

Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen

Von BEAT KELLER¹⁾

ZUSAMMENFASSUNG

Gemäss aktuellem Kenntnisstand lassen sich im Schweizerischen Molasse-Becken fünf hydrogeologische Einheiten unterscheiden: (1) lokaler bis regionaler Aquifer im verkarsteten Mesozoikum; (2) Untere Meeresmolasse (UMM, inkl. Helvetischer Flysch p.p.) mit vereinzelt wasserführenden Schichten; (3) Untere Süsswassermolasse (USM) mit einzelnen wasserführenden Schichten; (4) Obere Meeresmolasse (OMM) als regionaler Aquifer und (5) Obere Süsswassermolasse (OSM) mit einzelnen wasserführenden Schichten. Infolge einer Durchmischung von miozänen marinen Formationswässern mit jüngeren meteorischen Wässern liegen heute im östlichen Molasse-Becken drei übereinandergestapelte Grundwasser-Einheiten mit unterschiedlichem Chemismus vor, welche die lithostratigraphischen Grenzen diskordant durchschneiden.

Die hohen Anforderungen unserer technischen Gesellschaft (Abfalldeponien, Suche nach Grundwasser und Kohlenwasserstoffen, Nutzung der Geothermie etc.) verlangen nach einer verbesserten Kenntnis der Hydrogeologie des Molasse-Beckens. Aber eine weiterführende hydrogeologische Charakterisierung wird durch den stark heterogenen Aufbau des Lithosoms sowie durch den ungenügenden Wissenstand über die Diagenese und die tektonische Überprägung erschwert.

Die Konzepte der Fazies-Architektur und der Grössenhierarchie der sedimentären Einheiten stellen geeignete Grundlagen für eine verbesserte Quantifizierung der hydrogeologischen und petrophysikalischen Eigenschaften der Molasse dar. Eine praktische Anwendung dieser Konzepte wurde in der Schweiz erstmals für die distale USM versucht. Basierend auf Feld- und Laborstudien kann der Aufbau des Lithosoms der distalen USM durch fünf grundlegende Architektur-Elemente dargestellt werden. Diese unterscheiden sich durch ihre Geometrien und Grössenordnungen, ihren charakteristischen faziellen Aufbau und ihre Genese, aber auch durch ihre petrophysikalischen Eigenschaften. Es sind dies: (1) Rinnengürtel (RG), (2) Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR), (3) Uferwälle und distale Überschwemmungssande (UW), (4) Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) sowie (5) lakustrische Ablagerungen (LAK). Die Untersuchungen der petrophysikalischen Eigenschaften (Porosität und Permeabilität) identifizierten die Rinnengürtel (RG) als hauptsächliche und die damit verbundenen Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) als untergeordnete Aquifere. Demgegenüber wirken die Uferwälle (UW), die Ablagerungen der Überschwemmungsebene (UPS) und die lakustrischen Sedimente (LAK) als Aquitarden oder gar Aquifugen.

Die Ergebnisse neuerer sedimentologischer Untersuchungen erlauben eine überblicksmässige Darstellung der synsedimentären Architektur des alpinen Vorland-Beckens und die Ausscheidung wichtiger hydrostratigraphischer Einheiten mit grundlegenden Architektur-Elementen. Im verkarsteten mesozoischen Untergrund liegt über weite Bereiche ein kommunizierendes System von hochpermeablen Makroporen vor. Die UMM dagegen gliedert sich in vier wesentliche hydraulische Einheiten. Turbiditfächer und Ablagerungen der Strandebene bilden Sedi-mentkörper mit guten primären Permeabilitäten. Die volumenmässig dominanten pelitischen Beckensedimente besitzen jedoch kaum primäre Durchlässigkeiten, während die Deltakörper unterschiedlich permeabel sind. Im Kontrast dazu dominieren in der OMM primär gut durchlässige sandige Ablagerungen der wattenmeerartigen Meeresstrasse und der wellendominierten Strandebenen. Während die pelitischen Sedimente der Küstenwatten und interdeltischen Buchten als schlecht durchlässige hydrostratigraphische Einheiten anzusehen sind, liegen in

¹⁾ R. Mengis + H. G. Lorenz AG, Schlossstrasse 3, CH-6005 Luzern.

den Deltakörpern heterogene Permeabilitätsverhältnisse vor. Die primären hydrostratigraphischen Architekturen der USM und OSM sind sich generell sehr ähnlich, sie lassen sich in vier prinzipielle Einheiten unterteilen: alluviale Schuttfächer mit ursprünglich hochpermeablen konglomeratischen Schüttungsloben, einen Übergangsbereich mit gut durchlässigen Deckensandsteinen und Rinnengürteln, die Alluvialebene mit den oben beschriebenen prinzipiellen Architektur-Elementen RG, DFR, UW und UPS sowie die axialen Hauptentwässerungssysteme mit ihren stark amalgamierten Rinnengürteln guter primärer Durchlässigkeit. Während in der USM gering permeable lakustrische Sedimente (LAK, exkl. verkarstete Süßwasserkalke) vorwiegend im westlichen distalen Beckenteil vorkommen, finden sich derartige Ablagerungen in der OSM als mächtigere Einschaltungen häufig auch in proximalen Faziesräumen. Die bis heute bekannten Untersuchungen über die Diagenese schreiben dem Schweizerischen Molasse-Becken eine geringe diagenetische Reife zu. Sie schliessen zudem auf eine frühe Kalzit-Zementation und zeigen, dass die Sedimente infolge der mechanischen Kompaktion heute generell eher geringe offene Porositäten besitzen. Die gegen den Alpenrand hin zunehmende tektonische Deformation ist gebietsweise für gute Fissurations-Porositäten verantwortlich.

Im vereinfachten geologischen Schnitt durch das Molasse-Becken lassen sich von N nach S zusammenfassend vier hydrogeologisch relevante Abschnitte unterscheiden: (I) Zone mit guter primärer Porosität und teilweise bedeutender Fissurations-Porosität in der tektonisierten Subjurasischen Molasse, (II) Zone mit mittlerer primärer Porosität und eher geringer Fissurations-Porosität im Gebiet der Mittelländischen Molasse, (III) Zone mit Fissurations-Porosität und schwacher primärer Porosität im Bereich der gefalteten Molasse und (IV) Zone mit teilweise guter Fissurations-Porosität und unbedeutender primärer Porosität in der Subalpinen Molasse.

Die oberflächennahe Zone mit «Verwitterungs-» oder «Druckentlastungsklüftung» und den damit auftretenden sekundären Porositäten bildet zudem über weite Bereiche des Mittellandes eine bis mehrere Meter mächtige hydraulische Einheit mit guten Durchlässigkeitseigenschaften.

ABSTRACT

Current understanding permits differentiation of five hydrogeological units in the Swiss Molasse Basin: (1) a local to regional aquifer in karstified Mesozoic strata of the basal foredeep unconformity; (2) the Lower Marine Molasse (UMM and Helvetic Flysch p.p.), which contains a few water-bearing beds; (3) the Lower Freshwater Molasse (USM) with individual water-bearing beds; (4) a regional aquifer in the Upper Marine Molasse (OMM); (5) the Upper Freshwater Molasse (OSM) with some individual water-bearing beds. Mixing of Miocene marine formation waters with more recent recharged meteoric waters is responsible for the stacking of three chemically distinct ground-water units in the Molasse Basin; these cut discordantly across lithostratigraphic boundaries. Improved understanding of the hydrogeology of the Molasse Basin is essential in view of the specialised needs of our technological society (waste disposal, search for ground-waters and hydrocarbons, geothermal applications etc.). However, improved hydrogeological characterisation is hindered both by strongly heterogeneous nature of the sedimentary succession and insufficient understanding of its modification as a result of diagenesis and tectonic processes.

The concepts of facies architecture and hierarchy of scales provide foundations for the quantitative assessments of the hydrogeological and petrophysical properties of the Molasse. The first practical application of these concepts in Switzerland was in a study of the distal USM. Field and laboratory work allowed the recognition of five basic architectural elements in this sequence, each differentiated by their geometry, dimensions, facies and origin, as well as on the basis of their petrophysical properties. These architectural elements are: (1) meander belts (RG); (2) crevasse splays and channels (DFR); (3) levees and distal splays (UW); overbank deposits, paleosols and swamp beds (UPS), and (5) lacustrine deposits (LAK). Petrophysical investigations of porosity and permeability indicate that the meander belt sandstones (RG) and the crevasse splays and channels (DFR) connected to them respectively form principal and subsidiary aquifers in the succession. In contrast, the levee deposits (UW), overbank deposits, paleosols and swamp beds (UPS) and lacustrine deposits (LAK) form aquitardes or even aquifuges.

The results of more recent sedimentological investigations allow an overview of the sedimentary architecture of the Molasse Basin and permit the distinction of the major hydrostratigraphic units, each with their component architectural elements. The karstified Mesozoic shows an extensive interconnected system of macropores in the subsurface. In contrast, the Lower Marine Molasse (UMM) is subdivided in four main hydraulic units. Submarine fan turbidites and beach deposits form sediment bodies with good primary permeabilities. In contrast, the volumetrically dominant pelitic basinal deposits contain virtually no primary porosities, while deltaic deposits show variable perviousness. Sandy deposits with good primary permeability dominate in the Upper Marine

Molasse (OMM); these were laid down in tidal straits and wave-dominated shorelines. While pelitic tidal flat deposits and interdeltic and interdistributary bay facies form hydrostratigraphic units with poor permeabilities, deltaic packages show heterogeneous permeability characteristics. The primary hydrostratigraphic architectures of the Lower (USM) and the Upper Freshwater Molasse (OSM) are in general very similar; both may be subdivided into four main units: alluvial fans with highly permeable conglomerate lobes, transition zones with pervious sandstones and channel belts, alluvial plains with the architectural elements described above (RG, DFR, LS, UPS, LAK) as well as the axial drainage system with strongly amalgamated channel belt deposits showing good primary porosities. While the low-permeability lacustrine deposits of the USM occur mainly in distal basin areas in the western part of the basin, comparable facies in the OSM also commonly occur in considerable thickness interbedded with proximal facies.

Diagenetic studies to date assign the deposits of the Swiss Molasse Basin a low diagenetic maturity. These studies have recognised early calcite cementation, and conclude that the relatively low open porosities result from mechanical compaction. An increase in tectonic deformation occurs towards the Alpine front and is locally responsible for good fissure porosity. Simplified geological cross-sections running south to north across the Molasse Basin allow the recognition of four hydrogeologically significant zones: (I) tectonised Subjurassic Molasse – zone with good primary porosity and local significant fissure porosity; (II) Plateau Molasse – zone of moderate primary porosity and relatively low fissure porosity; (III) Folded Molasse – zone showing fissure porosity but weak primary porosity, and (IV) Subalpine Molasse – zone with locally good fissure porosity but negligible primary porosity.

Many areas also show a near-surface layer with secondary porosity and jointing resulting from “weathering” or “exfoliation”; this layer forms a permeable hydraulic unit over much of the Mittelland (Swiss Plateau).

1. Einleitung

Das zwischen dem Alpenbogen und dem Juragebirge gelegene Schweizerische Mittelland gehört heute zu den weltweit am dichtesten besiedelten Gebieten. Mit der stetigen Zunahme der Bevölkerungsdichte und der anwachsenden Konzentration an Gewerbe-, Industrie- und Dienstleistungsbetrieben stiegen auch die technischen Anforderungen und das ökonomische Interesse gegenüber dessen Felsuntergrund, der durch die Ablagerungen der Molasse aufgebaut wird (Figs. 1 & 2).

So wird in diesem auch heute noch nach Erdöl und vor allem Erdgas gesucht, obwohl die einzige produktive Bohrung Entlebuch nur einen bescheidenen Erfolg gezeitigt hat. In vermehrtem Masse wird derzeit auch das Felsgrundwasser erschlossen und zum Beispiel in Zürich (Aqui und Tiefenbrunnen) oder in Matran (FR) aus der Oberen Meeresmolasse oder in Eglisau (ZH) teilweise aus der Unteren Süsswassermolasse gefördert. Die Suche nach unkontaminiertem Felsgrundwasser ist in jüngster Zeit vor allem in Anbetracht der verbreiteten Verschmutzung von oberflächennahem Lockergesteinsgrundwasser – insbesondere durch die Landwirtschaft (Nitratproblem) – intensiviert worden. Im weiteren rückt auch das geothermische Potential der Molasse zunehmend ins Zentrum des ökonomischen Interesses und wird immer umfassender genutzt. Nebst der Ausbeutung dieser natürlichen Ressourcen dienen die Molasseablagerungen zudem vermehrt als Wirtgestein für Abfälle aller Art. Und nicht zuletzt kommt der Molasse grosse Bedeutung auch als Baugrund und als Rohstofflieferant (Tongruben, Steinbrüche) zu.

Diese vielfältigen Anforderungen an den Felsuntergrund dieses dicht besiedelten Gebietes bringen es mit sich, dass in der Zukunft erhebliche Zielkonflikte entstehen können. Werden doch beispielsweise einerseits in der Molasse die Grundwasserleiter (Aquifere) genutzt, stellen bestehende und geplante Abfalldeponien zugleich hohe Anforderungen an deren Grundwasserstauer (Aquifugen) und Grundwasserhemmer (Aquitarden oder Aquicluden; Definitionen nach Bates & Jackson 1980). Mit einem umfassenden Bewirtschaftungskonzept liesse sich potentiellen negativen Auswirkungen entgegentreten

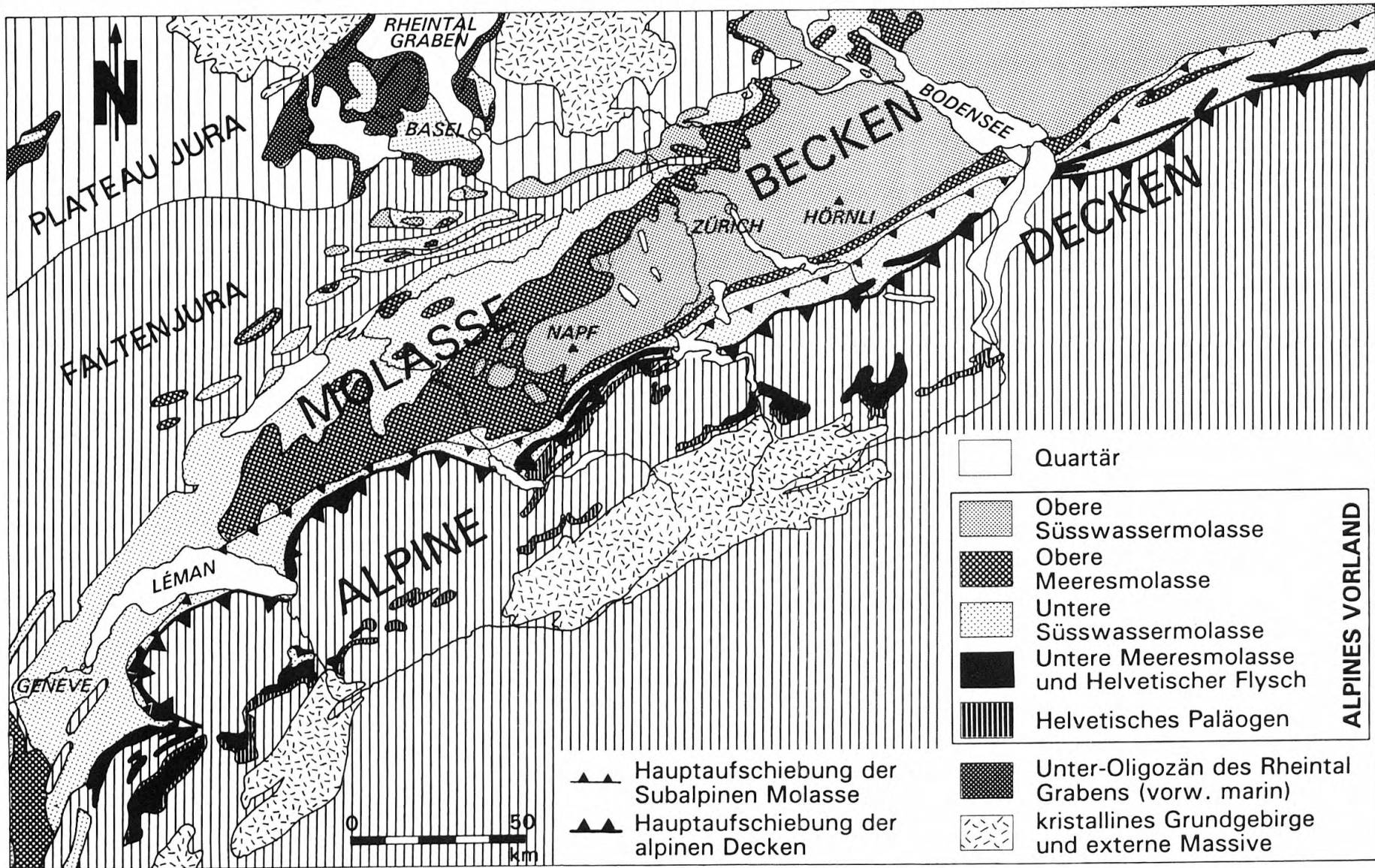


Fig. 1. Geologische Übersichtskarte des Molasse-Beckens (generalisiert nach Spicher 1980).

