser Wichtigkeit.

Auf der Stufe der megaskopischen Skala (ca. $n \cdot 10^2$-$n \cdot 10^3$m) stehen folgende Fragen im Zentrum des Interesses:

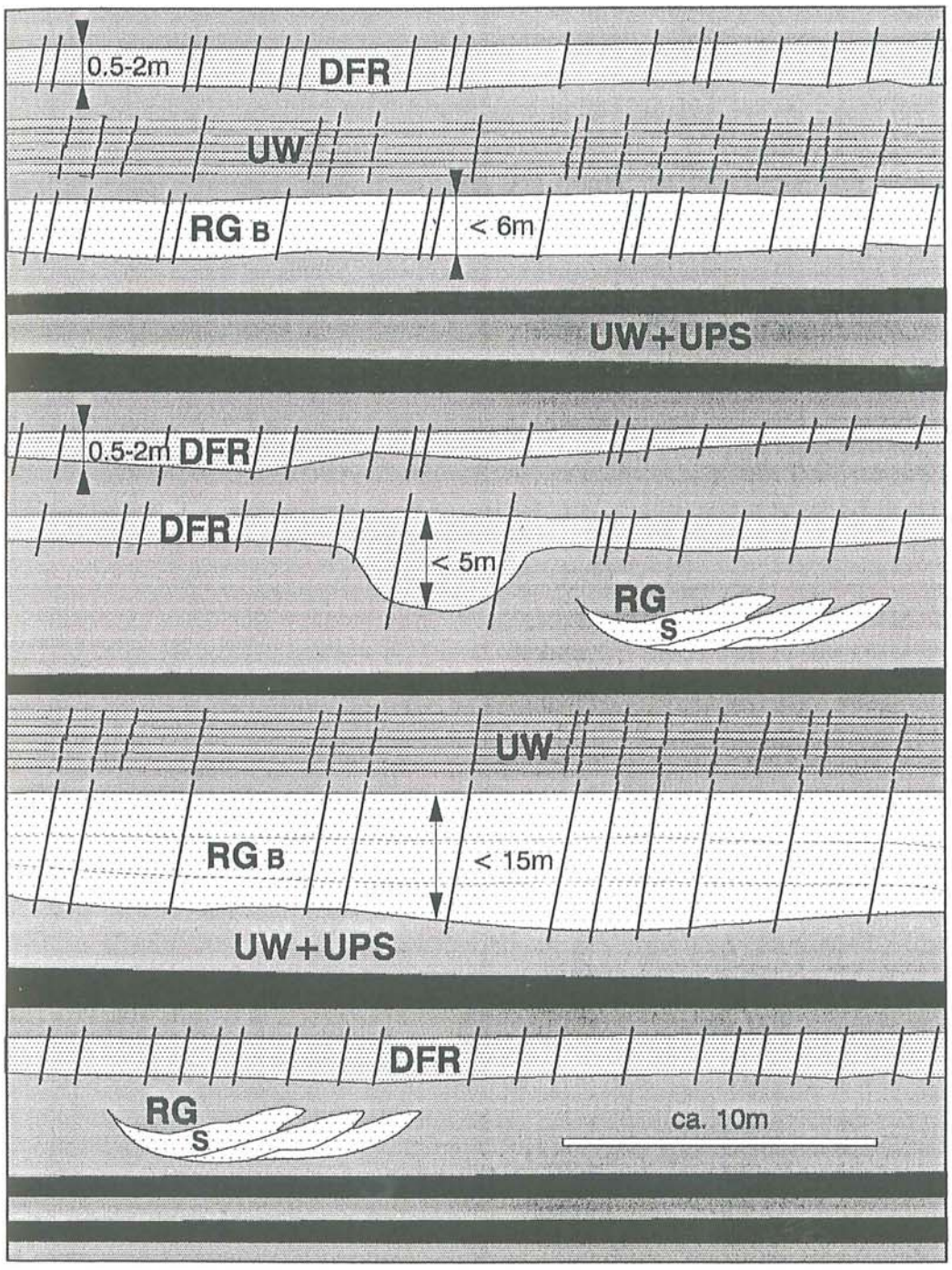
- Welche räumliche Ausdehnungen haben die ausgeschiedenen Architektur-Elemente? Dabei kommt den Rinnensandsteinen der Elemente RG (Rinnengürtel) und DFS (Durchbruchsfächer und -rinnen) eine besondere Bedeutung zu.

- In welchem Ausmass stehen die Rinnensandsteine untereinander in Verbindung ("Interconnectedness")?

Die höchste hierarchische Stufe, die gigaskopische Skala, liegt ausserhalb des gegebenen Rahmens dieser Studie. Sie würde ein umfangreiches Explorationsprogramm mit Auswertungen von Seismik und Bohrungen beinhalten.

Fig. 19: Der hypothetische Modellblock zeigt den heterogenen Aufbau der distalen USM im megaskopischen Bereich. Nebst den verschiedenen Architektur-Elementen ist auch das typische Erscheinungsbild von Klüften berücksichtigt. Diese sind nur in den kompetenten Sandsteinen gut ausgebildet, da die Deformation in den inkompetenten Lagen plastisch kompensiert wurde.

HYPOTHETISCHER MODELLBLOCK DER DISTALEN USM



RG Rinnengürtel; B bodenfracht-, S suspensionsfrachtreiche
DFR Durchbruchsfächer und Durchbruchsrinnen
UW Uferwälle und distale Überschwemmungssande
UPS Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen

Fig. 19

3.5.1 Räumliche Ausdehnung der Architektur-Elemente

Für die Modellierung von Fliesssystemen sind nebst den petrophysikalischen und petrographischen Eigenschaften der verschieden Architektur-Elemente vor allem deren räumliche Ausdehnungen von grosser Wichtigkeit. Für die folgenden Betrachtungen ist es zweckmässig, die ausgeschiedenen Architektur-Elemente in zwei Gruppen zu unterteilen:

Das **Gerüst der Rinnensandsteinkörper** (Architektur-Element RG: Rinnengürtel) und die sie **umgebende Matrix** (Einbettungssediment) aus den Architektur-Elementen UW (Uferwälle und distale Überschwemmungssande), UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) und LAK (lakustrische Ablagerungen). Zwischen diesen zwei vermittelt das Architektur-Element DRF (Durchbruchsfächer und -rinnen).

In der Matrix der USM lassen sich die Architektur-Elemente UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) und LAK (lakustrische Ablagerungen) durch tabulare Geometrien darstellen. Auch das Architektur-Element UW (Uferwälle und distale Überschwemmungssande) bildet annähernd tabulare oder flach keilförmige Sedimentkörper. Das Architektur-Element DFR (Durchbruchsfächer und -rinnen) indes zeigt neben den flach keilförmigen bis tabularen Geometrien der Durchbruchsfächer

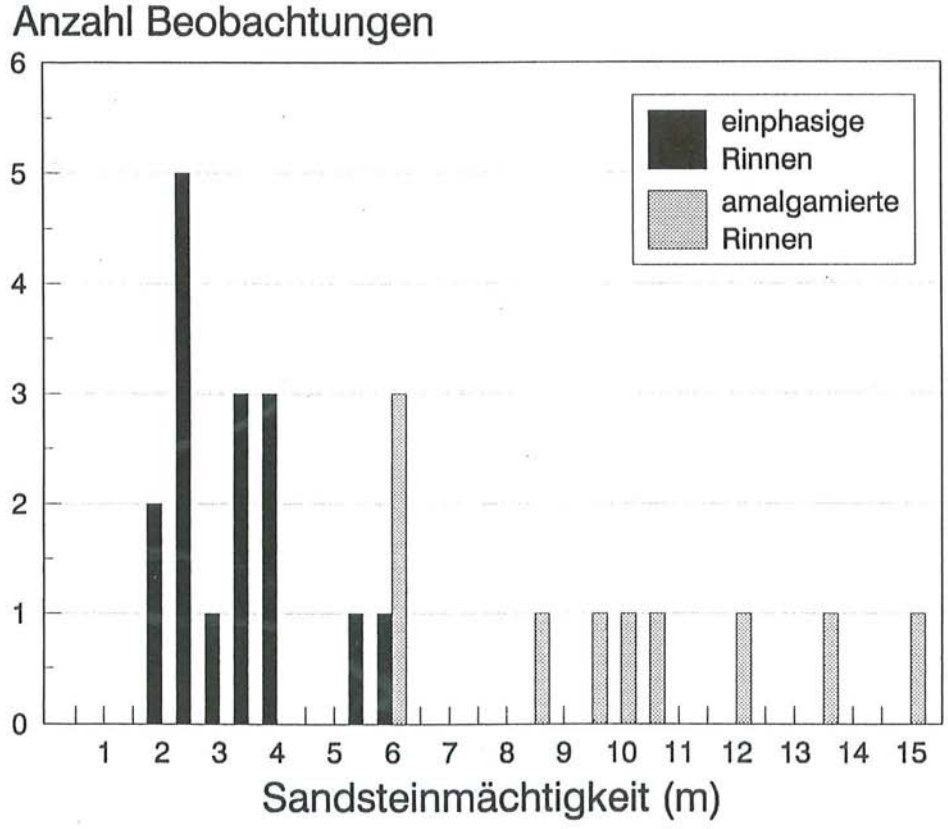


Fig. 20: Histogramm der beobachteten Mächtigkeiten einphasiger und amalgamierter Rinnensandsteine in der distalen Unteren Süsswassermolasse.

auch Durchbruchsrinnen mit eher röhrenförmigen Geometrien. Die geometrischen Parameter der verschiedenen Architektur-Elemente sind in Figur 47 zusammenfassend dargestellt.

3.5.2 Geometrie des Architektur-Elementes Rinnengürtel (RG)

Als potentielle Fliesswege in fluviatilen Ablagerungssystemen stehen nebst dem ebenfalls psammitischen Architektur-Element DFR die sandigen Ablagerungen der Rinnengürtel (Architektur-Element RG) im Zentrum des Interesses. Die Aufschlussverhältnisse im Mittelland gestatten es jedoch nicht, die laterale Ausdehnung der relativ weiträumigen Sandsteinkörper direkt auszumessen. Deshalb sind wir für die Prognosen im megaskopischen Bereich (Kap. 3.1.1) auf Berechnungen angewiesen, wie sie sich für in der Erdölgeologie zur Abschätzung von Reservoirsandsteinen bewährt haben. Ausgangspunkt derartiger Berechnungen ist die Tiefe der Paläorinne.

Bestimmung der Paläorinnentiefe

Für einphasige, nicht amalgamierte Rinnenkörper mit sinusförmigem bis mäandrierendem Verlauf (Kap. 3.2.5) darf die Paläorinnentiefe als äquivalent zur Dicke der Gleithangablagerungen des lateral wandernden Paläoflusses angenommen werden und entspricht damit approximativ der Mächtigkeit der Rinnensandsteine (LORENZ et al. 1985).

Im Falle amalgamierter Rinnengürtel lässt sich die Tiefe der ehemaligen Rinne aufgrund folgender empirischer Relation abschätzen: Rinnentiefe (m) = 0.55·Mächtigkeit des amalgamierten Rinnensandsteinkörpers (m) (FIELDING & CRANE 1987).

Die Mächtigkeiten der in der distalen USM beobachteten Rinnensandsteine (RG) sind in Tabelle 3 aufgelistet und in Figur 20 als Histogramm dargestellt.

Der Mittelwert der Mächtigkeiten einphasiger Rinnensandsteine beträgt 3.3m bei einer Standardabweichung von 1.1m. Die beobachteten Rinnen zeigen dabei eine gute Anpassung an die Normalverteilung (zweiseitige Signifikanz p=0.627), gehorchen aber auch einer Poissonverteilung (zweiseitige Signifikanz p=0.053). Bei der vorliegenden Normalverteilung haben demnach 66.26% aller einphasigen Rinnen eine Paläotiefe von 3.3±1.1m.

Die aufgrund der empirischen Relation Rinnentiefe (m) =0.55·Mächtigkeit amalgamierter Rinnen (m) ermittelten Paläotiefen der mehrphasigen Rinnensandsteine zeigen demgegenüber generell höhere Werte mit einem Mittelwert von 5.2m und maximalen Rinnentiefen von 8.3m (Tab. 3, Fig. 21). Für alle erfassten Rinnen ergibt sich ein Mittel von 4.0±1.6m. Bei dieser Ermittlung der Paläorinnentiefen wurde die Kompaktion der Sandsteine nicht speziell berücksichtigt, da diese vermutlich nicht überall gleichgross ist und ohnehin im Bereich der Fehlergrenzen liegen dürfte. Die Kompaktion von losem Sand zu Sandstein kann gemeinhin auf rund 10% veranschlagt werden (LORENZ et al. 1985).

Für die Abschätzung der USM-Flüsse sind die Daten der einphasigen Rinnen sicher von übergeordneter Bedeutung (mittlere Paläorinnentiefe 3.3±1.1m). Demgegenüber können die empirisch abgeleiteten Dimensionen der mehrphasigen Rinnen (5.2±1.6m) als Obergrenze der Paläorinnentiefen interpretiert werden.

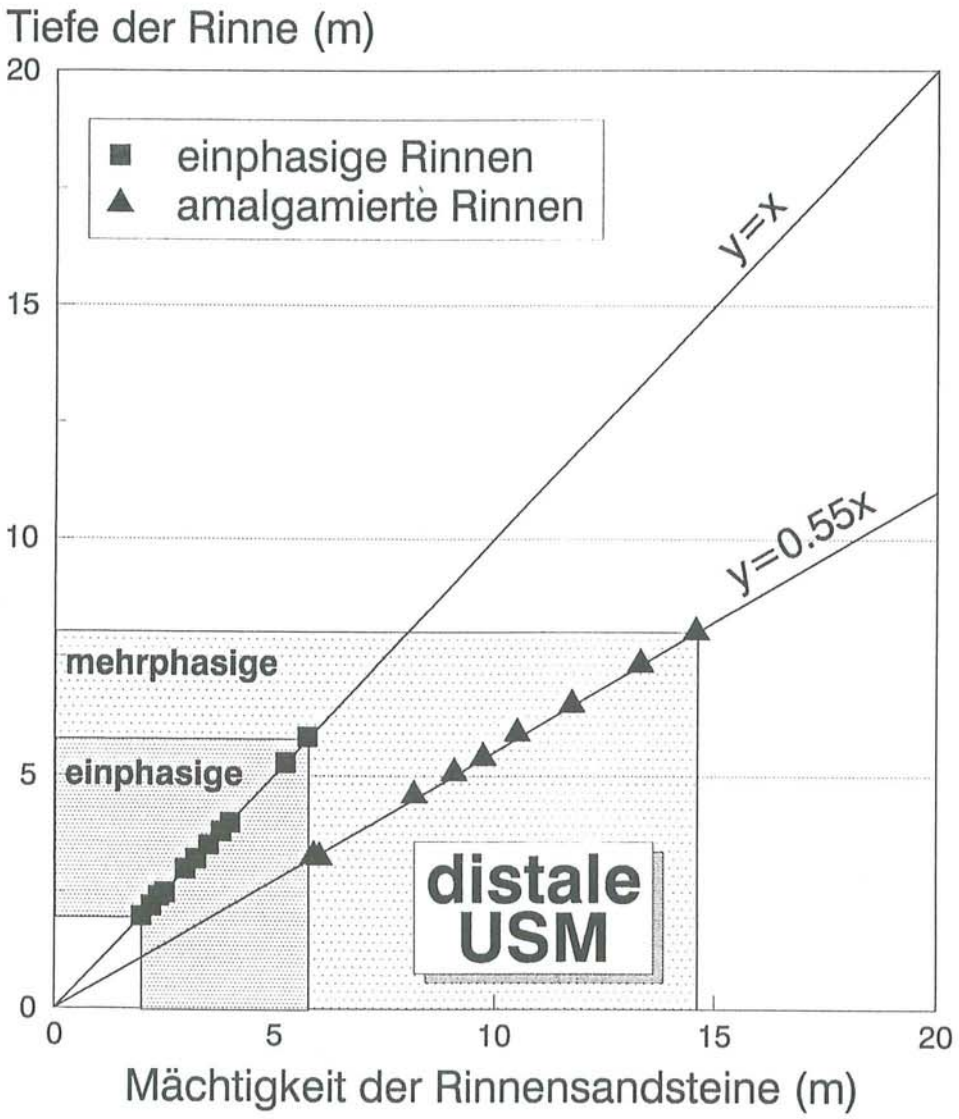


Fig. 21: Graphische Darstellung der beobachteten (x=y) und aufgrund empirischer Relationen (y=0.55x) ermittelten Rinnengeometrien der distalen Unteren Süsswassermolasse.

Berechnung der Breite der Rinnengürtel

Aufgrund der ermittelten Paläorinnentiefen lassen sich die Breiten der Rinnengürtel herleiten. Dabei kann auf verschiedene empirische Relationen abgestützt werden, wie sie in der Erdölindustrie Verwendung finden.

Die bekannteste ist die Beziehung von COLLINSON (1978) für frei mäandrierende Flüsse (Fig. 22): Rinnengürtelbreite (m) = 64.6·(Rinnentiefe)$^{1.54}$. Sie ist für die distale USM als obere Grenze des Verhältnisses Rinnengürtelbreite / Rinnentiefe anzusehen, da darüber nur verwilderte Flussysteme vorliegen (FIELDING & CRANE 1987). Für die einphasigen Rinnen errechnen sich nach COLLINSON (1978) mittlere maximale Breiten der Rinnengürtel von 418±224m bei maximalen Werten von 993m und minimalen von 187m. Diese Werte, die auf die direkt abgeleiteten Parameter von einphasigen Rinnen bauen, dürfen als beste Näherung für die Obergrenze der Rinnengürtelbreite angesehen werden. Die Resultate der Berechnung nach COLLINSON (1978) für die Gesamtheit der Paläorinnen gelten als maximale mögliche Werte. Sie ergaben 587±371m als maximale mittlere Breiten der Rinnengürtel, bei einem Maximum von 1600m.

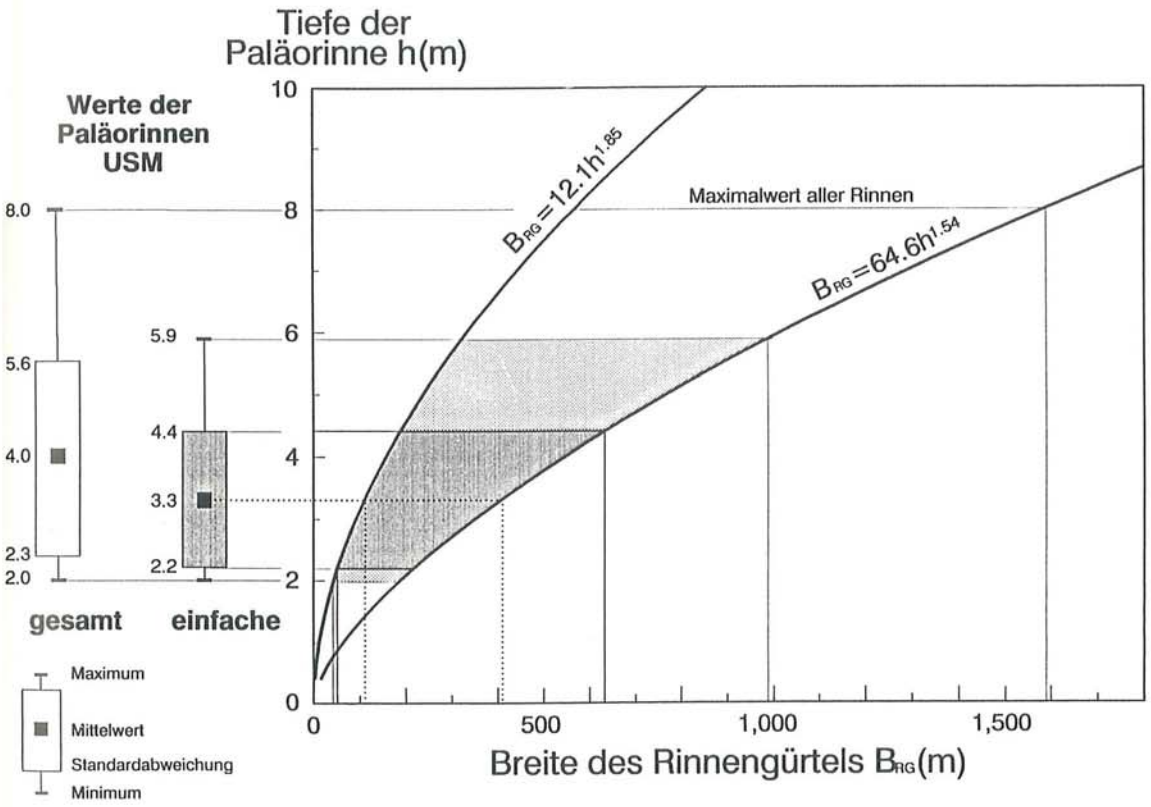


Fig. 22: Graphische Darstellung der Beziehung Rinnentiefe / Rinnengürtelbreite für sinusförmige bis mäandrierende Flusssysteme und Ableitung der in der distalen Unteren Süsswassermolasse zu erwartenden Rinnengürtelgeometrien (umgezeichnet und ergänzt nach FIELDING & CRANE [1987]).

Eine umfangreiche Datensammlung erlaubte FIELDING & CRANE (1987) die Ableitung einer weiteren Relation, die sie als beste Annäherung für alle Flussysteme erachten. Sie lautet: Rinnengürtelbreite (m) = 12.1·(Rinnentiefe)$^{1.85}$ (Fig. 22). Diese Beziehung erlaubt es, für die Pa-

läorinnen der distalen USM eine Untergrenze der Rinnengürtelbreite abzuschätzen. Die beste Näherung für die Untergrenzen der Rinnengürtelbreite ist dabei wiederum von den Berechnungen auf der Basis der einphasigen Rinnen zu erwarten. Sie ergaben mittlere minimale Breiten der Rinnengürtel von 118±77m, bei einem Minimum von 43m.

Längenausdehnung der Rinnengürtel

Während sich die Mächtigkeit und die Breite der Rinnengürtel aufgrund von empirischen Formeln und praktischen Überlegungen ableiten lassen, gestaltet sich eine Abschätzung deren Längenausdehnung als sehr schwierig, worauf bereits in NTB 88-25 hingewiesen wurde.

Die Resultate der vorliegenden Studie erlauben jedoch weiterführende Angaben über die kritische Grösse der Längserstreckung. In der Faziesanalyse (Kap. 3.2.5) konnte nachgewiesen werden, dass in der distalen USM sowohl bodenfrachtreiche als auch suspensionsfrachtreiche Mischfrachtrinnen vorkommen.

Die Untersuchungen von GALLOWAY (1977) und GALLOWAY & HOBDAY (1983) haben gezeigt, dass die Rinnengürtel mit steigendem Anteil an Bodenfracht zunehmend breiter und in der Längsachse kontinuierlicher werden. Umgekehrt zeigen die Ablagerungen von Flüssen mit steigender Suspensionsfracht eine zunehmende Zergliederung der Rinnengürtel in Schnürsenkelsande und Sandlinsen.

Im Falle der distalen USM des zentralen und östlichen Mittellandes können wir daher für das Hauptentwässerungssystem mit seinen Mischfrachtrinnen allgemein von komplexen, wulstartigen Rinnengürteln ausgehen (Fig. 11). Gegen das Liefergebiet hin, also gegen Westen und die Alpen zu, ist mit einem steigenden Bodenfrachtanteil und folglich mit einer allmählichen Zunahme der Breite und der Kontinuität der Rinnengürtel zu rechnen. Flussabwärts, gegen Osten zu, ist indes mit einer stetigen Abnahme der Bodenfracht und einer Zunahme der Suspensionsfracht zu rechnen, sofern hier der Sedimenteintrag aus den Alpen nicht stärker zunimmt als die sich kumulierende Wassermenge im Hauptentwässerungssystem. Gesamthaft ist zu erwarten, dass die Sandsteine der Rinnengürtel gegen Osten zu, also in Richtung des damaligen Golfes der Paratethys, immer stärker gegliedert werden und anfänglich Schnürsenkelsande, dann nur noch Aneinanderreihungen von Sandlinsen bilden. Andererseits müssten die Sandsteinkörper im Westen mit steigendem Bodenfrachtanteil zunehmend sandig sowie von grösserer Kontinuität, Längsausdehnung und Breite sein.

Tab. 3: Beobachtete und aufgrund empirischer Relationen ermittelte Rinnengeometrien der distalen Unteren Süsswassermolasse.

Lokalität	Teufe Profilmeter	Beobachtete Mächtigkeiten der Rinnensandsteine (m)			Frachttyp**	Paläorinnentiefe (m)		
		einphasige	mehrphasige	Ableitung der Rinnentiefe*		einphasige	mehrphasige	gesamt
RB101	88.5- 98.2		9.7	5.3		5.3	5.3	5.3
RB101	67.4- 72.7	5.3				5.9	5.8	5.3
RB101	36.8- 42.7	5.9				4.0	4.5	5.9
RB102	57.8- 61.8	4.0				3.5	8.0	4.0
Weiach	140.6-151.1		10.5	5.8		2.4	7.3	5.8
Weiach	132.0-135.5	3.5				3.2	6.5	3.5
Weiach	115.7-123.9		8.2	4.5		2.0	3.3	4.5
Weiach	99.6-114.2		14.6	8.0		2.0	3.3	8.0
Weiach	78.0- 91.3		13.3	7.3		2.2	5.0	7.3
Weiach	58.8- 70.6		11.8	6.5		3.8	3.3	6.5
Schafisheim	300.5-302.9	2.4				4.0		2.4
Gerlafingen			6.0	3.3	BFR	2.5		3.3
Gerlafingen		3.2			BFR	2.5		3.2
Gerlafingen		2.0			BFR	3.5		2.0
Gerlafingen		2.0			BFR	2.5		2.0
Schüpfen			6.0	3.3	BFR	3.0		3.3
Pfaffnau	6.4- 15.5		9.1	5.0	BFR			5.0
Pfaffnau	16.3- 18.5	2.2			SFR			2.2
Fisibach	13.9- 17.7	3.8			SFR			3.8
Pieterlen		4.0			BFR			4.0
Radelfingen		2.5						2.5
Radelfingen Strasse		2.5			BFR			2.5
Rapperswil		3.5			BFR			3.5
Rapperswil		2.5			SFR			2.5
Rapperswil		3.0			SFR			3.0
Roggwil			5.9	3.3	BFR			3.3
				Anzahl Beobachtungen		16	10	26
				Maximum		5.9	8.0	8.0
				Minimum		2.0	3.3	2.0
				Mittelwert		3.3	5.2	4.0
				Standardabweichung		1.1	1.6	1.6

*Rinnentiefe = 0.55·(Mächtigkeit mehrphasiger Rinnensandsteine)
**Frachttyp: BFR: bodenfrachtreich
SFR: suspensionsfrachtreich

Tab. 3

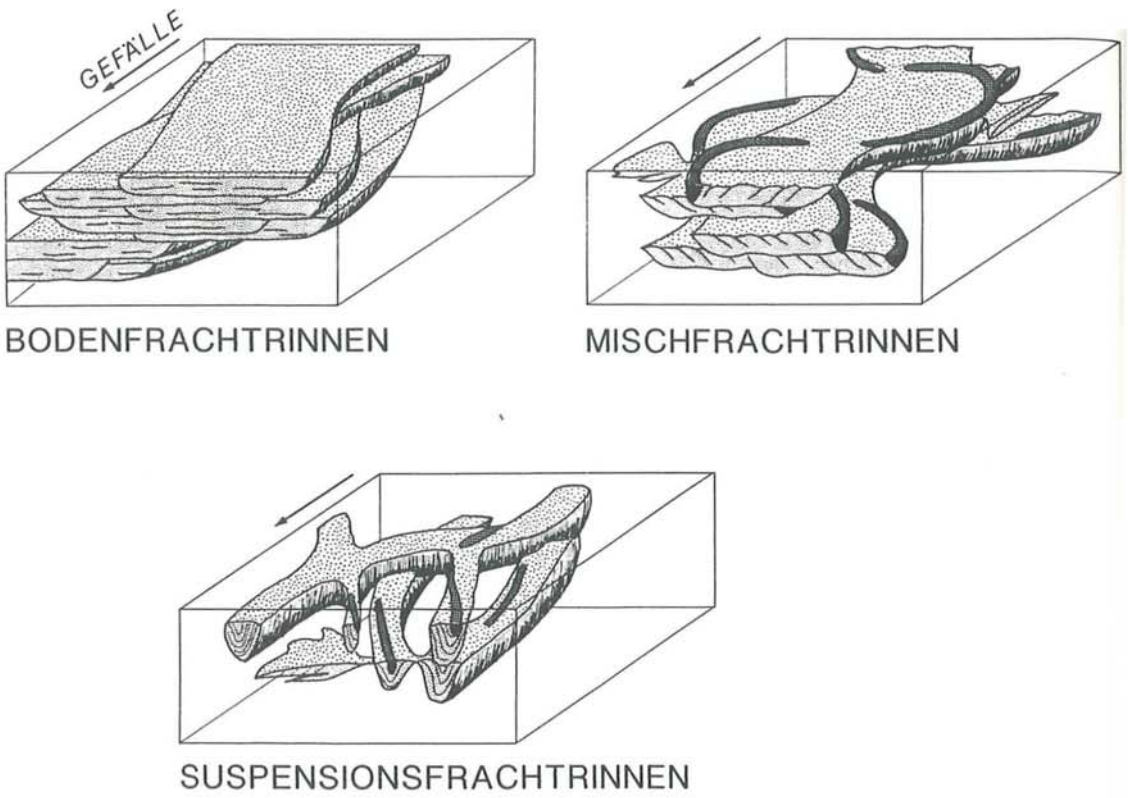


Fig. 23: Schematische Darstellung der dreidimensionalen Geometrien, der lateralen Zusammenhänge und der internen Schichtung von Rinnengürteln in Abhängigkeit der Sedimentfracht. Im Hauptentwässerungssystem der distalen Unteren Süsswassermolasse dominierten bodenfrachtreiche Mischfrachtrinnen. Daneben kamen auch klassische suspensionsfrachtreiche Mischfrachtrinnen vor (umgezeichnet nach GALLOWAY & HOBDAY [1983]).

3.5.3 Kontakte und Verbindungen der Rinnensandsteine ("Interconnectedness")

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Beurteilung von Fliesswegen in fluviatilen Lithosomen stellt die hydraulische Kommunikation verschiedener Rinnengürtel entlang von Erosivkontakten dar. Diese lateralen und vertikalen Verbindungen ("Interconnection", "Connectedness") sind im wesentlichen eine Funktion der Grösse und des Typs der Paläorinne sowie der Subsidenz- und Avulsionsrate.