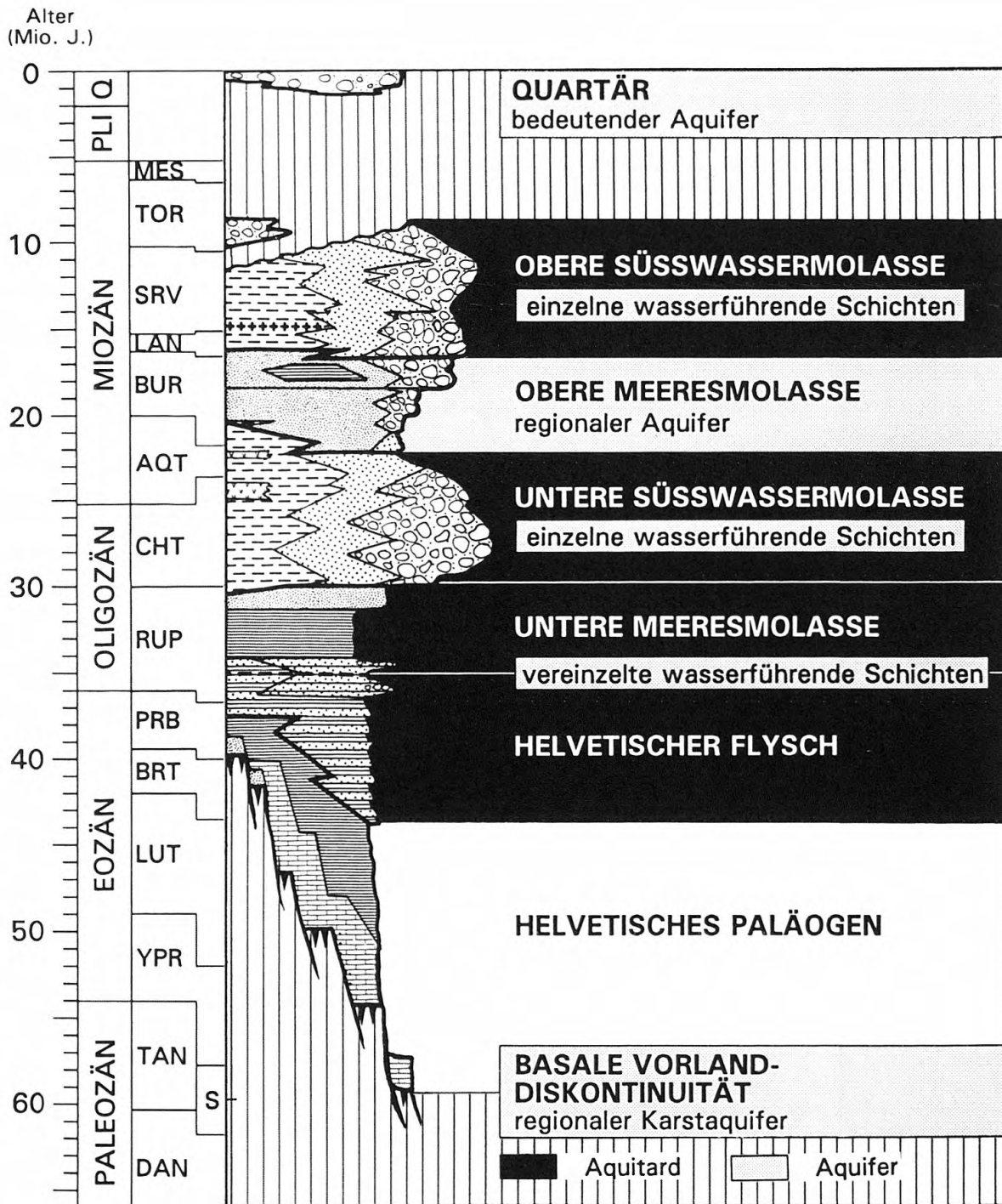


Fig. 2. Stratigraphisches Sammelprofil des alpinen Vorlandes und aktueller Kenntnisstand über die hydrogeologischen Eigenschaften (Stratigraphie nach Keller 1989 sowie Daten von Lateltin 1988 und Herb 1988, Hydrogeologie nach Parriaux 1981 und Nagra 1988, chronostratigraphische Gliederung nach Haq et al. 1988 [links] und Berggren et al. 1985 [rechts]).

– freilich bedarf es dazu einer umfassenden Kenntnis der Gesteinseigenschaften, insbesondere der hydrogeologischen.

2. Aktueller Wissensstand und Problematik

In den vergangenen Dekaden wurden die petrophysikalischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Molasse-Beckens durch verschiedene Studien untersucht. Die Hauptziele dieser Untersuchungen waren vor allem die Erkundung von Erdöl- und Erdgas (Zusammenfassungen vgl. z. B. Kopp 1955, Büchi 1971, Weidmann 1991), die Erfassung der lokalen und regionalen Grundwasserverhältnisse (z. B. Obere Süsswassermolasse des Murgtales TG durch Balderer 1979, 1983, 1989, Molasse des Broye-Beckens durch Parriaux 1981 sowie Obere Meeresmolasse der Westschweiz durch Thierrin 1988). In neuerer Zeit kam auch die Abklärung einer Nutzung geothermischer Energie (z. B. Pasquier 1977, Rybach et al. 1980, Bew 1981) sowie die Erforschung der Eigenschaften als Deponieuntergrund hinzu. Die Ergebnisse aller dieser Arbeiten ergaben eine insgesamt gute Kenntnis der regionalen hydrogeologischen Eigenschaften der Molasseablagerungen. In Jäckli & Kempf (1972, 1980), Bew (1981) und Nagra (1988) ist der aktuelle Wissensstand über die hydrogeologischen Eigenschaften der Molasse zusammenfassend dargestellt. Zusätzliche Detailinformationen geben verschiedene kleinere Publikationen (z. B. Büchi 1975, Häberle 1990). Den Darstellungen von Pasquier (1977), Parriaux (1981) und Nagra (1988) zufolge lassen sich im Schweizerischen Molasse-Becken inklusive dessen basalen Vorland-Diskontinuität²⁾ fünf hydrogeologische Einheiten unterscheiden (Fig. 2):

- I *Verkarstetes Mesozoikum*:
regionaler Karstaquifer mit partiell grosser Wasserwegsamkeit;
- II *Untere Meeresmolasse (inkl. Helvetischer Flysch p.p.)*:
vorwiegend wasserstauend mit vereinzelt wasserführenden Schichten als Sandsteinbänke mit Kluftporosität;
- III *Untere Süsswassermolasse*:
grundwasserhemmend mit einzelnen wasserführenden Schichten als gröbere Sandsteine und Konglomerate ehemaliger Flussrinnen, in vertikaler Richtung tw. grundwasserstauend;
- IV *Obere Meeresmolasse*:
regionaler Aquifer;
- V *Obere Süsswassermolasse*:
grundwasserhemmend mit einzelnen wasserführenden Schichten als gröbere Sandstein- und Nagelfluhkörper ehemaliger Flussrinnen und Schuttfächer, in vertikaler Richtung tw. grundwasserstauend.

²⁾ Nach dem Plattentektonik-Konzept von Bally & Snelson (1980) werden alle über der basalen Vorland-Diskontinuität (basal foredeep unconformity) abgelagerten Sedimente der Beckenfüllung dem Vorland, resp. der Vortiefe (foredeep) zugerechnet. Die beiden jüngeren Abschnitte dieser Entwicklung werden in der klassischen, teilweise auch in der neueren Literatur als «Flysch» und «Molasse» bezeichnet. Verschiedene Autoren (z. B. Bally & Snelson 1980, Miall 1984) betrachten diese Bezeichnungen jedoch infolge ihrer mangelnden Definition, der oft falschen Anwendung und der Schwierigkeit, sie auf andere Vorland-Becken zu übertragen, als aufgegeben. Da sie in der Schweiz aber als geläufige lithostratigraphische Bezeichnungen gelten und hier zudem eine brauchbare Unterteilung der Vorlandsedimente erlauben, werden sie in diesem Artikel im herkömmlichen Sinne (Trümpy 1980) verwendet.

Generell werden der Oberen Süsswassermolasse und der Unteren Süsswassermolasse eine geringe Wasserführung und ein grosses Rückhaltevermögen für gelöste chemische Stoffe zugeschrieben.

Daneben ist auch die grosse hydrogeologische Bedeutung der oberflächennahen *Verwitterungszone mit sekundärer Lösungs- und Kluftporosität* bekannt (z.B. Pasquier 1977, Bew 1981, Parriaux 1981). Letztere zeigt vor allem im alpennahen Bereich des Molasse-Beckens Wirkung und überwiegt dort die übrige Porenzirkulation meist um ein Vielfaches.

Verschiedene Untersuchungen über die Grundwasseraustritte (Parriaux 1981, Balderer 1982, Thierrin 1988) belegen, dass in der Molasse folgende *Quellentypen* dominieren: (a) Schichtquellen entlang lithologischer Diskontinuitäten zwischen Grundwasserleitern (Sandsteine, Konglomerate, verkarstete Süsswasserkalke) und -stauern (Ton- und Schlammsteine, Mergel), (b) punktförmige Kluftquellen (meist aus Entlastungs- oder Verwitterungsklüftung) und (c) Quellen aus der Verwitterungszone (mit sekundärer Porosität und Klüftung).

Aufgrund umfangreicher Auswertungen von Hydrochemie- und Isotopenanalysen weiss man heute auch, dass im nordostschweizerischen Molasse-Becken drei übereinander gestapelte *Grundwasser-Einheiten* vorkommen, welche die lithostratigraphischen Grenzen des Molasse-Beckens diskordant durchschneiden: Na – Cl-Wässer in der Tiefe, Na – HCO₃-Wässer im mittleren sowie Ca – Mg – HCO₃-Wässer im oberen Bereich (Nagra 1988, Schmassmann 1990, Balderer 1990, Pearson et al. 1991). Diese verschiedenen stratifizierten Wassertypen entstanden vermutlich infolge der Durchmischung von marinen miozänen Formationswässern mit pleistozänen und jüngeren, von der Oberfläche her eingesickerten Meteorwässern.

Probleme mit undichten Deponien (z. B. Köliken AG, Teufstal BE), Misserfolge bei der Forschung nach Kohlenwasserstoffen und trockene Bohrungen bei der Grundwassersuche (z. B. Fehraltdorf ZH, Dickiwald bei Horw LU), aber auch grosse Unsicherheiten bei der Modellierung des regionalen Grundwasserflusses machen deutlich, dass der aktuelle Wissensstand über die petrophysikalischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Molasse-Beckens noch ungenügend ist und den Anforderungen der Zukunft nur in bedingtem Masse gerecht wird.

Als wichtigste Erschwernisse bei der hydrogeologischen Charakterisierung des Molasse-Beckens sind zu nennen:

- der *stark heterogene Aufbau* des Lithosoms,
- die *wenig bekannte Diagenese* sowie
- die *ungenügenden Kenntnisse der tektonischen Überprägung*.

Damit sich die hydrogeologischen Eigenschaften und das hydraulische Verhalten der Molasse in Zukunft jedoch sicherer prognostizieren lassen, muss das Grundwissen über die Stratigraphie, Sedimentologie, Petrographie sowie über die Diagenese und die Tektonik wesentlich erweitert werden. Mit anderen Worten, um zuverlässige stochastische Modellierungen durchführen zu können, sollten die Möglichkeiten einer deterministischen Bestimmung der Eingangsparameter durch Feld- und Laborstudien möglichst umfänglich ausgeschöpft werden. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die numerische Simulation zur “quantification of one’s own prejudice” wird (van de Graaff & Ealey 1989).

3. Grundlagen einer Quantifizierung der hydrogeologischen und petrophysikalischen Eigenschaften der Molasse

Umfassende Quantifizierungen und Modellierungen der hydrogeologischen und petrophysikalischen Eigenschaften von Sedimentgesteinen werden nicht nur in der klassischen Hydrogeologie, sondern ebenso in der Erdölgeologie durchgeführt. In jüngster Zeit sind diesbezüglich vor allem in letzterer neue Ansätze und Konzepte für die Quantifizierung erarbeitet worden, die sich auch auf die heterogenen Molasse-Ablagerungen anwenden lassen. Im Vordergrund stehen dabei die *Methode der Fazies-Architektur* (Miall 1985) sowie das *Konzept der Grössenhierarchie* (Haldorsen 1983, Miall 1988).

Grundlegend für die hydrogeologische Charakterisierung eines heterogenen Lithosoms ist dessen Zerlegung in seine prinzipiellen sedimentären Bausteine – die sogenannten *Architektur-Elemente*. Derartige Architektur-Elemente zeichnen sich aus durch eine typische dreidimensionale Geometrie mit entsprechenden Grenzflächen, einen kennzeichnenden faziellen Aufbau, eine spezifische Grössenordnung sowie eine charakteristische Genese (Miall 1985; Fig. 3). Typische Architektur-Elemente im Sinne Mialls sind beispielsweise sandige Rinnenfüllungen oder Gleithangablagerungen von Flüssen.

Sowohl in der sedimentologisch-faziellen Analyse als auch bei der petrophysikalischen Charakterisierung spielen zudem die Grössenbeziehungen der architektonischen Bausteine, bzw. des untersuchten Gesteinsvolumens, eine wichtige Rolle. So etwa bauen Sandkörner Grossrippeln auf, die ihrerseits Bauelemente der nächst höheren Ordnung darstellen – in unserem Beispiel vielleicht von Gleithangablagerungen. Diese wiederum sind Teil eines ganzen Rinnengürtels, der seinerseits einer der architektonischen Bausteine einer ganzen Formation bildet (Fig. 4).

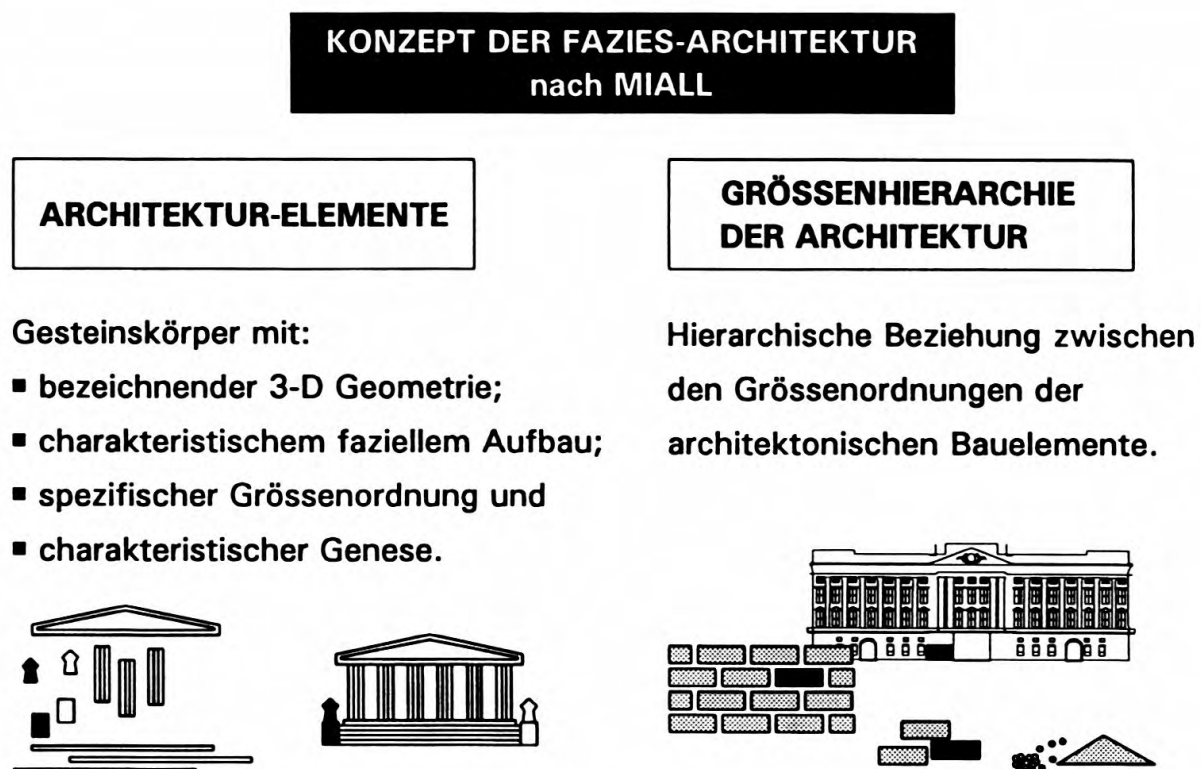


Fig. 3. Konzept der Fazies-Architektur nach Miall (1985, 1988).

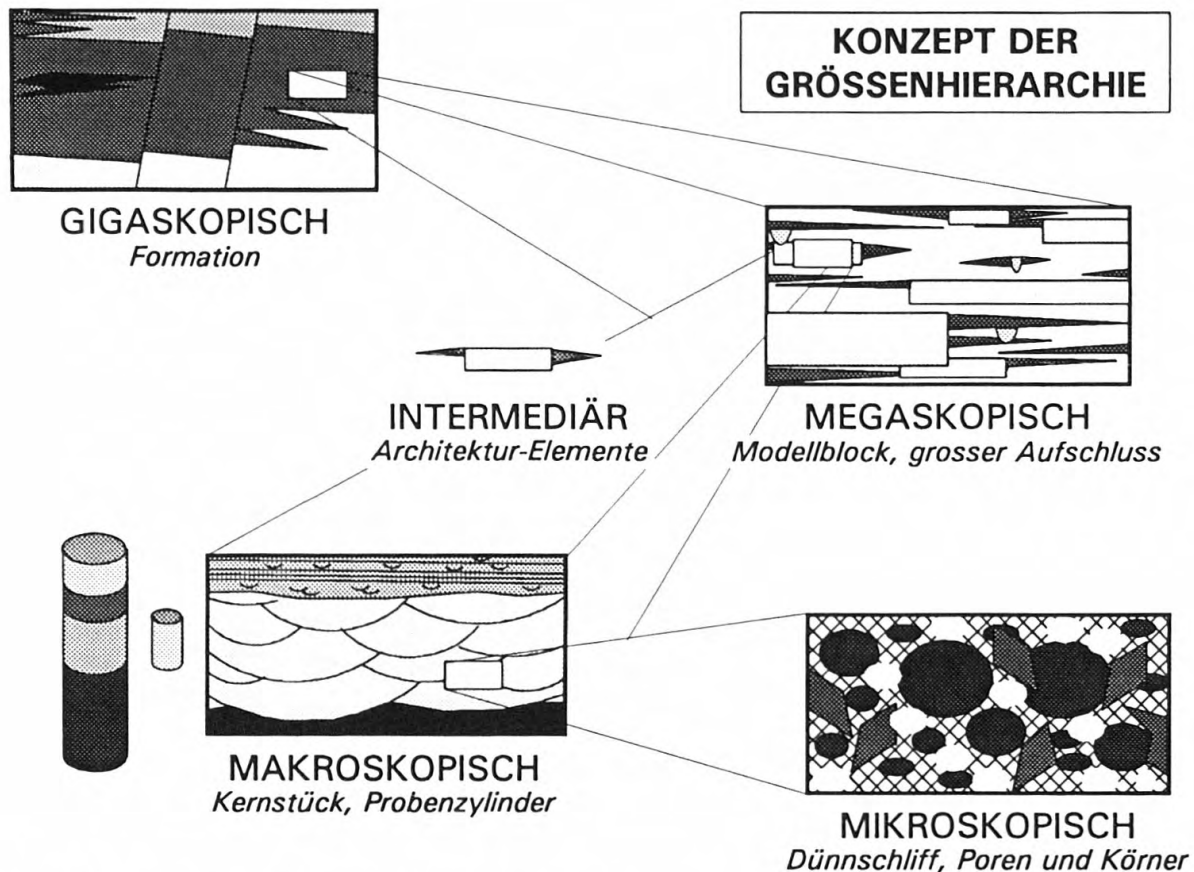


Fig. 4. Die hierarchischen Grössenordnungen von Gesteinsvolumen nach Haldorsen (1983). Die Architektur-Elemente sind in diesem untersuchungsmethodischen Konzept zwischen der makro- und der megaskopischen Grössenordnung einzustufen.

Unter dem Gesichtspunkt der Untersuchungsmethodik und ohne genaue Grenzen festzulegen, unterscheidet Haldorsen (1983, 1986) vier hierarchische Grössenordnungen von Gesteinsvolumen (Fig. 4):

- *mikroskopisch*: Dünnschliff, Poren, Körner, Matrix eines Gesteins;
- *makroskopisch*: Stücke von Bohrkernen, Probenzylinder, Sedimentstrukturen;
- *megaskopisch*: Modellblöcke in Simulationen, grosse Aufschlüsse, Gruben, Log-Daten;
- *gigaskopisch*: ganze Formationen, regionale Skala.

Die Architektur-Elemente in Funktion als hydraulische Bausteine sind in dieser Hierarchie zwischen der makro- und der megaskopischen Grössenordnung einzustufen und bilden somit eine *intermediäre Grössenordnung*.

Besonders bei der Bestimmung von petrophysikalischen und hydrogeologischen Eigenschaften sowie bei der Modellierung gilt es den verschiedenen hierarchischen Grössenordnungen Rechnung zu tragen, sind diese doch stark vom jeweils betrachteten Gesteinsvolumen abhängig (Fig. 5). Diese *Skalenabhängigkeit* wird in erster Linie durch die Anisotropie und die Heterogenitäten der Sedimentgesteine hervorgerufen, wobei hier die Effekte der Krongrösse, der Kornsortierung und Kornform, der Packungsdichte, aber auch der Einfluss von Tonhäuten, Sedimentstrukturen und Bioturbation sowie die Dia-

ABHÄNGIGKEIT DER PETROPHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN VOM UNTERSUCHTEN GESTEINSVOLUMEN

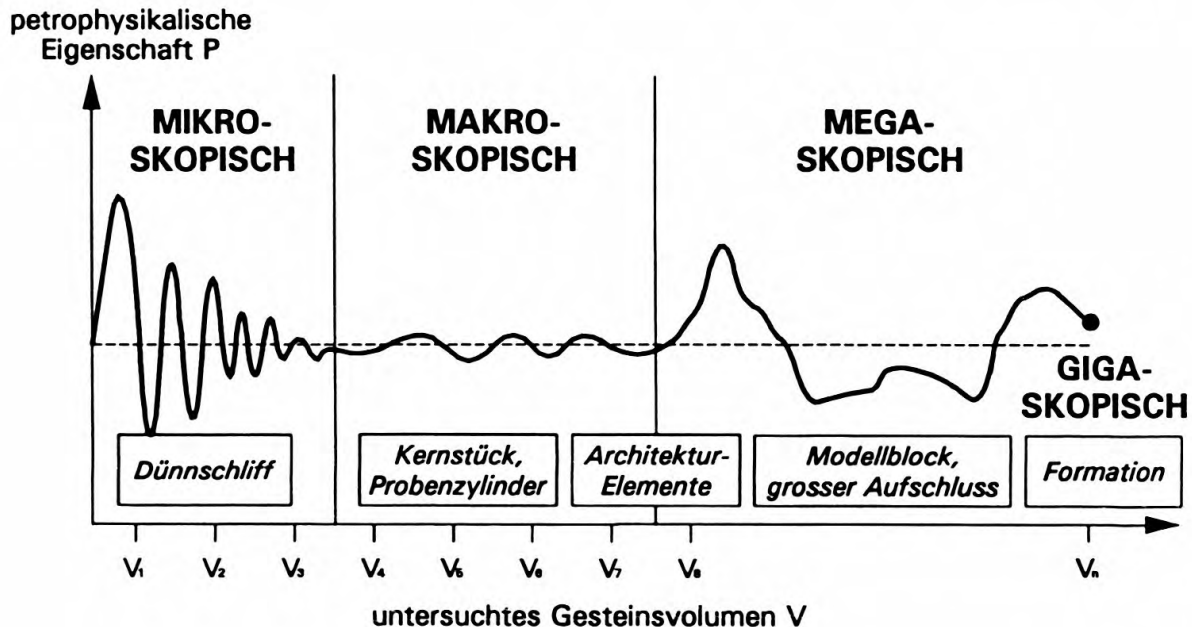


Fig. 5. Abhängigkeit der petrophysikalischen Eigenschaften vom untersuchten Gesteinsvolumen (nach Haldorsen & Lake 1984).

Untersuchungsergebnisse lassen sich infolge der unterschiedlichen Grössenordnungen der Heterogenitäten und wegen der anisotropen Eigenschaften nicht direkt von der einen Grössenordnung auf die andere übertragen.

genese und die Fissuration genannt seien. Im Speziellen bedeutet dies, dass sich Messungen an Probenzylindern (core plugs) nicht ohne weiteres auf höhere Grössenordnungen übertragen lassen, da die Gefahr einer starken Verfälschung der Eigenschaften besteht (vgl. Fig. 10) (Haldorsen & Lake 1984).

In der praktischen Anwendung gilt es meist, die hydrogeologischen Verhältnisse im megaskopischen Bereich zu beurteilen, so etwa für Deponien oder für Erdwärmesonden, die beim Vorhandensein von migrationsfähigem Felsgrundwasser einen wesentlich höheren Wirkungsgrad erreichen. Für Deponien mit langlebigen, stark toxischen Substanzen wie Sondermüll oder radioaktiven Abfällen, aber auch bei der grossräumigen Bewirtschaftung des Felsgrundwassers steht die Beurteilung der gigaskopischen Verhältnisse im Vordergrund.

Grundlegend für beide Grössenordnungen ist aber die sedimentologisch-fazielle Ausscheidung der Architektur-Elemente, die Quantifizierungen von deren hydrogeologischen und petrophysikalischen Eigenschaften sowie die Beurteilung ihrer räumlichen Verbreitung. Als Methoden für die in situ Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften der Architektur-Elemente haben sich in jüngster Zeit insbesondere Doppelpacker-Tests (Untersuchung für die Reststoffdeponien Pieterlen BE und Pfaffnau LU), Cross-hole-Tests sowie das Verfahren des Fluid-Logging bewährt (weiterführende Untersuchung der Bohrungen Burgdorf durch die Nagra). Nähere Angaben zu diesen Methoden finden sich in Kűpfer et al. (1989) und Blűmling & Hufschmied (1989). Für Ana-

lysen in der gigaskopischen Skala spielen überdies die lithostratigraphischen Verhältnisse eine bedeutende Rolle.

4. Anwendung des Konzepts der Architektur-Elemente und der Grössenhierarchie in der distalen Unteren Süsswassermolasse

Nebst einer Anwendung für die Faziesanalyse in der Oberen Meeresmolasse (Keller 1989) wurden die Konzepte der Architektur-Elemente und der Grössenhierarchie in der Schweizer Molasse erstmals für die distale Untere Süsswassermolasse praktisch verwendet (Keller et al. 1990, Fig. 1 und 2). Ziel dieser im Auftrag der Nagra am Geologischen Institut der Universität Bern durchgeführten Studie war die Untersuchung der Fazies, der räumlichen Ausdehnung und der petrographisch-petrophysikalischen Eigenschaften der verschiedenen Fazieseinheiten sowie der grossräumigen Geometrie und der Diagenese.

4.1 Die Architektur-Elemente der distalen Unteren Süsswassermolasse

Aufgrund der sedimentologischen Studie in Ziegeleigruben und an natürlichen Aufschlüssen am Nordrand des Molassebeckens zwischen Rhein und Bielersee sowie an den Bohrungen von Langenthal (BE) ist es möglich, für den distalen Teil der Unteren Süsswassermolasse fünf prinzipielle Architektur-Elemente auszuscheiden. Diese Elemente unterscheiden sich nicht nur durch ihre Genese, ihre dreidimensionalen Geometrien, ihre Grenzflächen und ihre spezifischen Grössenordnungen, sondern ebenso durch ihre Sedimentologie, Fazies, Sedimentpetrographie, Diagenese und schliesslich auch durch ihre petrophysikalischen Eigenschaften (Porosität, Permeabilität). Als Architektur-Elemente sind zu unterscheiden (Fig. 6 und 7) (englische Ausdrücke entsprechend Platt & Keller 1992 in Klammern):

- RG* Rinnengürtel (Meander Belt Sandstones MB);
- DFR* Durchbruchsfächer und -rinnen (Crevasse Channel and Splay Sandstones CS);
- UW* Uferwälle und distale Überschwemmungssande (Levee Sandstones and Siltstones LS);
- UPS* Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (Overbank Fines and Paleosols OPS);
- LAK* lakustrische Ablagerungen (Lacustrine Deposits LAC) (nur in der Bohrung Weiach).

Aus fazieller Sicht gehören diese Architektur-Elemente zur distalen Alluvialebene des alpinen Vorlandes mit einem vorwiegend axialen Entwässerungssystem, das vor allem von Süden her durch die radiale Entwässerung der Alpen eingespeist wurde (Büchi & Schlanke 1977, Hantke 1991). Sinusförmige bis mäandrierende Flüsse bauten Rinnengürtel (RG) mit viel sandiger Bodenfracht auf (bodenfrachtreiche Mischfrachtrinnen). Bei uferübertretendem Hochwasser wurden die angrenzenden Uferwälle (UW) aus heterolithischen Sedimenten abgelagert. Im Extremfall durchbrach der Fluss seine natürlichen Uferdämme und bildete Durchbruchsfächer, die von den Durchbruchsrinnen gespeist wurden (DFR). Im distalen Teil setzten sich dabei die Überschwemmungssande ab (unter UW). Aus dem stehenden Wasser sedimentierten Ton und Silt und

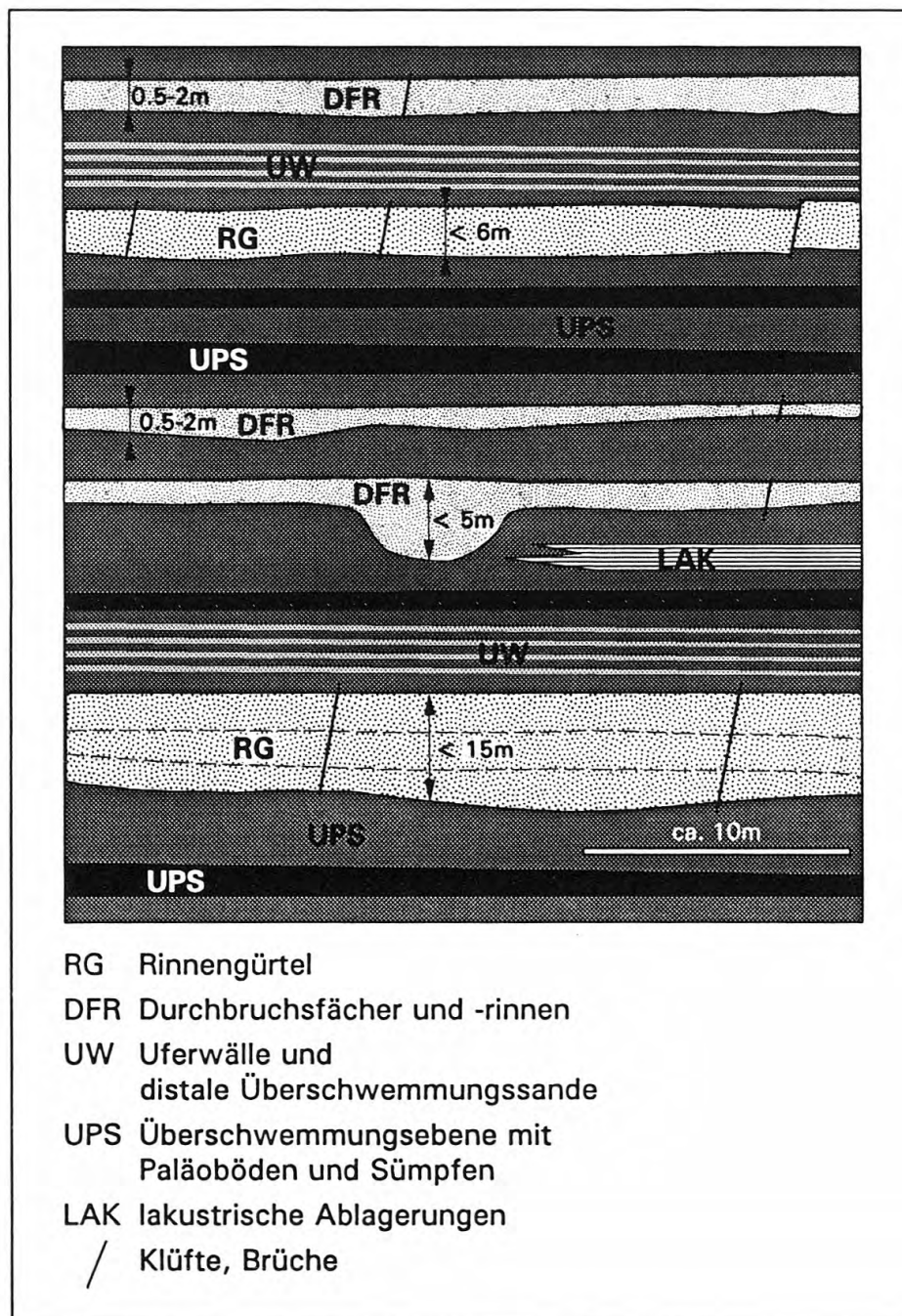


Fig. 6. Die Architektur-Elemente der distalen USM (nach Keller et al. 1990).

fürten zur vertikalen Aggradation der Schwemmebene (UPS). Abgesehen von der Flussrinne selbst unterlag die Schwemmebene einer unterschiedlichen Pedogenese (UPS), die deren Sedimente überprägte. Daneben existierten auch Sumpfebenen (UPS) sowie zeitweise ausgedehnte Seen (LAK), vor allem im westlichen Beckenteil. Die geometrischen Eigenschaften der Architektur-Elemente sind aus Fig. 7 ersichtlich, wobei hier darauf hingewiesen sei, dass das Architektur-Element UPS aufgrund seines tafeligen Charakters und der grossen lateralen Ausdehnung für die Korrelation zwischen

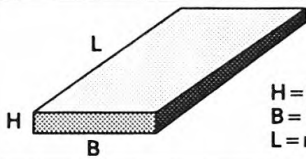
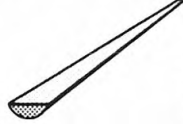

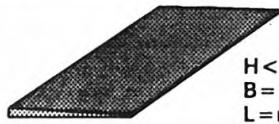


ARCHITEKTUR ELEMENT		VEREINFACHTE GEOMETRIE	DURCHLÄSSIGKEIT K (m/sec)
RG	RINNENGÜRTEL	 H = 2-15m B = 150-1500m L = n·10 m	1E-04 bis 1E-07
DFR	DURCHBRUCHSRINNE	 H ≤ 4m B < 10m L = n·10 m	1E-06 bis 1E-08
	DURCHBRUCHSFÄCHER	 H = 1-2m B = n·10 m L = n·10 m	
UW	UFERWÄLLE UND DISTALE ÜBER- SCHWEMMUNGSSANDE	 H < 3m B = 10-30m L = n·10 m	1E-07 bis 1E-10
UPS	ÜBERSCHWEMMUNGS- EBENE MIT PALÄO- BÖDEN UND SÜMPFEN	 H < 6m B = n·10 m L = n·10 m	1E-08 bis 1E-11
LAK	LAKUSTRISCHE SEDIMENTE		KEINE DATEN

Fig. 7. Geometrie und Durchlässigkeitseigenschaften der Architektur-Elemente der distalen USM.