Flusssysteme mit sinusförmigen bis mäandrierenden Mischfrachtrinnen, wie sie für die distale USM interpretiert werden (Kap. 3.2.5), zeichnen sich dadurch aus, dass deren Rinnengürtel relativ isoliert in der tonig-siltigen Matrix (Kap. 3.5.1) vorkommen, teilweise aber wohl miteinander in erosivem Kontakt stehen (Fig. 11 und 23). Bei den Rinnengürteln bodenfrachtreicher Paläoflüsse hingegen ist generell mit einer Zunahme der Verbundenheit zu rechnen. Mit steigendem Suspensionsfrachtanteil jedoch nimmt der Grad der Verbundenheit generell ab (GALLOWAY & HOBDAY 1983). Die Rinnengürtel sind mehr oder weniger in der Haupfliessrichtung angeordnet, im axialen Entwässerungssystem der USM also ungefähr von WSW nach ENE und in den zuführenden Systemen mehr oder weniger senkrecht dazu (Kap. 2.1). Den Durchbruchsfächern

und -rinnen (Architektur-Element DFR) kommt in Mischfrachtsystemen als verbindendes Element ebenfalls eine gewisse Bedeutung zu, die aber schwierig abzuschätzen ist.

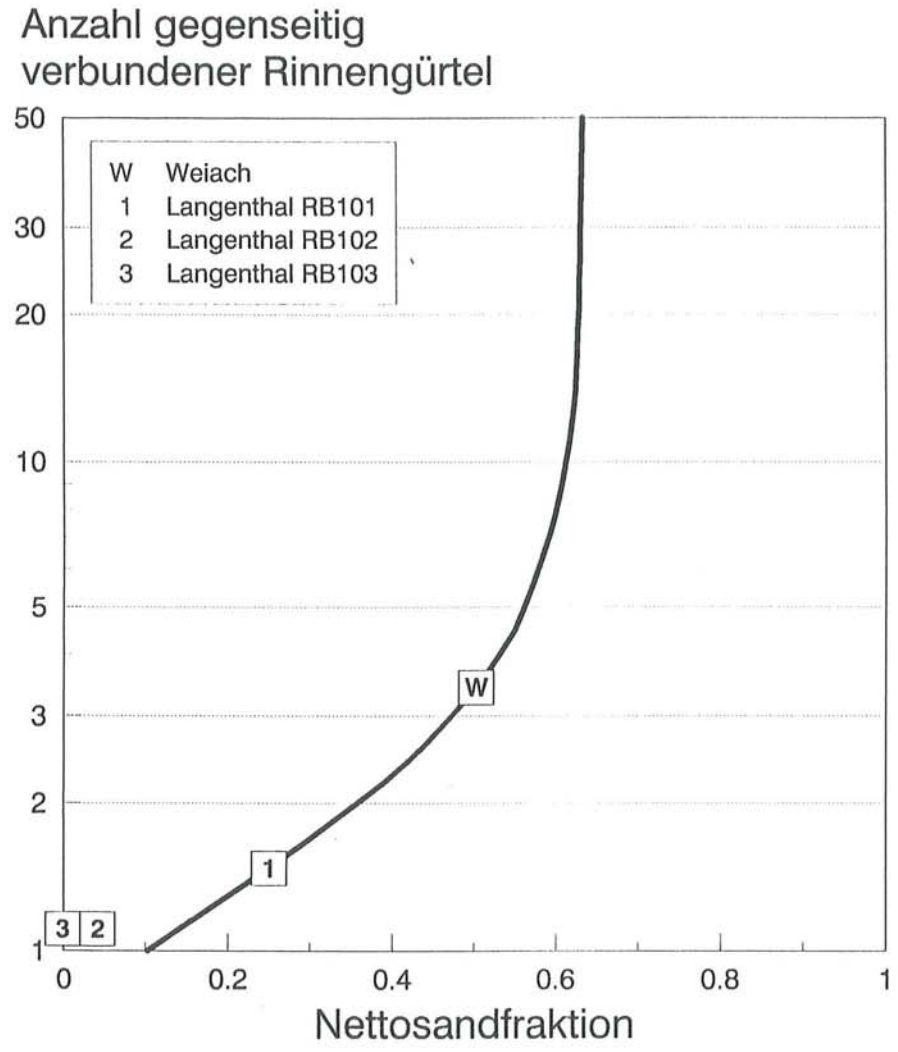


Fig. 24: Darstellung des Grades der Verbundenheit von Rinnengürteln als Funktion der Nettosandfraktion. Die Ordinate gibt die Zahl der Rinnengürtel an, die jeweils als Gruppe miteinander in Verbindung stehen. Die Nettosandfraktion ist der Quotient der Gesamtmächtigkeit des Lithosoms geteilt durch die Gesamtmächtigkeit aller Rinnensandsteine (nach FIELDING & CRANE [1987]).

Die Verbundenheit der Rinnengürtel ("Interconnection", "Connectedness") kann aufgrund von Computer-Simulationsstudien aber auch als Funktion der Nettosandfraktion einer Sedimentationssequenz dargestellt werden (FIELDING & CRANE 1987) (Fig. 24). Die Nettosandfraktion errechnet sich aus dem Verhältnis (Totalmächtigkeit der Rinnensandsteine) / (Gesamtmächtigkeit der Sequenz). Für die distale USM ergibt sich folgendes Bild (Tab. 1, Fig. 24):

- Aufgrund der Nettosandfraktion von 0.50 in der Bohrung Weiach kann

geschlossen werden, dass hier jeweils zwischen 3 und 5 und somit mehrere Rinnengürtel miteinander in Verbindung stehen.

- Demgegenüber ist zu erwarten, dass die Rinnengürtel im Gebiet der Bohrungen Langental RB101 (0.25) und RB102 (0.06), möglicherweise auch Schafisheim (0.10) als isolierte Sandsteinkörper in der Matrix vorliegen.

3.5.4 Modellvorstellungen

Die Resultate der Feldbeobachtungen, der Auswertungen der Bohrprofile sowie der sedimentologischen Analyse mit theoretischen Überlegungen und Berechnungen erlauben es, die räumlichen Beziehungen des Gerüstes der Rinnengürtel (RG) in ihrer tonig-siltigen Matrix (Einbettungssediment: übrige Architektur-Elemente) in der megaskopischen Skala als zweidimensionalen Modellblock darzustellen (Fig. 25 und 26). Diese Modellschnitte sollen insbesondere die grossräumige Verteilung und Anordnung der Rinnengürtel in Schnitten quer zur Fliessrichtung des Hauptentwässerungssystems der distalen USM demonstrieren (Fig. 25). Im weiteren sind in Figur 26 zusätzlich die räumlichen Beziehungen der Durchbruchsfächer und -rinnen (Architektur-Elemente DFR) zu den Rinnengürteln dargestellt. Die Durchbruchsfächer und -rinnen spielen in Ablagerungen von Mischfrachtrinnen als mögliche Verbindungen von Fliesswegen eine nicht zu unterschätzende Rolle (GALLOWAY & HOBDAY 1983) - vor allem dann, wenn sie durch jüngere Rinnensysteme anerodiert wurden oder durch Klüfte miteinander verbunden sind. In den Darstellungen sind auch die statistische Verteilung und die Geometrien berücksichtigt, die aus den Häufigkeiten und den Massen einphasiger Rinnen abgeleitet wurden (Kap. 3.5.2, Tab. 2 und Fig. 22).

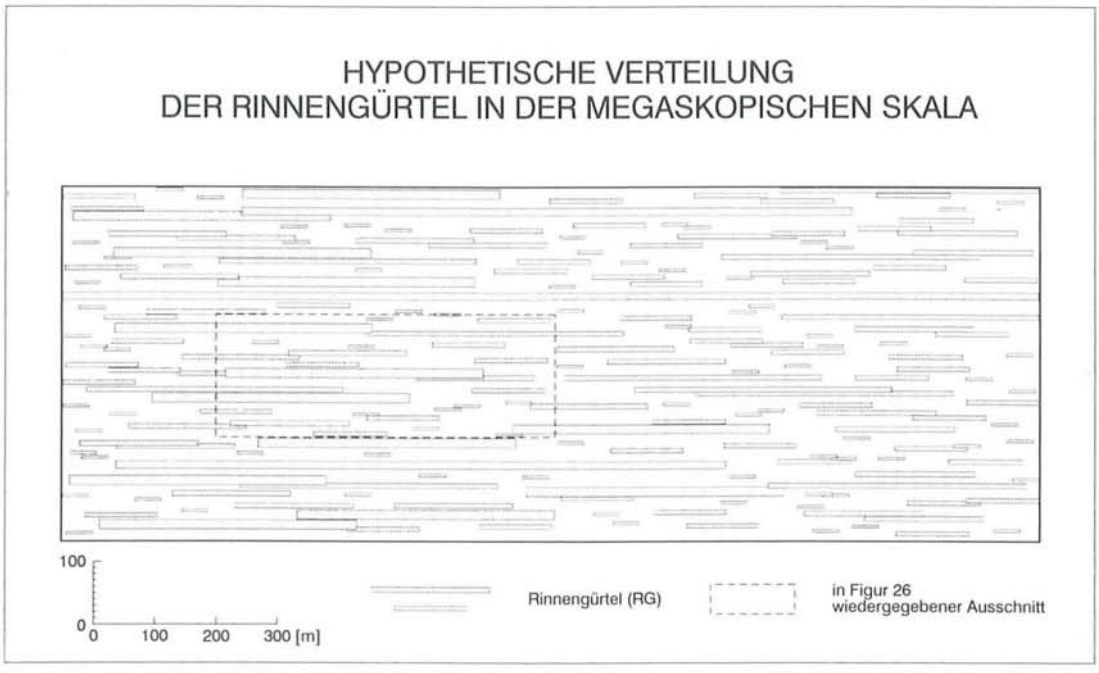


Fig. 25: Der Modellblock veranschaulicht eine hypothetische Verteilung der für die distale Untere Süsswassermolasse hergeleiteten Rinnengürtel.

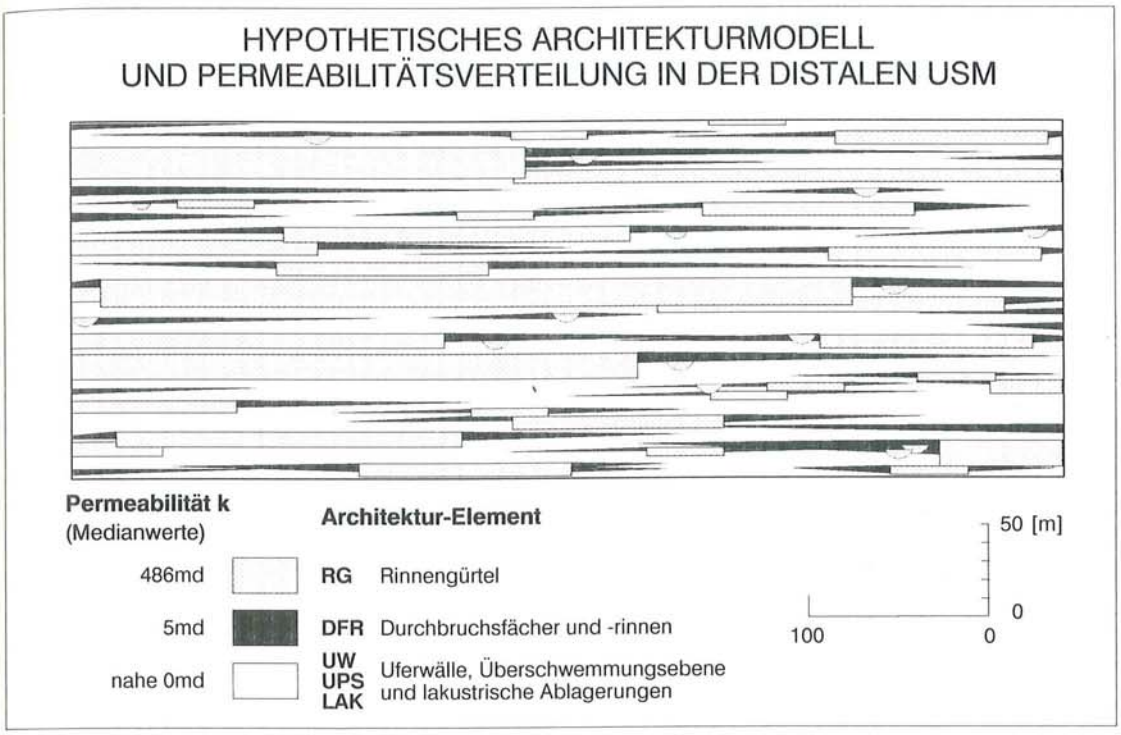


Fig. 26: Hypothetisches Architekturmodell und Permeabilitätsverteilung in der distalen Unteren Süsswassermolasse.

4 SEDIMENTPETROGRAPHIE

4.1 Einleitung

In den ersten drei Kapiteln wurden Faziestypen, Architektur-Elemente und deren Geometrie dargelegt. Im vierten und fünften Kapitel sollen diese Elemente mineralogisch, petrographisch und petrophysikalisch charakterisiert werden. Es gilt nach dem Meso- und Makrobereich den Mikrobereich zu analysieren und darzustellen. Der Lösung dieser Fragen diente ein differenziertes Laborprogramm, dessen Resultate beschrieben und diskutiert werden.

4.2 Laborprogramm und Methodik

Für die vorliegende Laborstudie standen Bohrkerne der drei Bohrungen (RB101, 102 und 103) der Region Langenthal (BE) zur Verfügung, denen 65 Proben für die vorgesehenen Analysen (Beilage 21) entnommen wurden. Pro Architektur-Element wurden mindestens drei verschiedene Sedimentations-Abfolgen beprobt, wobei die Sandsteine des Rinnengürtels (RG) und der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) wegen ihrer hydrologischen Bedeutung als potentielle Grundwasserleiter stärker berücksichtigt wurden. Die Proben wurden nicht regelmässig verteilt, sondern vielmehr gezielt an die Lithologie und die Sedimentstrukturen angepasst genommen. Leider konnte nicht jede gewünschte Stelle beprobt werden, da mehrere, besonders die grobkörnigsten Rinnensandstein-Abschnitte infolge der schlechten Zementation in dünne absandende Scheiben zerfallen waren. Zudem wurden jeweils die obersten Dekameter jeder Bohrung weggelassen, da diese während des Quartärs vermutlich im Grundwasserstrom bzw. dessen Einfluss auf die Zementation der Sandsteine, gelegen haben.

Die Analysen der Proben erfolgten auf zwei, z.T. auf drei Wegen:

- Mineralspezien und deren Gehalte, sowie Porosität und Permeabilität wurden mittels physikalischer und chemischer Labormethoden analysiert und gemessen.

- Die Petrographie - u.a. Porosität und Calcitzement-Gehalt - der Sandsteine wurde in einer quantitativen Dünnschliffauswertung eruiert.

- Sie konnte an einigen Beispielen auch mittels Computer-Bildanalyse auf dem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt werden, wo sich mit Hilfe einer Elementanalyse u.a. Komponenten, Zement, Poren und Porengrössenklassen bestimmen lassen.

Damit die durch verschiedene Methoden gewonnenen Resultate tatsächlich miteinander verglichen werden können, mussten die 10-15cm mächtigen Proben derart geteilt werden, dass die drei notwendigen Analysestücke - Zylinder für die Permeabilitätsmessung, Dünnschliff-Klötzchen und Mineralogieprobe - dicht nebeneinander liegen, um mögliche Effekte von

Heterogenitäten auszuschliessen. Trotzdem zeigen beispielsweise zwei Dünnschliffe desselben Klötzchens (U 95.15A), die nur eine Dünnschliffdicke hintereinander liegen, unterschiedliche Calcitzementierung. Die Ergebnisse werden nachfolgend getrennt nach den vier Architektur-Elementen aufgeführt.

Die Gehalte (Gewichts%) an Quarz, Albit, Kalifeldspat, Calcit und Dolomit (Beilage 10) wurden wie üblich mittels Röntgendiffraktometrie und Coulometrie bestimmt. Die Differenz zwischen der Summe dieser Gewichtsanteile und 100% entspricht dem Gehalt an Glimmer, Tonmineralien und Akzessorien. Dieser Restbestand stammt grösstenteils aus den Gesteinsbruchstücken und darf keinesfalls als Tonmatrix interpretiert werden. Letztere wird bei der quantitativen Dünnschliffanalyse ermittelt.

Die Anteile der verschiedenen Tonminerale in der Tonfraktion (<2µ) wurden ebenfalls röntgenographisch ermittelt. Diese Korngrössenfraktion wurde in Atterberg-Zylindern von den gemahlenen Gesteinsproben abgetrennt und in je drei Präparaten (luftgetrocknet, äthylenglycolisiert und bei 550°C gebrannt) geröntgt und ausgewertet. Ausführlichere Beschreibungen der verschiedenen Methoden sind den Geologie-Berichten der Bohrungen Böttstein (NTB 85-02) und Siblingen (NTB in Vorb.) zu entnehmen.

Die absolute Porosität (Beilage 11) wurde an den Permeabilitäts-Zylindern gemessen. Sie kann aus dem Gesamtvolumen - durch Bestimmung des Auftriebs in Luft und in Quecksilber - und dem pyknometrisch bestimmten Festvolumen errechnet werden. Die offene Porosität wurde im Dünnschliff durch Auszählen der mit blau eingefärbtem Epoxiharz gefüllten, d.h. kommunizierenden Poren ermittelt.

Die Permeabilitätswerte (Beilage 11) stammen von 2.5-3.5cm hohen und 3cm breiten, aus den Kernstücken herausgebohrten Zylindern, bei denen die Menge des durchströmenden Stickstoffs pro Zeiteinheit unter gegebenem Druck gemeisen wird. Die Messungen ergeben die spezifische Permeabilität k in Millidarcy (md), die in den Durchlässigkeitskoeffizienten K($msec^{-1}$) umgerechnet wird. Da die Permeabilität im allgemeinen richtungsabhängig ist, wurden sowohl waagrecht als auch senkrecht gebohrte Zylinder analysiert.

Bei der Dünnschliff-Herstellung wurden die rund 5mm dicken Gesteinsklötzchen vorerst gehärtet, d.h. unter Vakuum mit blau eingefärbtem Epoxiharz imprägniert. Dadurch wurde der kommunizierende Porenraum gefüllt.

Das quantitative Auszählen der Dünnschliffe dient der petrographischen Charakterisierung der Sandsteine, Siltsteine und Tone (Beilage 12); wobei die Zementierung und Porosität lokalisiert und beschrieben werden kann. Die quantitative Analyse erfolgte halbautomatisch mit einem SWIFT-Punktzähler. Mittels eines Schrittmotors, dessen Schrittlänge entsprechend der Korngrösse jeder Probe angepasst wird, wurden 300 Punkte verteilt auf 3 Linien über die gesamte Schliffläche analysiert. Daraus resultierten die in Beilage 12 aufgeführten Modalbestände, in Volumenprozent, denn bei diesem Verfahren werden die Raumanteile der einzelnen Komponentengruppen bestimmt. Das Auszählen ermöglicht

es auch, den Anteil der Tonmatrix vom gesamten Ton-Glimmer-Gehalt der Röntgenanalyse zu trennen. Figur 27 zeigt, dass der röntgenographisch bestimmte Tongehalt deutlich höher ist als der Tonmatrixanteil im Dünnschliff, denn bei der Röntgenanalyse werden auch Tonmineralien in umgewandelten Feldspäten und Gesteinsbruchstücken mitgezählt. Werden die coulometrisch und röntgenographisch gemessenen Gesamtkarbonatgehalte mit den aus den Dünnschliffen ermittelten Werte verglichen (Fig. 28), zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung. Ein Grund für die stets etwas höheren Auszählwerte liegt u.a. darin, dass die "Karbonatbruchstücke" oft nicht zu 100% aus Calcit bestehen.

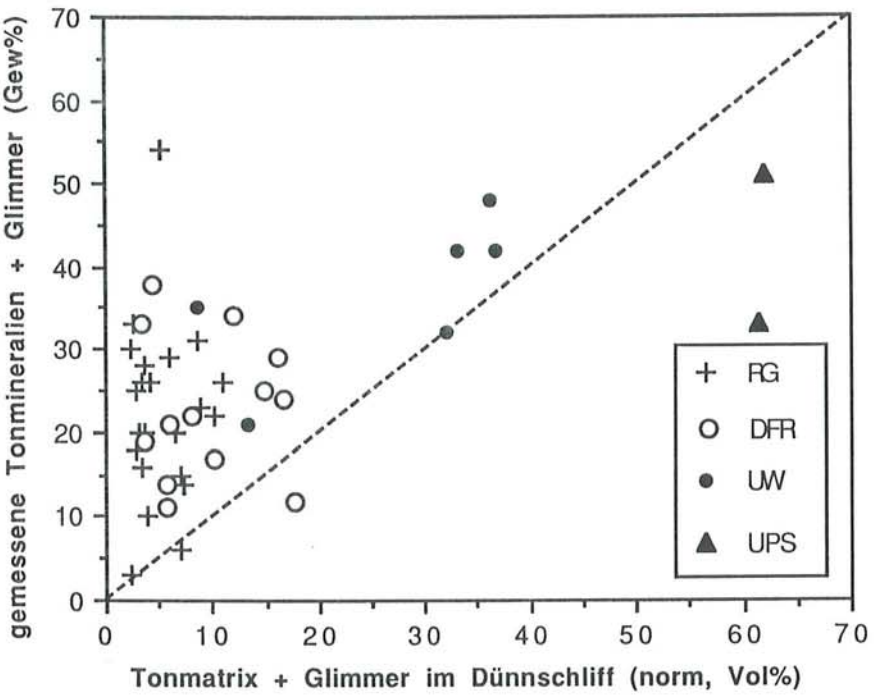


Fig. 27: Beziehung zwischen röntgenographisch ermitteltem Gesamtmineralgehalt (inkl. Tonmineralien in Gesteinbruchstücken) und Tonmatrix (inkl. Grobglimmer) im Dünnschliff für die verschiedenen Architektur-Elemente (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

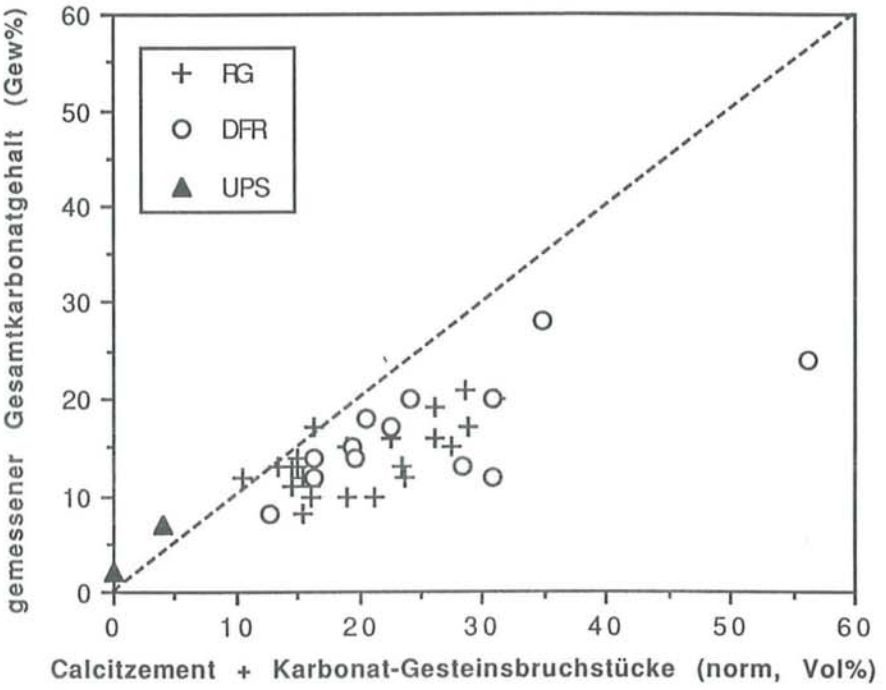


Fig. 28: Vergleich zwischen röntgenographisch und im Dünnschliff bestimmtem Gesamtkarbonatgehalt (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

Vergleiche mit Resultaten aus der Literatur sind, wenn die Methodik nicht genau bekannt ist, nicht oder nur bedingt zulässig.

In einem zusätzlichen Auszählverfahren wurden die Porositätstypen analysiert.Bei einem vertretbaren Arbeitsaufwand wurden in den Dünnschliffen, die mehr als 1% Porosität aufweisen, 100 Poren ausgezählt. In denjenigen mit geringerer Porosität wurden dagegen nur 20-50 Poren berücksichtigt.

Die mittlere Korngrösse (Beilage 12) und der Sortierungsgrad wurden visuell unter Zuhilfenahme von Vergleichsskalen (FÜCHTBAUER & MÜLLER, 1970) geschätzt.

In Figur 29 werden die Porositätswerte aus der Computer-Bildanalyse, aus dem Punktzählverfahren und aus den Laboranalysen einander gegenübergestellt. Leztere, d.h. die absoluten Porositäten korrelieren gut mit den Werten aus der Bildanalyse, denn die schliessen neben den offenen auch die geschlossenen Poren ein. Die Streuung resultiert aus der die Bildanalyse störenden z.T. ungenügenden Dünnschliff-Qualität. Der Vergleich der gemessenen absoluten Porosität mit der im Dünnschliff eruierten offenen Porosität ergibt eine umso bessere Übereinstimmung je grösser die Werte sind. Ist die absolute Porosität tiefer als 10% können im Dünnschliff praktisch keine Poren mehr festgestellt werden (Kap. 4.5).

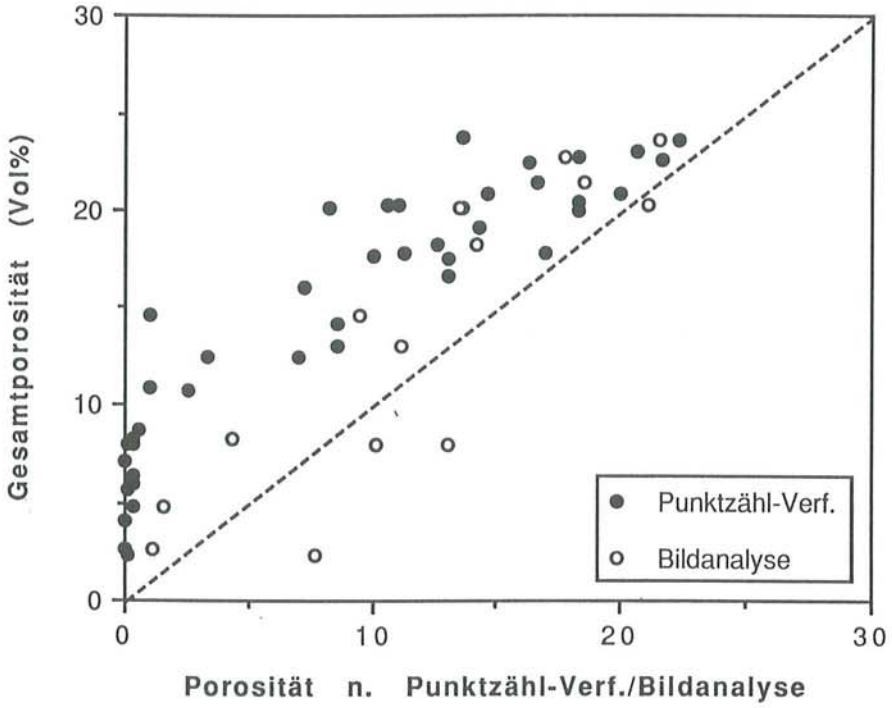


Fig. 29: Vergleich zwischen Gesamtporosität und im Dünnschliff resp. mittels Bildanalyse ermittelter Porosität.

4.3 Zusammensetzung und Textur

Die meisten untersuchten Proben waren Sandsteine, weniger häufig waren Siltsteine, tonige oder mergelige Siltsteine, siltige Tone und Mergel. Die Sandsteine stammen grösstenteils aus dem Rinnengürtel-Architektur-Element und dem Architektur-Element der Durchbruchsfächer und -rinnen, während die weniger zahlreichen feinkörnigen Proben dem Uferwall- und dem Überschwemmungsebenen-Architektur-Element entnommen worden sind.

Sandsteine

Aufgrund ihrer mineralogischen Zusammensetzung handelt es sich bei den Sandsteinen der distalen Unteren Süsswassermolasse um feldspatreiche Litharenite oder Litharenite (Fig. 30).

Deren Komponenten bestehen aus einem breiten Spektrum metamorpher, sedimentärer und magmatischer Gesteinsbruchstücke. Dazu gesellen sich Quarz, Albit, Kalifeldspat, Muskovit, Biotit und Chlorit. Tonminerale finden sich vorwiegend in der detritischen Matrix, in vielen Poren konnten zudem in geringen Mengen authigener Illit festgestellt werden. Ferner enthalten viele Feldspattrümmer ansehnliche Mengen von feinkristallinem Glimmer. Calcit ist das vorherrschende Zementmineral, dessen Gehalt jedoch sehr stark variiert, selbst zwischen zwei Dünnschliffen, die nur 3mm auseinander liegen, erscheint er einerseits nur

in Spuren oder andererseits zu mehr als 20%. Schwermineralien sind nur akzessorisch (<2%) vertreten.