Bohrungen viel besser geeignet ist als die Sandsteine (Architektur-Elemente RG und vor allem DFR). Für eine detaillierte Beschreibung der Architektur-Elemente und der Fazies sei auf Keller et al. (1990) sowie Platt & Keller (1992) verwiesen.

4.2 Überblick der Sedimentpetrographie der Architektur-Elemente

Auch in der Laboruntersuchung sind die Verschiedenheiten zwischen den einzelnen Architektur-Elementen deutlich zu Tage getreten (Keller et al. 1990). Sie begründen sich einerseits durch primäre sedimentologische Unterschiede, vor allem infolge der hydrodynamischen Sortierungseffekte, andererseits durch diagenetische Veränderungen, in erster Linie der differentiellen Zementation. Gesamthaft haben alle Architektur-Elemente einen hohen Anteil an Körnern, wobei sich die Rinnengürtel (RG) und die Durchbruchsfächer und Durchbruchsrinnen (DFR) durch eine mehrheitlich mittlere, die Uferwälle (UW) und die Ablagerungen der Überschwemmungsebene (UPS) dagegen durch eine vorwiegend schlechte bis sehr schlechte Sortierung auszeichnen. Sedimentpetrographisch können die Sandsteine der Rinnengürtel (RG) im Folk-Diagramm als Litharenite und feldspatreiche Litharenite klassifiziert werden. Im Vergleich ihrer mitt-

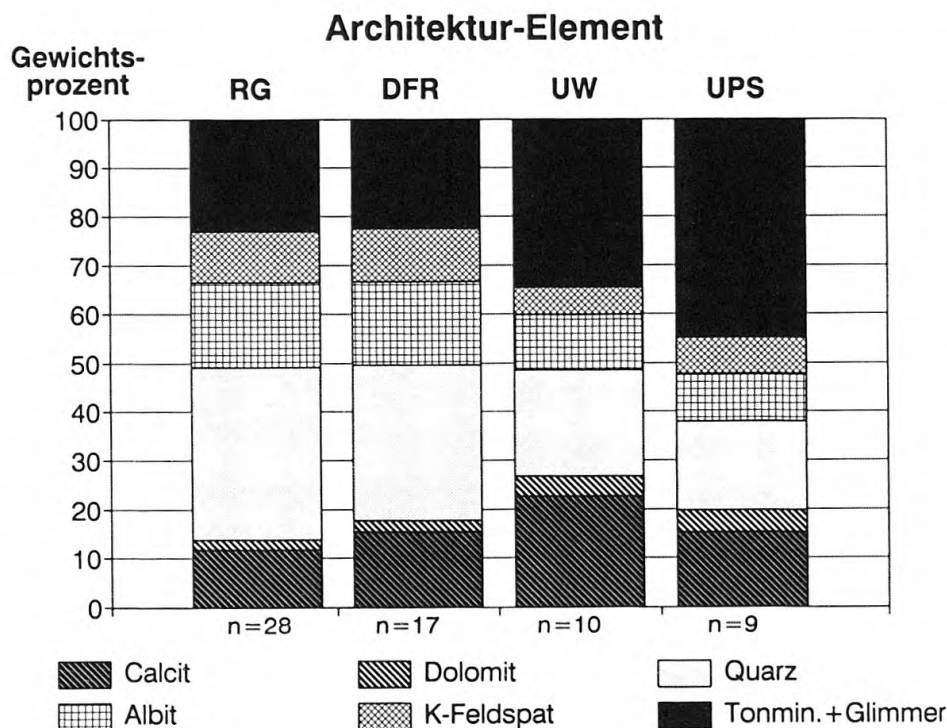


Fig. 8. Mittlere mineralogische Zusammensetzung der Architektur-Elemente der distalen USM (nach Keller et al. 1990). Von den niedrig energetischen Architektur-Elementen (UPS, UW) zu den höher energetischen (RG, DFR) kann eine Abnahme des Ton- und Glimmergehalts auf Kosten der schneller sedimentierten Komponenten Quarz und Feldspäte festgestellt werden.

leren mineralogischen Zusammensetzungen sind deutliche Unterschiede feststellbar (Fig. 8), wobei vor allem die Abnahme des Ton- und Glimmergehalts auf Kosten der schneller sedimentierbaren Komponenten (Quarz und Feldspat) von den niedrig energetischen Architektur-Elementen (UPS, UW) hin zu den höher energetischen (DFR, RG) auffällt.

Einen Grossteil der Tonmineralien der arenitischen Architektur-Elemente steckt jedoch in den lithischen Komponenten, also in den Gesteinsbruchstücken, weshalb der Unterschied deutlicher wird, wenn wir nur den Tonmatrix-Gehalt der Architektur-Elemente betrachten (Fig. 9). Hier ist mit der Abnahme der paläohydrodynamischen Energie von den Rinnengürteln (RG) hin zu den Sedimenten der Überschwemmungsebene (UPS) eine rasche Zunahme des Tonanteils festzustellen, erfolgte die Sedimentation hier doch vorwiegend aus der Suspension (Ton- und Siltfraktion).

Die Diagenese der distalen Unteren Süsswassermolasse ist relativ einfach (Keller et al. 1990), hat aber einen grossen Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften der Architektur-Elemente. Die Versenkungstiefe der jüngeren Unteren Süsswassermolasse am Nordrand des Molasse-Beckens betrug gemäss den Berechnungen von Kaelin et al. (1992) vor der pliozänen Hebung und Kippung des Beckens wohl maximal zwischen 1500 m bis gut 3000 m. Während und nach der subsidenzbedingten Kompaktion bildete sich stellenweise authigener Ton in Form von Illit. Danach erfolgte eine sehr unterschiedlich starke Zementation mit Calcit. Sie verhinderte weitgehend eine stärkere Kompaktion und ermöglichte die Erhaltung der offenen intergranulären Poren in wenig

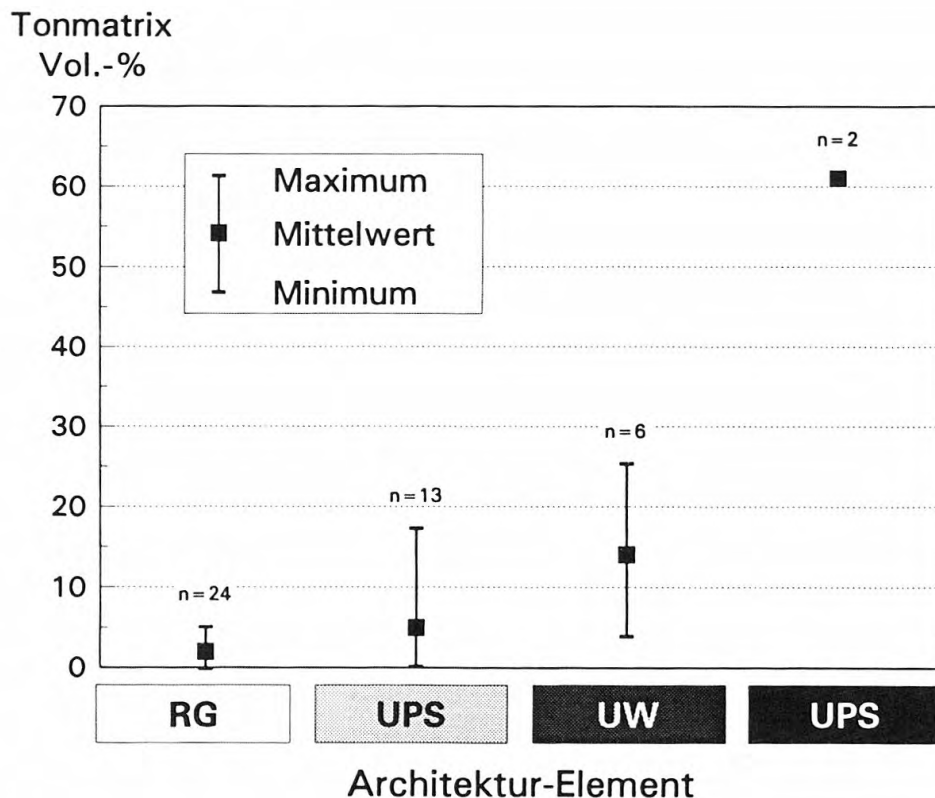


Fig. 9. Der Tonmatrix-Gehalt der Architektur-Elemente der distalen USM (nach Keller et al. 1990) verdeutlicht die Abhängigkeit vom Mechanismus und von der Geschwindigkeit der Sedimentation.

zementierten Bereichen. Während der Diagenese wurden auch Feldspäte und Gesteinsbruchstücke gelöst. Die in den Sandsteinen der Rinnengürtel vielfach beobachtete hohe Porosität, die ihnen ein zuckerartiges Aussehen verschafft, lässt sich somit teilweise als echte primäre Porosität erklären, lassen doch die an die Poren angrenzenden Kalzitkristalle glatte Oberflächen und keinerlei Lösungserscheinungen erkennen. Wie die Auswertung neuerer Bohrungen aus dem Gebiet Pfaffnau (LU) zeigt, tritt vor allem im oberflächennahen Bereich eine auf die Porenwasserzirkulation zurückzuführende sekundäre Porosität auf. Diese geht jeweils einher mit einer braungrauen Verfärbung der Sandsteine, die durch die Oxidation von Glimmern und anderen eisenhaltigen Akzessorien verursacht wird.

4.3 Die Porositäten und Permeabilitäten der Architektur-Elemente in der mikro- und makroskopischen Größenordnung

Aufgrund ihrer gut unterscheidbaren lithofaziellen, geometrischen und vor allem ihrer petrophysikalischen Eigenschaften sind die Architektur-Elemente auch als hydraulische Einheiten aufzufassen. Deshalb wurden ihre Porositäten und Permeabilitäten im Labor an Dünnschliffen und Probenzylindern – also in der mikro- und makroskopischen Skala – bestimmt.

Die Untersuchung der Porositäten der verschiedenen Architektur-Elemente ergibt für die distale USM folgendes Bild (Keller et al. 1990):

- Die *Gesamtporosität* (absolute Porosität) ist in den grobkörnigen Sandsteinen der Rinnengürtel (RG) am grössten (Medianwert 20 %) und ist bei den Durchbruchsfächern und -rinnen (DFR) bereits deutlich niedriger (Medianwert 14.5 %). Kleinere Gesamtporositäten mit Medianwerten um 7.5 % besitzen die Feinsedimente der Uferwälle (UW) und der Überschwemmungsebene (UPS).
- Beträgt die Gesamtporosität weniger als 10 % (vorwiegend Architektur-Elemente UW und UPS), so liegen kaum mehr offene Poren vor. Umgekehrt weisen Proben mit mehr als 10 % Gesamtporosität (vorwiegend Architektur-Elemente RG und DFR) annähernd grosse offene Porositäten auf, was sich in einer höheren Permeabilität niederschlägt.
- Die Bestimmung der verschiedenen Porentypen im Dünnschliff zeigt unter anderem, dass in den Sandsteinen der Rinnengürtel (RG) und der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) die intergranulären Poren (Poren zwischen den Komponenten, Zwickelporen) ca. 60 % des Gesamtporenvolumens ausmachen. Demgegenüber dominieren in den Feinsedimenten die Fissurationsporen (Risse, kleine Klüfte), wobei das Architektur-Element UW ca. 60 %, UPS dagegen über 95 % derartige Poren aufweist.
- In den porösen sandigen Architektur-Elementen RG und DFR sind sowohl die gemessenen absoluten als auch die offenen Porositäten stark vom Ausmass der Kalzit-Zementation abhängig: bei absoluten Porositäten $< 10\%$ sind die Zwickel zwischen den Komponenten generell mit Kalzit-Zement gefüllt. Derartige Partien zeigen sich im verwitterten Aufschluss als sogenannte «Knauer». Generell sind die feinkörnigeren Sandsteine der Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) besser zementiert als die grobkörnigeren der Rinnengürtel (RG) und besitzen daher auch geringere offene Porositäten.

Die Messungen der Permeabilitäten an Probenzylindern identifizierten die Sandsteine der Rinnengürtel (RG) als hauptsächliche und die Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) als damit verbundene untergeordnete Aquifere (Fig. 10). Die an den verschiedenen Proben aus den jeweiligen Architektur-Elementen gemessenen spezifischen Permeabilitäten weisen infolge der partiell geringen offenen Porositäten beträchtliche Schwankungen auf, wobei für das Architektur-Element RG Werte von zwischen < 0.01 bis 1766 md, für DFR zwischen < 0.01 bis 389 md bestimmt wurden. Demgegenüber wirken die Architektur-Elemente UW und UPS mit Werten zwischen < 0.01 und 9 md als Aquicluden.

Von grosser praktischer Bedeutung ist aber auch die Untersuchung der gegenseitigen Verbundenheit (interconnectedness) der durchlässigen Architektur-Elemente, werden dadurch doch neue Wasserwegsamkeiten ermöglicht. Die diesbezüglichen Analysen ergaben, dass verschiedenorts jeweils einige Rinnengürtel (RG) durch Erosivkontakte miteinander verbunden sein müssen und somit in hydraulischem Kontakt stehen. An anderen Lokalitäten hingegen scheinen sie isoliert in der sie umgebenden Matrix zu liegen.

4.4 *Praktische Anwendung und Vergleich der hydraulischen Eigenschaften in verschiedenen Grössenordnungen*

Das vorgestellte Konzept ist bei den Abklärungen für die Evaluation von Reststoffdeponie-Standorten in Pieterlen BE und Pfaffnau LU bereits in der Praxis angewendet

worden. Überdies haben die Nagra im Erdsondenfeld Burgdorf BE (Müller 1991) sowie die Landeshydrologie und -geologie im Grauholtztunnel BE (Dollinger et al. 1991) weiterführende hydrogeologische Untersuchungen unter dem Gesichtspunkt der sedimentären Architektur durchgeführt. Die genannten Untersuchungsstandorte liegen in der distalen oberen USM («Aquitane»). Abgesehen von Pieterlen, das bereits zur subjurassischen aufgerichteten Molasse gehört, befinden sich die Standorte in geologisch äquivalenten Positionen wie die Bohrungen von Langenthal BE, die im Labor auf ihre petrographisch-petrophysikalischen Eigenschaften untersucht wurden (vgl. vorangehende Kapitel).

Basierend auf detaillierten sedimentologischen Analysen der Bohrkerns testete man in Pfaffnau gezielt einzelne Architektur-Elemente mittels Doppel-Packer Versuchen hydraulisch. In Burgdorf dagegen erfolgte die Bestimmung der Durchlässigkeiten aufgrund des Fluid-Logging und des Flowmeter Verfahrens (Blümling & Hufschmied 1989), dessen Ergebnisse mit den Architektur-Elementen korreliert wurden.