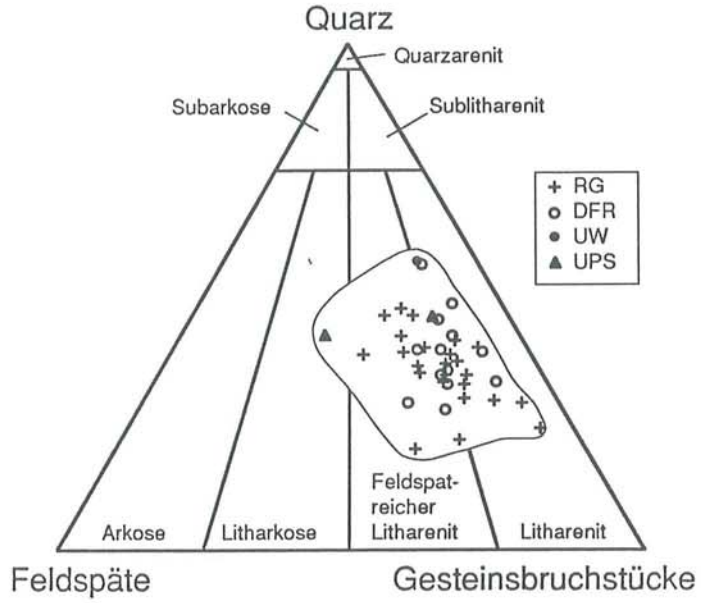


Fig. 30: Petrographische Zusammensetzung der Proben aus den verschiedenen Architektur-Elementen im Dreiecksdiagramm nach FOLK (1974) (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

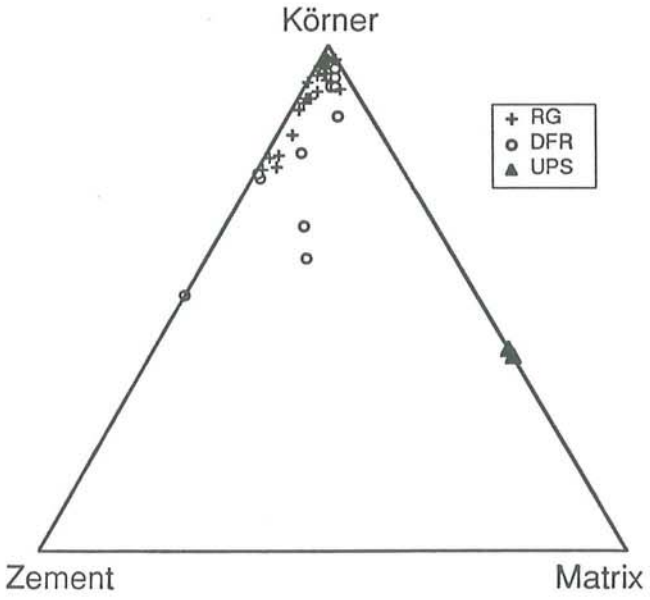


Fig. 31: Das Dreiecksdiagramm veranschaulicht den hohen Komponentenanteil in den verschiedenen Architektur-Elementen.

Aufgrund der Gesamtmineralogie-Analysen (Beilage 10) bestehen die Gesteine der Unteren Süsswassermolasse aus Quarz, Albit, Kalifeldspat, Calcit und Dolomit sowie Tonmineralien, Glimmer und Akzessorien. Während die durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung der Architektur-Elemente Rinnengürtel und Druchbruchsfächer nahezu identisch ist, unterscheiden sich die beiden andern Architektur-Elemente durch deutlich höhere Tongehalte (Fig. 32). Dies widerspiegelt die abnehmende Transportenergie der ablagernden Strömung.

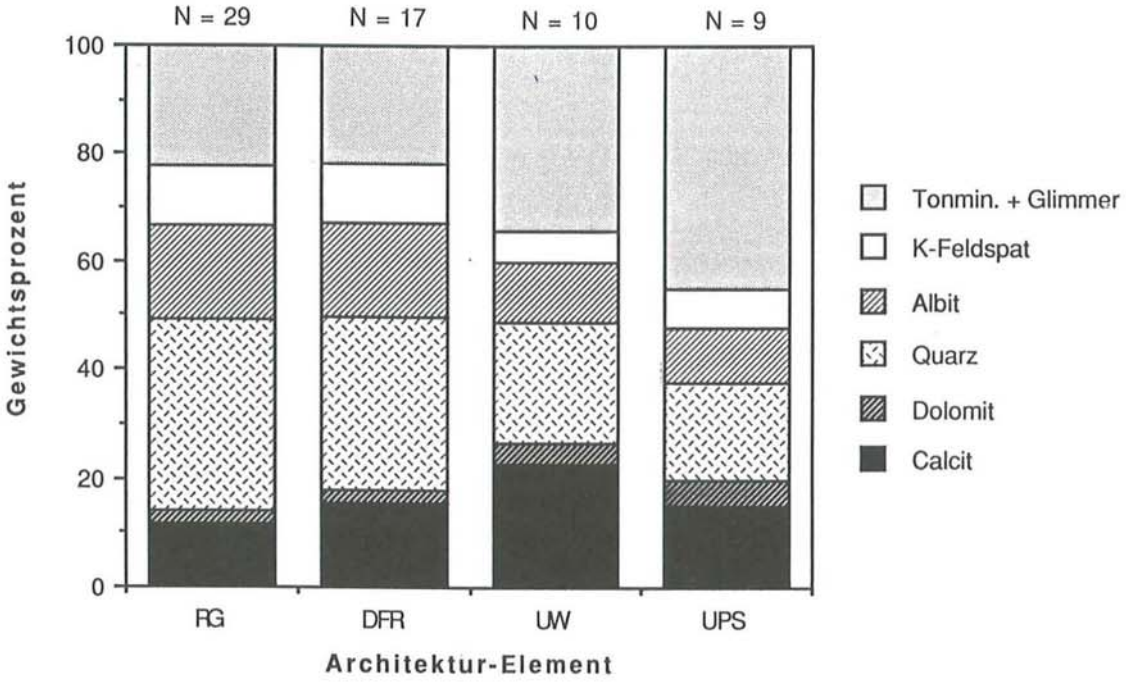


Fig. 32: Mittlere mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen Architektur-Elemente (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

Der Grossteil der Tonmineralien und Glimmer in den Sandsteinen der Rinnengürtel und der Durchbruchsfächer und -rinnen stammt jedoch von den Bruchstücken stark umgewandelter Gesteine und Feldspatkörnern. Dies dürfte der Grund sein für die relativ hohen Ton-Glimmer-Gehalte von Proben, die weder einen signifikanten detritischen noch einen authigenen Tongehalt aufweisen (Fig. 27).

Vor allem in den Sandsteinen der Rinnengürtel und der Durchbruchsfächer und -rinnen ist der Anteil der Tonmatrix sehr gering (Beilage 12 und Fig. 33), wogegen die Proben des Uferwalls und der Überschwemmungsebene deutlich toniger sind. Die tonmineralogische Zusammensetzung der Tonfraktion (aus Matrix und Gesteinsbruchstücken) ist in allen Proben der verschiedenen Architektur-Elemente praktisch gleich (Fig. 34). Einzig der lateritische Boden 52.30m (RB 103) weist einen erhöhten Smectit-Gehalt auf (Beilage 14). Die andern Bodentypen weisen entgegen den Erwartungen keine solche Erhöhung auf.

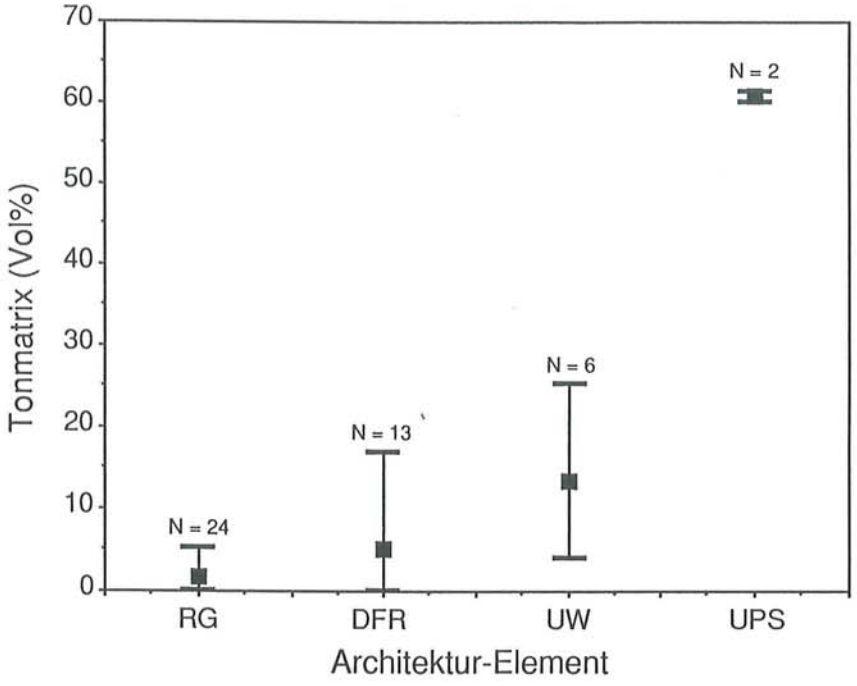


Fig. 33: Abhängigkeit des Tonmatrix-Anteils von den verschiedenen Architektur-Elementen (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

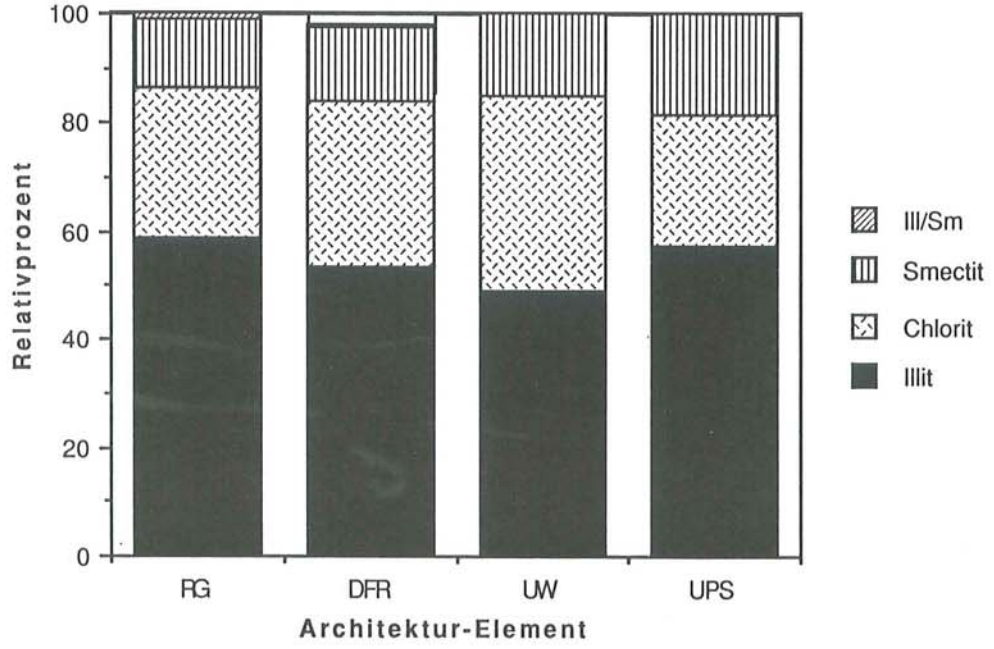


Fig. 34: Tonmineralogische Zusammensetzung (Fraktion <2µ) der verschiedenen Architektur-Elemente (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

Korngrösse und Sortierung: Die Rinnengürtel-Proben sind überwiegend mittelkörnige (0.251-0.425mm), seltener fein- oder grobkörnige Sandsteine. Dagegen sind Grobsandsteine in natürlichen Aufschlüssen durchaus nicht aussergewöhnlich. Unter den Proben der Durchbruchsfächer und -rinnen sind einige mittelkörnige, überwiegend jedoch feinkörnige (0.063-0.251mm) Sandsteine. Bei beiden Gruppen sind die Sandsteine vorwiegend mittel, selten gut oder schlecht sortiert (Beilage 12). Die untersuchten Uferwall-Gesteine sind hauptsächlich tonige Grobsiltsteine und die Proben der Überschwemmungsebene tonige Feinsandsteine; die alle dementsprechend schlecht bis sehr schlecht sortiert sind.

Schwermineralien

An 15 Proben - überwiegend Feinsandsteine aus Durchbruchsfächern - wurde das Schwermineral-Spektrum ermittelt. Sie weisen in der Bohrung RB101 vor allem Epidot und stark variierende Granat-Gehalte auf (Beilage 15), wogegen in der stratigraphisch höhere Schichten der oberen bunten Molasse erfassenden Bohrung RB103 zwischen Proben mit dem genannten Spektrum auch solche mit überwiegend Apatit (neben Granat) auftreten. Diese Vergesellschaftung ermöglicht jedoch, verglichen mit der Region Langenthal (MAURER et al., 1982), wo das "Chatt" durch hohe Apatitgehalte und das "Aquitan" durch die Vormachtstellung des Epidots gekennzeichnet sind, leider keine genaue Einstufung.

Pyrit

In einigen der Sandstein- und Grobsiltproben können Pyritkristalle festgestellt werden. Besonders aufgefallen sind sie im Kernstück RB 101: 96.2-98.2m durch zahlreiche 1mm grosse limonitische Rostflecken, die jeweils im Zentrum Pyrit aufweisen. Dass Pyrit an der Basis von Sandsteinkörpern, am Kontakt zu den liegenden tonigen Schichten auftritt, kann auch in Aufschlüssen beobachtet werden. Der Pyrit bildet Nester von mikroskopisch kleinen, 4-10µ grossen Kristallen, von 20 µ Himbeerpyriten sowie bis 0.2mm grosse Aggregate. Die Kristalle befinden sich einerseits im Porenraum, andererseits in Rissen von Quarzkörnern und Gesteinsbruchstücken sowie entlang Kristallgrenzen in karbonatischen Gesteinsbruchstücken.

Siltsteine, Mergel und Tone

Diese Lithotypen dominieren die Gesteine des Uferwalls und der Überschwemmungsebene. Sie bestehen generell aus variablen Gemischen siltgrosser Quarz-, Feldspat- und Gesteinsbruchstücken sowie aus Calcitzement und Tonmineralien. Viele der Uferwall-Proben zeichnen sich zudem durch relativ hohe Gehalte (z.T. >20%) an detritischem Glimmer aus (Fig. 36 und Beilage 16, Fig. B). Die Gesamtmineralogie ist ähnlich wie diejenige der Sandsteine, doch ist der Tonmineral- und Glimmergehalt deutlich höher (Fig. 32).

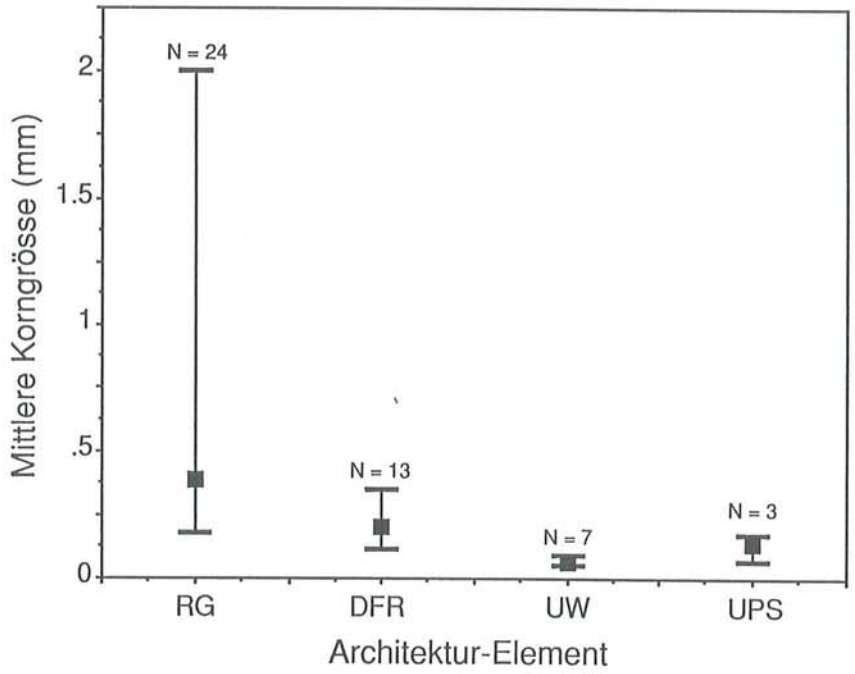


Fig. 35: Abhängigkeit der mittleren Korngrösse von den verschiedenen Architektur-Elementen (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

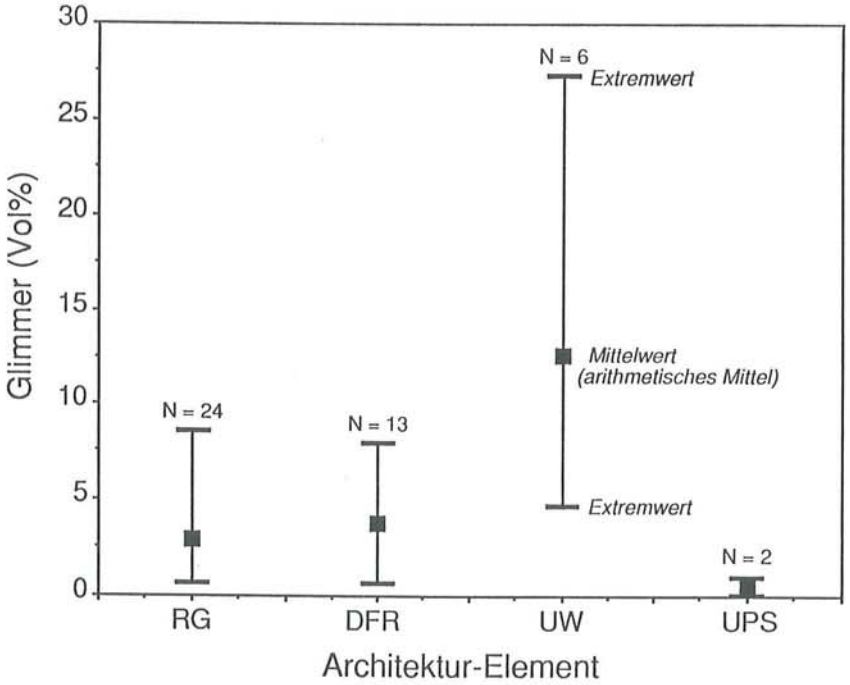


Fig. 36: Glimmergehalt der verschiedenen Architektur-Elemente (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

4.4 Diagenese

Die untersuchten Sandsteine sind in verschiedenem Ausmass verfestigt, bzw. zementiert. Sie variieren vom locker gebundenen Gestein, wo die Körner schon bei geringer Berührung ausbrechen, bis zum kompakten Fels. Für diese Unterschiede allein verantwortlich ist der Calcitzement, dessen Gehalt sehr variabel ist (Beilage 12). Andere Verfestigungsarten, wie beispielsweise Drucklösung oder Zementation durch Quarz oder authigenen Ton etc. sind unbedeutend. Dies ist das Ergebnis einer geringen diagenetischen Überprägung und relativ einfacher Diagenesegeschichte mit Kompaktion und Zementation durch Calcit, möglicherweise gefolgt durch Lösung des Calcites (was noch abzuklären ist), sowie einer weiteren Lösungsphase, der Feldspäte und teilweise Gesteinsbruchstücke zum Opfer fielen.

Calcit-Zement und Matrix

Calcit erscheint als intergranulärer, porenfüllender Zement (Beilage 17, Fig. A; Beilage 18, Fig. A und B), und zwar als sparitische Calcitkristalle in den Rinnengürtel-Sandsteinen, und sowohl als Sparit wie auch als Mikrit in den Proben der Durchbruchsfächer und -rinnen sowie des Uferwalls. In den Gesteinen der Überschwemmungsebene liegt vor allem Mikrit vor, doch ist Sparit in grossen Poren und in Klüften präsent. Stellenweise hat Calcit in geringem Mass Feldspatkörner und Gesteinsbruchstücke ersetzt.

Authigene Tonmineralien

Im Porenraum zwischen den detritischen Komponenten hat sich stellenweise illitischer Ton neugebildet (= authigener Ton). Die Illitfasern bilden Brücken zwischen einzelnen Sandkörnern (Beilage 18, Fig. C), sind jedoch auch in Rissen von Körnern (Beilage 18, Fig. D) gewachsen. Eine exakte mineralogische Zusammensetzung dieses illitischen Tonminerals konnte nicht bestimmt werden, da es unmöglich war ein reines Präparat für eine Röntgenanalyse herzustellen.

Kompaktion

Einige Mineralkörner und Gesteinsbruchstücke weisen kleine Risse auf, die während der diagenetischen Kompaktion entstanden sind. Sie sind oft mit dem authigenen Ton gefüllt (Beilage 18, Fig. D). Da die mit Calcit zementierten und die unzementierten Bereiche dieselbe Minus-Zement-Porosität (=Volumenanteil von Porosität und Zement) aufweisen, kann nach der calcitischen Zementation keine signifikante Kompaktion mehr stattgefunden haben.

Lösungsporosität

Die meisten Proben enthalten in der Menge ihrer detritischen Komponenten eine Anzahl Feldspatkörner und Gesteinsbruchstücke, die teil-

weise bis beinahe vollständig gelöst sind (Beilage 16). Innerhalb der calcitisch zementierten Bereiche finden sich Komponenten mit Lösungsporen jedoch nur gegen den Rand zu.

Diagenese-Abfolge

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

- Die durch Kompaktion entstandenen Risse in den detritischen Komponenten enthalten z.T. authigenen Ton, d.h. die Kompaktion war vor der Tonmineral-Entstehung.

- Das Fehlen von authigenem Ton auf Calcitkristallflächen des Zements zeigt, dass der Ton vor der Calcitzementierung gewachsen sein muss.

- Calcitzement füllt den ehemaligen intergranulären Porenraum, tritt jedoch niemals in den Lösungsporen innerhalb der Komponenten auf. Demzufolge erfolgte die Lösung von Komponenten unter Bildung intragranulärer Porosität nach der Calcitzementation. Entsprechend liessen sich im Innern zementierter Bereiche des Dünschliffs, abgesehen von der Randzone auch keine Lösungsporen feststellen.

- Die hohe intergranuläre Porosität vieler Proben, hätte auch durch Zementlösung entstanden sein können. Jedoch ist kein Beweis vorhanden, der dies belegen würde. In der Tat zeigen die Calcitkristalle bei rasterelektronenmikroskopischer Untersuchung glatte Oberflächen und keinerlei Lösungsanzeichen.

- Demzufolge ist die in vielen Proben vorhandene beträchtliche intergranuläre Porosität eine echte primäre Porosität.

4.5 Porosität und Permeabilität

Die Genese der Poren wurde bereits vorangehend diskutiert, wogegen hier Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität, Calcitzement, Tonmatrix, Kornsortierung und -grösse sowie Unterschiede zwischen den Architektur-Elementen behandelt werden.

Die an den Probenzylindern gemessene absolute Porosität beinhaltet die Gesamtheit aller Poren, d.h. sowohl kommunizierende als auch abgeschlossene Poren (=absolute Porosität, Gesamtporosität). Bei der quantitativen Dünnschliff-Auswertung werden nur die mit blau eingefärbtem Epoxiharz gefüllten Poren gezählt, also solche die miteinander in Verbindung stehen (offene oder effektive Porosität). Dementsprechend sind die absoluten Porositäten stets höher als die ausgezählte offene Porosität (Beilagen 7, 8 und 9).

Sinkt die Gesamtporosität unter 10%, werden in den Dünnschliffen kaum mehr Poren festgestellt (Fig. 29, 37). Bei hohen Porositäten über 20% weisen dagegen Gesamtporosität und effektive Porosität nahezu identi-

sche Werte auf, d.h. der ganze Porenraum ist frei zugänglich und diese Proben weisen deshalb auch hohe Permeabilitäten auf (s. unten).

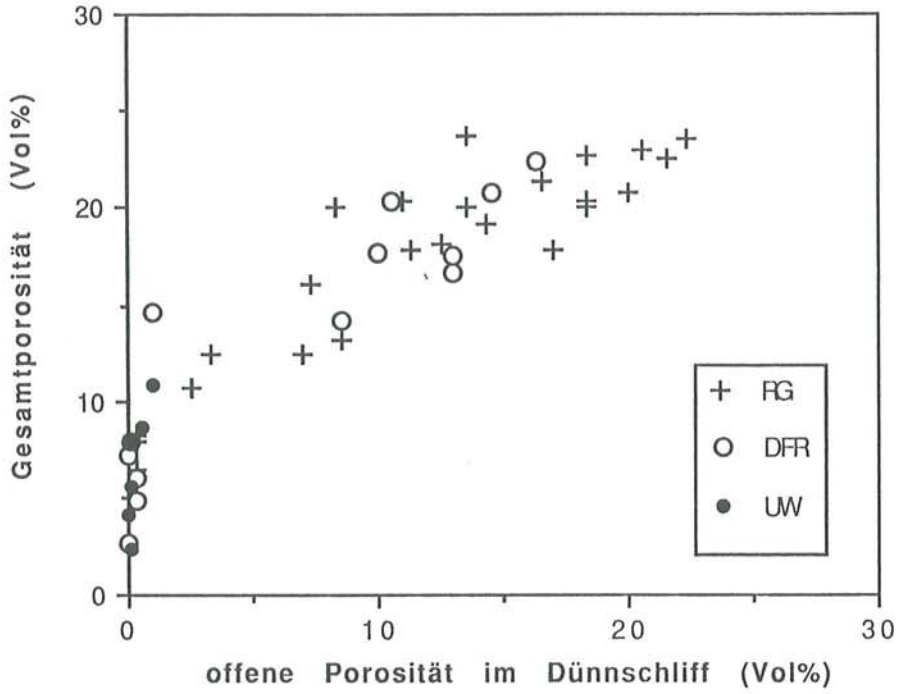


Fig. 37: Vergleich von Gesamtporosität und offener Porosität (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

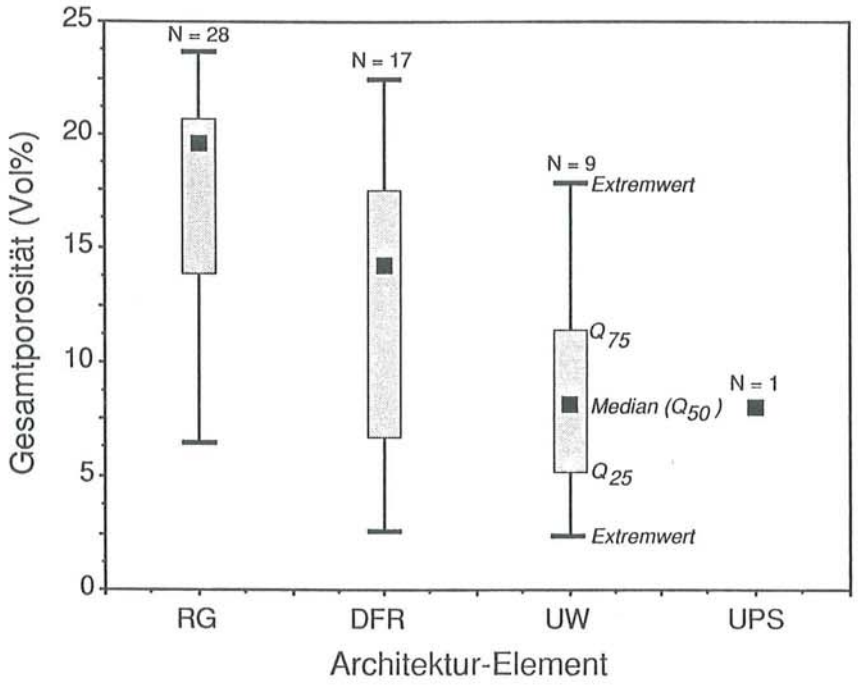


Fig. 38: Abhängigkeit der durchschnittlichen Gesamtporosität (Medianwert) vom Architektur-Element (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

Ein Vergleich der durchschnittlichen Porosität der vier Architektur-Elemente zeigt deutliche Unterschiede (Fig. 40). Die Rinnengürtel-Sandsteine weisen durchschnittlich 17.5%, die Sandsteine der Durchbruchsfächer und -rinnen 12.4% und die Uferwall-Sedimente lediglich 8.7% absolute Porosität auf.

Bei den Porositäts- und Permeabilitäts-Figuren, bzw. Beilagen werden wegen der nicht-lognormalen Verteilung der Werte die Medianwerte und nicht arithmetische Mittel aufgeführt. Der Medianwert wird im Gegensatz zum arithmetischen Mittel von Extremwerten nicht beeinflusst.

Die Summe der durchschnittlichen Porosität und des Calcitzements (= Minus-Zement-Porosität) ergibt für die Rinnengürtel- und die Durchbruchsfächer und -rinnen-Sandsteine annähernd gleiche Werte (Fig.39). Daraus kann geschlossen werden, dass die Sandsteine beider Gruppen vor der Zementation ähnlich hohe Porositäten aufwiesen.

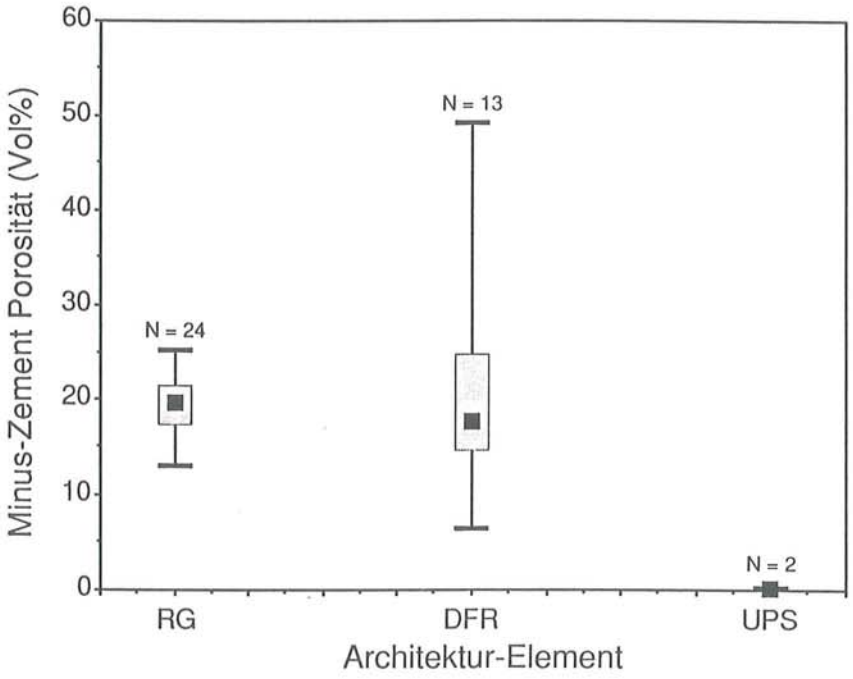


Fig. 39: Vergleich der Minus-Zementporosität in den Sandsteinen des Rinnengürtels (RG), der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) sowie der Überschwemmungsebene (UPS) (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

Porosität - Calcitzement und Tonmatrix

Die offene und die absolute Porosität der untersuchten Sandsteine hangen klar und eindeutig vom Ausmass der calcitischen Zementation ab; je mehr Calcitzement, desto geringer die Porosität. Enthält eine Probe mehr als 10% Calcitzement (im Dünnschliff festgestellt), beträgt die offene Porosität weniger als 10% (Fig. 40 und Beilage 13). Ebenso wird die Porosität von der Tonmatrix beeinflusst: Wenn die Tonmatrix mehr als 5Vol% einnimmt (Fig. 41 und Beilage 12), sinkt die offene Porosität, unabhängig vom Calcitzement, unter 10%.