Die Ergebnisse dieser Tests sind in Figur 10 zusammengefasst und den an Probenzylindern gemessenen Durchlässigkeiten gegenübergestellt. Der Vergleich der durch die verschiedenen Methoden ermittelten Durchlässigkeiten zeigt für die sandigen Architektur-Elemente RG und DFR eine um zwei bis drei Zehnerpotenzen kleinere Streuung

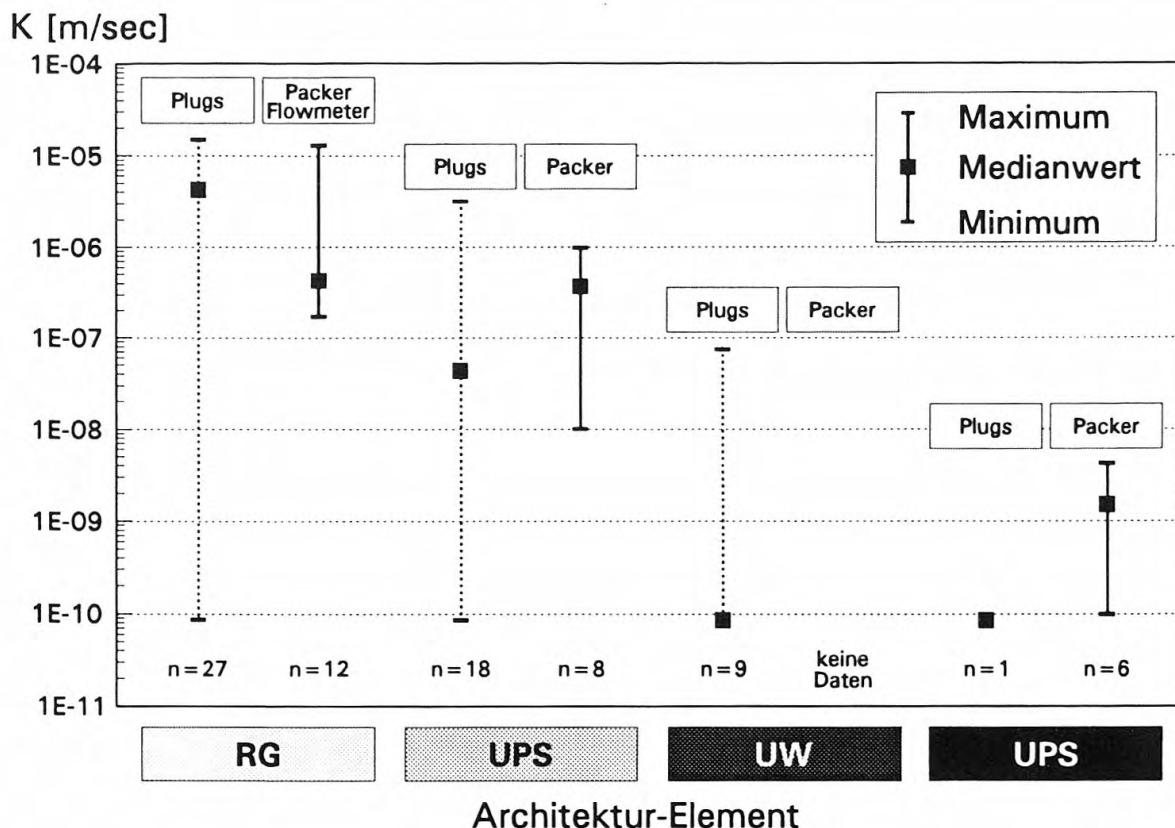


Fig. 10. Vergleich zwischen den an Probenzylindern (makroskopische Skala) gemessenen Permeabilitäten und den durch Doppel-Packer sowie Flowmeter (intermediäre bis megaskopische Skala, Daten von der Nagra freundlichlicherweise zur Verfügung gestellt) gewonnenen Daten aus der distalen USM. Er verdeutlicht die kleinere Streuung der Messwerte in der intermediären und megaskopischen Skala infolge des geringeren Einflusses von kleinmassstäblichen Heterogenitäten.

der Messwerte als die an Probenzylindern durchgeführten Analysen. Zudem differieren auch die entsprechenden Medianwerte um eine Zehnerpotenz.

Wurden bis heute vielleicht auch noch nicht genügend derartige Tests durchgeführt, so scheint doch diese Gegenüberstellung die theoretischen Überlegungen zu bestätigen, dass sich Messungen von einer hierarchischen Stufe nicht direkt auf eine andere übertragen lassen (Kap. 3, Fig. 4): Die Messungen an den kleinen Probenzylindern decken nur die makroskopische Skala und somit geringe Volumina ab, sie sind daher sehr stark von kleinmasstäblichen Heterogenitäten beeinflusst. Mit dem Doppel-Packer dagegen können ganze Architektur-Elemente als hydraulische Einheiten im intermediären Bereich zwischen der mikro- und der makroskopischen Grössenordnung getestet werden. Demgegenüber erfasst das Fluid-Logging Verfahren im Prinzip den megaskopischen Bereich (ganzes Bohrloch), woraus sich im Vergleich mit dem sedimentologischen Profil die Eigenschaften einzelner Architektur-Elemente ermitteln lassen.

Die hydraulischen Tests einzelner Architektur-Elemente sind somit viel aussagekräftiger und konsistenter, da diese die grösstmöglichen, sowohl genetisch als auch lithologisch annähernd homogenen *hydraulischen Bausteine* des Lithosoms darstellen (vgl. Fig. 5, Kap. 3). Eine verbesserte Quantifizierung der hydraulischen Eigenschaften (Unterschiede in der horizontalen und der vertikalen Durchlässigkeit, Transmissivität) liesse sich in Zukunft sicher durch die konsequente Anwendung von Crosshole-Tests an korrelierbaren Architektur-Elementen erreichen.

Die derartig hydraulisch und geometrisch quantifizierten Architektur-Elemente bilden eine verlässliche Grundlage für die Beurteilung der hydrogeologischen Eigenschaften eines Lithosoms im megaskopischen Bereich, wie es beispielsweise Untersuchungen für Deponien erfordern. Sie stellen aber auch ideale natürliche hydraulische Elemente für mathematische Modellierungen im mega- und gigaskopischen Bereich dar und vermindern stochastische Ungenauigkeiten.

5. Überblick über die synsedimentäre hydrogeologische Architektur des alpinen Vorlandes

Während die hydraulischen Eigenschaften der distalen Unteren Süsswassermolasse infolge der umfangreichen Untersuchungen heute entsprechend gut bekannt sind, bestehen diesbezüglich für die übrigen lithostratigraphischen Gruppen des alpinen Vorlandes (vgl. Anmerkung ²⁾) noch wesentliche Kenntnislücken. Neue Ergebnisse verschiedener moderner sedimentologischer Forschungsarbeiten in der Molasse bilden aber eine solide Grundlage für weiterführende hydrogeologische Untersuchungen und erlauben für die einzelnen lithostratigraphischen Gruppen des Molasse-Beckens eine überblicksmässige Darstellung der Sedimentationsverhältnisse und der daraus resultierenden Hydrostratigraphie. Da die Kenntnisse über den Einfluß der Diagenese und die Effekte der Tektonisierung in der Schweizer Molasse nur summarisch bekannt sind (vgl. Kap. 6), werden die synsedimentären hydrofaziellen Verhältnisse anhand von vereinfachten Profilschnitten durch das Vorland-Becken dargestellt. Dabei sind nur die basale Vorland-Diskordanz (verkarstetes Mesozoikum) und die jüngere, als Molasse bezeichnete Beckenfüllung berücksichtigt (vgl. Fig. 2). Zudem kann in dieser Zusammenstellung nicht im Detail auf die für die Hydrogeologie ebenfalls wichtige Lithostratigraphie eingegangen werden, von der Büchi & Schlanke (1977), Naef et al. (1985) und Habicht (1987) einen Überblick geben. In diesem Zusammenhang sind auch die grundlegenden Arbeiten von Lemcke

(z. B. 1973, 1984) zu erwähnen, dessen grossräumigen Betrachtungen auch das Schweizerische Molasse-Becken miteinbeziehen.

Der Grundgedanke der nachfolgenden Ausführungen ist demnach die Veranschaulichung der prinzipiellen hydrostratigraphischen Einheiten (gigaskopische Modellskala) sowie die Ausscheidung und Beschreibung hydrogeologisch grundlegender Architektur-Elemente einzelner Einheiten. Sie sollen einerseits dazu beitragen, lokale hydrogeologische Verhältnisse in der Molasse differenziert zu charakterisieren und andererseits die Quantifizierung deterministischer Eingangsgrössen für stochastische Modellierungen erleichtern.

5.1 Basale Vorland-Diskordanz: verkarstetes Mesozoikum

Der Entwicklung der alpinen Vorlandsenke geht eine paleozäne Ruhephase mit grossräumiger Emersion der helvetisch-jurassischen Plattform voraus («restauration paléocène» [Trümpy 1973]), verbunden mit Karst- und Bodenbildungen (Pasquier & Persoz 1977) sowie einer Sedimentation der Verwitterungsprodukte in den neu entstandenen Karstsystemen («siderolithische» Bildungen: Bolustone, Bohnerz und Anreicherungen von Quarzsand). Diese Erosionsdiskordanz kann als basale Vorland-Diskontinuität im Sinne von Bally & Snelson (1980) verstanden werden.

Naturgemäss ist der Karst an das Auftreten von chemisch leicht verwitterbaren Kalken gebunden. Wie die Untergrundkartierung der helvetisch-jurassischen Plattform zeigt (Büchi et al. 1965, Trümpy 1980, Lemcke 1981), stehen im Untergrund des Schweizerischen Molasse-Beckens über weite Bereiche verkarstbare Kalke des Malm (Zentral- und Ostschweiz) und der Unterkreide (Westschweiz) an, wogegen sich im Gebiet des Zürichsees eine «Glatze» aus unverkarstetem, mergeligem mittlerem Malm abzeichnet. Aufgrund ihrer Auswertung von Karstphänomenen in verschiedenen Bohrungen der Westschweiz folgerten Pasquier & Persoz (1977) südlich des Neuenburger- und des Bielersees eine Grabenstruktur, in deren höher gelegenen Randgebieten sie eine Zone maximaler Verkarstung postulierten. Aber auch im Untergrund des süddeutschen Molasse-Beckens stehen weiträumig verkarstete Malmkalke an (Lemcke & Thunn 1956 sowie Lemcke 1976, 1981).

Die im Paleozän beginnende Karstdenudation der helvetisch-jurassischen Plattform liess weiträumige Karstsysteme stark heterogener Natur (Pasquier & Persoz 1977) entstehen. Diese wurden im Verlaufe der weiteren Vorlandentwicklung durch die mit der Nordwärtswanderung des Ablagerungszentrums verbundenen, sukzessive von Süden her auf das alpine Vorland übergreifenden Vorland-Sedimentation überdeckt. Die Verkarstung, die bevorzugt entlang von Kluftsystemen und Schichtfugen der Kalke erfolgt (Bögli 1978), hinterliess ein kommunizierendes System von hochpermeablen Makroporen, dessen Wegsamkeit durch Karstsedimente (z. B. Bolustone) vermindert oder gar unterbrochen sein kann (Fig. 11). Gesamthaft bildet die verkarstete mesozoische Unterlage im Schweizerischen Mittelland einen lokal, möglicherweise auch regional bedeutenden, heterogenen Aquifer in mega- bis gigaskopischer Grössenordnung (Vollmayr 1983, 1985 und Nagra 1988). Wie weit sich aber die im süddeutschen Raum beobachtete, weiträumige Karstwasserzirkulation (Lemcke & Thunn 1956, Lemcke 1976) auch auf das Schweizerische Molasse-Becken übertragen lässt, kann angesichts der unzureichenden Untersuchungen noch nicht mit Bestimmtheit beurteilt werden. In der Bohrung

BASALE VORLAND-DISKONTINUITÄT

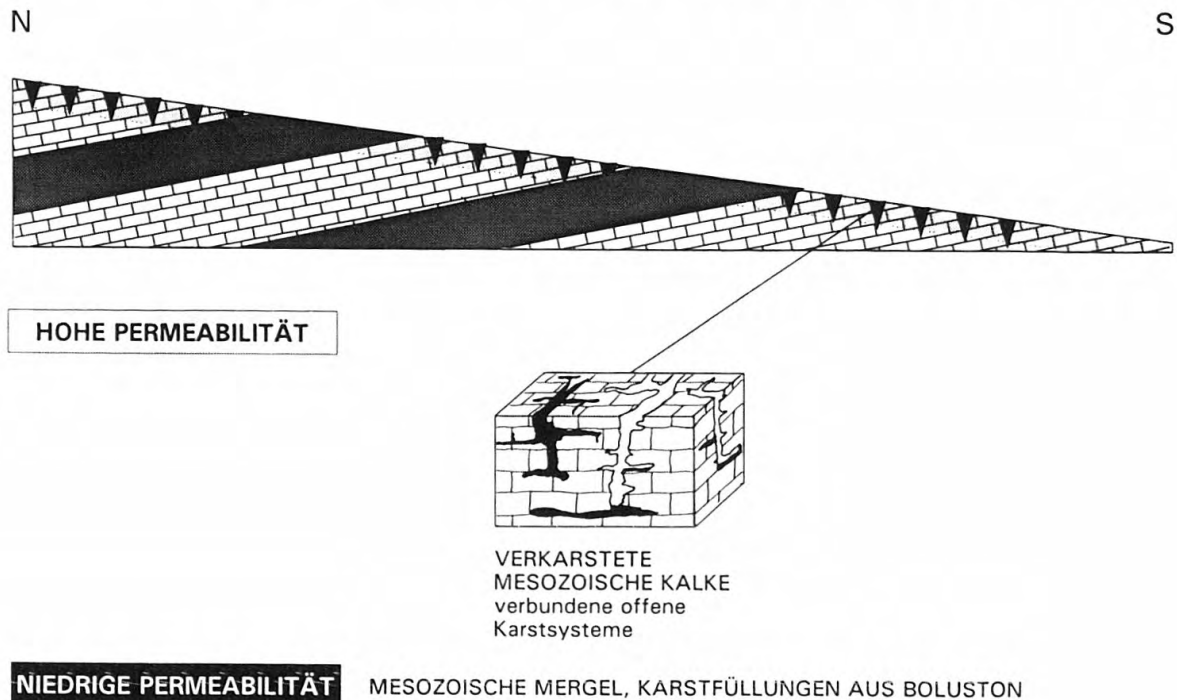


Fig. 11. Schematischer hydrostratigraphischer Schnitt durch die basale Vorland-Diskontinuität mit dreidimensionaler Architektur der prinzipiellen hydrogeologischen Einheit.

Entlebuch erwies sich der verkarstete Malm zudem als Speichergestein der ersten wirtschaftlich verwertbaren Gaslagerstätte in der Schweiz (Vollmayr & Wendt 1987).

5.2 Untere Meeresmolasse (UMM)

Als älteste Gruppe der Molasse (Fig. 2) wurde die UMM im Verlaufe des Rupelian in einem schmalen Meeresarm abgelagert. Dieser westliche Ausläufer der Paratethys erstreckte sich vom Wiener-Becken dem damaligen Alpennordrand entlang über die Schweiz bis nach Hoch-Savoyen. Er wird gelegentlich auch «Flysch-Restmeer» bezeichnet, womit der turbiditischen Sedimentation Rechnung getragen wird, durch welche die UMM ab dem frühen Oligozän kontinuierlich aus dem Helvetischen Flysch hervorging. So besteht die basale UMM aus von S geschütteten Turbiditen, die submarine Schuttfächer bildeten. Über diesen als Hilfern- oder Deutenhausen-Schichten bezeichneten Sandstein-Mergel-Wechsellagerungen mit untergeordneten konglomeratischen Schüttungen beruhigte sich die Sedimentation, und im verbliebenen, untiefen Meeresbecken gelangten unterhalb der Paläo-Sturmwellenbasis rauchgraue, tonig-siltige Feinsedimente – die Grisiger Mergel oder Marnes de Vaulruz – zum Absatz. Infolge einer weltweiten Regression zog sich das Meer an der Grenze Rupelian/Chattian rasch nach E zurück. Diese Regression wird durch sandige Küsten- und Strandablagerungen markiert, die als Horwer Sandsteine oder Grès de Vaulruz bezeichnet werden. Sie bilden im Gebiet der Schweiz den Abschluss der UMM und leiten in die Untere Süsswassermolasse über.

lasse über. Weiter im Osten ging der Meeresrückzug im älteren Chattian einher mit der Progradation einer deltaischen Sedimentation, deren Ablagerungen als Bausteinschichten s.s. bezeichnet werden.

Im Gegensatz zur Oberen Meeresmolasse liess sich in der UMM keine Gezeitenaktivität nachweisen, weshalb hier die Küstenablagerungen wellen- bzw. sturmdominierten Charakter besitzen; weiter im Osten gesellen sich dazu zunehmend schüttungsdominierte Deltas.

Die UMM steht in der Schweiz – abgesehen vom Fenster von Val d'Illiez – einzig in den Schuppen der Subalpinen Molasse an (Fig. 1), weshalb sich ihre generell von N nach S zunehmende Gesamtmächtigkeit nur schwer abschätzen lässt. In der Subalpinen Molasse erreicht sie Werte von vermutlich weit über 1000 m.

Detaillierte Angaben über die UMM finden sich in den Arbeiten von Frei (1979), Diem (1986 a), Kronmüller & Kronmüller (1987) sowie in Lateltin (1988).