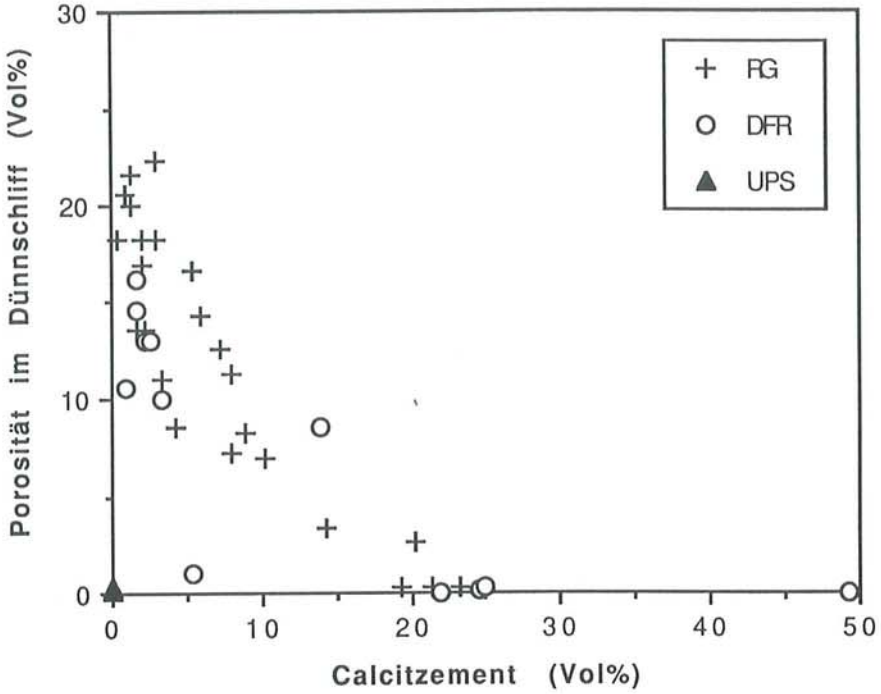


Fig. 40. Abhängigkeit der offenen Porosität vom Gehalt an Calcitzement (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

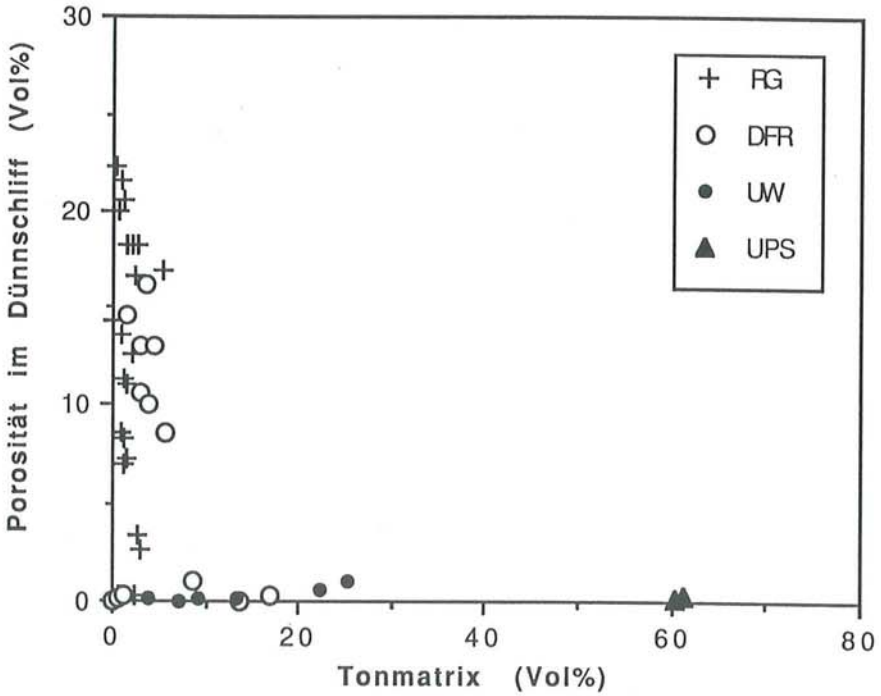


Fig. 41: Abhängigkeit der offenen Porosität von Tonmatrix-Anteil (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

Zur Charakterisierung der Porosität war es notwendig, die Poren in den Dünnschliffen auszuzählen und zu typisieren. Folgende Porentypen können unterschieden werden (Beilage 13):

- intergranuläre Poren (=Poren zwischen den Komponenten = Zwickelporen)
- Kluftporen (Beilage 16, Fig. C)
- intragranuläre Poren (=Poren in den Körnern)
  - Risse in Körnern (Beilage 18, Fig. D)
  - Lösungsporen in Feldspäten (Beilage 19, Fig. B)
  - Lösungsporen in Lithoklasten (Beilage 19, Fig. A)
  - Poren in aufgespaltenen Glimmern
  - Mikroporen in Feldspäten (Beilage 19, Fig. C)
  - Mikroporen in Lithoklasten
  - Mikroporen in Ton

In den Rinnengürtel- und Durchbruchsfächer und -rinnen-Sandsteinen überwiegen eindeutig die intergranulären Poren (Fig. 42), somit hängt die Porosität wie bereits ausgeführt hauptsächlich vom Grad der Calcit-Zementation des primären Porenraumes ab.

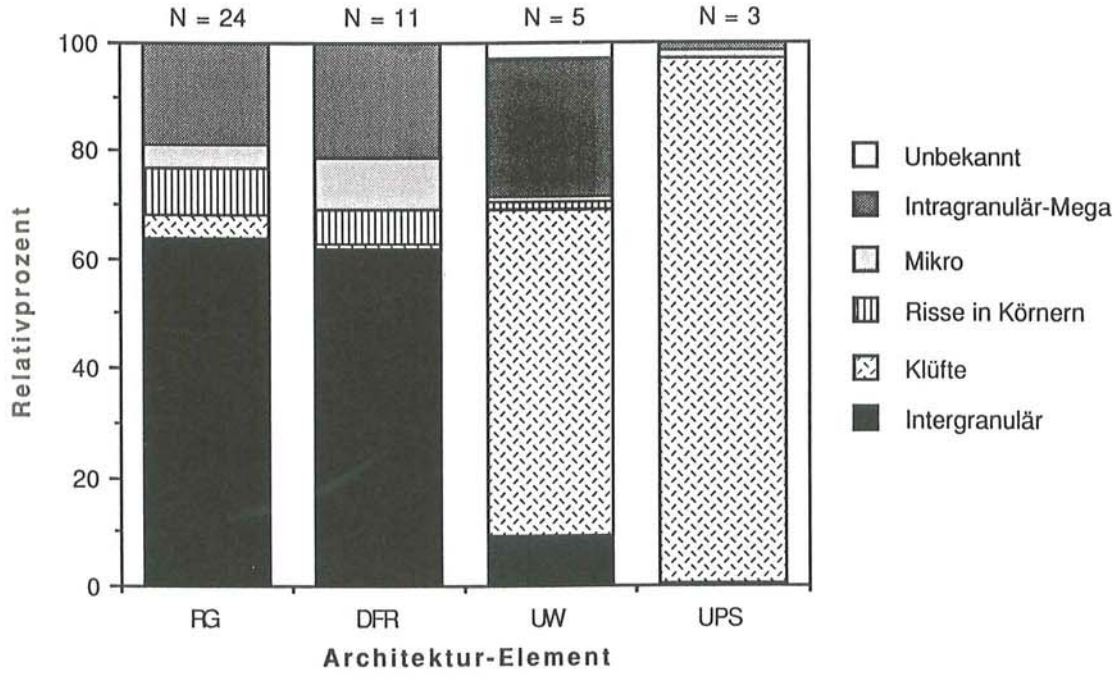


Fig. 42: Histogramm der relativen Häufigkeit der verschiedenen Porentypen in den Architektur-Elementen (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

Es existieren jedoch auch Sandsteine der Rinnengürtel und der Durchbruchsfächer und -rinnen, in denen intragranuläre Porosität vorherrscht, wobei die Lösungsporen - etwa je zur Hälfte in Feldspäten, bzw. in Gesteinsbruchstücken (Beilage 13) - über die Kornrisse dominieren. Dagegen sind in den Proben des Uferwalls und der Überschwemmungsebene grösstenteils haarrissfömige Klüfte die Ursache der Porosität.

Aufgrund der Abhängigkeit der gemessenen absoluten sowie der offenen Porositäten (Beilage 13) vom Ausmass der Zementierung können deutlich drei Gruppen unterschieden werden (Tab. 4). Dabei lässt sich auch ein Wechsel von überwiegend intra- zu intergranulären Poren von der geringporösen zur mittleren Gruppe feststellen:

Absolute Porosität	< 10%	10-18.5%	>18.5%
Offene Porosität	0.1-0.3%	1-13%	8.3-22%
Calcit-Zement	19-25%	2.3-20.3%	0.3-9%
Art der Zementierung im DS	±vollständig	gut zementierte wechseln mit porösen Bereichen	±offener Porenraum
% der inter-/intragranulären Porositätstypen	30:70 - 2:98	60:40 - 85:15	75:25-88:12

Tab. 4: Gliederung der Sandsteine des Rinnengürtels und der Durchbruchsfächer und -rinnen aufgrund der Porosität und des Zementgehaltes.

Wenn die absolute Porosität kleiner als 10% ist, überwiegt die intragranuläre Porosität und der Porenraum ist mehr oder weniger vollständig calcitgefüllt. Wird die absolute Porosität dagegen grösser als 10%, überwiegt die intergranuläre Porosität, und der Porenraum wird fleckenhaft zementiert, zementierte wechseln mit zementfreien Bereichen. Die fleckenhafte Zementation zeigt sich auch im Makrobereich, wo im Aufschluss zementierte, kalkige Sandsteinknauer in losem Sand auftreten.

Permeabilität

Die an den Probenzylindern gemessenen Permeabilitäten der Rinnengürtel-Sandsteine variieren zwischen <0.01 und 1766md, diejenigen der Sandsteine der Durchbruchsfächer und -rinnen von <0.01-389md, und bei den Uferwall-Gesteinen wies nur eine Probe eine messbare Permeabilität von 9md (Beilage 11) auf. Im Durchschnitt zeigen die Rinnengürtel-Proben eine 100 mal grössere Permeabilität als die Proben der Durchbruchsfächer und -rinnen (Fig. 45).

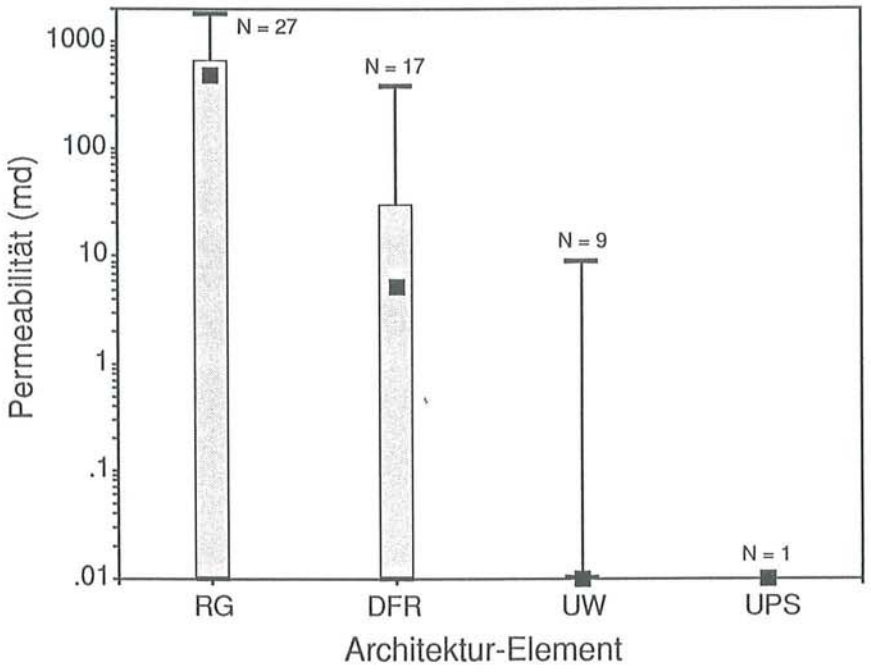


Fig. 43: Durchschnittliche Permeabilität in den vier Architektur-Elementen (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

Die Abhängigkeit der Permeabilität von der Porosität wird aus Figur 44 ersichtlich. Ist die absolute Porosität grösser als 10%, besteht bei den Durchbruchsfächer- und -rinnen-Sandsteinen eine klare lineare Beziehung: zunehmende Porosität hat eine höhere Permeabilität zur Folge. Dasselbe zeigt sich auch bei den Rinnengürtel-Sandsteinen, jedoch eindeutig erst oberhalb von rund 20% Porosität, darunter, zwischen 10 und 20%, können Proben mit sehr ähnlicher Porosität sehr unterschiedliche Permeabilitäten aufweisen. Bei diesen bewirkt die fleckenhafte Zementation trotz relativ hoher Porosität eine geringere Permeabilität. Keine messbare Permeabilität wiesen die Rinnengürtel- und Durchbruchsfächer- und -rinnen-Proben auf, deren Porosität weniger als 10% beträgt, da in diesen Fällen die Poren grösstenteils in den Körnern sitzen (s. vorn). Im weiteren geht aus Figur 45 hervor, dass Sandsteine der Durchbruchsfächer und -rinnen gegenüber den Rinnengürtel-Sandsteinen bei gleicher Porosität geringere Durchlässigkeiten besitzen, was wahrscheinlich auf den etwas höheren Tonmatrix-Anteil zurückzuführen ist.

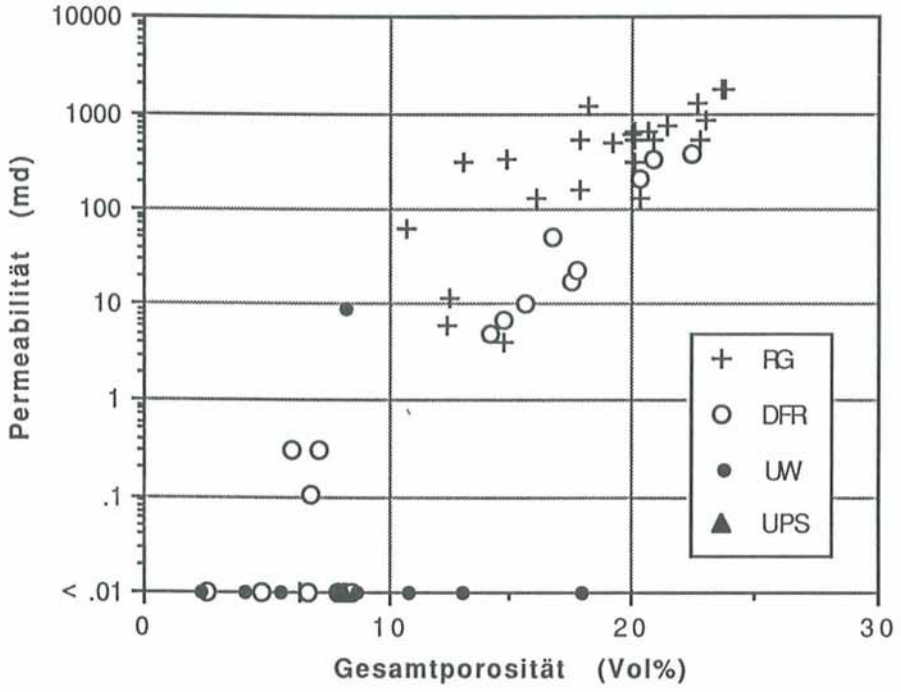


Fig. 44: Permeabilitäts-Porositäts-Diagramm (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

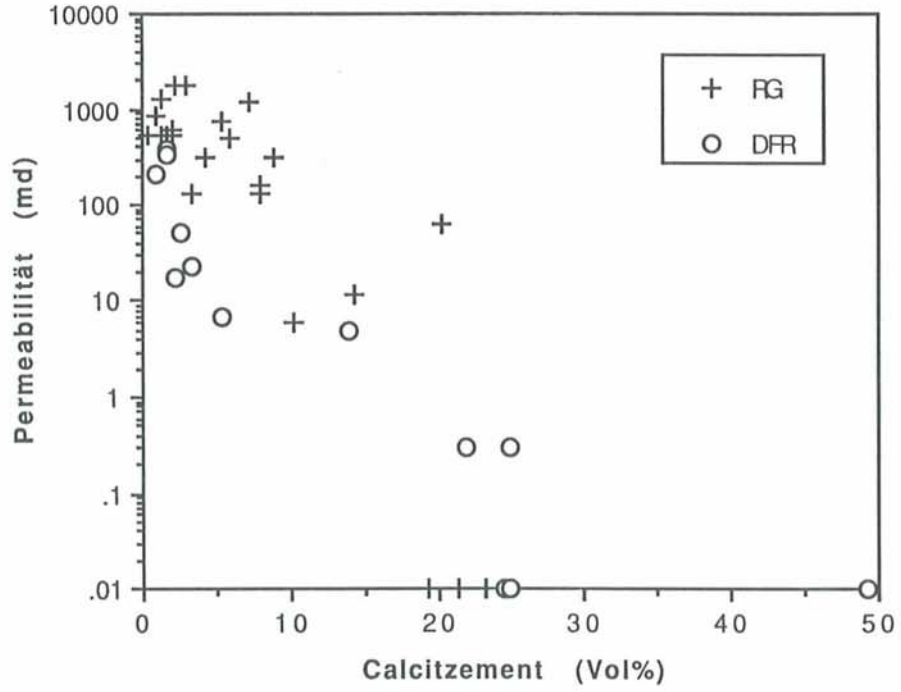


Fig. 45: Abhängigkeit der Permeabilität vom Calcitzement (Abkürzungen vgl. Fig. 13).

Dass Porosität und Permeabilität von der Sedimentationsart eindeutig beeinflusst werden, kann aus Figur 46 abgelesen werden, wo sich die Rinnengürtel-Sandsteine entsprechend der Sedimentstrukturen gruppieren.

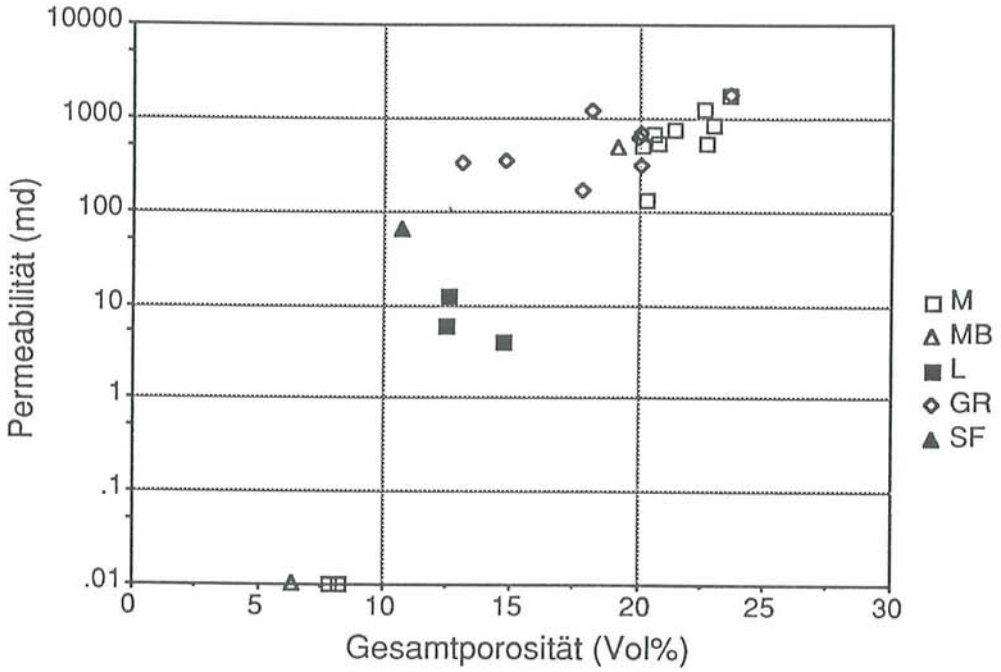


Fig. 46: Permeabilität und Gesamtporosität der Rinnengürtel-Sandsteine in Abhängigkeit der Sedimentstrukturen (M = massig, bzw. strukturlos, MB = massige Basislage, L = Transcurrent-Lamination, GR = Grossrippelschichtung, SF = Sohlenpflaster).

Im weiteren sollen nun die eben aufgezeigten Beziehungen innerhalb und zwischen den Architektur-Elementen von der Porosität, Permeabilität, Zementation und Gesteinszusammensetzung auf die einzelnen Sedimentationsabfolgen angewandt werden. Dabei muss den Heterogenitäten im Mikrobereich genügend Beachtung geschenkt werden, wie VAN DE GRAAF & EALEY (1989) am Beispiel eines Nordsee Ölfeldes darlegten: In einer fluvio-deltaischen Sequenz, wo grobkönige Rinnenfüllungen, in feinkörnigeren Sedimenten eingeschnitten sind, zeigen sich sowohl im Makrobereich innerhalb einer Rinne verschieden durchlässige Horizonte als auch im Mikrobereich der rippelstrukturierten Horizonte wechselt die Permeabilität von Laminae zu Laminae. Die Permeabilitätswerte entsprechen unseren Werten aus der Unteren Süsswassermolasse.

5 MINERALOGISCHE UND PETROPHYSIKALISCHE CHARAKTERISIERUNG DER ARCHITEKTUR-ELEMENTE DER USM

Das folgende Zitat von VAN DE GRAAFF & EALEY (1989) sei gewissermassen als Leitsatz der Diskussion und Interpretation der Ergebnisse vorangestellt:

> "The most important parameter to be defined by the reservoir geologist is the permeability HETEROGENEITY in the reservoir. Reservoir connectedness, presence and distribution of internal permeability baffles, vertical profiles of permeability, areal permeability trends, and variation of vertical permeability all have to be determined."

Für diese Studie sind nicht nur die durchschnittlichen Werte, sondern ebenso der Bereich der möglichen Werte, und beispielsweise die räumliche Verteilung von Porosität und Permeabilität wichtig, denn nicht die Mittelwerte bestimmen die effektive hydraulische Leitfähigkeit eines Sandsteinkörpers sondern das Neben- und Uebereinander verschiedenster Werte.

5.1 Rinnengürtel

Die untersuchten Proben stammen aus drei verschiedenen Sedimentationsabfolgen, nämlich aus einer 4m mächtigen einphasigen Rinnenfüllung (RB102: 57.8-61.8m), einer ebensolchen 5.3m mächtigen (RB 101: 67.4-72.4m) und einem 9.7m mächtigen, komplex zusammengesetzten Rinnenkörper (RB101: 88.5-98.2m) (Beilagen 7, 8 und 9). Die Proben sind vorwiegend mittelkörnige, seltener fein- oder grobkörnige Sandsteine; diejenigen der geringmächtigsten Sequenz sind unstrukturiert, die andern weisen zum Teil Schrägschichtungsblätter von Grossrippeln oder Transcurrentlamination auf.

Mineralogische Zusammensetzung

Die Sandsteine zeigen folgende mittlere Zusammensetzung (arithmetische Mittel) und Extremwerte:

Mineralogische Zusammensetzung	Mittelwert Gew% n = 29	Extremwerte Gew%
Quarz	35	14 / 55
Albit	18	5 / 25
Kalifeldspat	11	4 / 17
Calcit	12	6 / 18
Dolomit	2	1 / 4
Tonmineralien, Glimmer und Akzessorien	22	3 / 54
C_{org}	0.1	0 / 0.7

Tab. 5: Mineralogische Zusammensetzung der Rinnengürtel-Sandsteine; Röntgen- und Coulomat-Analysen.

Die starke Variation der Mineralgehalte der Sandsteine hängt weniger von der Korngrösse und dem Ablagerungsgefüge ab, als vielmehr vom Spektrum verschiedenster Gesteinsbruchstücke (Beilage 12). Zusammen mit den Feldspäten lässt deren hoher Anteil, die Sandsteine petrographisch vorwiegend ins Feld der feldspatreichen Litharenite (Fig. 28) rücken. Calcitzement variiert von 0.3-23.3 Vol% (Beilage 12). Das Ausmass der Calcitzementierung bestimmt in den Rinnengürtel-Sandsteinen praktisch allein das Porenvolumen und die Durchlässigkeit. Der Tonmatrix-Anteil ist mit 0-3.0 Vol% gering. Dabei lässt sich in den einzelnen Rinnensequenzen keine Tonzunahme gegen oben feststellen, wie eigentlich vom Ablagerungsmechanismus her erwartet werden könnte.

Porosität und Permeabilität

Die drei untersuchten Abfolgen von Rinnen sind durch einen heterogenen lithologischen Aufbau gekennzeichnet (Beilage 7, 8 und 9) und weisen demzufolge stark wechselnde Porositäten und Permeabilitäten auf.

	Median Q_{50} n = 28	Quartilwerte Q_{25}	Q_{75}	Extremwerte
Gesteinsdichte gcm^{-3}	2.13	2.09	2.26	2.04 / 2.48
Korndichte gcm^{-3}	2.65	2.64	2.66	2.62 / 2.72
Gesamtporosität %	19.6	13.9	20.7	6.4 / 23.7
Permeabilität md n=27	486	79	664	0 / 1766

Tab. 6: Porosität und Permeabilität der Rinnengürtel-Sandsteine

Die drei Rinnensandstein-Abfolgen zeigen die folgenden unterschiedlichen Permeabilitätsprofile:

- RB 101: 67.4-72.7m stellt eine einphasige Rinnenfüllung aus vorwiegend strukturlosen, z.T. schräggeschichteten Mittelsandsteinen dar, die an der Basis und oben gut zementiert sind. Infolge der guten Zementation weisen die zwei obersten Proben relativ geringe Porosität und keine Permeabilität auf (Beilagen 7 und 11). Im mittleren Abschnitt konnte wegen der absandenden und in dünne Scheiben zerfallenden Kerne nur bei einer Probe die Porosität gemessen werden. Die absolute Porosität beträgt bei einem geringen Calcitzementgehalt von nur 3Vol% insgesamt 20.4% und die offene Porosität 18%. Von der Lithologie her kann für den ganzen mittleren Abschnitt auf eine beachtliche Permeabilität geschlossen werden. Von den zwei untersten, derselben massigen Basisschicht entnommenen Sandsteinen (72.56 A und B), ist der obere, obschon feinkörniger, recht durchlässig (486md), dagegen der nur 8cm tiefer gelegene impermeabel.

- RB 101: 88.5-98.2m stellt eine komplex aufgebaute Rinnenfüllung aus gestapelten Sandsteinbänken mit Grossrippel-Schichtung und Transcurrent-Lamination dar. Den Sedimentgefügen entsprechend variabel sind die Porositäten und die Durchlässigkeiten: sehr poröse, gut bis sehr gut (1170md) durchlässige Bereiche werden von schwach porösen, gering durchlässigen Bereichen (4md) unterbrochen. Diese kaum durchlässigen Bereiche lassen sich durch einen Wechsel im Sedimentationsgefüge erklären. Die transcurrentlaminierten Sandsteine sind feinkörnig und besser zementiert als die hangenden und liegenden strukturlosen, bzw. grossrippelstrukturierten Mittelsandsteine. Bei den mittelkörnigen Sandsteinen variieren die Werte entsprechend dem Ausmass der Porosität und des Calcitzements. Generell zeigt der Rinnenkörper sowohl in den Feinsandsteinen wie auch in den Mittelsandsteinen gegen oben eine Permeabilitätszunahme (Beilage 7).

- RB 102: 57.8-61.8m besteht aus einer einfachen Rinnenfüllung, die aus strukturlosen und schräggeschichteten, groben Mittelsandsteinen zusammengesetzt ist. Die mit Ausnahme der untersten Probe schlecht zementierten Sandsteine zeigen hohe bis sehr hohe Permeabilität (63 - 1766md). Dabei weist der Rinnensandkörper im mittleren Teil die höchsten Porositäten und Permeabilitäten auf, gegen oben und unten ist eine Abnahme festzustellen (Beilage 8). Die geringe Durchlässigkeit des Basissandsteins beruht auf dessen guter Zementation und seines Matrixgehaltes.

Generell zeigen die drei Abfolgen - da sie nicht von klassischen, mäandrierenden Rinnen stammen - gegen oben keine Permeabilitätsabnahme, wie sie beispielsweise von VAN DE GRAFF & EALEY (1989) beschrieben wird. Diese Autoren stellten in fluviatilen Rinnenprofilen eine Abnahme von 2500md (Basis) auf 250md in der Mitte und im Top fest.

Zusammenfassend können die Sandsteine des Rinnengürtels folgendermassen charakterisiert werden:

- überwiegend mittelkörnige Sandsteine;
- mit sehr geringer Tonmatrix (0-3.0 Vol.%), und
- variablem Calcitzementanteil von praktisch zementfrei bis vollständig zementiert, und
- dementsprechend variabler offener und absoluter Porosität und Permeabilität.
- Die intergranuläre Porosität ist eine primäre Porosität d.h. der primäre Porenraum wurde nur durch Kompaktion und dem heute vorhandenen Zement verringert.
- Beträgt die absolute Porosität weniger als 10%, so ist sie überwiegend als sekundäre Lösungsporosität in den Komponenten zu finden.
- Bei Porositäten über 20% werden Permeabilitäten bis 1766md gemessen.
- Die geringmächtigste einphasige Rinnenfüllung weist die höchsten Permeabilitätswerte auf.
- Die zweitmächtigste, ebenfalls einphasige Rinne besitzt im Dach und an der Basis undurchlässige Sandsteine.
- Die mächtigste, komplex zusammengesetzte Rinnenfüllung weist neben meist schlecht zementierten, durchlässigen auch sehr gering permeable Horizonte auf.

5.2 Durchbruchsfächer und -rinnen

Von Uferdurchbrüchen stammende Sandsteine der Überschwemmungsebene treten in den Bohrkernen vor allem als rund 1m mächtige, flächenhafte Sedimentkörper, oder als einzelne mächtigere, aufeinandergestapelte Schichten und selten als dazugehörige kleinere Rinnen auf. Acht der untersuchten Proben stammen aus einem 7m mächtigen, komplexen, aus mehreren Schichtfluten zusammengesetzten Körper (RB 101: 76-83m). Sechs Proben wurden 4 verschiedenen, im allgemeinen 1-2m mächtigen, planaren Sandsteinbänke (Beilagen 7, 8 und 9) und drei einer geringmächtigen Durchbruchsrinne (RB 102: 83.90-88.80m) entnommen. Zusätzliche Proben dieser Rinne zerfielen wegen ihrer schwachen Zementation. Die Proben sind überwiegend feinkörnige, selten mittelkörnige Sandsteine, die oft aus strukturlosen Abschnitten, ohne sichtbare Ablagerungsgefüge, oder selten aus solchen mit Grossrippelschichtung stammen. Die Sandkörper lagern im Kernprofil stets zwischen Ton- und Mergelbänken, manche andern Durchbruchsfächer- und -rinnen-Sandsteine liegen direkt über Rinnengürtel- oder auch Uferwall-Sandsteinen.