Hydrogeologische Architektur der UMM

Aus sedimentologischer und lithologischer Sicht präsentiert sich die UMM als relativ einfach aufgebaut, und es lassen sich grundsätzlich vier teilweise miteinander verzahnte hydrostratigraphische Einheiten unterscheiden (Fig. 12). Die Turbiditfächer und die regressive Strandebene können als hydraulische Einheiten mit guten primären Permeabilitäten angesehen werden, die in einer Matrix aus kaum durchlässigen Beckensedimenten liegen. Im Osten gesellen sich dazu grobdetritische deltaische Sedimentkör-

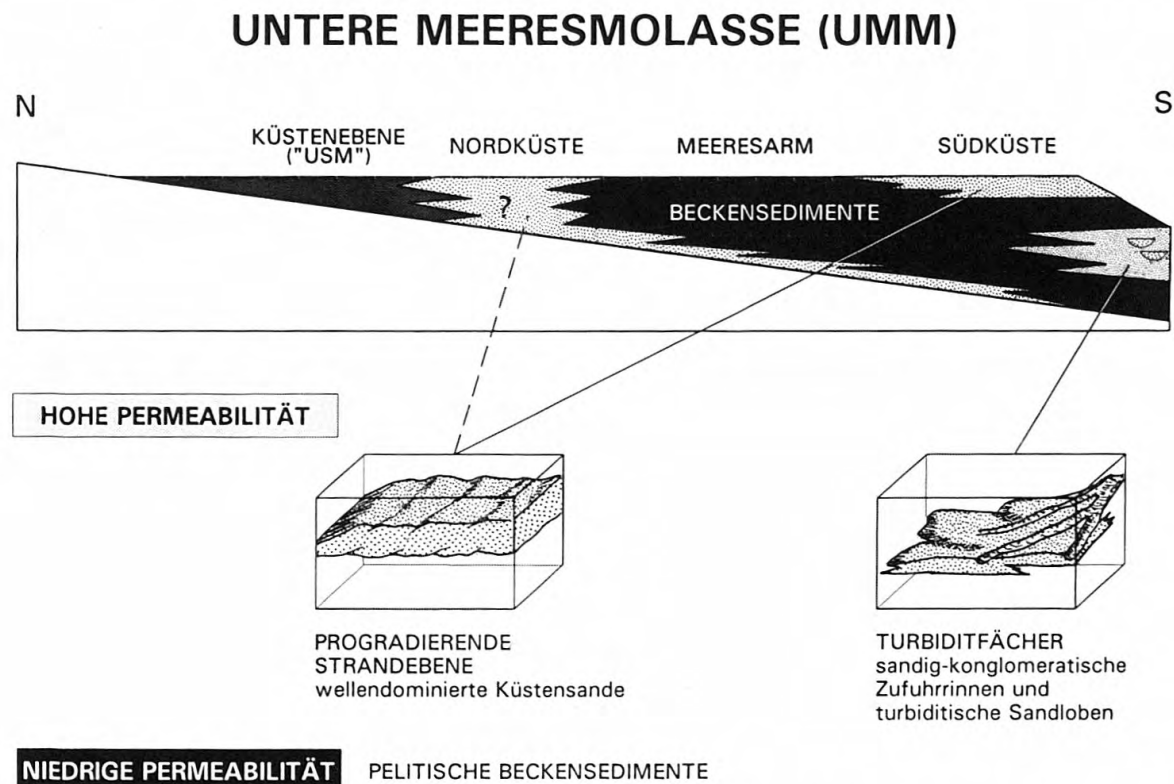


Fig. 12. Schematischer hydrostratigraphischer Schnitt durch die UMM mit dreidimensionaler Architektur der prinzipiellen hydrogeologischen Einheiten.

per mit mehrheitlich guten primären Durchlässigkeiten, die hier nicht weiter zu besprechen sind (vgl. dazu Kronmüller & Kronmüller 1987).

- Die zyklischen, bis mehrere hundert Meter mächtigen *Turbiditfächer* der unteren UMM wurden durch sandig-konglomeratise Zufuhr- und Verteilerrinnen aufgebaut, die eigentliche Kanalkomplexe bildeten. Diese primär gut durchlässigen Ablagerungen mündeten in die im wesentlichen aus Bouma-Turbiditen bestehenden Turbiditfächer. Im distalen Bereich verfangern diese Turbiditfächer, deren ursprünglichen Radien 15 bis 20 km betragen haben dürften, mit den dichten, feindetritischen Bekensedimenten.
- Die bis 800 m mächtigen pelitischen *Beckensedimente* haben eine weiträumige Ausdehnung und bestehen grösstenteils aus Tonmergeln mit sehr geringen primären Permeabilitäten. Gegen das Hangende hin sind darin mit fortschreitender Küstenprogradation zunehmend Sturmsandlagen eingeschaltet, die bis mehrere Meter mächtige amalgamierte Sturmsandloben mit guten primären Durchlässigkeiten bilden können.
- Die primär gut durchlässigen Ablagerungen der *regressiven wellendominierten Küsten* bauen im Süden bis zu 20 m dicke, tabulare bis schwach keilförmige Sandsteinkörper mit grossen lateralen Ausdehnungen auf. Bis heute herrscht wenig Klarheit darüber, ob an der heute unter dem Schweizerischen Molasse-Becken liegenden Nordküste ebenfalls derartige progradierende sandige Strandebenen oder lediglich geringmächtige, marin aufgearbeitete fluviatile Reliktsande wie in Süddeutschland vorkommen.

5.3 Untere Süsswassermolasse (USM)

Die USM (Fig. 2) entstand unter örtlich und zeitlich recht verschiedenartigen Sedimentationsbedingungen, was sich im stark heterolithischen Charakter der zweitältesten und mächtigsten Gruppe der Molasse niederschlug. Die Ablagerung der kontinentalen USM begann an der Grenze Rupelian/Chattian mit den Ablagerungen der Küstenebene und endete mit der heterochronen Transgression der OMM an der Wende Aquitanian/Burdigalian. Beim Rückzug des UMM-Meeres progradierte die Küstenebene rasch nach Osten und im Schweizerischen Molasse-Becken blieb eine flache, von kleineren konglomeratischen Schuttfächern gesäumte Alluvialebene zurück. Hier gelangten anfänglich rötliche und bunte Feinsedimente (Mergel, Schlammsteine und Siltsteine) mit Einschaltungen von Sandsteinen der Flussrinnen zur Ablagerung (Untere Bunte Molasse, Molasse rouge). Im späten Oligozän führte die verstärkte Hebung der Alpen zu ausgeprägter Reliefbildung und rascher Absenkung des Beckenbodens. Infolge der zunehmenden Erosion und der gesteigerten Transportkraft der Flüsse bauten am damaligen Alpennordrand gewaltige radiale Schuttfächer (Pèlerin, Rigi, Speer und Höhrone) mit verwilderten Flusssystemen in das Molasse-Becken vor. Die Alluvialebene wurde in einem distalen, beckenaxialen Entwässerungssystem von sinusförmigen bis mäandrierenden Flüssen nach Osten hin in die Paratethys entwässert, deren Küstenlinie damals auf der Höhe von München pendelte. Während im Süden sandige Flussablagerungen mit unterschiedlicher Geröllführung vorherrschten (Granitische Molasse, Grès de la Cornalle), lagen im alpenfernen Teil zeitweise Sümpfe und ausgedehnte Seen (Wynauer Süsswasserkalk, Molasse à charbon), in welchen im westlichen Beckenteil sogar Gips abgeschieden wurde (Molasse grise à gypse).

Heute bildet die USM in der Westschweiz und am Nordrand des Molasse-Beckens grossräumig den anstehenden Felsuntergrund (Fig. 1), kommt aber auch in Synklinalen des Jura vor. In der Zentral- und Ostschweiz dagegen ist die USM nur am Südrand der Mittelländischen sowie in der Subalpinen Molasse aufgeschlossen. Durch höhere Ablagerungsraten und tektonischen Zusammenschub bedingt, erreicht die USM am Beckensüdrand eine Mächtigkeit von bis zu 4 km. Gegen Norden wird sie zunehmend geringmächtiger und keilt im Jura aus.

Die Arbeiten von Habicht (1945 a), Bersier (1959), Kissling (1974), Frei (1979), Fasel (1986), Schlunegger (1991), Platt (1992) und Platt & Keller (1992) geben detaillierte Beschreibungen der USM. Nagra (1988) und Keller et al. (1990) befassen sich im Speziellen auch mit deren hydrogeologischen Aspekten.

Hydrogeologische Architektur der USM

Die vielfältige und komplexe sedimentäre Architektur der USM ist – in Abhängigkeit tektonischer (v. a. Subsidenz und Hinterlandrelief) und klimatischer Einflüsse – im wesentlichen durch die paläohydraulischen Gradienten im Vorland-Becken direkt bestimmt worden. In den fluviatilen Ablagerungen sind zyklische Sedimentabfolgen unterschiedlicher Ursachen (Auto- und Allozyklen) und verschiedener Grössenordnungen mit schnell ändernder Lithofazies weit verbreitet. Von grosser Bedeutung sind dabei bis mehrere Meter mächtige Flussablagerungs-Sequenzen, deren Rinnenfüllungen und proximale Überschwemmungssedimente die Architektur-Elemente mit hohen primären Durchlässigkeiten bilden. Demgegenüber stellen die Ablagerungen der Überschwemmungsebene sowie lakustrische und palustrische Sedimente Architektur-Elemente mit geringen primären Permeabilitäten dar. In Abhängigkeit der Proximalität zum Liefergebiet lassen sich in der USM verschiedene Faziesgürtel unterscheiden. Dabei nimmt die Korngrösse mit der Gefällsverminderung und der nachlassenden Transportkraft der Flüsse von den proximalen konglomeratischen Schuttfächern hin zur distalen Alluvialebene im Norden gesamthaft ab. Gleichermassen steigt der Anteil der vertikal aggradierten Feinsedimente gegenüber den grobkörnigen Rinnensedimenten an, und die gegenseitige Verbundenheit der Rinnenfüllungen geht zurück. Auch die Flusstypen wandeln sich von bodenfracht-dominierten Flüssen im alpennahen hin zu mischfracht-dominierten im distalen Beckenteil. Eigentliche Suspensionsfracht-Rinnen (klassische mäandrierende Flüsse) dagegen scheinen in der schweizerischen USM nicht oder nur untergeordnet vorgekommen zu sein.

Im vereinfachten Schnitt durch die Ablagerungsräume lassen sich vom proximalen zum distalen Beckenteil vier ineinander verzahnte hydrostratigraphische Faziesbereiche unterscheiden (Fig. 13). Diese verkörpern prinzipielle Einheiten, die aus wohl unterscheidbaren hydraulischen Architektur-Elementen bestehen.

- Die konglomeratischen *alluvialen Schuttfächer* werden grundsätzlich durch verwilderte, bodenfrachtdominierte Flusssysteme aufgebaut, wobei sowohl Rinnen- als auch Schichtflutablagerungen vorkommen. Diese bilden Sedimentkörper mit hohen primären Durchlässigkeiten und flächenhaften, tabularen Geometrien von bis zu mehreren hundert Metern Breite und bis einigen Kilometern Länge. Deren Dicke variiert von mehreren Metern (einfache Rinnenzyklen) bis zu einigen Dekametern

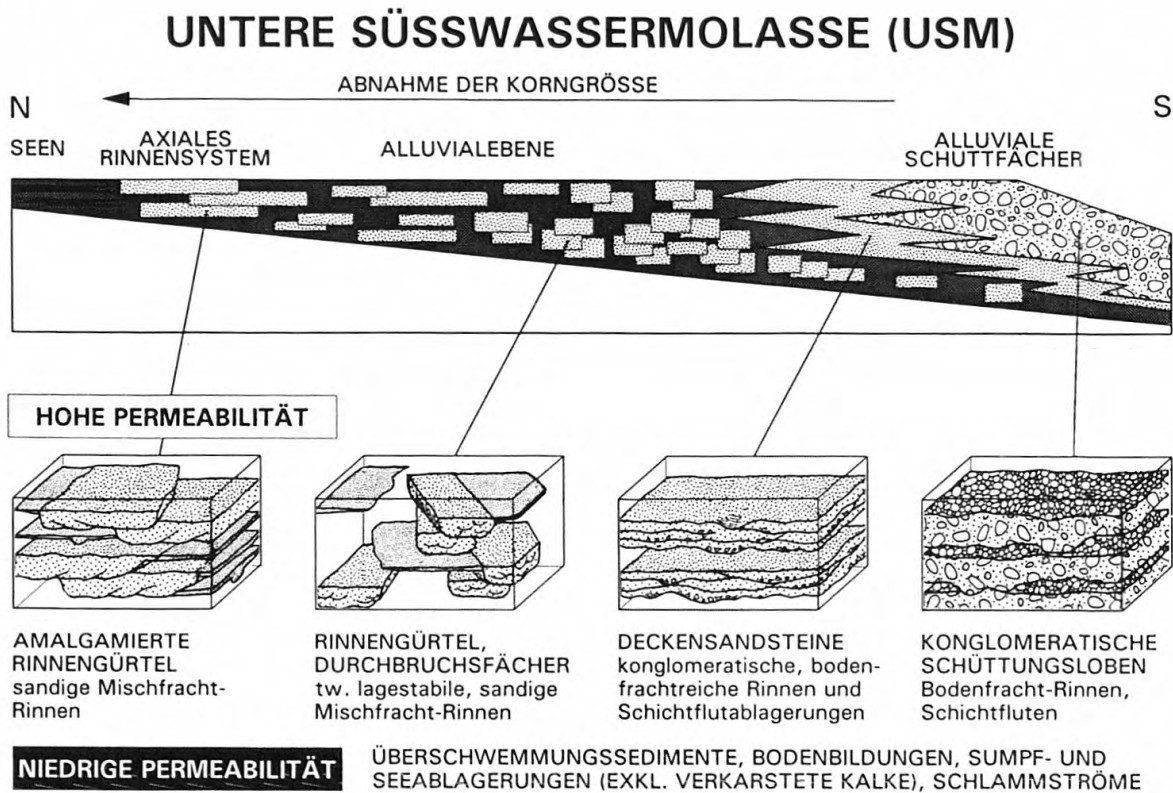


Fig. 13. Schematischer hydrostratigraphischer Schnitt durch die USM mit dreidimensionaler Architektur der prinzipiellen hydrogeologischen Einheiten.

(amalgamierte Sequenzen). Schutt- und Schlammstromablagerungen sowie geringmächtige Überschwemmungs- und Bodenbildungen verkörpern Architektur-Elemente geringer Permeabilitäten. Dazu gesellen sich im distalen Bereich gelegentlich auch lakustrische Ablagerungen. Das Verhältnis der grobdetritischen Sedimente (Konglomerate und Sandsteine) zu den pelitischen ist generell grösser als 2:1, wobei alpennah solche grösser als 5:1 auftreten können.

- Zwischen den konglomeratischen Schuttfächern und der eigentlichen Alluvialebene liegt ein *Übergangsbereich* mit ebenfalls bodenfrachtdominierten, konglomeratreichen sandigen Flussablagerungen, die in den äusseren Bereichen der Subalpinen, aber auch in der gefalteten Molasse verbreitet sind. Die Ablagerungen dieser primär hochpermeablen Rinnenfüllungen erfolgte teilweise ebenfalls in verwilderten Flusssystemen mit Schichtfluten, wobei Deckensandsteinkörper mit tabularen Geometrien entstanden. Diese besitzen grosse laterale Ausdehnungen von einigen hundert Metern, bei Mächtigkeiten von einigen Metern bis wenigen Dekametern. Sie verfangern seitlich mit Überschwemmungssanden. Wasserstauende Architektur-Elemente bilden vorab die feindetritischen Ablagerungen der Schwemmebene, zu denen sich auch lakustrische Sedimente gesellen. Das Verhältnis der konglomeratisch-sandigen Architektur-Elemente zu den pelitischen liegt zwischen 1:2 bis 3:1.
- Die Architektur-Elemente der *Alluvialebene* erfuhren bereits unter Kapitel 4 eine detaillierte Beschreibung. Dabei gilt es zwischen Rinnengürteln (RG) und Durchbruchssedimenten (DFR) mit hohen primären Durchlässigkeiten einerseits sowie

- wenig permeablen Ablagerungen der Uferwälle (UW) und der Überschwemmungsebene (UPS, LAK) andererseits zu unterscheiden. Den verschiedenen, gleichzeitig in der Flussebene existenten Rinnentypen kommt aus hydrogeologischer Sicht einige Bedeutung zu, ist damit doch auch eine Änderung in der Lithofazies und Geometrie von deren Rinnengürteln verbunden. So kommen im proximalen, heute zumeist in der gefalteten Molasse anstehenden Bereich die oben erwähnten Deckensandsteinkörper bodenfrachtreicher Rinnen vor. Daneben können auch mehrere Dekameter breite und bis zu wenigen Zehnern von Metern tiefe Rinnensandsteine beobachtet werden, die ein zeitweise anastomosierendes Verhalten andeuten. Mischfrachtrinnen mit unterschiedlichen Bodenfrachtanteilen dominierten sowohl im beckenquerenden als auch im axialen Hauptstromsystem. Während die gegenseitige Verbundenheit der Rinnenfüllungen stromabwärts generell abnimmt, erhöht sich der Anteil an vertikal aggradierten Feinsedimenten. Lediglich im axialen Entwässerungsstrom führten lagestabilere Rinnen zu einer verstärkten vertikalen Amalgamierung und höherer gegenseitiger Verbundenheit der Rinnengürtel. Je nach Profilabschnitt beträgt das Sandstein/Feinsediment-Verhältnis im proximalen Bereich zwischen 2 : 1 bis 1 : 2, gegen den Nordrand hin treten solche von 1 : 4 bis 1 : 10 auf.
- Vor allem der distale, westliche Beckenteil hatte zeitweise im Bereich stark verminderter Sedimentzufuhr gelegen, sodass sich eine *Sumpf- und Seenlandschaft* ausbreitete. Deren Ablagerungen bestehen grösstenteils aus den primär gering permeablen Architektur-Elementen Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) sowie tonig-siltigen und kalkigen Seeablagerungen (LAK). Damit assoziiert kommen auch besser durchlässige deltaische Sandsteinkörper vor. Diese lakustrisch-palustri-schen Ablagerungen der USM treten als lithostratigraphisch gut definierte Einheiten (Molasse à charbon, Wynauer Süsswasserkalke) mit ausgedehnten, tabularen Geometrien von einigen Dekametern Mächtigkeit auf.