Mineralogische Zusammensetzung

Die mineralogische Zusammensetzung der Sandsteine variiert von Durchbruchsrinnen und -fächern wie diejenigen der Rinnengürtel beträchtlich (Tab. 7):

Mineralogische Zusammensetzung	Mittelwert Gew% n = 17	Extremwerte Gew%
Quarz	32	26 / 40
Albit	17	10 / 30
Kalifeldspat	11	7 / 22
Calcit	15	6 / 26
Dolomit	2	0 / 3
Tonmineralien, Glimmer und Akzessorien	22	0 / 34
C_{org}	0.1	0 / 0.3

Tab. 7: Mineralogische Zusammensetzung der Durchbruchsfächer- und -rinnen-Sandsteine (Röntgen- und Coulomat-Analysen).

Die Durchbruchsfächer- und -rinnen-Sandsteine gehören aufgrund ihrer petrographischen Zusammensetzung zu den Lithareniten (Fig. 28). Sie können sehr schlecht oder sehr gut zementiert sein, der Calcitzement-Gehalt beträgt entsprechend den Dünnschliff-Analysen zwischen 1.0 und 25.0 bzw. 49.3 Vol%, wobei im letzten Wert infolge des im Dünnschliff untrennbaren feinkristallinen Calcit-Zement-Tonmatrix-Gemisches auch der Ton enthalten ist (Beilage 12). Ansonsten nimmt die Tonmatrix 0.6-17.0 Vol% ein und ist damit bei den meisten Proben deutlich höher als bei den Rinnengürtel-Sandsteinen.

Porosität und Permeabilität

Die Sandsteine der Durchbruchsfächer und -rinnen sind im Durchschnitt deutlich weniger porös als diejenigen des Rinnengürtels. Dies, obschon beinahe ebenso hohe Werte gemessen wurden, die jedoch durch entsprechend häufige tiefere Werte mehr als egalisiert werden (Tab. 8).

	Median Q_{50} n = 17	Quartilwerte Q_{25}	Q_{75}	Extremwerte
Gesteinsdichte gcm^{-3}	2.29	2.2	2.48	2.05 / 2.60
Korndichte gcm^{-3}	2.66	2.66	2.68	2.61 / 2.71
Gesamtporosität %	14.2	6.78	17.55	2.6 / 22.4
Permeabilität md	5	0	30.5	0 / 389

Tab. 8: Porosität und Permeabilität der Durchbruchsfächer und -rinnen-Sandsteine.

Von den acht Proben des 7m mächtigen Sandsteinkörpers aus gestapelten Durchbruchsfächern weisen vier, nämlich die zuoberst und an der Basis, eine relativ geringe absolute Porosität (2.6-6.8%) und keine oder nur eine sehr geringe Permeabilität auf. Die Proben des mittleren Abschnitts zeigen bei absoluten Porositäten von 14.7-20.8% und offenen Porositäten von 11-15% (Beilage 13) Permeabilitäten von 7-330md (Beilage 11) auf. Verglichen mit den Sandsteinkörpern des Rinnengürtels verhält sich dieser komplexe Durchbruchsfächer ähnlich wie der Rinnenkörper RB 102: 57.8-61.8m mit der grössten Durchlässigkeit im mittleren Abschnitt, jedoch mit viel geringeren Werten infolge des höheren Matrix-Gehaltes und der besseren Zementation der feinkörnigen Sandsteine. Die Probe RB 101: 104.42m stammt ebenfalls aus einem zusammengesetzten Komplex, weist dementsprechend und zusätzlich verstärkt durch seine Mittelkörnigkeit höhere Porositäts- und Permeabilitätswerte als die Mittelwerte auf.

Die verschiedenen Einzelbänke weisen absolute Porositäten zwischen 6.0 und 14.2% auf, die jedoch nur geringe oder keine messbare Permeabilität zur Folge haben (Beilage 11). Die Proben der Durchbruchsrinne RB 102: 83.90-88.80m weisen trotz relativ hohen offenen Porositäten (9-13%) und Gesamtporositäten von 14.2-17.7% geringe Durchlässigkeiten (10-23md) auf. Die Gründe dafür liegen im erhöhten Matrixgehalt und in den kleinen Porengrössen, die ungefähr 0.1mm im Gegensatz zu 1mm bei den Rinnensandsteinen beträgt.

Zusammenfassend können die Sandsteine der Durchbruchsfächer und -rinnen wie folgt gekennzeichnet werden:

- Sie sind überwiegend feinkörnig.
- Der Calcitzement- und der Tonmatrix-Gehalt sind variabel, jedoch grösser als bei Rinnengürtel-Sandsteinen.
- Die Porosität ist sehr variabel und z.T. recht hoch.

- Die Permeabilität der Sandsteine ist variabel, jedoch im Einzelnen meistens und im Durchschnitt viel geringer als in den Rinnengürtel-Mittelsandsteinen. Dies wegen der kleineren Poren und der grösseren Zement- und Matrixanteile.

Der höhere Tonmatrixgehalt beruht primär auf dem Ablagerungsmechanismus, d.h. auf der raschen und gleichzeitigen Ablagerung der Boden- und Suspensionsfracht. Sekundär konnte Ton auch durch Bodenbildungsprozesse in die einzelnen auf der Schwemmebene liegenden Sandschichten eindringen; bei länger andauernder Pedogenese können auf diese Weise undurchlässige Sandsteinbänke entstehen.

5.3 Uferwall und distale Überschwemmungssandsteine

Aus fünf verschiedenen Abfolgen von Uferwall- und distalen Überschwemmungsebenen-Ablagerungen wurden 10 Proben, überwiegend tonige oder mergelige Grobsiltsteine, selten Feinsandsteine, untersucht. Alle zeigen Kleinrippelschichtungen teilweise mit Kletterrippeln und Entwässerungsstrukturen (Beilage 7, 8 und 9). Die stets geringmächtigen Sequenzen (<0.8m) sind in tonig-mergelige Ablagerungen eingeschaltet, lagern aber auch an der Basis oder am Dach von Fein-, bzw. Mittelsandsteinen.

Mineralogische Zusammensetzung

In der mineralogischen Zusammensetzung haben Quarz- und Feldspat-Gehalt im Vergleich mit den Fein- und Mittelsandsteinen abgenommen. Dagegen setzten die Glimmermineralien (Tab. 9), wie auch Calcitzement und -mikrit, sowie die Tonmatrix deutlich zu.

Mineralogische Zusammensetzung	Mittelwert Gew% n = 10	Extremwerte Gew%
Quarz	22	14 / 29
Albit	11	7 / 20
Kalifeldspat	6	2 / 14
Calcit	23	14 / 47
Dolomit	4	1 / 8
Tonmineralien, Glimmer und Akzessorien	34	15 / 48
C_{org}	0.1	0 / 0.4

Tab. 9: Mineralogische Zusammensetzung der Uferwall-Proben.

Porosität und Permeabilität

Die höheren Zement- und Matrixanteile vermindern natürlich das Porenvolumen, wobei neben der intragranulären Porosität bei einzelnen Proben auch der primäre intergranuläre Porenraum nicht restlos gefüllt

wurde. Mit Ausnahme einer Probe konnten mit der vorhandenen Apparatur jedoch keine Durchlässigkeiten festgestellt werden.

	Median Q_{50} n = 9	Quartilwerte Q_{25}	Q_{75}	Extrem-werte
Gesteinsdichte gcm^{-3}	2.46	2.37	2.55	2.20 / 2.60
Korndichte gcm^{-3}	2.68	2.67	2.69	2.64 / 2.70
Gesamtporosität %	8.2	5.22	11.38	2.3 / 17.9
Permeabilität md	0	0	0	0 / 9

Tab. 10: Porosität und Permeabilität der Uferwall-Proben.

Zusammenfassend weisen die Uferwall- und distalen Überschwemmungssedimente folgende Kennzeichen auf:

- Es sind überwiegend Grobsiltsteine mit Kleinrippelschichtung.
- Ihre Gehalte an Tonmatrix, Calcitzement und -mikrit sind variabel, meist jedoch relativ hoch.
- Sie weisen stets einen hohen Glimmeranteil auf.
- Ihre Porosität variiert, ist aber überwiegend niedrig; der eine hohe Wert (17.9%) kann nicht interpretiert werden.
- Nur eine von neun Proben wies eine messbare Permeabilität (9md) auf.

5.4 Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen

In der Überschwemmungsebene verzahnen sich fein- und feinstkörnige Ablagerungen, die verschiedenste diagenetische Entwicklungen, wie pedogenetische Prozesse ober- oder unterhalb des Grundwasserspiegels durchlaufen haben (vgl. Kap. 3.3.4). Beprobt wurden rote, bunte und schwarze Tone, Mergel und siltige Gesteine, sowie Feinsand- und Siltsteine aus den Durchbruchsfächern und -rinnen sowie dem Uferwall, die jedoch Wurzelspuren, Karbonatknollen und Kennzeichen von Paläoböden enthalten. So vielfältig wie die Lithologie ist die zugehörige mineralogische Zusammensetzung (Beilage 10). Quarz- und Feldspat-Gehalt sind im Mittel deutlich niederiger als in den Gesteinen der Rinnengürtel und der Durchbruchsfächer und -rinnen (Tab. 11), dementsprechend höher fallen die Tonmatrix- und Calcitgehalte aus. Die hohen Calcitgehalte beruhen meist auf einer diagenetischen Anreicherung im Bodenprofil - entweder diffus verteilt oder in Form von Calicheknollen. Die Tonmatrix der Sandsteine ist primär aus der Suspension horizontweise abgelagert und danach durch Pedoturbation mit der gesamten Sandsteinbank vermischt worden.

Mineralogische Zusammensetzung	Mittelwert Gew% n = 9	Extrem-werte Gew%
Quarz	18	9 / 29
Albit	10	4 / 19
Kalifeldspat	7	3 / 20
Calcit	15	1 / 42
Dolomit	5	1 / 14
Tonmineralien, Glimmer und Akzessorien	45	31 / 57
C_{org}	0.1	0 / 0.2

Tab. 11: Mineralogische Zusammensetzung der Proben der Überschwemmungsebene.

Porosität und Permeabilität konnten leider nur an einer Probe gemessen werden, da alle andern infolge Rissbildung in den tonigen Proben zerfielen. Sie dürften jedoch wegen ihrer Zusammensetzung entsprechend der gemessenen Probe keine grosse Permeabilität aufweisen. Nicht auszuschliessen ist eine Durchlässigkeit entlang von beobachteten Rissen, die aber im Labor nicht gemessen werden kann.

Zusammenfassung:
Beziehung Architektur-Element - Mineralogie/Petrophysik

- Die Sandkörper der Rinnengürtel (RG) sind texturiell und strukturell heterogen zusammengesetzt. Sie enthalten aufgrund ihrer Sedimentationsart nur 1-3Vol% Tonmatrix. Entsprechend des heterogenen Rinnenaufbaus weisen die überwiegend mittelkörnigen Sandsteine variable absolute (6.4-23.7Vol%) und offene (1-22Vol%) Porositäten sowie unterschiedliche Permeabilitäten (0-1766md) auf. Ihre Werte ändern innerhalb der Rinnenkörper im cm-Bereich; im Durchschnitt beträgt die Gesamtporosität 19.6%, die bei diesem Ausmass beinahe vollständig kommunizierend ist und eine durchschnittliche Permeabilität von 486md zur Folge hat. Die Porosität ist grösstenteils eine primäre, intergranuläre Porosität und wird einzig durch das Ausmass der Calcitzementation bestimmt. Diese hängt z.T. von der Korngrösse ab - das Feinsandstein-Intervall ist besser zementiert - bei den Mittelsandsteinen aber mindestens teilweise von deren Sortierung - die gut sortierten sind meist schlechter zementiert. Die Mächtigkeit der Rinnenkörper hat anscheinend keinen Einfluss auf die Zementation, die beiden geringmächtigen, einphasigen Körper sind sehr verschieden stark zementiert.

- Die mehrphasigen mächtigen Sandsteinbänke der Durchbruchsfächer (DFR) weisen, wie auch die zugehörige geringmächtige Rinnenfüllung, ebenfalls eine heterogene texturielle und strukturelle Zusammensetzung auf. Hingegen sind die einzelnen geringmächtigen planaren

Sandsteinbänke homogener aufgebaut. An den Sandbänken der Rinnengürtel unterscheiden sie sich durch ihre Feinkörnigkeit, ihren höheren Tonmatrix-Gehalt (-17Vol%) und deshalb eine allgemein schlechtere Sortierung. Das hat zur Folge, dass die Sandsteine, trotz z.T. hohen Gesamtporositäten (2.6-22.4Vol%) im Durchschnitt eine deutlich geringere offene Porosität (8.6Vol% gegenüber 13.1Vol%) und sehr viel tiefere Permeabilität (5md gegenüber 486md) als die Rinnensandsteinkörper aufweisen. Die höheren Werte stammen von den mächtigeren, zusammengesetzten Bänken.

- Die Uferwall-Ablagerungen bestehen aus tonigen oder mergelige Grobsilt- und Feinsandsteinen, mit Kleinrippelschichtung. Aufgrund dieser feinkörnigen und tonigen Ausbildung weisen sie im Durchschnitt eine absolute Porosität von 8.2Vol%, nur die Spur einer offenen Porosität und, abgesehen von einer Ausnahme, keine Permeabilität auf.

- Die Sedimente der Überschwemmungsebene sind sowohl strukturell wie texturiell sehr vielfältig ausgebildet. Jedoch führen sie ablagerungs- und diagenesebedingt reichlich Tonmatrix und/oder Karbonat. Deshalb weisen diese Gesteine, bei einer geringen Porosität entlang von beispielsweise Trockenrissen, Wurzelspuren, Wühlgefügen, keine messbare Permeabilität auf.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

In der vorliegenden Studie wird die Untere Süsswassermolasse (USM) im zentralen und östlichen Mittelland erstmals aufgrund ihres hierarchischen Aufbaus charakterisiert. Basierend auf einer detaillierten Faziesanalyse können in diesen kontinentalen Ablagerungen verschiedene Faziestypen ausgeschieden werden, die gut abgrenzbare Faziesgemeinschaften bilden. Da diese Faziesgemeinschaften jeweils spezifische Grössenordnungen (Makrobereich: ca $n \cdot 10^0$-10^1m) und Geometrien besitzen, werden sie als Architektur-Elemente bezeichnet (Fig. 47). Der Gesteinskörper der distalen USM lässt sich demnach im wesentlichen durch ein baukastenartiges Zusammenfügen folgender fünf Architektur-Elemente darstellen: RG Rinnengürtel, DFR Durchbruchsfächer und -rinnen, UW Uferwälle und distale Überschwemmungssande, UPS Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen sowie LAK lakustrische Ablagerungen. Die zugehörigen Geometrien, Lithologien, Korngrössen und sedimentologischen Charakteristika sind in Figur 47 zusammenfassend dargestellt. Durch diese detaillierte Beschreibung sind die verschiedenen Architektur-Elemente auch am Bohrkern identifizierbar, wie dies für die Bohrungen Langenthal und Weiach demonstriert wurde.

Damit sich die technischen Eigenschaften der distalen Unteren Süsswassermolasse modellieren lassen, wurden die petrographischen und petrophysikalischen Eigenschaften ihrer Bausteine bis in den Mikrobereich (ca. $<10^{-1}$m) untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Architektur-Elemente an sich einen heterogenen Aufbau besitzen, der einerseits auf primäre sedimentologische Unterschiede (v.a. hydrodynamische Sortierung), andererseits auf diagenetische Veränderungen (v.a. differentielle Zementation) zurückgeführt werden kann (Fig. 47).

Die Gesteine aller Architektur-Elemente zeichnen sich durch hohe Komponentenanteile aus, wobei die Sandsteine als feldspatreiche Litharenite klassifiziert werden können. Erwartungsgemäss ist der Tonmatrixgehalt der im energiereichen Milieu abgelagerten arenitischen Architektur-Elemente RG (Rinnengürtel) und DFR (Durchbruchsfächer und -rinnen) viel geringer als in den sie umgebenden Architektur-Elemen-ten niederenergetischer Ablagerungsräume. Der gleichwohl hohe Gesamttongehalt der arenitischen Architektur-Elemente Rinnengürtel und Durchbruchsfächer und -rinnen findet jedoch in den grossen Tonmineral- und Glimmeranteilen der Gesteinsbruchstücke eine Erklärung.

Die Diagenese der distalen Unteren Süsswassermolasse ist relativ einfach und erfolgte im wesentlichen durch die Kompaktion und eine calcitische Zementation. Die mitunter beträchtliche intergranuläre Porosität - vorab in den Architektur-Elementen Rinnengürtel (RG) und Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) - ist die Folge einer nicht vollständigen Zementation, die aber ausreichte, um eine weitere Kompaktion zu verhindern. Für die verschiedenen Architektur-Elemente konnten jeweils charakteristische Porositäten und Permeabilitäten (Fig. 47) ermittelt werden, wobei die starke Heterogenität in deren Verteilung hervor gehoben sei.

Aufgrund der faziellen petrographischen und petrophysikalischen Eigenschaften lassen sich die Architektur-Elemente in ein arenitisches Ge-Gerüst aus Rinnengürteln mit den angrenzenden Durchbruchsfächer und -rinnen (Architektur-Elemente RG und DFR) und die sie umgebende tonig-siltige Matrix der Überschwemmungsebene (UW, UPS und LAK) gruppieren. Während das Sandsteingerüst der distalen Unteren Süsswassermolasse Medianwerte der offenen Porosität von 13.1% in den Rinnengürteln und 8.6% in den Durchbruchsfächer und -rinnen, sowie Permeabilitäts-Medianwerte von 486md, bzw. 5md aufweist, ist an den Proben der Matrix kaum mehr eine offene Porosität oder messbare Permeabilität feststellbar.

Für die grossräumige Prognose von Fliesswegen kommt der räumlichen Aus-dehnung in den Verbindungen des Gerüsts der Rinnengürtel eine übergeordnete Bedeutung zu. Die sedimentologische Analyse führt zum Schluss, dass es sich bei den Paläoflüssen der distalen Unteren Süsswassermolasse um sinusfömige bis mäandierende Mischfrachtrinnen handelt. Dabei gilt es zu unterscheiden zwischen Ablagerungen von suspensionsfrachtreichen und solchen von bodenfrachtreichen Mischfrachtrinnen. Die in der distalen Unteren Süsswassermolasse vorherrschenden Rinnengürtel bodenfrachtreicher Flüsse sind generell viel breiter (ca. 150-1500m) und kontinuierlicher als diejenigen suspensionsfrachtreicher Flüsse (Breite ca. 40-100m). Zudem sind sie oft amalgamiert und stehen auch häufiger miteinander in erosivem Kontakt.

Zusammenfassend können wir für das Hauptentwässerungssystem der distalen Unteren Süsswassermolasse im zentralen und östlichen Mittelland von Mischfracht-Paläorinnen mit komplexen, wulstartigen Rinnengürteln ausgehen. Zum Liefergebiet der Alpen im Süden hin, aber auch gegen Westen zu, ist mit einem steigenden Bodenfrachtanteil und folglich mit einer allmählichen Zunahme der Breite, der Kontinuität und der Verbundenheit ("Interconnectedness") der Rinnengürtel zu rechnen.

Demgebenüber kann flussabwärts, gegen Osten zu, eine stetige Abnahme der Bodenfracht und eine Zunahme der Suspensionsfracht erwartet werden, woher hier die Sandsteine der Rinnengürtel immer stärker gegliedert werden und anfänglich Schnürsenkelsande, dann nur noch Aneinanderreihungen von Sandlinsen bilden. Gesamthaft dürften auch die primären Porositäten und Permeabilitäten gegen den Nordrand des Molassebeckens und gegen Osten hin generell abnehmen, wobei aber die grossräumigen Unterschiede der Diagenese und der Tektonisierung einen beträchtlichen sekundären Einfluss ausüben.

Fig. 47: Übersicht der Eigenschaften der verschiedenen Architektur-Elemente in der distalen Unteren Süsswassermolasse (Abkürzungen für Korngrössen: t Ton, si Silt, fs Feinsand, ms Mittelsand, crs Grobsand).

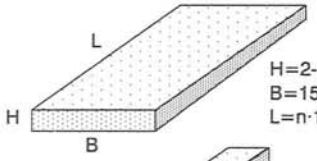
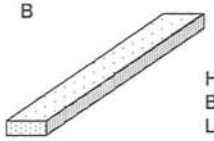
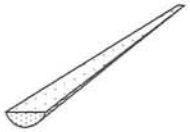
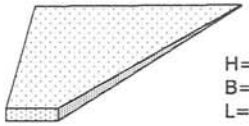
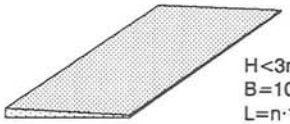
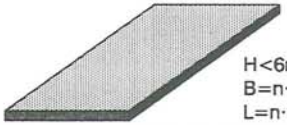
ARCHITEKTUR-ELEMENT		VEREINFACHTE GEOMETRIE	LITHOLOGIE KORNGRÖSSE	SEDIMENT-STRUKTUREN	POROSITÄT P PERMEABIL. k
					(Medianwerte)
RG	**bodenfrachtreiche Rinnengürtel**	 H=2-15m B=150-1500m L=n·10³m	Sandsteine, tw. tonig-siltig ms, tw. crs	Grossrippeln, oft strukturlos, Sohlenpflaster, grossmassstäbliche flachwinklige Schrägschichtung, gelegentlich Fining-upwards, interne Erosionsdiskordanzen	P=19.6% k=486md
	suspensionsfrachtreiche Rinnengürtel	 H=2-4m B=40-100m L=n·10³m	tonig-siltige Sandsteine ms, tw. fs oder crs		
DFR	**Durchbruchsrinnen**	 H≤4m B<10m L=n·10²m	tw. tonig-siltige Sandsteine ms, tw. fs oder crs	ebene Lamination, Grossrippelschichtung, oft strukturlos, im Dach oft pedogenisiert	P=14.2% k=5md
	Durchbruchsfächer	 H=1-2m B=n·10²m L=n·10²m	ton- und siltreiche Sandsteine fs, tw. ms	ebene Lamination, Kleinrippelschichtung, oft strukturlos, im Dach oft pedogenisiert	
UW	**Uferwälle und distale Überschwemmungssande**	 H<3m B=10-30m L=n·10²⁻³m	heterolithisch aus Siltsteinen, ton- und siltreichen Sandsteinen si, fs	Kletterrippeln, Wulstschichtung, Belastungs- und Entwässerungsstrukturen, ebene Lamination, tw. pedogenisiert und gefleckt	P=8.2% k nahe 0md
UPS	**Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen**	 H<6m B=n·10³m L=n·10³m	Schlammsteine, Mergel, tw. Kalkknollen si, t	Bodenbildungen, gefleckt mit komplexen Farbwechseln, tw. laminiert	P=8.1% k nahe 0md
LAK	**lakustrische Ablagerungen**		Schlamm- und Siltsteine, Kalk, Mergel si, t	feinlaminiert, oft strukturlos und bioturbiert, tw. Kleinrippelschichtung	P nahe 0% k nahe 0md

Fig. 47

LITERATURVERZEICHNIS

ALLEN, J.R.L. & WRIGHT, V.P. 1989: Paleosols in siliciclastic sequences. Short course notes, P.R.I.S., Univ. Reading.

BERGER, J.-P. 1985: La transgression de la molasse marine supérieure (OMM) en Suisse occidentale. Münch. Geowiss. Abh. Reihe A, Geol. Paläont. 5.

BERGGREN, W.A., KENT, D.V. & VAN COUVERING, J.A. 1985: The Neogene: Part 2. Neogene geochronology and chronostratigraphy. In: SNELLING, N.J. (Ed.): The chronology of the geological record. Mem. geol. Soc. London 10, 141-195.

BIRKELAND, P.W. 1984: Soils and Geomorphology. Oxford Univ. Press, New York.

BÜCHI, U.P. & SCHLANKE, S. 1977: Zur Paläogeographie der Schweizerischen Molasse. Erdöl-Erdgas-Z. 93 (Sonderausgabe), 57-69.

BÜCHI, U.P., LEMCKE, K., WIENER, G. & ZIMDARS, J. 1965: Geologische Ergebnisse der Erdölexploration auf das Mesozoikum im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 32/82, 7-38.

BUURMAN, P. 1980: Palaeosols in the Reading Beds (Palaeocene) of Alum Bay, Isle of Wight, U.K., Sedimentology 27, 593-606.

COLLINSON, J.D. 1978: Vertical sequence and sand body shape in alluvial sequences. In: MIALL, A.D. (Ed.): Fluvial sedimentology. Mem. canad. Soc. Petroleum Geol. 5, 577-286.

COLLINSON, J.D. & THOMPSON, D.B. 1982: Sedimentary structures. George Allen & Unwin, London.

DIEM, B. 1986: Die Untere Meeresmolasse zwischen Saane (Westschweiz) und Ammer (Oberbayern). Eclogae geol. Helv. 79/2, 493-560.

ERNI, A. & KELTERBORN, P. 1948: Ölgeologische Untersuchungen im Molassegebiet südlich Wangen a.d. Aare - Aarburg. Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 26/2, 1-37.

ESTEBAN, M. & KLAPPA, C.F. 1983: Subaerial exposure environment. In: SCHOLLE, P.A., BEBOUT, D.G. & MOORE, C.H. (Ed.): Carbonate depositional environments. Mem. amer. Assoc. Petroleum Geol. 33, 1-63.

FASEL, J.-M. 1986: Sédimentologie de la Molasse d'eau douce subalpine entre le Léman et la Gruyère. Thèse 907, Univ. Fribourg.

FIELDING, C.R. & CRANE, R.C. 1987: An application of statistical modelling to the prediction of hydrocarbon recovery factors in fluvial reservoir sequences. In: ETHRIDGE, F.G., FLORES, R.M. & HARVEY, M.D. (Ed.): Recent developments in fluvial sedimentology. Spec. Publ. Soc. econ. Paleont. Mineral 39, 321-328.

FOLK, R.L. 1974: Petrology of sedimentary rocks. Hemphill, Austin.

FREI, H.-P. 1979: Stratigraphische Untersuchungen in der subalpinen Molasse der Nordost-Schweiz zwischen Wägitaler Aa und Urnäsch. Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich [N.F.] 233.

FÜCHTBAUER, H. & MÜLLER, G. 1970: Sedimentologie - Petrologie. Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

GRAAFF VAN DE, W.J.E & EALEY, P.J. 1989: Geological modeling for simulation studies. Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol. 73/11, 1436-1444.

GALLOWAY, W.E. 1977: Catahoula formation of the Texas coastal plain: depositional systems, composition, structural development, ground-water flow history, and uranium distribution. Bur. econ. Geol. Univ. Texas, Austin, Rept. Invest. 87.

GALLOWAY, W.E. & HOBDAY, D.K. 1983: Terrigenous clastic depositional systems. Springer Verlag, New York.

GHOSH, S.K. 1987: Cyclicity and facies characteristics of alluvial sediments in the Monongahela-Dunkard groups, Central West Virginia. In: ETHRIDGE, F.G., FLORES, R.M. & HARVEY, M.D. (Ed.): Recent developments in fluvial sedimentology. Spec. Publ. Soc. econ. Paleont. Mineral 39, 229-242.

GOLDBERY, R. & BEYTY, M. 1984: Laterization and groundwater alteration phenomena in the Triassic Budra Formation, southwestern Sinai. Sedimentology 31, 575-594.

GOUDIE, A.S. 1973: Duricrusts in tropical and subtropical landscapes. Claredon Press, Oxford.

GOUDIE, A.S. 1983: Calcrete. In: GOUDIE, A.S. & PYE, K. (Eds.): Chemical sediments and geomorphology: Precipitates and residua in the near surface environment (93-131). Academic Press, London.

HABICHT, J.K.A. 1987: Internationales stratigraphisches Lexikon. Band Europa. Fasz. 7, Schweiz. Fasz. 7b, Schweizerisches Mittelland (Molasse). Schweiz. geol. Komm. u. Landeshydrol. u. -geol.

HALDORSEN, H.H. & LAKE, L.W. 1984: A new approach to shale management in field-scale models. J. Soc. Petroleum Engineers 24, 447-457.

HAQ, B.U., HARDENBOL, J. & VAIL, P.R. 1987: Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. Science 235, 1156-1167.

HEIM, ALB. 1919: Geologie der Schweiz. Band I: Molasseland und Juragebirge. Tauchnitz, Leipzig.

HOLE, F.D. 1961: A classification of pedoturbations and some other processes and factors of soil formation in relation to isotropism and anisotropism. Soil Sci. 91, 375-377.

HOMEWOOD, P., ALLEN, P.A. & WILLIAMS, G.D. 1986: Dynamics of the Molasse Basin of western Switzerland. In: ALLEN, P.A. & HOMEWOOD, P. (Ed.): Foreland basins. Spec. Publ. int. Assoc. Sedimentol. 6, 199-219.

JACKSON, R.G. II 1978: Preliminary evaluation of lithofacies models for meandring alluvial streams. In: MIALL, A.D. (Ed.): Fluvial sedimentology. Mem. canad. Soc. Petroleum Geol. 5, 543-576.

KELLER, B. 1989: Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (Unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. Diss. Univ. Bern

KELLER, B. 1990: Wirkung von Wellen und Gezeiten bei der Ablagerung der Oberen Meeresmolasse. Löwendenkmal und Gletschergarten - zwei anschauliche geologische Studienobjekte. Mitt. natf. Ges. Luzern 31, 245-271.

KISSLING, D. 1974: L'oligocène de l'extrémité occidentale du bassin molassique suisse. Stratigraphie et aperçu sédimentologique. Thèse 1648, Univ. Genève.

LEMCKE, K. 1984: Geologische Vorgänge in den Alpen ab Obereozän im Spiegel vor allem der deutschen Molasse. Geol. Rdsch. 73/1, 371-397.

LORENZ, J.C., HEINZE, D.M., CLARK, J.A. & SEARLS, C.A. 1985: Determination of widths of meander-belt sandstone reservoirs from vertical downhole data, Mesaverde Group, Piceance Creek basin, Colorado. Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol. 69/5, 710-721.

MATTER, A., HOMEWOOD, P., CARON, C., RIGASSI, D., VAN STUIJVENBERG, J., WEIDMANN, M. & WINKLER, W. 1980: Flysch and Molasse of western and central Switzerland (Excursion No. V). In: Geology of Switzerland, a guide-book. Part B, 261-293. Wepf, Basel/New York.

MATTER, A., PETERS, TJ., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., ISCHI, H. & MEYER, CH. 1988a: Sondierbohrung Weiach. Nagra Tech. Ber. NTB 86-01, Baden (Switzerland).