Gesamthaft besitzen die Ablagerungen der USM in den Rinnengürteln primär gute bis sehr gute horizontale Durchlässigkeiten, die aber infolge des zunehmenden Suspensionsfrachtanteils der Flüsse vom proximalen hin zum distalen Bereich insgesamt abnehmen. Demgegenüber sind die primären vertikalen Permeabilitäten in Abhängigkeit der dreidimensionalen sedimentären Architektur je nach Fazieszone als recht unterschiedlich zu bewerten. So lassen die Ablagerungen der Sumpf- und Seenlandschaften nur geringfügige vertikale Permeabilitäten zu. Eine Ausnahme davon bilden die bis zu 1 m mächtigen und lateral bis zu einigen Kilometern weit verfolgbaren Süsswasserkalke im westlichen Molasse-Becken (Molasse à charbon, Grès et marnes gris à gypse), die heute infolge von Verkarstung gut durchlässige Aquifere bilden können (Parriaux 1981 und mündl. Mitt. M. Weidmann). Stark eingeschränkt ist die vertikale Wasserwegsamkeit wegen der hohen Anteile an tabularen, gering permeablen Architektur-Elementen mit grosser lateraler Ausdehnung auch in den Ablagerungen der Alluvialebene. Andererseits ist im Bereich des axialen Entwässerungssystems und gegen den alpennahen Bereich hin infolge höherer gegenseitiger Verbundenheit der Rinnengürtel mit einer Zunahme der vertikalen Durchlässigkeiten zu rechnen. Während diese im Übergangsbereich noch eher als mässig zu beurteilen sind, liegen in den Schuttfächern wegen der verstärkten Amalgamierung der Rinnensequenzen primär hohe vertikale Permeabilitäten vor.

5.4 Obere Meeresmolasse (OMM)

Die Ablagerung der jüngsten marinen Gruppe der Molasse (Fig. 2) begann an der Wende Aquitanian/Burdigalian mit etappenweisen Transgressions-Regressionszyklen, die am Beckensüdrand zwischen Hörnli und Aaretal wiederholt in Verlandungsphasen mündeten. Während der Regressionen gelangten in der Küstenebene Sedimente zum Absatz, die mit der jüngeren USM vergleichbar sind. Daneben breiteten sich auch grössere Seen und Sümpfe aus, in denen lakustrische Pelite mit Süsswasserkalken sowie Molassekohlen abgelagert wurden. Noch im frühen Burdigalian erfolgte dann mit anhaltendem eustatischem Meeresspiegelanstieg der Zusammenschluss mit der Paratethys im Osten, und es erstreckte sich eine schmale Meeresstrasse entlang des damaligen Alpennordrandes, deren Nordküste zuweilen weit im heutigen Jura lag. Während die marinen Sandsteine der basalen Regressionszyklen weitgehend unter wellendominierten Bedingungen entstanden sind, stellten sich mit steigendem Meeresspiegel gemischtenenergetische und gezeitendominierte Ablagerungsbedingungen ein. In den von Grossrinnen durchfurchten subtidalen Faziesräumen des beckenzentralen Wattenmeeres und in strömungsexponierten Sandwatten wurden überwiegend sandige Sedimente (tw. als Muschelstandsteine), in den randlichen intertidalen Misch- und Schlickwatten dagegen dunkelgraue, heterolithische und pelitische Sedimente abgesetzt. Die damaligen Alpenflüsse bauten Deltas unterschiedlicher Grösse in das Meer vor, wobei je nach dominantem Sedimenttransport wellen-, gezeiten- oder flussdominierte Deltas entstanden. Nach dem letzten und zugleich stärksten Meeresspiegelanstieg zur Zeit der OMM dehnten sich zwischen den Deltas an der Südküste tiefere Buchten aus, deren dunkelgraue pelitische Sedimente vielfach als «Helvétien» bezeichnet wurden. Wohl infolge der verstärkten Sedimentzufuhr, verbunden mit eustatischem Meeresspiegelabfall, wich das OMM-Meer rasch gegen N zurück und verlandete im späten Burdigalian endgültig.

Die OMM steht heute grossräumig am Nord- und Südrand des Molasse-Beckens sowie im westlichen Mittelland (BE, FR) an (Fig. 1). Ihre Mächtigkeit beträgt im Süden maximal ca. 1000 m und keilt gegen den Beckennordrand, respektive im Jura, aus.

Eine weiterführende Darstellung der OMM findet sich in den Arbeiten von Homewood (1981), Allen et al. (1985), Berger (1985), Homewood et al. (1989), Keller (1989), Schoepfer (1989) und Lejay (1991). Mit der Hydrogeologie der OMM in der Westschweiz im Speziellen befassen sich die Publikationen von Thierrin (1988, 1990).

Hydrogeologische Architektur der OMM

Im Gegensatz zur USM präsentiert sich die OMM als lithofaziell weniger heterogen, und es können fünf hydrogeologisch bedeutsame, ineinander greifende Faziesbereiche unterschieden werden. Diese hydrostratigraphischen Einheiten (Fig. 14) sind im wesentlichen durch das Wirkungsverhältnis der Faziesfaktoren Sedimentzufuhr sowie Wellen- und Gezeitenenergie bestimmt worden.

- An der Basis der OMM befinden sich im südlichen Beckenteil der Zentralschweiz fünf bis sechs Sandsteinkomplexe, die im Küstenbereich unter wellendominierten Bedingungen gebildet wurden. Die primär gut durchlässigen Einheiten von 20–150 m Mächtigkeit sind durch gering permeable pelitische Einschaltungen aus Süsswassermolasse voneinander abgegrenzt und können als *Strandebenen* gedeutet werden. Diese

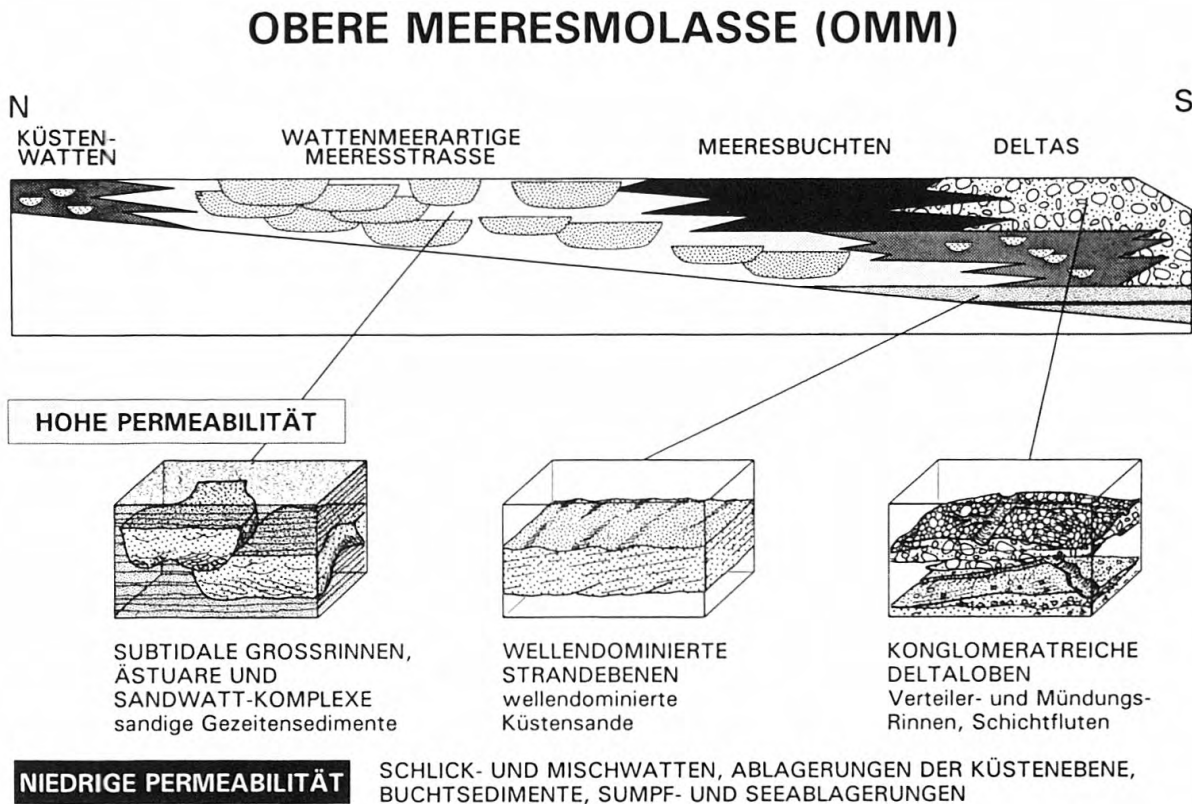


Fig. 14. Schematischer hydrostratigraphischer Schnitt durch die OMM mit dreidimensionaler Architektur der prinzipiellen hydrogeologischen Einheiten.

sandigen Strandebenen-Komplexe besitzen wohl tabulare bis schwach keilförmige Geometrien mit horizontalen Ausdehnungen von mehreren Kilometern.

- Der Grossteil der OMM wird von sandigen Gezeitenablagerungen gebildet, die in der *wattenmeerartigen Meeresstrasse* unter dem Einfluss der Tidenströmungen abgelagert wurden. Sie weisen am Beckensüdrand bis zu 450 m Gesamtmächtigkeit auf und werden gegen Norden hin zunehmend geringmächtiger. Aus hydrogeologischer Sicht bedeutend sind in diesem Faziesbereich vor allem die mittel- bis grobsandigen Ablagerungen der subtidalen Grossrinnen und der damit verbundenen, weit verzweigten Rinnensysteme. Durch deren seitliche Verlagerung entstanden bis zu einige Dekameter mächtige tabulare Sedimentkörper von grosser lateraler Ausdehnung und mit guten primären Permeabilitäten, denen auch die als Aquifere bekannten Muschel-sandsteine (Parriaux 1981) zugerechnet werden können. Diesen permeablen Sandsteinkörpern zwischengeschaltet sind entweder mässig durchlässige Ablagerungen subtidaler Sandplatten oder gering permeable heterolithische Sedimente in unterschiedlichen Mächtigkeiten. Letztere entstanden bei Meeresspiegelanstieg im tieferen Watt unter Mangelsedimentation.
- An der Nord- und an der Südküste akkumulierten im flachen Subtidal und Intertidal der *Sand-, Misch- und Schlickwatten* dunkelgraue, pelitische Sedimente mit landwärts zunehmenden Feinanteilen. Diese überwiegend heterolithischen Wattenablagerungen besitzen je nach Sandanteil mässige bis sehr geringe primäre Durchlässigkeiten. Gesamthaft bilden sie grossflächige, tabulare bis schwach keilförmige Sedimentkörper

von bis zu mehreren Dekametern Mächtigkeit. Meist stehen sie in Wechsellagerung mit ebenso schlecht durchlässigen Ablagerungen der Küstenebene, in denen gelegentlich permeable Rinnensandsteine eingelagert sind.

- Die mannigfaltigen *deltatischen Ablagerungen* an der Südküste zeichnen sich insgesamt durch einen heterogenen lithologischen Aufbau aus, wobei zwischen den verschiedenen Deltatypen grosse Unterschiede bestehen. Die in der OMM verbreiteten verwilderten Deltas (braid deltas), wie sie am Hörnli oder Napf vorkommen, werden durch verwilderte, bodenfruchtreiche Flussrinnen sowie Schichtfluten aufgebaut. Deren konglomeratisch-sandige Ablagerungen besitzen primär hohe Permeabilitäten und bilden wie in der Süsswassermolasse mehrere Meter bis Dekameter dicke, lobenartige Sedimentkörper mit grosser seitlicher Ausdehnung. Überdies kommen vor allem im distalen Teil weniger breite Sandstein- und Konglomeratkörper von Verteilerrinnen vor, die blind in den stauenden Buchtsedimenten enden. Vollständige deltaxische Ablagerungszyklen gehen im Dach in gering durchlässige, feinkörnige Sedimente der Deltaebene über, die tabulare Geometrien aufweisen. Ferner gelangten auch in den Buchten zwischen den Schüttungsloben sowie über aufgegebenen Loben stark pelitische, gering permeable Sedimente zum Absatz. Durch die vielfache Repetition von Deltazyklen entstanden im proximalen Bereich bis 500 m mächtige, stark heterolithische Sedimentkörper mit entsprechend wechselhaften Durchlässigkeitsverhältnissen. In der OMM existieren untergeordnet aber auch andere Deltatypen mit meist ebenso heterogenem lithologischem Aufbau.
- Während der maximalen Meeresvorstösse der jüngeren OMM (St. Galler-Formation) breiteten sich zwischen den Deltas im Süden flache *Meeresbuchten* aus. Unter schwachen Strömungen sedimentierten dort bis zu 200 m mächtige, tonig-siltig-feinsandige Abfolgen dunkelgrauer Frabe («Schiefermergel»). Die nördliche Verbreitungsgrenze dieser primär nur schwach durchlässigen hydraulischen Einheit ist ungewiss, wurden deren Sedimente am Beckennordrand doch anscheinend mit den oben erläuterten, heterolithischen Wattsedimenten verwechselt und als «Helvetien» miteinander korreliert.

Abgesehen von den geringpermeablen hydraulischen Einheiten der Küstenwatten und der Deltabuchten können der OMM grossräumig gute primäre Durchlässigkeiten in horizontaler Richtung zugeschrieben werden. Demgegenüber ist die vertikale Permeabilität in der aus regressiven Strandebenen aufgebauten basalen Einheit und vor allem in den Deltakomplexen durch tabulare pelitische Einschaltungen stark eingeschränkt. Vor allem in distalen Deltabereichen liegen grobdetritische Rinnenfüllungen oft in Form mehr oder weniger isolierter Sedimentkörper ohne wesentliche hydraulische Verbindung vor. Aber auch in den sandigen Ablagerungen der Meeresstrasse im zentralen Beckenteil ist eine Verminderung der vertikalen Durchlässigkeiten als Folge der lithologischen Heterogenitäten und Diskontinuitäten zu erwarten.

5.5 Obere Süsswassermolasse (OSM)

Mit der Regression des OMM-Meeres setzte im jüngeren Burdigalian die Sedimentation der kontinentalen OSM ein (Fig. 2), deren Ablagerungen bis ins jüngere Serravallian nachweisbar sind. Am damaligen, gegenüber heute noch ca. 10 km weiter süd-

lich gelegenen Alpennordrand stiessen in den Schüttungszentren (Pfänder, Hörnli, Napf) gewaltige konglomeratische Schuttfächer mit verwilderten Flusssystemen zuweilen weit in die Alluvialebene vor. Diese radialen Alpenflüsse mündeten im distalen Beckenteil in ein axiales Hauptentwässerungssystem, das aufgrund des hohen Hellglimmergehalts als Glimmersand-Stromsystem bezeichnet wird. Nach heutiger Kenntnis entwässerte es das damalige Alpenvorland vom Böhmischem Massiv bis Genf und floss von Osten her durch das Gebiet des heutigen Faltenjura nach Westen in das Rhonetal zum Mittelmeer ab. Auch entlang des sich hebenden Schwarzwaldes entstanden kleinere Schüttungen, bekannt als Juranagelfluh. Im Gegensatz zur USM, in welcher ausgedehnte lakustrische Sedimente weitgehend auf den nordwestlichen Beckenteil beschränkt sind, kommen in der OSM Seeablagerungen mit Süswasserkalken (z. B. Öhninger Zone) sowie Molassekohlen (z. B. Käpfnach) weit verbreitet vor und zeugen von zeitweilig ausgedehnten Seen, Sümpfen und Mooren. Besonders mächtig entwickelt sind lakustrische Sedimente zwischen den Schuttfächern und in deren distalen Teilen. Überdies reichen in der unteren OSM mächtigere lakustrische Einschaltungen zuweilen bis in die proximalen Schuttfächer und bilden mancherorts lithostratigraphisch gut erfassbare, grossräumige Horizonte (Öhninger Zone, «Basismergelzone» der Napfschichten, «Basiszone» der OSM etc.). Daneben gelangten in der Alluvialebene vor allem pelitische Sedimente als Überschwemmungs- und Bodenbildungen zum Absatz (bunte Siltsteine und Schlammsteine).

Gesamthaft lagen in der OSM aber ähnliche Faziesräume und schnell ändernde Ablagerungsbedingungen wie in der USM vor, was sich in ihrem ebenso heterogenen lithofaziellen Aufbau niederschlug.