MATTER, A., PETERS, TJ., BLÄSI, H.-R., SCHENKER, F. & WEISS, H.-P. 1988b: Sondierbohrung Schafisheim. Nagra Tech. Ber. NTB 86-03, Baden (Switzerland).

MAURER, H., GERBER, M.E. & NABHOLZ, W.K. 1982: Sedimentpetrographie und Lithostratigraphie der Molasse im Einzugsgebiet der Langete (Aarwangen-Napf, Oberaargau). Eclogae geol. Helv. 75/2, 381-413.

MIALL, A.D. 1981: Analysis of fluvial depositional systems. Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol., course note ser. 20.

MIALL, A.D. 1985: Architectural element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. Earth-Sci. Rev. 22, 261-308.

MIALL, A.D. 1988: Facies architecture in clastic sedimentary basins. In: KLEINSPEHN, K. & PAOLA, C. (Ed.): New perspectives in sedimentary basin analysis: a symposium in honor of F.J. Pettijohn (p. 67-81). Springer-Verlag, New York.

MÜLLER, W.H., HUBER, M., ISLER, A. & KLEBOTH, B. 1984: Erläuterungen zur "Geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100 000". Nagra Tech. Ber. NTB 84-25, Baden (Switzerland).

NAEF, HCH., DIEBOLD, P. & SCHLANKE, S. 1985: Sedimentation und Tektonik im Tertiär der Nordschweiz. Nagra Tech. Ber. NTB 85-14, Baden (Switzerland).

NTB 88-25 1988: Sedimentstudie - Zwischenbericht 1988. Nagra Tech. Ber. NTB 88-25. Baden (Switzerland).

ODIN, G.S. & MONTANARI, A. 1989: Age radiométrique et stratotype de la limite Éocène Oligocène. C.R. Acad. Sci. (Paris) 309/II, 1939-1945.

PAULUS, B. 1963: Zur Stratigraphie und Fazies der oligozänen und miozänen Molasse im südlichen Oberbayern. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 30/78, 53-97.

RIGASSI, D.A. 1977: Subdivision et datation de la Molasse "d'eau douce inférieure" du Plateau Suisse. Paleolab News 1, Terreaux du Temple, Genève.

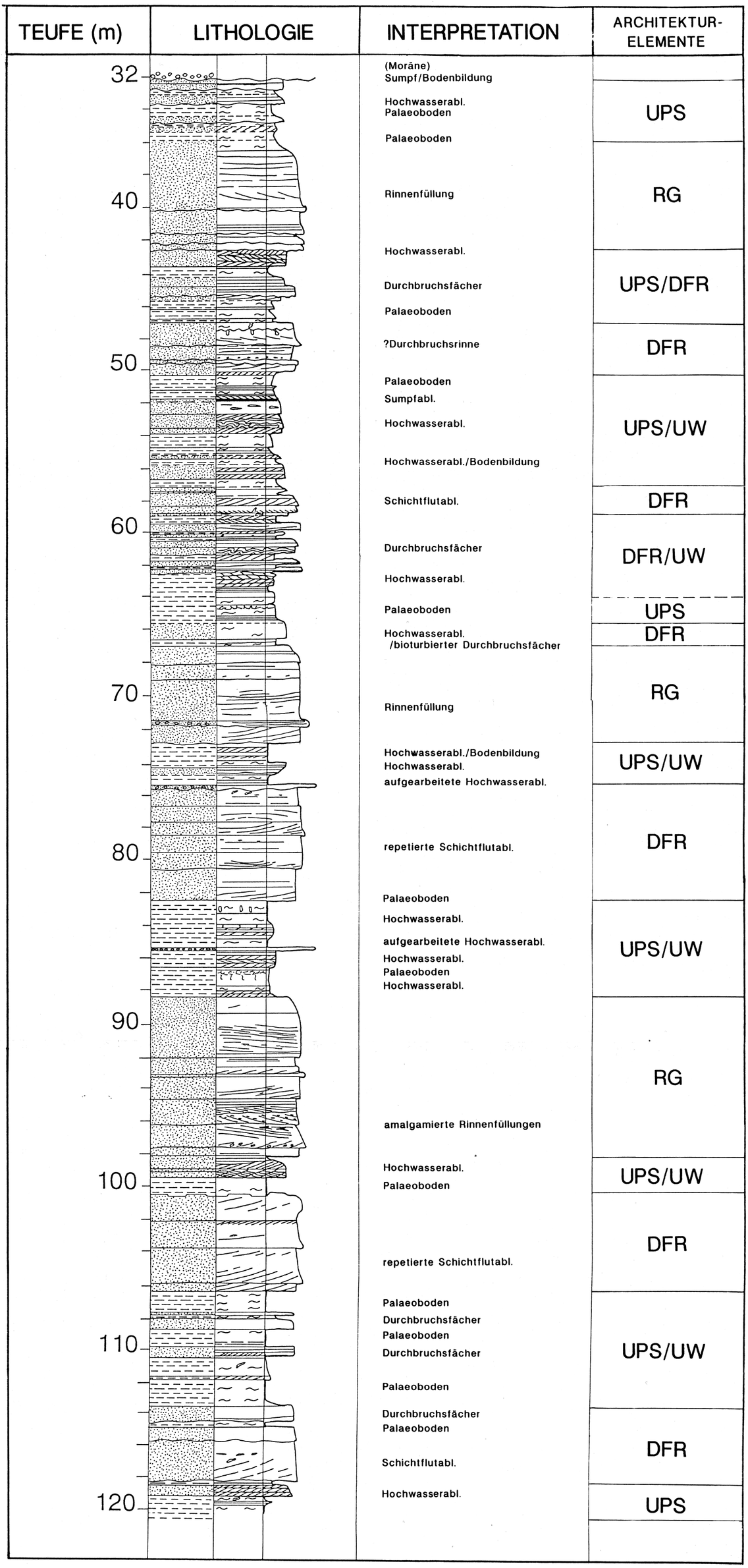
RUST, B.R. 1978: A classification of alluvial channel systems. In: MIALL, A.D. (Ed.): Fluvial sedimentology. Mem. canad. Soc. Petroleum Geol. 5, 187-198.

SCHUMM, S.A. 1972: Fluvial paleochannels. In: RIGBY, J.K. & HAMBLIN, W.K. (Ed.): Recognition of ancient sedimentary environments. Spec. Publ. Soc. econ. Paleont. Mineral 16, 98-107.

STEAR, W.M. 1983: Morphological characteristics of ephemeral stream channel and overbank splay sandstone bodies in the Permian Lower Beaufort Group, Karoo Basin, South Africa. In: COLLINSON, J.D. & LEWIN, J. (Ed.): Modern and ancient fluvial sediments. Spec. Publ. int. Assoc. Sedimentol. 6, 405-420.

TRÜMPY, R. 1985: Die Plattentektonik und die Entstehung der Alpen. Njbl. natf. Ges. Zürich 187.

YAALON, D.H. & KALMAR, D. 1978: Dynamics of cracking and swelling of clay soils: displacement of skeletal grains, optimum depth of slickensides, and rate of intra-pedonic turbation. Earth Surface Processes 3, 31-42.



NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

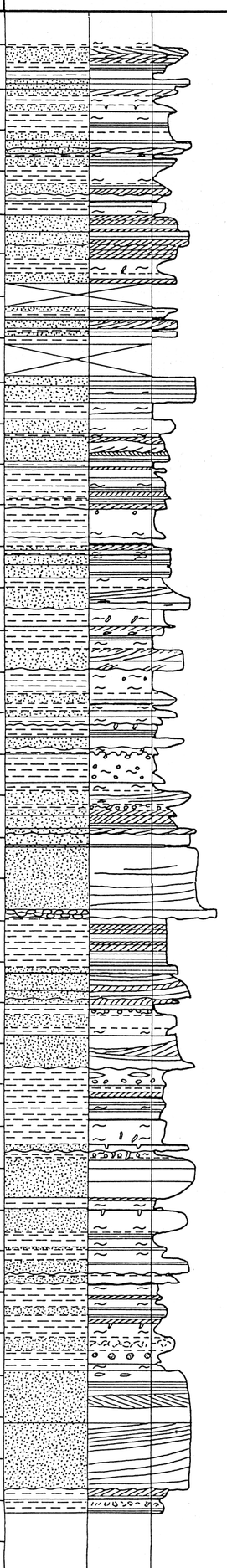
SEDIMENTOLOGISCHES PROFIL DER BOHRUNG LANGENTHAL RB 101, MIT GENESE UND ARCHITEKTUR-ELEMENTEN

Untere Süsswassermolasse

DAT.: Aug. 1990

BEILAGE 1

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

TEUFE (m)	LITHOLOGIE	INTERPRETATION	ARCHITEKTUR-ELEMENTE
20		Hochwasserabl.	
		Hochwasserabl.	UPS
		Hochwasserabl.	
		Hochwasserabl.	
		Palaeoboden	
		Hochwasserabl.	
		Sumpf/Bodenbildung	
		Hochwasserabl.	UW
30		Hochwasserabl.	
		Hochwasserabl.	
		Palaeoboden	UPS
		Hochwasserabl.	
		Schichtflutabl.	
		Palaeoboden	DFR
		Durchbruchsfächer	
40		Hochwasserabl.	
		Hochwasserabl.	UPS
		Palaeoboden	
		Hochwasserabl. u. Bodenbildung	
		Palaeoboden	
		Schichtflutabl.	
		Hochwasserabl.	DFR/UPS
		Palaeoboden	
50		Durchbruchsfächer	
		Palaeoboden	
		Sumpf/Bodenbildung	UPS
		Durchbruchsfächer u. Bodenbildung	
		Durchbruchsfächer	
		Palaeoboden	
		Palaeoboden	UW
		Hochwasserabl.	
60		Rinnenfüllung	RG
		Sohlenpflaster	
		Hochwasserabl.	UPS/UW
		Durchbruchsfächer	
		Palaeoboden	
		Hochwasserabl.	DFR/UPS
		Durchbruchsfächer	
70		Hochwasserabl.	
		Sumpf/Bodenbildung	
		Hochwasserabl. u. Bodenbildung	UPS
		Sumpf/Bodenbildung	
		Durchbruchsfächer	
		Palaeoboden	
		Schichtflutabl.	DFR
		Palaeoboden	
		Durchbruchsfächer	
		Palaeoboden	
80		Durchbruchsfächer	
		Sumpf/Bodenbildung	
		Hochwasserabl.	
		Palaeoboden	UPS
		Hochwasserabl.	
		Palaeoboden	
		Durchbruchsrinne	DFR
90		Hochwasserabl.	
		Sumpf/Bodenbildung	UPS/UW
		Hochwasserabl.	

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

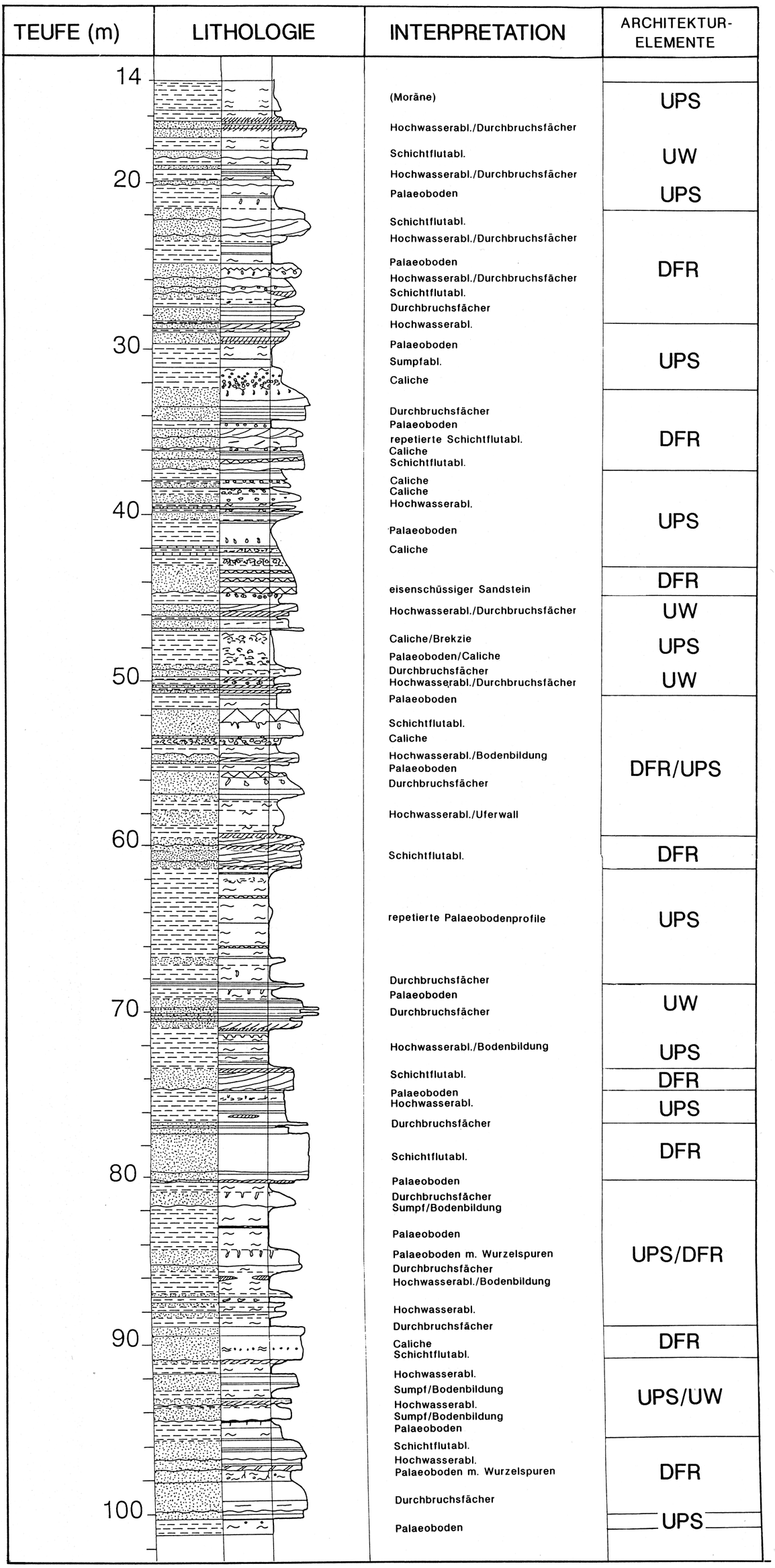
NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

SEDIMENTOLOGISCHES PROFIL DER BOHRUNG LANGENTHAL RB 102, MIT GENESE UND ARCHITEKTUR-ELEMENTEN

Untere Süsswassermolasse

DAT.: Aug. 1990

BEILAGE 2



Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

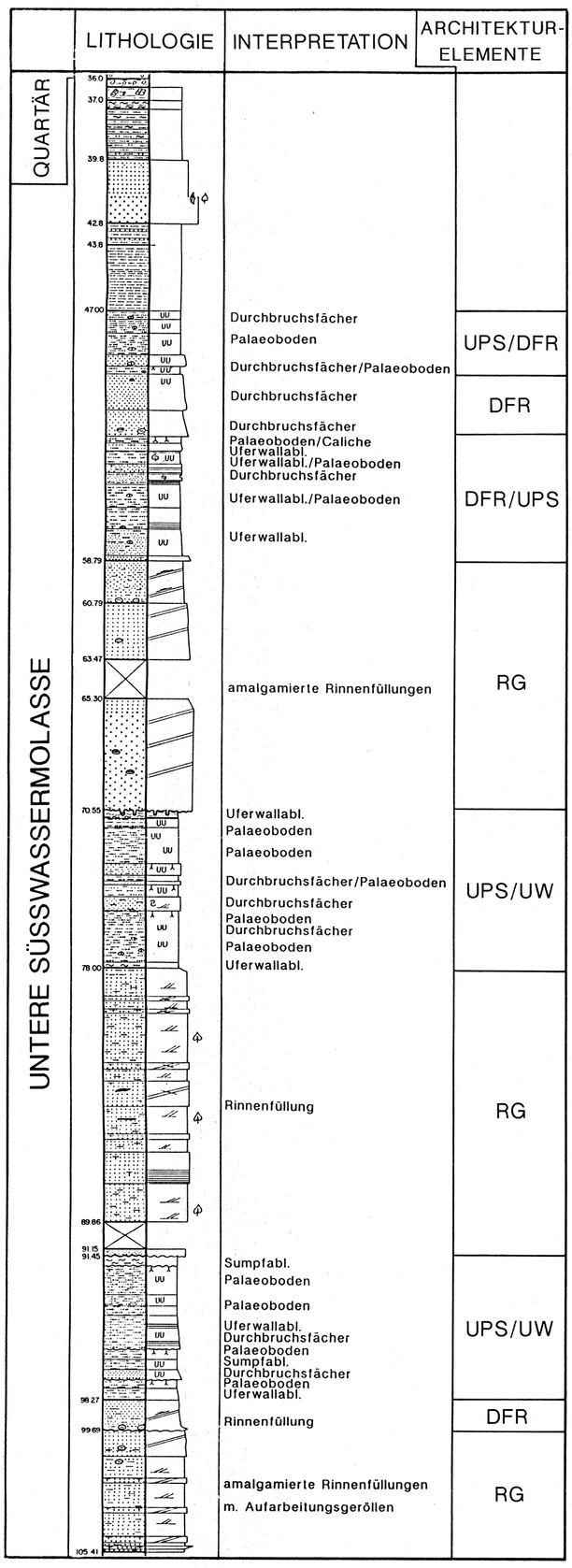
NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

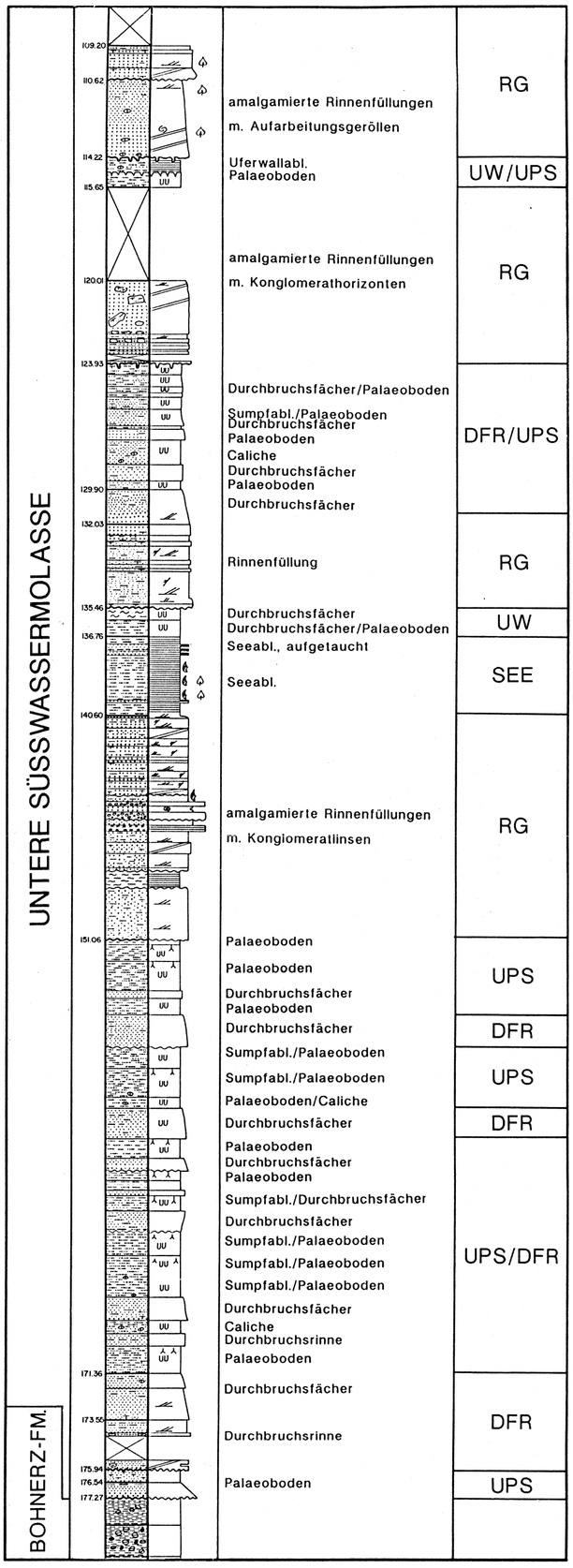
SEDIMENTOLOGISCHES PROFIL DER BOHRUNG LANGENTHAL RB 103, MIT GENESE UND ARCHITEKTUR-ELEMENTEN

Untere Süsswassermolasse

DAT.: Aug. 1990

BEILAGE 3





Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

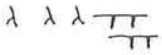
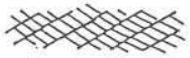
SEDIMENTOLOGISCHES PROFIL DER BOHRUNG WEIACH MIT GENESE UND ARCHITEKTUR-ELEMENTEN

Untere Süsswassermolasse

DAT.: Aug. 1990

BEILAGE 4

LEGENDE

	Sandstein		Trockenrisse
	Mergel		Wurzelspuren
			Pflanzenreste
	Kalk		Lamination
	Konglomerat /Brekzie		Fleckung
			Schrägschichtung
	organisches Material		Konvolutschichtung
	Karbonatknollen		Rippeln
	Aufarbeitungsgerölle		Kletterrippeln
	eisenschüssiger Horizont		
	Brekziierung		Wühlgänge/Biotubation
RG	Rinnengürtel	UW	Uferwall u. U.-durchbruch
DFR	Durchbruchsfächer u. -rinnen	UPS	Überschwemmungsebene, Paläoboden u. Sumpf

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA	**TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**	
LEGENDE ZU DEN SEDIMENTOLOGISCHEN PROFILEN		
Untere Süsswassermolasse	DAT.: **Aug. 1990**	**BEILAGE** 5

Bohrung	Teufe in m			Lithologie und Struktur
RB101	69.10A	RG	⫳ 6cm	Mittelsandstein, kalkig, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	B	RG	⫳	Mittelsandstein, kalkig, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	69.88	RG		Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	72.56A	RG	⫳ 8cm	Feinsandstein, gesteinsbruchstückreich; massige Basislage
	B	RG	⫳	Mittelsandstein, kalkig, gesteinsbruchstückreich; massige Basislage
	89.25A	RG	⫳ 10cm	Feinsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	B	RG	#	Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	90.10	RG		Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	91.90	RG		Feinsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	94.62A	RG	⫳ 10cm	Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	B	RG	#	Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	95.15A	RG	⫳ 7cm	Feinsandstein, kalkig, gesteinsbruchstückreich; Transcurrent-Lamination
	B	RG	⫳ 5cm	Feinsandstein, kalkig, gesteinsbruchstückreich; Transcurrent-Lamination
	C	RG	#	Feinsandstein, kalkig, gesteinsbruchstückreich; Transcurrent-Lamination
	95.70A	RG	⫳ 9cm	Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung
	B	RG	⫳ 2cm	Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung
	C	RG	⫳	Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung
	96.25	RG	⫳	Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung mit Kohlehäxel
	96.90	RG		Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich
	97.70	RG		Mittel- bis Grobsandstein, gesteinsbruchstückreich
	98.10A	RG	⫳ 12cm	Mittel-bis Grobsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung
	B	RG	⫳	Mittel-bis Grobsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung
RB102	58.70	RG		Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	59.15A	RG	⫳ 12cm	Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	B	RG	⫳	Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	60.10	RG		Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung
	61.30A	RG	⫳ 8cm	Fein- bis Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung
	B	RG	⫳	Fein- bis Mittelsandstein, mit Tonhäuten; Grossrippelschichtung
	61.52	RG	⫳	Mittelsandstein, kalkig, tonig, mit Tonklasten, "Sohlenpflaster"

RB101	76.25	DFR		Feinsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	76.50A	DFR	⫳ 20cm	Feinsandstein, kalkig, tonig, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	B	DFR	⫳	Feinsandstein, kalkig, tonig, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	77.90	DFR		Feinsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
	81.10	DFR		Fein- bis Mittelsandstein; gesteinsbruchstückreich, Grossrippelschichtung
	82.10	DFR		Feinsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung
	82.35A	DFR		Fein- bis Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung
	B	DFR		Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; Grossrippelschichtung, erosive Basis
	104.42	DFR		Mittelsandstein, gesteinsbruchstückreich; strukturlos
RB102	67.60A	DFR	⫳ 17cm	Feinsandstein, kalkig; Kleinrippelschichtung
	B	DFR	⫳	Feinsandstein, kalkig; Kleinrippelschichtung
	84.80	DFR		Feinsandstein, gesteinsbruchstückreich
	85.90	DFR		Feinsandstein, gesteinsbruchstückreich; Durchbruchsrinne; strukturlos
	86.30	DFR		Feinsandstein, gesteinsbruchstückreich; Durchbruchsrinne; strukturlos
RB103	85.00A	DFR	#	Feinsandstein, kalkig, tonig, rot; strukturlos
	B	DFR	⫳	Feinsandstein, kalkig, tonig, rot; strukturlos
	96.20	DFR		Fein- bis Mittelsandstein, kalkig; strukturlos

RB101	84.10	UW		Mergel-Grobsiltstein, ocker; Kleinrippelschichtung, bioturbiert
	84.70A	UW	⫳ 15cm	Ton-Grobsiltstein, kalkig, ocker; Kleinrippelschichtung mit Kletterrippeln und Entwässerungsstruktur
	B	UW	# 10cm	Ton-Grobsiltstein, kalkig, ocker; Kleinrippelschichtung mit Kletterrippeln und Entwässerungsstruktur
	C	UW	⫳	Ton-Grobsiltst.,kalkig,ocker;Kleinrippelsch.,mit Kletterrip. u. Entwässer.str.
RB102	57.50	UW		Mergel-Grobsiltstein
	88.83	UW		Mergel-Grobsiltstein; Kleinrippelschichtung
RB103	72.80	UW		Tonmergel, siltig, bunt; Kleinrippelschichtung, bioturbiert
	73.30A	UW	⫳ 12cm	Feinsandstein, kalkig, tonig, bunt; Kleinrippelschichtung
	B	UW	⫳	Feinsandstein, kalkig, tonig, bunt; Kleinrippelschichtung
	91.27	UW		Ton-Grobsiltstein, fahlbunt; Kleinrippelschichtung

RB102	54.60	UPS		Silt-Tonstein, bunt
	79.90	UPS		Mergel-Grobsiltstein, bunt
	89.00	UPS		Ton-Feinsandstein, schwarz
RB103	52.30	UPS		Ton-Siltstein, rot; Paläosol (Laterit)
	66.30	UPS		Mergel, ocker; mit rotem tonigem Wurzelgefüge Paläosol
	67.35A	UPS	⫳ 20cm	Silt-Tonstein, dolomitisch rot; Paläosol
	B	UPS	⫳	Silt-Tonstein, kalkig, rot; Paläosol
	71.20	UPS		Mergel, siltig, bunt; mit Trockenrissen
	97.50	UPS		Feinsandstein, tonig, rot; Paläosol

= senkrecht
⫳ = waagrecht

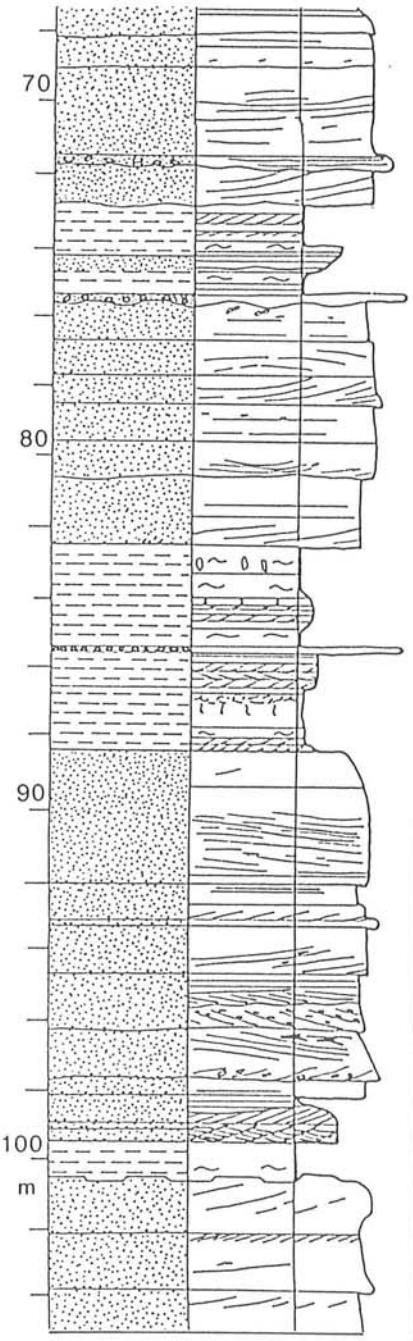
Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

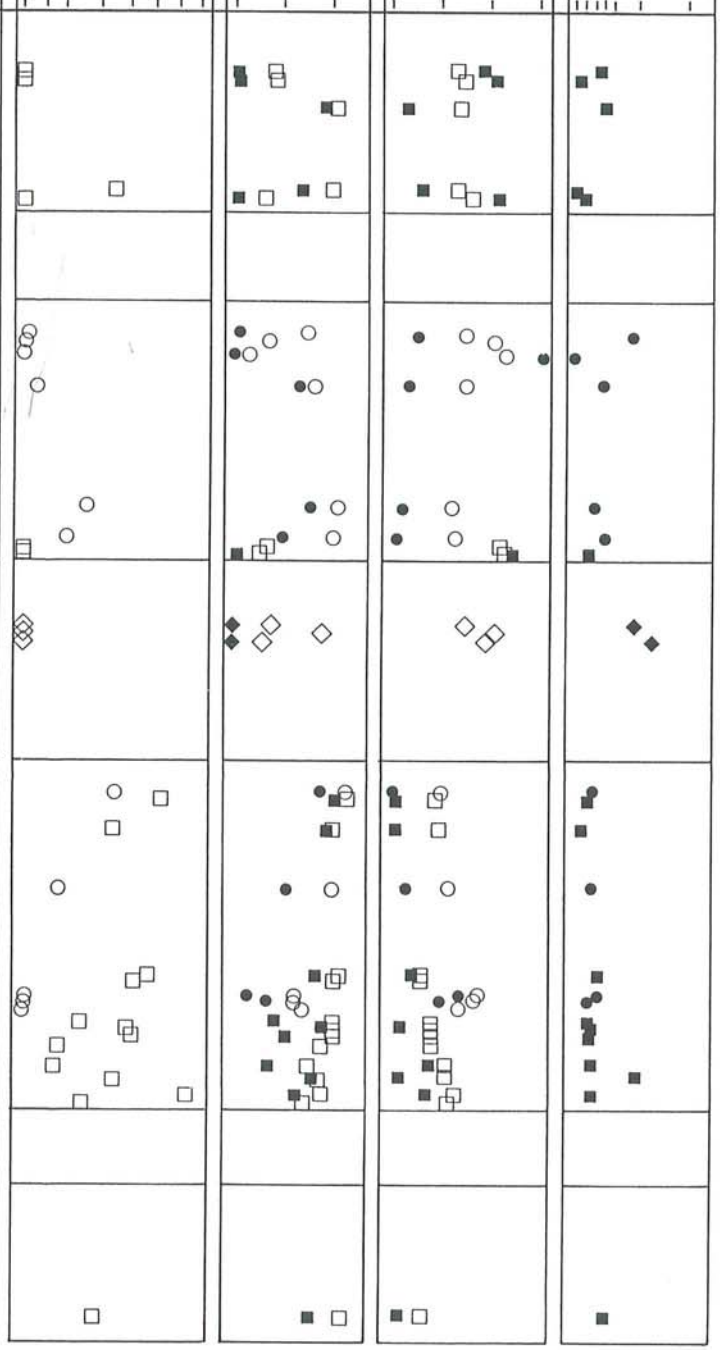
PROBENLISTE: LITHOLOGIE UND STRUKTUR

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 6**

USM Langenthal RB101



	Korngrösse in mm	Probe
RG	0.25	69.10
	0.35	
	0.25	69.88
	0.21	72.56
	0.25	
UPS UW		
DFR	0.15	76.25
	0.13	76.50
	0.18	77.90
	0.21	81.10
	0.21	82.10
	0.25	82.35
UW	<62 µ	84.70
RG	0.21	89.25
	0.25	
	0.25	90.10
	0.21	91.90
	0.43	94.62
	0.21	95.15
	0.18	
	0.43	95.70
	0.35	96.25
	0.25	96.90
	0.43	97.70
	0.5	98.10
UPS UW		
DFR	0.35	104.42



Legende:			
	Mittelsandstein	■	□
	Feinsandstein	● Dünnschliff	○ Laborunter – suchung
	Ton/Siltstein	◆	◇

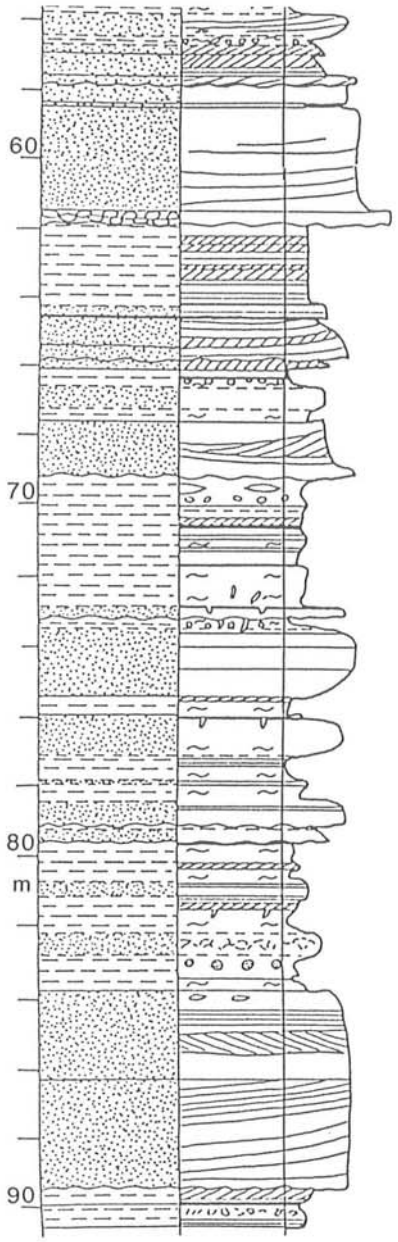
Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

SEDIMENTOLOGISCHES PROFIL LANGENTHAL RB 101,
MIT ERGEBNISSEN DER LABOR- UND DÜNNSCHLIFF-UNTERSUCHUNGEN

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 7**

USM Langenthal RB102



	Korn grösse in mm	Probe	Permeabilität mdarcy 10^2 10^3 0 1 2 4 6 8 1 2	Porosität Vol% 0 10 20	Calcit □ gesamt ■ Zement % 0 10 20 40	Tonmatrix Vol% 01 35 10 20
UW	<62 µ	57.50 ◆	◇	◇	◇	◆
RG	0.3	58.70 ●	□	■ □	■ □	■
	0.43	59.15 ●	□	■ □	■ □	■
	0.43	59.15 ●	□	■ □	■ □	■
	0.3	60.10 ●	□	■ □	■ □	■
	0.43	61.30 ●	□	■ □	■ □	■
		61.52 ●	□	■ □	■ □	■
UPS						
UW						
DFR						
UPS						
DFR	0.11	67.60 ●	○	● ○	● ○	●
		67.60 ●	○	● ○	● ○	●
UPS						
DFR						
UPS						
DFR		84.80 ●	○	○	○	
	0.18	85.90 ●	○	● ○	● ○	●
	0.18	86.30 ●	○	● ○	● ○	●
		87.70 ◢				
		88.30 ◢				
UW	<62 µ	88.83 ●	◇	◇	◇	◆

Legende:				
	Mittelsandstein	■		□
	Feinsandstein	●	Dünnschliff	○ Laborunter – suchung
	Ton/Siltstein	◆		◇

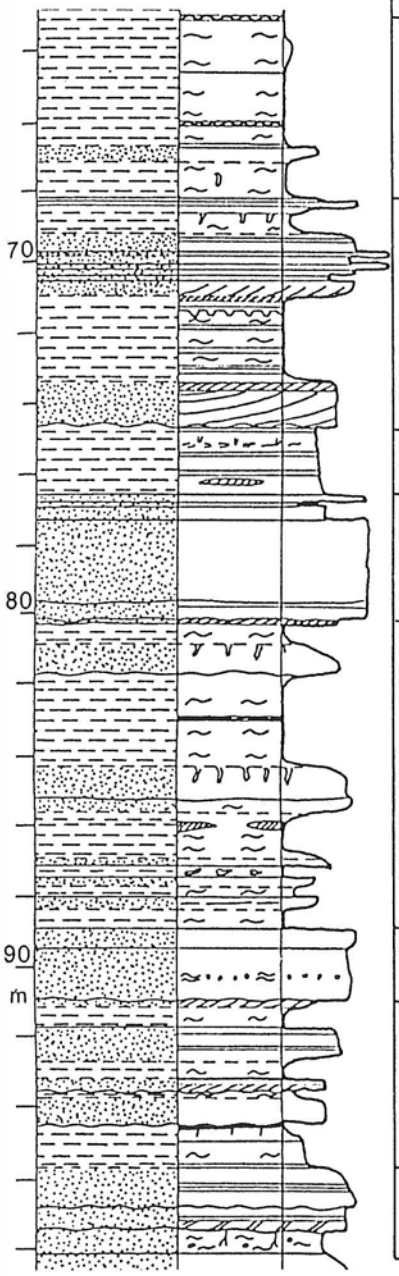
Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

SEDIMENTOLOGISCHES PROFIL LANGENTHAL RB 102,
MIT ERGEBNISSEN DER LABOR- UND DÜNNSCHLIFF-UNTERSUCHUNGEN

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 8**

USM Langenthal RB103



	Korn grösse in mm	Probe	Permeabilität mdarcy 10^2 10^3 0 1 2 4 6 8 1 2	Porosität Vol% 0 10 20	Calcit □ gesamt ■ Zement % 0 10 20 40	Tonmatrix Vol% 01 35 10 20
UPS	<62 u	66.30 ●	◇	◇	◇	
		67.35 ◐				
UW						
UPS		71.20 ◐				
UW	<62 u	72.80 ●	◇	◇	◇	
DFR	0.09	73.30 ◐	⊖	● ○	⊖	●
UPS						
DFR						
DFR						
UPS						
DFR	0.21 0.21	85.0 ◐	⊖	◐ ⊖	⊖ ◐	● ●
DFR						
UW	<62 u	91.27 ●	◇	◆ ◇	◇	◆
UPS						
UW						
DFR	0.21	96.20 ●	○	● ○	○ ●	●
UPS	0.18	97.50 ●		●	◐	●

Legende:				
	Mittelsandstein	■		□
	Feinsandstein	●	Dünnschliff	○ Laborunter — suchung
	Ton/Siltstein	◆		◇

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

SEDIMENTOLOGISCHES PROFIL LANGENTHAL RB 103,
MIT ERGEBNISSEN DER LABOR- UND DÜNNSCHLIFF-UNTERSUCHUNGEN

Untere Süsswassermolasse | DAT.: **Aug. 1990** | **BEILAGE 9**

	Teufe in Meter	Gesteinsbeschreibung		Corg Gew %	Calcit Gew %	Dolomit Gew %	Quarz Gew %	Albit Gew %	Kalifeld-spat Gew %	Tonmin. + Akzessor. Gew %
RB101	69.10A	Mittelsandstein	RG	0.1	13	2	38	20	13	14
	B	Mittelsandstein	RG	0.1	15	1	36	14	9	25
	69.88	Mittelsandstein	RG	-	14	1	43	18	15	9
	72.56A	Feinsandstein	RG	0.3	13	2	39	14	6	26
	B	Mittelsandstein	RG	0.5	16	1	39	15	10	19
	89.25A	Feinsandstein	RG	0.1	10	2	36	14	7	31
	B	Mittelsandstein	RG	0.1	9	2	37	16	8	28
	90.10	Mittelsandstein	RG	0.1	10	2	39	22	17	10
	91.90	Feinsandstein	RG	0.1	11	2	36	18	13	20
	94.62A	Mittelsandstein	RG	-	6	2	47	25	14	6
	B	Mittelsandstein	RG	0.1	6	2	36	21	7	28
	95.15A	Feinsandstein	RG	0.2	17	4	32	15	12	20
	B	Feinsandstein	RG	0.1	16	4	34	16	4	26
	C	Feinsandstein	RG	0.1	14	4	26	12	6	38
	95.70A	Mittelsandstein	RG	0.1	8	2	39	20	9	22
	B	Mittelsandstein	RG	0.1	8	2	29	17	15	29
	C	Mittelsandstein	RG	0.1	8	2	38	23	14	15
	96.25	Mittelsandstein	RG	0.3	8	2	34	21	12	23
	96.90	Mittelsandstein	RG	0.7	11	2	30	16	11	30
	97.70	Mittel- bis Grobsandstein	RG	-	11	2	31	24	17	15
	98.10A	Mittel- bis Grobsandstein	RG	-	13	3	35	25	8	16
	B	Mittel- bis Grobsandstein	RG	0.1	12	4	28	24	8	24
RB102	58.70	Mittelsandstein	RG	-	11	3	33	15	12	26
	59.15A	Mittelsandstein	RG	-	9	2	31	15	10	33
	B	Mittelsandstein	RG	-	11	2	55	19	10	3
	60.10	Mittelsandstein	RG	0.1	10	2	36	18	14	20
	61.30A	Fein- bis Mittelsandstein	RG	0.1	15	2	40	14	11	18
	B	Fein- bis Mittelsandstein	RG	-	14	2	37	14	11	22
	61.52	Mittelsandstein	RG	0.1	18	1	14	5	8	54
RB101	76.25	Feinsandstein	DFR	0.1	15	3	31	14	8	29
	76.50A	Feinsandstein	DFR	0.1	21	3	29	15	8	24
	B	Feinsandstein	DFR	0.1	23	1	26	10	7	33
	77.90	Feinsandstein	DFR	0.3	15	2	35	16	11	21
	81.10	Fein- bis Mittelsandstein	DFR	0.2	12	2	40	20	15	11
	82.10	Ton-Grobsiltstein	DFR	0.1	13	2	36	15	7	27
	82.35A	Fein- bis Mittelsandstein	DFR	0.1	24	2	31	14	13	16
	B	Mittelsandstein	DFR	0.1	26	2	27	12	8	25
	104.42	Mittelsandstein	DFR	-	6	2	28	22	8	34
RB102	67.60A	Feinsandstein	DFR	0.2	17	3	33	13	9	25
	B	Feinsandstein	DFR	0.1	16	3	28	12	7	34
	84.80	Feinsandstein	DFR	0.2	15	3	39	30	13	-
	85.90	Feinsandstein	DFR	0.1	10	2	38	18	15	17
	86.30	Feinsandstein	DFR	0.2	12	2	34	18	12	22
RB103	85.00A	Feinsandstein	DFR	0.1	10	2	31	23	22	12
	B	Feinsandstein	DFR	0.1	10	3	30	23	10	24
	96.20	Fein- bis Mittelsandstein	DFR	0.1	18	2	26	20	15	19
RB101	84.10	Ton-Grobsiltstein	UW	0.4	47	3	14	7	4	25
	84.70A	Ton-Grobsiltstein	UW	-	15	2	26	12	3	42
	B	Ton-Grobsiltstein	UW	-	21	2	24	10	4	39
	C	Ton-Grobsiltstein	UW	0.1	19	1	18	9	5	48
RB102	57.50	Mergel-Grobsiltstein	UW	-	30	3	26	14	6	21
	88.83	Mergel-Grobsiltstein	UW	0.1	32	4	18	8	3	35
RB103	72.80	Tonmergel	UW	0.1	20	7	19	8	2	44
	73.30A	Feinsandstein	UW	0.4	14	7	23	15	9	32
	B	Feinsandstein	UW	0.1	14	8	29	20	14	15
	91.27	Ton-Grobsiltstein	UW	-	14	5	21	11	7	42
RB102	54.60	Silt-Tonstein	UPS	0.2	14	3	15	8	7	53
	79.90	Mergel-Grobsiltstein	UPS	0.2	25	3	15	6	3	48
	89.00	Feinsandstein	UPS	-	4	3	25	19	16	33
RB103	52.30	Ton-Siltstein	UPS	-	1	1	29	18	20	31
	66.30	Mergel,	UPS	0.1	42	5	9	4	2	38
	67.35A	Silt-Tonstein	UPS	0.1	1	14	17	8	3	57
	B	Silt-Tonstein	UPS	-	15	3	16	7	5	54
	71.20	Mergel	UPS	-	33	8	13	5	3	38
	97.50	Feinsandstein	UPS	0.1	1	1	25	14	8	51

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

MINERALGEHALTE: RÖNTGEN- UND COULOMAT-BESTIMMUNGEN

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 10**

	Teufe in in Meter	Gesteinsbeschreibung		Gesteins-dichte gcm^{-3}	Korn-dichte gcm^{-3}	Porosität %	Permeabilität md	Permeabilität ms^{-1}
RB101	69.10A	Mittelsandstein	RG	2.45	2.66	7.9	<0.01	
	B	Mittelsandstein	RG	2.46	2.68	8.2	<0.01	
	69.88	Mittelsandstein	RG	2.11	2.65	20.4		
	72.56A	Feinsandstein	RG	2.15	2.66	19.2	486	$4.6\ 10^{-6}$
	B	Mittelsandstein	RG	2.48	2.65	6.4	<0.01	
	89.25A	Feinsandstein	RG	2.04	2.64	22.7	526	$5.0\ 10^{-6}$
	B	Mittelsandstein	RG	2.04	2.65	23.0	849	$8.1\ 10^{-6}$
	90.10	Mittelsandstein	RG	2.10	2.64	20.8	521	$5.0\ 10^{-6}$
	91.90	Feinsandstein	RG	2.12	2.66	20.3	127	$1.0\ 10^{-6}$
	94.62A	Mittelsandstein	RG	2.06	2.62	21.4	745	$7.1\ 10^{-6}$
	B	Mittelsandstein	RG	2.08	2.62	20.6	666	$6.3\ 10^{-6}$
	95.15A	Feinsandstein	RG	2.32	2.65	12.5	12	$1.1\ 10^{-7}$
	B	Feinsandstein	RG	2.34	2.67	12.4	6	$5.3\ 10^{-8}$
	C	Feinsandstein	RG	2.27	2.66	14.7	4	$4.1\ 10^{-8}$
	95.70A	Mittelsandstein	RG	2.11	2.64	20.1	304	$2.9\ 10^{-6}$
	B	Mittelsandstein	RG	2.11	2.65	20.0	605	$5.7\ 10^{-6}$
	C	Mittelsandstein	RG	2.11	2.64	20.1	658	$6.2\ 10^{-6}$
	96.25	Mittelsandstein	RG	2.17	2.64	17.8	162	$1.5\ 10^{-6}$
	96.90	Mittelsandstein	RG	2.24	2.67	16.1	135	$1.1\ 10^{-6}$
	97.70	Mittel- bis Grobsandstein	RG	2.17	2.64	17.8	526	$5.0\ 10^{-6}$
	98.10A	Mittel- bis Grobsandstein	RG	2.16	2.64	18.2	1170	$1.1\ 10^{-5}$
	B	Mittel- bis Grobsandstein	RG	2.25	2.64	14.8	339	$3.2\ 10^{-6}$
RB102	58.70	Mittelsandstein	RG	2.11	2.64	20.1	517	$5.0\ 10^{-6}$
	59.15A	Mittelsandstein	RG	2.06	2.66	22.6	1269	$1.2\ 10^{-5}$
	B	Mittelsandstein	RG	2.04	2.67	23.6	1766	$1.7\ 10^{-5}$
	60.10	Mittelsandstein	RG	2.00	2.62	23.7	1723	$1.7\ 10^{-5}$
	61.30A	Fein- bis Mittelsandstein	RG	2.22	2.67	13.1	320	$3.0\ 10^{-6}$
	61.52	Mittelsandstein	RG	2.43	2.72	10.7	63	$6.0\ 10^{-7}$

	Teufe in in Meter	Gesteinsbeschreibung		Gesteins-dichte gcm^{-3}	Korn-dichte gcm^{-3}	Porosität %	Permeabilität md	Permeabilität ms^{-1}
RB101	76.25	Feinsandstein	DFR	2.27	2.66	14.7	7	$7.0\ 10^{-8}$
	76.50A	Feinsandstein	DFR	2.48	2.66	6.8	0.1	$1.0\ 10^{-9}$
	B	Feinsandstein	DFR	2.60	2.67	2.6	<0.01	
	77.90	Feinsandstein	DFR	2.20	2.64	16.7	53	$5.0\ 10^{-7}$
	81.10	Fein- bis Mittelsandstein	DFR	2.10	2.64	20.8	330	$3.0\ 10^{-6}$
	82.10	Feinsandstein	DFR	2.16	2.71	20.3	213	$2.0\ 10^{-6}$
	82.35A	Fein- bis Mittelsandstein	DFR	2.52	2.70	6.7	<0.01	
	B	Mittelsandstein	DFR	2.56	2.69	4.8	<0.01	
	104.42	Mittelsandstein	DFR	2.05	2.64	22.4	389	$3.7\ 10^{-6}$
RB102	67.60A	Feinsandstein	DFR	2.29	2.67	14.2	5	$5.0\ 10^{-8}$
	B	Feinsandstein	DFR	2.48	2.68	8.5	<0.01	
	84.80	Feinsandstein	DFR	2.22	2.63	15.6	10	$9.3\ 10^{-8}$
	85.90	Feinsandstein	DFR	2.19	2.66	17.7	23	$2.0\ 10^{-7}$
	86.30	Feinsandstein	DFR	2.21	2.68	17.5	18	$1.6\ 10^{-7}$
RB103	85.00A	Feinsandstein	DFR	2.50	2.66	6.0	0.3	$2.8\ 10^{-9}$
	B	Feinsandstein	DFR	2.48	2.67	7.1	0.3	$2.8\ 10^{-9}$
	96.20	Fein- bis Mittelsandstein	DFR	2.45	2.66	7.9	<0.01	

	Teufe in in Meter	Gesteinsbeschreibung		Gesteins-dichte gcm^{-3}	Korn-dichte gcm^{-3}	Porosität %	Permeabilität md	Permeabilität ms^{-1}
RB101	84.70A	Ton-Grobsiltstein	UW	2.46	2.67	7.9	<0.01	
	B	Ton-Grobsiltstein	UW	2.20	2.68	17.9	<0.01	
	C	Ton-Grobsiltstein	UW	2.54	2.69	5.6	<0.01	
RB102	57.50	Mergel-Grobsiltstein	UW	2.58	2.69	4.1	<0.01	
	88.83	Mergel-Grobsiltstein	UW	2.60	2.66	2.3	<0.01	
RB103	72.80	Tonmergel	UW	2.48	2.70	8.2	9	$8.6\ 10^{-8}$
	73.30A	Feinsandstein	UW	2.39	2.68	10.8	<0.01	
	B	Feinsandstein	UW	2.32	2.67	13.1	<0.01	
	91.27	Ton-Grobsiltstein	UW	2.41	2.64	8.7	<0.01	
RB103	66.30	Mergel	UPS	2.50	2.72	8.1	<0.01	

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

POROSITÄT, PERMEABILITÄT, GESTEINS- UND KORNDICHTE

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 11**

	Teufe in Meter		Sortierung	Mittlere Korngrösse	Quarz mono-kristallin	Quarz Poly-kristallin	Quarz total	Feldspäte	Glimmer	Gest.bruchst. Krist. metam. silizikl.	Gest.bruchst. Karbonate	Opake Körner	Schwerminerali en	Calcit Zement	Porosität	Tonmatrix
RB101	69.10A	RG	M	0.25	18	8	26	15	5	24	8	tr	tr	19	tr	2
	B	RG	MG	0.35	28	7	35	16	2	20	5	tr	0	21	tr	1
	69.88	RG	SG/G	0.25	15	7	22	8	2	29	15	tr	0	3	18	3
	72.56A	RG	MG	0.213	28	7	35	12	4	19	10	0	1	6	14	0
	B	RG	MG	0.25	27	4	31	15	3	22	5	tr	0	23	tr	1
	89.25A	RG	SG/G	0.213	23	3	26	10	5	30	8	0	tr	tr	18	2
	B	RG	MG	0.25	17	4	21	5	2	37	12	1	tr	1	21	1
	90.1	RG	G	0.25	22	8	30	6	3	27	11	0	tr	1	20	1
	91.9	RG	G	0.213	16	8	24	13	2	34	10	0	1	3	11	2
	94.62A	RG	MG	0.425	21	6	27	10	4	28	8	0	tr	5	17	2
	95.15A	RG	MG	0.213	22	7	29	10	4	23	13	0	1	14	3	3
	B	RG	MG	0.177	23	5	28	8	9	13	18	2	2	10	7	1
	95.70A	RG	MG/M	0.425	22	5	27	20	8	15	8	1	1	9	8	1
	B	RG	MG	0.425	18	6	24	11	3	24	15	tr	0	2	18	2
	96.25	RG	MG	0.35	27	6	33	12	6	17	6	2	1	8	11	1
	96.9	RG	MG	0.25	23	5	28	13	1	26	14	1	0	8	7	2
	97.7	RG	SG/G	0.425	13	4	17	15	1	34	9	0	tr	2	17	5
	98.10A	RG	SG/G	0.5	13	2	15	22	1	26	12	0	tr	7	13	2
RB102	58.7	RG	SG/G	0.3	27	6	33	14	2	24	11	0	1	2	14	1
	59.15A	RG	G	0.425	19	7	26	15	1	23	10	tr	0	1	22	1
	B	RG	G	0.425	21	6	27	11	2	26	9	tr	0	3	22	tr
	60.1	RG	SG/G	0.3	20	7	27	14	2	21	18	tr	0	2	14	1
	61.30A	RG	G/MG	0.425	25	8	33	18	2	22	11	tr	tr	4	9	1
	61.52	RG	S/SS	2	12	5	17	4	2	45	5	0	0	20	3	3
	Mittelwert			0.388	21	6	27	12	3	25	10	tr	tr	7	12	2
	Min			0.177	12	2	15	4	1	13	5	0	0	tr	tr	0
	Max			2.000	28	8	35	22	9	46	18	2	2	23	22	5
	N			24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
RB101	76.25	DFR	SG/G	0.151	29	6	35	9	7	17	15	1	1	5	1	9
	76.50B	DFR	MG	0.125	22	4	26	4	3	8	7	2	0	49	0	0
	77.9	DFR	SG/G	0.177	18	9	27	14	2	21	17	0	0	3	13	3
	81.10	DFR	G	0.213	22	6	28	12	3	26	12	0	0	2	15	2
	82.10	DFR	M	0.213	23	4	27	7	2	32	16	0	tr	1	11	3
	82.35B	DFR	MG	0.25	23	11	34	6	3	21	10	tr	tr	25	tr	1
	104.42	DFR	MG	0.35	16	5	21	18	6	23	9	0	tr	2	16	4
RB102	67.60A	DFR	MG	0.107	22	4	26	7	8	21	8	2	1	14	9	6
	85.90	DFR	G/MG	0.177	27	4	31	11	5	24	11	1	0	3	10	4
	86.30	DFR	G	0.177	23	3	26	13	2	24	15	1	0	2	13	5
RB103	85.00A	DFR	S	0.213	20	1	21	4	1	23	6	3	0	25	tr	17
	B	DFR	S	0.213	22	2	24	11	3	19	6	1	0	22	0	14
	96.20	DFR	G/MG	0.213	16	4	20	14	3	31	6	tr	0	25	tr	1
	Mittelwert			0.388	22	5	26	10	4	22	11	1	tr	14	7	5
	Min			0.177	16	1	20	4	1	8	6	0	0	1	0	0
	Max			2.000	29	11	35	18	8	32	17	3	1	49	16	17
	N			13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
RB102	89.00	UPS	SS	0.177	15	2	17	5	1	11	4	3	0	0	tr	60
RB103	97.50	UPS	S/SS	0.177	15	tr	15	12	0	9	0	2	1	0	tr	61
	Mittelwert			0.177	15	1	16	8	1	10	2	3	tr	0	tr	61
	Min			0.177	15	tr	15	5	0	9	0	2	0	0	tr	60
	Max			0.177	15	2	17	12	1	11	4	3	1	0	tr	61
	N			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

	Teufe in Meter		Sortierung	Mittlere Korngrösse	Quarz mono-krst. Feldspat	Quarz mono-kristallin	Quarz poly-kristallin	Feldspäte	Glimmer	Gest.bruchst. Krist. metam. silizikl.	Gest.bruchst. Karbonate + Zement	Opake Körner	Schwerminerali en	Porosität	Tonmatrix
RB101	84.70A	UW		0.062	22				27	16	23	2	tr	tr	9
	C	UW		0.062	18				23	3	41	1	1	tr	13
RB102	57.50	UW		0.062	12				6	9	61	3	tr	0	7
	88.83	UW		0.062	16				5	11	62	3	0	tr	4
RB103	73.30A	UW	S	0.088		18	2	3	6	11	30	3	0	1	25
	91.27	UW		0.062	26				10	12	28	1	0	1	22
	Mittelwert			0.066	19				13	10	41	2	tr	tr	14
	Min			0.062	12				5	3	23	1	0	0	4
	Max			0.088	26				27	16	62	3	1	1	25
	N			7	5				6	6	6	6	6	6	6

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

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

MINERALOGISCH-PETROGRAPHISCHE MODALBESTÄNDE DER GESTEINSPROBEN: DÜNNSCHLIFF-AUSZÄHLUNGEN

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 12**

Bohrung	Teufe in Meter		Calcit-Zement	absolute Porosität	DS-porosität	POROSITÄTSTYPEN												
						intergran.		Klüfte	undiff.	intragranuläre Porosität								
						allgemein	mikro in Ton			Feldspäte makro	Feldspäte mikro	Lithoklaste makro	Lithoklaste mikro	Karb.-Gest. makro	Karb.-Gest. mikro	Risse in Körnern	Glimmer	undiff.
RB101	69.10A	RG	19	7.9	tr	36	0	0	0	14	4	22	8	0	0	14	2	0
	69.10B	RG	21	8.2	tr	18	0	0	0	16	10	16	6	0	0	28	4	2
	69.88	RG	3	20.4	18	70	0	0	0	1	0	15	4	1	0	9	0	0
	72.56A	RG	6	19.2	14	78	0	0	0	5	1	7	1	2	0	6	0	0
	72.56B	RG	23	6.4	tr	12	0	0	0	14	10	32	6	0	0	24	2	0
	89.25A	RG	tr	22.7	18	83	0	0	0	4	1	2	1	3	1	5	0	0
	89.25B	RG	1	23.0	21	75	0	0	0	4	0	11	1	0	0	5	1	3
	90.10	RG	1	20.8	20	87	0	0	0	1	0	8	0	1	0	2	1	0
	91.90	RG	3	20.3	11	83	0	0	0	3	3	6	0	0	0	4	1	0
	94.62A	RG	5	21.4	17	67	0	0	0	8	1	15	0	0	0	8	0	1
	95.15A	RG	14	12.5	3	63	3	0	0	4	1	14	4	0	1	8	2	0
	95.15B	RG	10	12.4	7	77	1	0	0	1	1	15	3	0	0	1	0	1
	95.70A	RG	9	20.1	8	74	0	0	0	6	2	2	2	2	1	4	2	5
	95.70B	RG	2	20.0	18	78	0	0	0	3	0	5	2	0	2	6	2	2
	96.25	RG	8	17.8	11	77	0	0	0	2	1	7	2	3	0	7	0	1
	96.90	RG	8	16.1	7	56	2	0	0	4	1	16	3	4	2	12	0	0
	97.70	RG	2	17.8	17	65	1	0	0	7	0	13	0	2	1	11	0	0
	98.10A	RG	7	18.2	13	56	0	0	0	10	3	9	1	1	0	19	0	1
RB102	58.70	RG	2	20.1	14	87	0	0	0	3	1	6	1	0	0	1	1	0
	59.15A	RG	1	22.6	22	75	0	0	0	3	1	9	0	0	0	11	0	1
	59.15B	RG	3	23.6	22	71	0	0	0	9	1	10	0	0	0	8	0	1
	60.10	RG	2	23.7	14	77	0	0	0	4	2	5	1	0	0	11	0	0
	61.30A	RG	4	13.1	9	70	0	0	0	14	1	7	1	0	0	5	1	1
	61.52	RG	20	10.7	3	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB101	76.25	DFR	5	14.7	1	71	1	0	0	1	1	9	3	2	0	2	0	10
	77.90	DFR	3	16.7	13	86	2	0	0	2	1	6	0	0	0	3	0	0
	81.10	DFR	2	20.8	15	84	1	0	0	1	0	5	1	2	1	5	0	0
	82.10	DFR	1	20.3	11	80	2	0	0	5	0	8	1	0	0	1	2	1
	82.35B	DFR	25	4.8	tr	15	5	0	0	25	10	5	15	0	0	25	0	0
	104.42	DFR	2	22.4	16	88	0	0	0	3	0	3	1	0	0	5	0	0
RB102	67.60A	DFR	14	14.2	9	79	3	0	0	4	0	9	1	0	0	3	0	1
	85.90	DFR	3	17.7	10	78	2	0	0	3	0	8	3	0	0	2	1	3
	86.30	DFR	2	17.5	13	84	0	0	0	5	2	1	2	0	0	6	0	0
RB103	85.00A	DFR	25	6.0	tr	2	8	12	2	20	4	14	14	0	2	4	0	18
	96.20	DFR	25	7.9	tr	12	0	0	0	28	14	18	6	0	0	12	2	8
RB101	84.70C	UW		5.6	tr	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB102	88.83	UW		2.3	tr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
RB103	72.80	UW		8.2	tr	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	73.30A	UW		10.8	1	46	4	0	14	10	2	10	0	0	0	6	0	8
	91.27	UW		8.7	1	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB102	89.00	UPS	0	-	tr	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB103	66.30	UPS		8.1		0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	97.50	UPS	0	-	tr	2	3	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5

tr = Spur

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

POROSITÄTSTYPEN: RESULTATE DER DÜNNSCHLIFF-AUSZÄHLUNGEN

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 13**

Teufe in m	Gesteinsbeschreibung		Illit	Chlorit	Smectit	Ill/Sm
RB 101						
72.56A	Feinsandstein	RG	50-55	25-30	15-20	1-5
76.25	Feinsandstein	DFR	55-60	25-30	15-20	
84.70B	Ton-Grobsiltstein	UW	50-55	35-40	10-15	
95.15B	Mittelsandstein	RG	60-65	30-35	5-10	1-5
98.10A	Mittel- bis Grobsandstein	RG	60-65	20-25	10-15	1-5
104.42	Mittelsandstein	DFR	50-55	30-35	10-15	
RB 102						
57.50	Mergel-Grobsiltstein	UW	55-60	30-35	10-15	1-5
67.60B	Feinsandstein	DFR	55-60	30-35	10-15	
84.80	Feinsandstein	DFR	55-60	20-25	15-20	
89.00	Ton-Feinsandstein	UPS	60-65	25-30	10-15	1-5
RB 103						
52.30	Ton-Siltstein	UPS	50-55	10-15	30-35	1-5
71.20	Mergel	UPS	55-60	30-35	10-15	1-5
85.00A	Feinsandstein	DFR	40-45	35-40	10-15	1-5
91.27	Ton-Grobsiltstein	UW	35-40	35-40	20-25	1-5

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

MENGENVERHÄLTNISSE DER TONMINERALIEN IN DER FRAKTION <2µ

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 14**

Mineral		RB 101 48.10	RB 101 59.74	RB 101 70.45	RB 101 76.50	RB 101 89.25	RB 101 95.70	RB 101 98.10	RB 101 104.42	RB 101 114.20	RB 103 36.10	RB 103 54.60	RB 103 69.10	RB 103 70.60	RB 103 81.80	RB 103 90.30
Anatas		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
Granat		35	5	43	15	156	17	86	36	12	22	7	45	225	34	20
Total		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
*Andere		1	0	0	0	2	3	2	2	0	0	0	1	2	0	0
Piemontit		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Allanit		0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0
Zoisit		0	2	0	1	0	0	3	0	1	0	0	2	0	0	0
Klinozoisit		13	18	11	8	9	6	10	5	13	5	0	12	5	3	5
Epidot Aggregate		35	42	38	50	41	58	20	17	20	50	0	55	3	10	11
Epidot		25	18	31	18	16	20	34	24	21	26	0	17	13	36	14
Sphen		1	2	4	1	0	2	10	33	3	3	0	2	4	20	8
Staurolith		2	2	0	0	0	1	7	0	1	0	1	0	5	1	2
Rutil		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Apatit	Total	19	14	9	16	7	7	6	9	33	13	83	6	56	23	48
	gerundet kugelig	12	3	5	8	5	2	1	5	14	3	21	1	30	10	24
	angerundet	5	5	2	4	2	2	1	3	16	6	49	4	16	8	16
	gerundet prismatisch	0	2	2	3	0	3	0	1	0	3	5	0	4	3	4
	prismatisch	1	0	0	1	0	0	4	0	1	1	0	1	5	2	1
	angular	1	4	0	0	0	0	0	0	2	0	8	0	1	0	3
Turmalin	Total	1	1	6	4	0	0	1	4	5	1	14	2	7	1	6
	gerundet kugelig	0	1	1	0	0	0	0	2	3	0	4	1	2	0	0
	angerundet	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	2	0	3	0	4
	gerundet prismatisch	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	prismatisch	0	0	1	2	0	0	0	1	1	0	3	0	0	1	2
	angular	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	5	1	2	0	0
Zirkon	Total	3	1	1	2	24	3	5	5	1	1	2	3	5	5	6
	zoniert	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2
	angerundet kugelig	1	0	1	1	7	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0
	anhedral	1	0	0	0	6	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1
	subhedral, angerundet	1	0	0	0	5	1	1	2	0	0	0	1	2	3	2
	euhedral	0	1	0	0	4	0	4	2	1	0	1	1	2	0	1

Probe (cm)

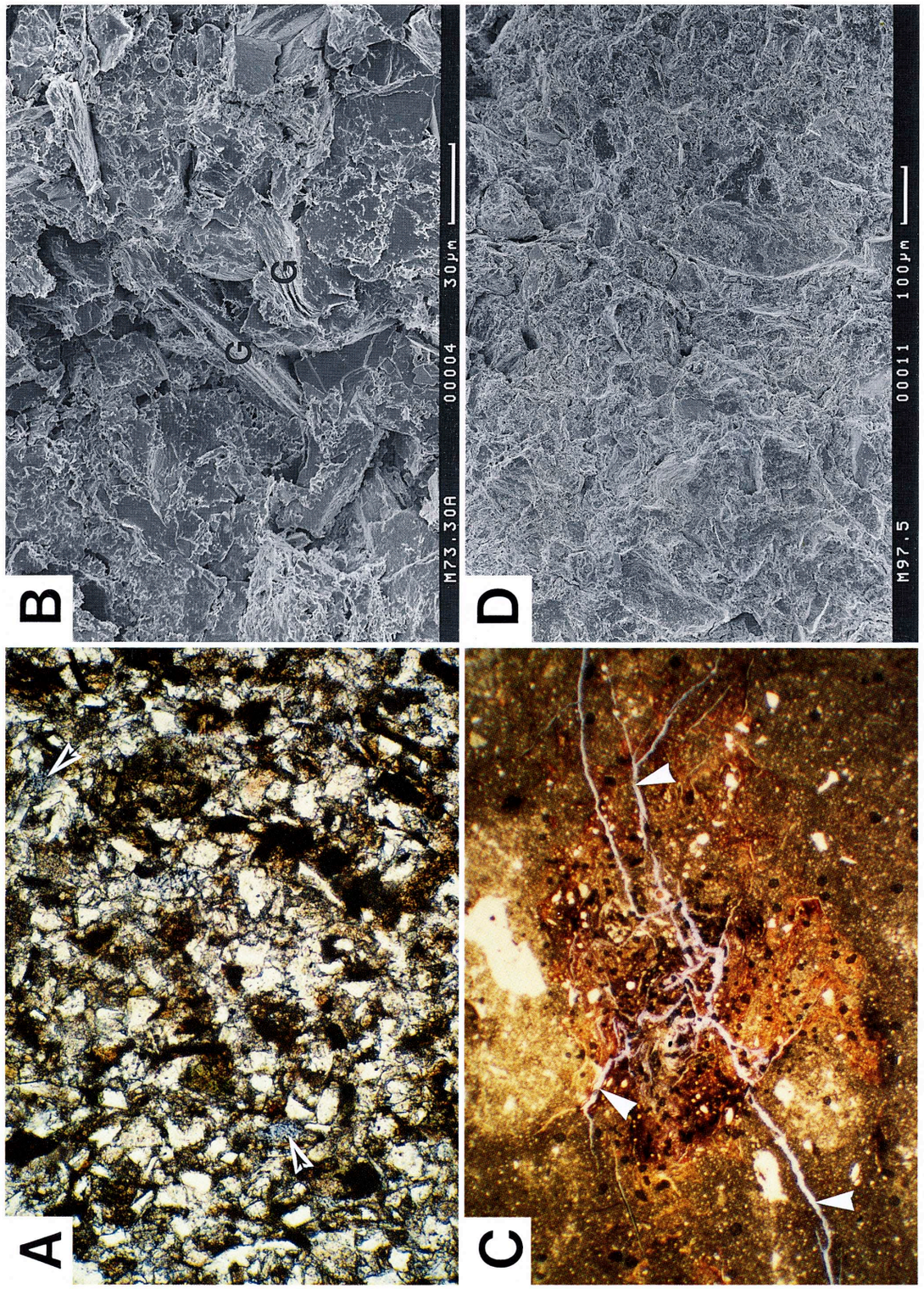
* Serpentin, Chromspinell, Pumpellyit, Prehnit, Chloritoid, Topas

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

ZUSAMMENSETZUNG DER SCHWERMINERAL-PROBEN
(FRAKTION 0.06 – 0.4 mm)

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 15**



Poren in Gesteinen des Uferwalls und der Ueberschemmungsebene

Fig. A: Korn-Lösungsporen (Pfeile, blauer Epoxiharz) in Uferwall-Feinsandstein. (RB 103-73.30A; Dünnschliff-Aufnahme; Fotobreite = 0.76mm

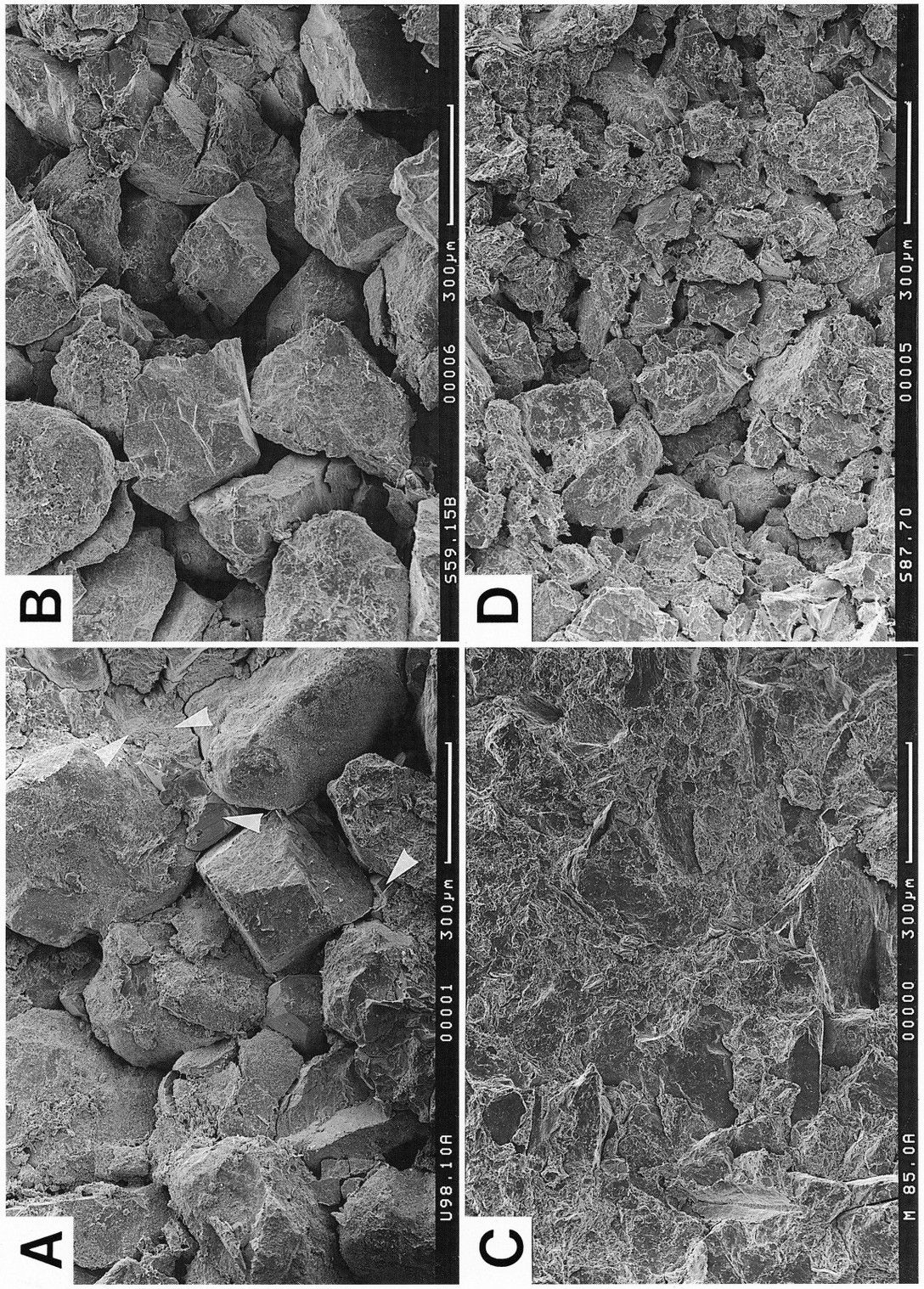
Fig. B: Uferwall-Feinsandstein mit erhöhtem Glimmergehalt, im Gegensatz zu Rinnengürtel- und Durchbruchsfächer- und -rinnen-Sandsteinen, sowie geringer Porosität. (RB 103-66.30; REM-Aufnahme)

Fig. C: Kluft-Porosität (Pfeile), der einzige Porentyp in Mergeln der Ueberschwemmungsebene. (RB 103-66.30; Dünnschliff-Aufnahme, Fotobreite = 7.57mm)

Fig. D: Extrem geringe Porosität in Sandstein der Ueberschwemmungsebene. (RB 103-97.5; REM-Aufnahme)

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA	TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41	
FOTOTAFEL: PORENEN IN GESTEINEN DES UFERWALLS UND DER ÜBERSCHWEMMUNGSEBENE.		
Untere Süsswassermolasse	DAT.: **Aug. 1990**	**BEILAGE** 16



Poröse und zementierte Sandsteine des Rinnengürtels und Durchbruchsfächers

Fig. A: Rinnengürtel-Sandstein mit geringer Porosität, da der primäre Porenraum mit intergranulärem Calcitzement gefüllt ist (Pfeile); vergleiche Fig. B. (RB 101, 69.10B; REM-Aufnahme)

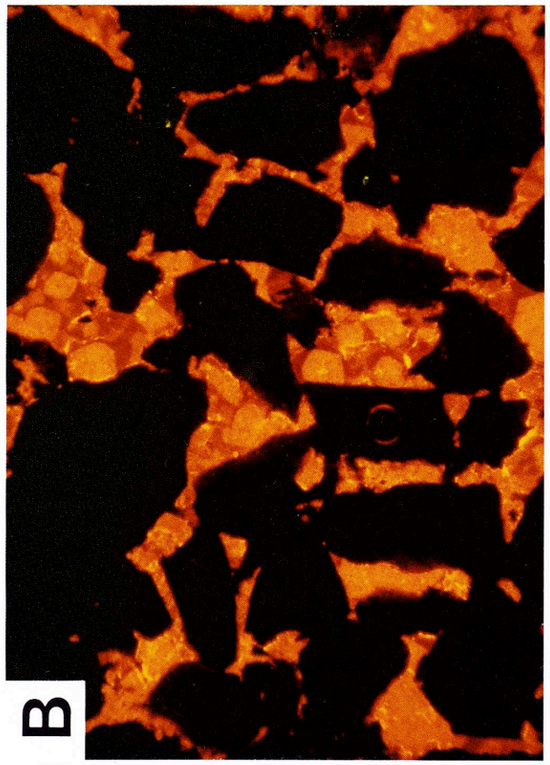
Fig. B: Rinnengürtel-Sandstein mit hoher Porosität, d.h. unzementiertem offenem Porenraum. (RB 102, 59.15B; REM-Aufnahme)

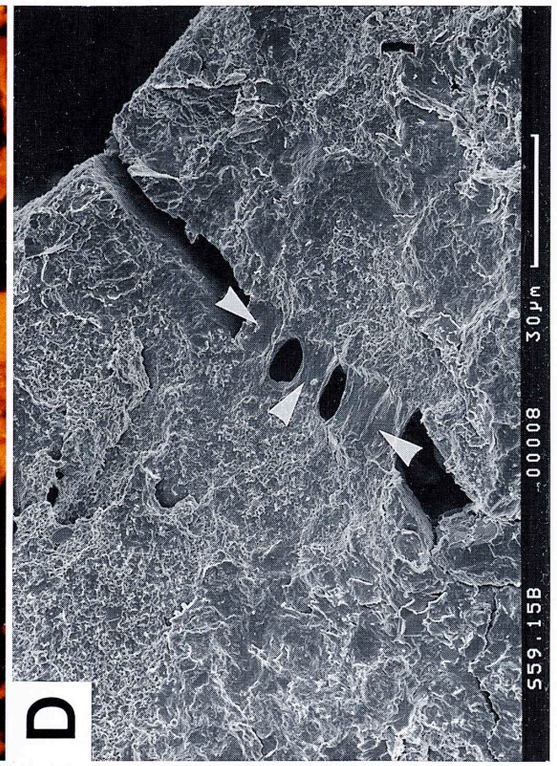
Fig. C: Feinsandstein des Durchbruchfächers mit geringer Porosität infolge Tonmatrix und intergranulärem Calcitzement; vergleiche Fig. D. (RB 103, 85.0A; REM-Aufnahme)

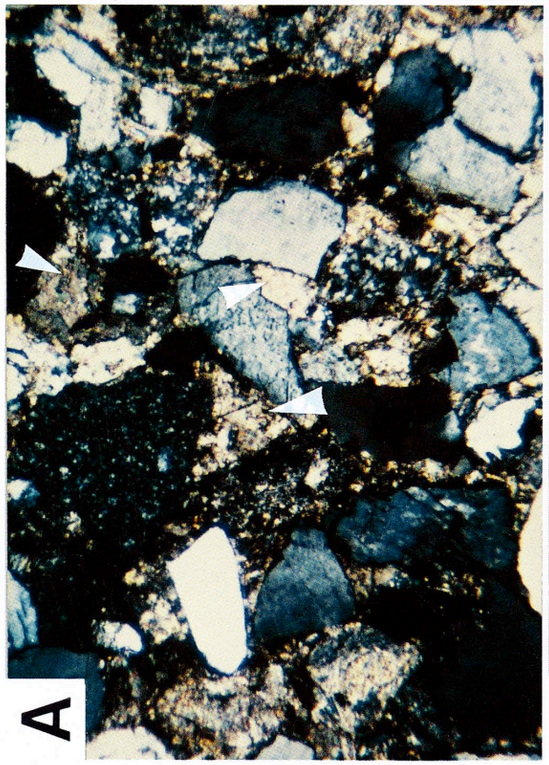
Fig. D: Feinsandstein des Durchbruchfächers mit hoher Porosität. (RB 101, 81.10; REM-Aufnahme)

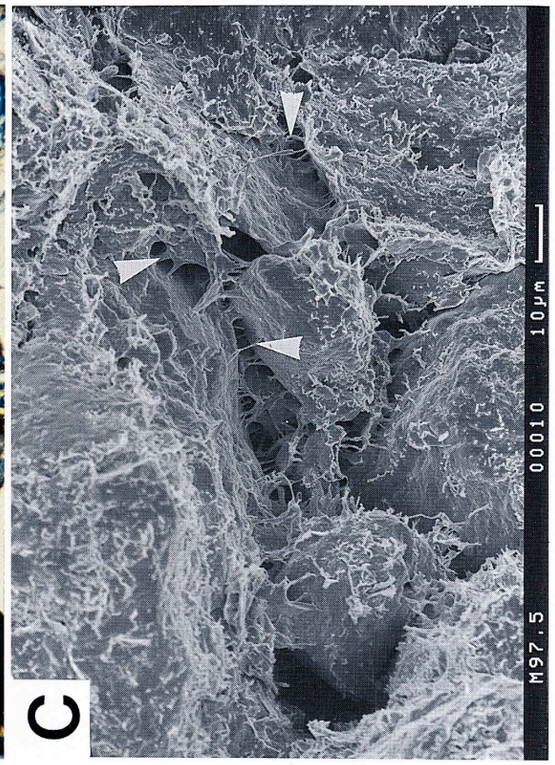
Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA	TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41	
FOTOTAFEL: PORÖSE UND ZEMENTIERTE SANDSTEINE DES RINNENGÜRTELS UND DES DURCHBRUCHSFÄCHERS		
Untere Süsswassermolasse	DAT.: **Aug. 1990**	**BEILAGE** 17









Authigene Minerale

Fig. A: Calcitzementierter Sandstein: Ausgefüllte Calcitkristalle (Pfeile) füllen den ursprünglichen, primären Porenraum fast vollständig.
(RB 101-72.56B, Rinnengürtel-Sandstein; Dünnschliff-Aufnahme, X Pol., Fotobreite = 1.7mm)

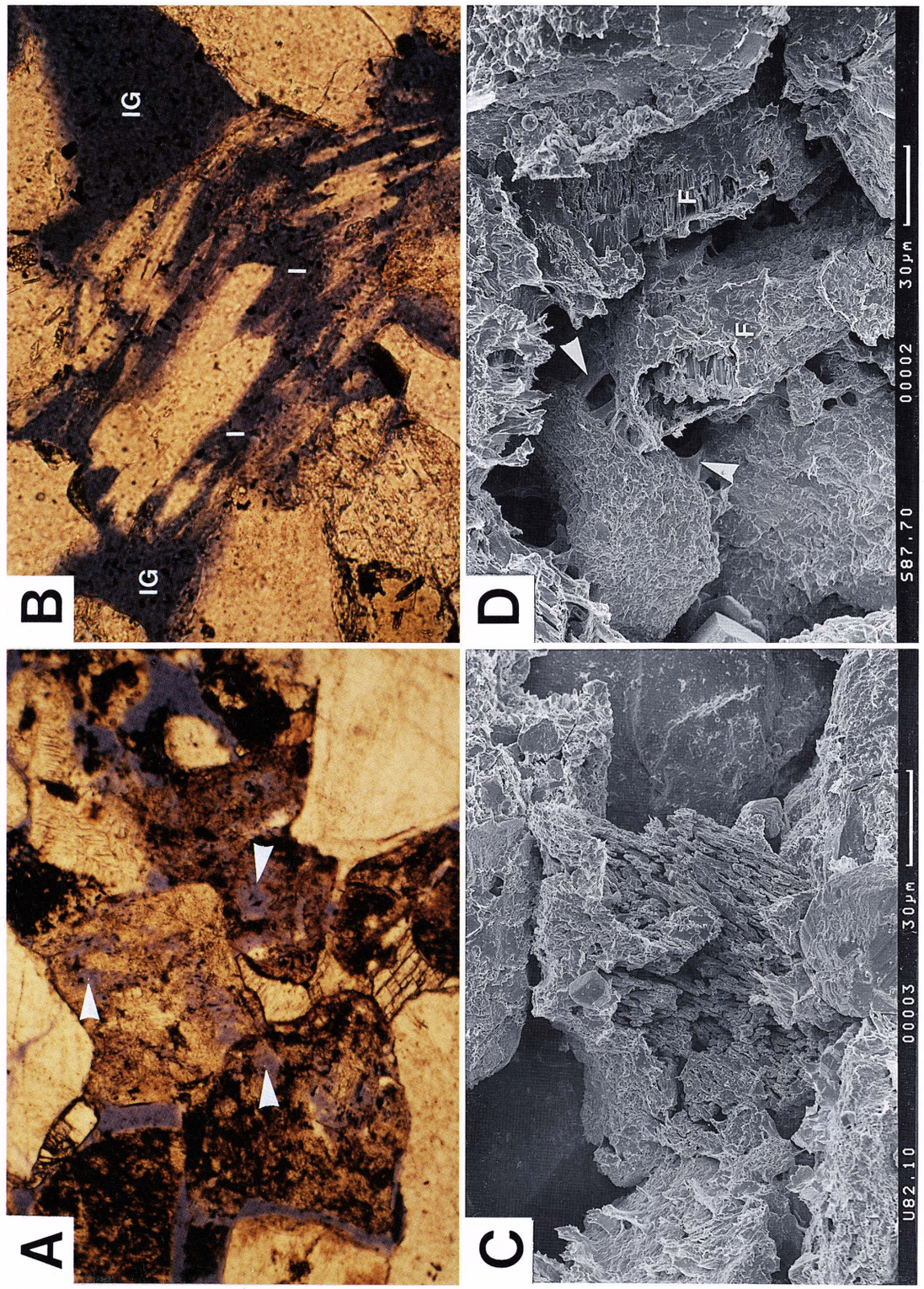
Fig. B: Kathodenlumineszenz-Aufnahme von Fig. A: Der orange bis rötlich lumineszierende Calcitzement zeigt ein zoniertes Kristall-Wachstum.

Fig. C: Authigene, fibröse illitische Tonmineralien (Pfeile) umhüllen Körner oder bilden Brücken zwischen den Komponenten.
(RB 103-97.5, UPS-Sandstein; REM-Aufnahme)

Fig. D: Illitische Tonmineralien innerhalb eines Risses in einer Komponente. Sie belegen, dass der Ton nach der Sediment-Kompaktion gewachsen ist.
(RB 102-59.15B, Rinnengürtel-Sandstein; REM-Aufnahme)

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA	TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41	
FOTOTAFEL: AUTHIGENE MINERALE		
Untere Süsswassermolasse	DAT.: **Aug. 1990**	**BEILAGE** 18



Lösungsporosität in Komponenten

Fig. A: Intragranuläre Lösungsporosität (Pfeile) in Gesteinsbruchstücken. Die Poren sind mit blau gefärbtem Härtungs-Epoxiharz gefüllt.
(RB 101-98.10A, RG-Sandstein; Dünnschliff-Aufnahme, Fotobreite = 1.34mm)

Fig. B: Intragranuläre Lösungsporosität (I) in einem Feldspatkorn. Die Lösung griff bevorzugt entlang von Zwillingsebenen an, was zu tafeligen Poren geführt hat. Daneben sind auch grosse intergranuläre Poren (IG) ausgebildet.
(RB 102-59.15A, RG-Sandstein; Dünnschliff-Aufnahme, Fotobreite = 0.37mm)

Fig. C: Intragranuläre Mikroporosität in einem teilweise gelösten Feldspatkorn (Zentrum).
(RB 101-82.10, DFR-Sandstein; REM-Aufnahme)

Fig. D: Teilweise gelöste Feldspatkörner (F) und illitische Tonmineralien (Pfeile). Weil der Ton nie in Poren von gelösten Komponenten zu finden ist, muss er vor der Lösung entstanden sein.
(RB 102-87.70, DFR-Sandstein, REM-Aufnahme)

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA	TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41	
FOTOTAFEL: LÖSUNGSPOROSITÄT IN KOMPONENTEN		
Untere Süsswassermolasse	DAT.: **Aug. 1990**	**BEILAGE** 19

Radelfingen bei Aarberg BE	587.600/208.500
Schüpfen BE	594.500/209.750
Rapperswil BE	597.750/213.200
Pieterlen Bielersee BE	592.200/224.000
Schachen W Gerlafingen SO	608.700/223.750
Langenthal BE: RB 101	624.810/227.800
RB 102	624.580/227.700
RB 103	625.220/226.620
Roggwil BE	630.150/230.200
St. Urban LU	631.500/228.560
Fisibach AG	673.100/267.500

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA	**TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**	
LISTE DER UNTERSUCHTEN LOKALITÄTEN MIT KOORDINATEN		
Untere Süsswassermolasse	DAT.: **Aug. 1990**	**BEILAGE** 20

Messziel	Methodik	Architektur-Element				
		RG	DFR	UW	UPS	Gesamt
Mineralogie	Röntgendiffraktometrie	29	17	10	9	65
Tonmineralogie	Röntgendiffraktometrie	3	5	3	3	14
Calcit/Dolomit	Coulom. Röntgendiffrakt.	29	17	10	9	65
Organischer Kohlenstoff	Coulomat	29	17	10	9	65
Porosität/ Dichte	Auftriebsverfahren/ Pyknometrie	28	17	9	1	55
Permeabilität	N_2-Durchströmverfahren	27	17	9	1	54
Petrographie, Gefüge, Fazies (quantitativ)	Durchlichtmikroskop	12	6	3	-	21
Petrographie, Gefüge, Fazies (qualitativ)	Durchlichtmikroskop	12	7	3	2	24
Poren u. Mineralneubildung	Rasterelektronenmikroskop					10
Schwerminerallien	Abtrennen, Durchlichtmikroskop	4	11			15

Beilage zum Geologischen Bericht Nr. 13 der Landeshydrologie und -geologie

NAGRA **TECHNISCHER BERICHT NTB 90-41**

LABORPROGRAMM

Untere Süsswassermolasse DAT.: **Aug. 1990** **BEILAGE 21**

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 Sondierbohrung Böttstein - Geologie	Fr. 70.-
Nr. 2	1987	A. Escher, H. Masson, A. Steck Coupes géologiques des Alpes occidentales suisses	Fr. 10.-
Nr. 3	1988	A. Pugin Carte des isohypses de la base des sédiments du Quaternaire	Fr. 10.-
Nr. 4	1988	M. Burkhard Horizontalschnitt des Helvetikums der Westschweiz	Fr. 10.-
Nr. 5	1988	A. Matter, Tj. Peters, Ch. Isenschmid, H.-R. Bläsi, H.-J. Ziegler Sondierbohrung Riniken - Geologie	Fr. 70.-
Nr. 6	1988	A. Matter, Tj. Peters, H.-R. Bläsi, J. Meyer, H. Ischi, Ch. Meyer Sondierbohrung Weiach - Geologie	Fr. 70.-
Nr. 7	1988	A. Escher Structure de la nappe du Grand-Saint-Bernard entre le val de Bagnes et les Mischabel	Fr. 10.-
Nr. 8	1988	A. Matter, Tj. Peters, H.-R. Bläsi, F. Schenker, H.-P. Weiss Sondierbohrung Schafisheim - Geologie	Fr. 70.-
Nr. 9	1989	Tj. Peters, A. Matter, H.-R. Bläsi, Ch. Isenschmid, P. Kleboth, Ch. Meyer, J. Meyer Sondierbohrung Leuggern - Geologie	Fr. 70.-
Nr. 10	1989	Tj. Peters, A. Matter, J. Meyer, Ch. Isenschmid, H.-J. Ziegler Sondierbohrung Kaisten - Geologie	Fr. 70.-
Nr. 11	1989	P. Jeanbourquin, M. Burri La zone de Sion-Courmayeur dans la région du Simplon	Fr. 10.-
Nr. 12	1990	Facies and Origin of Triassic Evaporites from the NAGRA Boreholes, Northern Switzerland	Fr. 60.-