Die OSM bildet heute weitgehend den Felsuntergrund des zentralen und östlichen Mittellandes, ist aber auch als Erosionsrelikte in den Synklinalen des Faltenjura erhalten geblieben (Fig. 1). Ihre heutige Mächtigkeit beträgt am Südrand des Molasse-Beckens noch maximal ca. 1500 m, indes sie im Jura auskeilt.

Weiterführende Literatur über die OSM findet sich zum Beispiel in Hofmann (1951, 1960) oder Büchi (1958, 1959). Während Bürgisser (1980, 1981, 1984) eine fundamentale lithofazielle und -stratigraphische Beschreibung des Hörnli-Schuttfächers wiedergibt, erläutert Nagra (1988) im Speziellen die hydrogeologischen Aspekte der OSM. Die auf umfangreichen Feldarbeiten und Quellenbeobachtungen beruhenden Arbeiten von Balderer (1979, 1983) beleuchten die oberflächennahe OSM des Murgtales TG als hydrogeologisches Gesamtsystem.

Hydrogeologische Architektur der OSM

Die hydrogeologische Architektur der OSM ist in ihrer Komplexität und Vielfalt mit jener der USM vergleichbar, wenn auch bei deren Ablagerung paläoklimatisch und -geographisch sicher unterschiedliche Bedingungen herrschten. Zyklische Sedimentabfolgen mit sich rasch ändernder Lithofazies – vorab Flussablagerungs-Sequenzen – prägen erneut das Lithosom. Im Prinzip finden sich darin die gleichen Architektur-Elemente wie in der USM wieder: Rinnengürtel (RG), Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR), Uferwälle und distale Überschwemmungssande (UW), Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) sowie lakustrische Ablagerungen (LAK) (vgl. Kap. 4.1). Entsprechend der Proximalität zum Liefergebiet können im vereinfachten

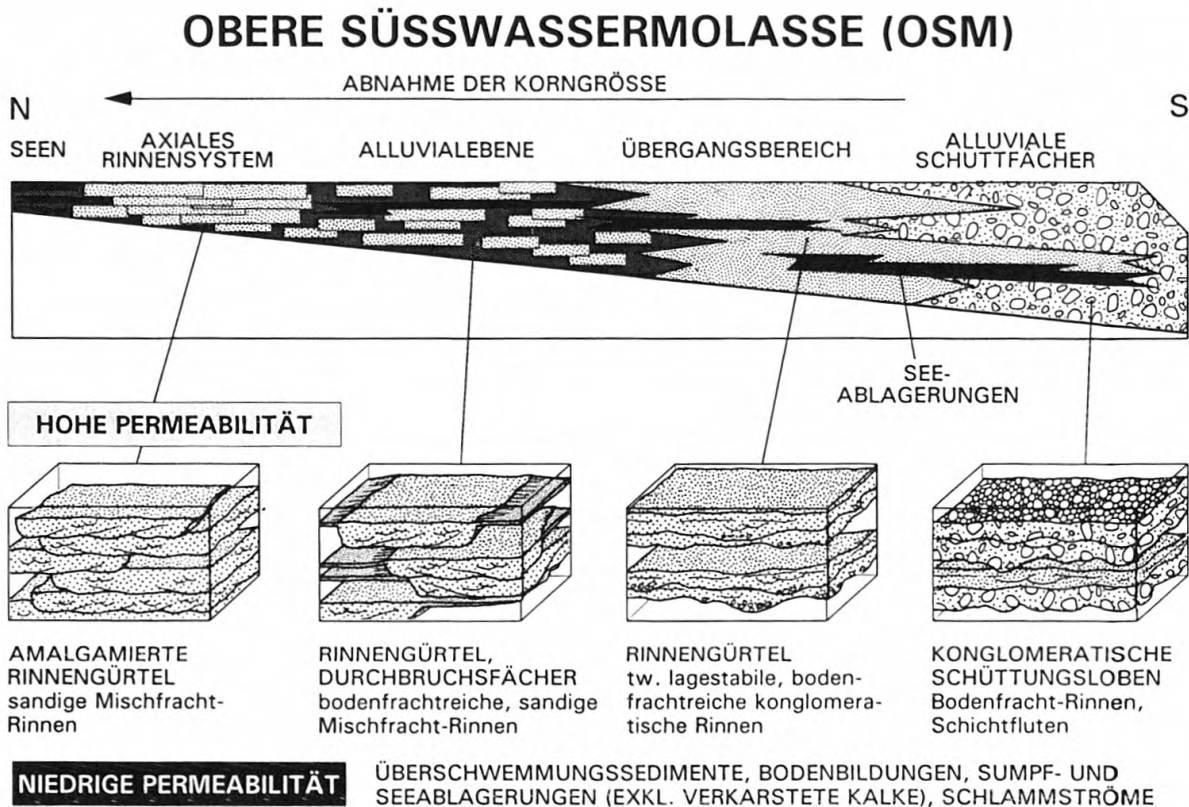


Fig. 15. Schematischer hydrostratigraphischer Schnitt durch die OSM mit dreidimensionaler Architektur der prinzipiellen hydrogeologischen Einheiten.

synsedimentären Querprofil (Fig. 15) vom proximalen zum distalen Vorland wiederum vier wesentliche, miteinander verzahnte Faziesgürtel, respektive hydrostratigraphische Einheiten unterschieden werden (vgl. auch Bürgisser 1981).

- Die konglomeratischen *alluvialen Schüttfächer* (Konglomerat-Assoziation H1 von Bürgisser 1981) bestehen grösstenteils aus Rinnen- und Schichtflutablagerungen verwilderter Bodenfracht-Flüsse. Diese Konglomerate und die damit assoziierten Sandsteine besitzen hohe primäre Permeabilitäten und bilden tabulare Architektur-Elemente mit grosser lateraler Ausdehnung. Sie erreichen Mächtigkeiten von bis zu mehreren Dekametern. In unregelmässigen Abständen zwischengeschaltet kommen darin auch die gering permeablen, pelitischen Architektur-Elemente UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden) und gelegentlich auch LAK (lakustrische Ablagerungen) vor. Das Verhältnis der grobdetritischen Ablagerungen zu den feindetritischen liegt zwischen 3 : 2 und 9 : 1.
- Der distale Schüttfächer im *Übergangsbereich* zur Alluvialebene (Konglomerat/Mergel-Assoziation H2 von Bürgisser 1981) wurde durch verwilderte Bodenfracht-Flussrinnen mit sinusförmigem Verlauf aufgebaut, die relativ lagestabil waren. Deren mehrere Meter bis wenige Dekameter mächtigen und mehrere hundert Meter breiten Rinnengürtel (Architektur-Element RG) bestehen überwiegend aus Konglomeraten und bilden Architektur-Elemente mit hohen primären Permeabilitäten. Sie liegen in einer gering durchlässigen pelitischen Matrix aus bis zu 20 m mächtigen Ablagerun-

- gen der Überschwemmungsebene (Architektur-Element UPS) mit dünneren Einschaltungen von Überschwemmungssanden (Typ UW). Das Verhältnis der grobdetritischen Rinnensedimente zu den feindetritischen Ablagerungen der Überschwemmungsebene liegt in der Grössenordnung von 1 : 2 bis 1 : 5.
- Im Vergleich mit der USM besass die eigentliche *Alluvialebene* der OSM (Sandstein/Mergel-Assoziation H3 von Bürgisser 1981) infolge der bereits weit fortgeschrittenen Einengung des Vorland-Beckens eine wesentlich geringere Ausdehnung. Die wiederum verwilderten, bodenfrachtreichen Flüsse lagerten rund 200 bis 500 m breite, sandige Rinnengürtel (RG) mit guten primären Durchlässigkeiten ab. Je nachdem, ob diese Rinnengürtel amalgamiert sind oder nicht, beträgt deren Mächtigkeit zwischen ca. 3 bis 16 m (Angaben Hörnli-Schuttfächer, Bürgisser 1984). Der überwiegende Teil dieses Faziesgürtels jedoch besteht aus wenig permeablen Ablagerungen der Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (UPS). Darin sind mässig permeable Uferwallsedimente (UW) und gut durchlässige, mit den Rinnengürteln in Verbindung stehende arenitische Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) zwischengeschaltet. Deren Geometrien sind mit den entsprechenden Architektur-Elementen der USM vergleichbar. In dieser Fazieszone beträgt der Anteil an primär gut durchlässigen Rinnengürteln zwischen 12 % bis 25 %. In der OSM sind die als Glimmersand-Stromsystem bekannten Ablagerungen des *axialen Entwässerungssystems* besonders markant entwickelt. Dessen bodenfrachtreiche, wohl teilweise immer noch verwilderten Mischfracht-Flüsse liessen im distalen Teil grösstenteils amalgamierte sandige Rinnengürtel (RG) mit hohen primären Permeabilitäten entstehen, die in Richtung Ost-West verlaufen. Bei Breiten von vielfach über 1000 m beträgt ihre Mächtigkeit meist einige wenige Dekameter. Die gegenseitige Verbundenheit der Rinnengürtel im axialen Entwässerungssystem kann als hoch eingestuft werden.
 - In Bereichen anhaltender Subsidenz und geringer Sedimentzufuhr breitete sich auch in der OSM eine mitunter sehr ausgedehnte *Sumpf- und Seenlandschaft* aus. Besonders gut entwickelt sind ihre pelitischen und karbonatischen Ablagerungen zwischen den Schuttfächern. Die vorherrschenden, gering durchlässigen Architektur-Elemente UPS (Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen) und LAK (Seeablagerungen) liegen in Mächtigkeiten von bis zu einigen Dekametern vor und können lateral über hunderte von Metern oder gar mehrere Kilometer verfolgt werden. Während dünnere Architektur-Elemente dieses Typs in den Ablagerungen der Alluvialebene unregelmässig verteilt vorkommen, können die mächtigeren mitunter lithostratigraphisch bedeutsame Horizonte bilden.

Aus sedimentologischer Sicht besitzt die OSM insgesamt ähnliche primäre hydrogeologische Eigenschaften wie die USM, wird sie doch durch vergleichbare Architektur-Elemente aufgebaut. So sorgen auch hier die Rinnengürtel für eine gute primäre horizontale Durchlässigkeit, während die vertikale Permeabilität analog zur USM je nach hydrofazieller Einheit als unterschiedlich zu bewerten ist. Trotzdem bestehen markante Unterschiede, indem in der OSM über weite Bereiche tabulare Einschaltungen von lakustrischen Sedimenten vorkommen. Infolge ihrer geringen Permeabilität bilden diese wichtige hydrogeologische Diskontinuitäten, die die vertikale Durchlässigkeit stark behindern oder lokal gar unterbinden. Überdies besitzt der Faziesgürtel der Alluvialebe-

ne eine im Vergleich mit der USM viel geringere Breite, und die permeablen Rinnengürtel des sandigen axialen Entwässerungssystems sind wesentlich besser entwickelt.

6. Postsedimentäre Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der Molasse durch die Diagenese und die Tektonik

6.1 Überblick über den aktuellen Kenntnisstand

Die heutigen hydrogeologischen Eigenschaften der Molasse sind nach deren Ablagerungen im wesentlichen durch die porositäts- und permeabilitätsverändernden Prozesse der Diagenese und der Tektonik überprägt worden.

Die *diagenetische Veränderung* der Molasse-Sedimente begann unmittelbar nach deren Ablagerung, wobei es prinzipiell zwischen der mechanischen und der chemischen Diagenese zu unterscheiden gilt. Die mechanische Diagenese ist in erster Linie vom Überlagerungsdruck abhängig, der durch die später abgelagerten Sedimente erzeugt wird. Die zunehmende Kompaktion bewirkt vor allem eine Abnahme der primären Porosität und der Mächtigkeit. Demgegenüber wird die chemische Diagenese vom Ausgangschemismus des Sediments und der Porenwässer gesteuert und beinhaltet die komplizierten Prozesse der Zementbildung sowie der Minerallösung und -neubildung. In Relation zur Versenkungstiefe reagiert die chemische Diagenese stark auf die Temperaturerhöhung sowie die chemische Veränderung der Porenlösungen und führt meist zu einer weiteren Porvenverminderung, gelegentlich aber auch zu einer sekundären Erhöhung der Porosität.

Der aktuelle Wissensstand über die Diagenese der Schweizerischen Molasse ist – wie bereits unter Kapitel 2 ausgeführt – recht rudimentär und basiert im wesentlichen auf den grundlegenden Arbeiten von Füchtbauer (1964, 1967) und Monnier (1979, 1982), der vor allem die Diagenese der Tonmineralien studierte. Füchtbauer zufolge war die Molasse relativ schwachen diagenetischen Veränderungen unterworfen und besitzt eine geringe diagenetische Reife. Ausschlaggebend ist seiner Ansicht nach einerseits das niedrige Alter der Molasse, andererseits der hohe Kalkgehalt, welcher Sandkörner und teilweise auch Tonmineralien vor Umwandlung schützt. Im rasch subsidierenden Vorland-Becken wirkte die mechanische Kompaktion als bedeutender diagenetischer Faktor und führte mit zunehmender Versenkungstiefe zu einer entsprechenden Reduktion der primären Porosität. Dabei stellt Füchtbauer (1964) eine starke Abhängigkeit der Porosität von der Korngrösse und dem Kalzitgehalt fest. So nimmt die Porosität bei gleichem Kalzitgehalt mit sinkender Korngrösse ab, was auch durch neue Untersuchungen bestätigt wird (vgl. Kap. 4.3).

Wie bereits angedeutet, sind die Gesteine der Molasse generell durch Kalzit zementiert. Neuere Untersuchungen sowohl in der subalpinen UMM der süddeutschen Molasse (Kronmüller & Kronmüller 1987) als auch in der distalen USM des Schweizerischen Molasse-Beckens (Keller et al. 1990) haben einen frühdiagenetischen Ursprung dieser Kalzitemente nachgewiesen, die eine spätere porenvermindernde Kompaktion teilweise verhinderten. Demgegenüber dürften die von Diem (1986b) in der subalpinen UMM beobachteten Quarzemente infolge der grossen ursprünglichen Versenkungstiefe spätdiagenetisch durch Drucklösung in den Sandsteinen (Füchtbauer & Müller 1977) entstanden sein.

Zahlreiche Beobachtungen zeigen, dass die *Porositäten* im Schweizerischen Molasse-Becken sowohl mit der Tiefe als auch gegen den Alpenrand hin abnehmen (z. B. BEW 1981, Kaelin et al. 1992), wobei zu beachten ist, dass die seismisch bestimmte absolute Porosität meist grösser ist als die hydrogeologisch relevante offene Porosität.

Die in der Schweizer Molasse beobachteten geringen offenen Porositäten werden von Füchtbauer (1964) mit der im Vergleich zur süddeutschen Molasse grösseren tektonischen Einengung begründet. Der Grad der diagenetischen Kompaktion und Zementation wie auch die damit verbundene Porositätsverminderung spiegeln sich sowohl in den von Norden nach Süden als auch mit der Tiefe zunehmenden seismischen Geschwindigkeiten der Molasse wider (Lohr 1967, Büchi & Bodmer 1983). So konnten in der Schweiz im Vergleich mit der süddeutschen Molasse hohe Anfangsgeschwindigkeiten beobachtet werden. Dass die Schichtgeschwindigkeiten der OSM und der OMM von Norden gegen Süden hin unverhältnismässig stark zunehmen, führt Lohr (1967) auf die Wirkung der lateralen, von Süden nach Norden gerichteten Kompression zurück. Ob dieses Verhalten nicht teilweise aus der Änderung der Lithofazies resultiert (vgl. Kap. 5), ist nicht geklärt. Es liegen aber weitere Anhaltspunkte für eine laterale Kompaktion der Molasse vor. So mutmasste Breddin (1958) aufgrund seiner Beobachtungen an deformierten Molassefossilien einen starken Einfluss von lateraler Kompression, verbunden mit einer Porositätsabnahme bereits früh nach der Ablagerung. Und Lemcke (1972, 1973, 1984) deutete die in der süddeutschen Molasse beobachteten überhydrostatischen Formationsdrucke als Folge der lateralen Kompression, die seiner Ansicht nach bis in die Gegenwart anhält und vor allem die OMM und OSM betrifft. Neueste Untersuchungen an verschiedenen Bohrungen in Süddeutschland von Müller et al. (1988) erklären diese Überdrucke einerseits durch einen rezenten tektonischen Druckaufbau, andererseits als «fossile» Überdrucke in sedimentär und/oder tektonisch isolierten Sedimentpaketen.

Aufgrund der seismischen Geschwindigkeiten in verschiedenen Bohrungen berechneten Kaelin et al. (1992) die Porositätsverteilungen und ermittelten daraus die maximalen theoretischen Versenkungstiefen. Aufgrund der Gegenüberstellung mit der aktuellen Versenkungstiefe errechneten sie den Betrag der postsedimentären Erosion, wobei sie für die Subalpine Molasse infolge späterer Hebung (ab dem Tortonian) eine Nettoerosion von maximal 8.5 km, für den Nordrand des Molasse-Beckens dagegen eine solche von 4 km postulieren. Diese von Kaelin et al. (1992) errechneten postsedimentären Erosionsraten sind im distalen Beckenteil rund doppelt so hoch wie die von Monnier (1982) aufgrund der Tiefenlage der Übergangszone zwischen Smektit und Mixed-layer Tonmineralien ermittelte maximale Versenkungstiefe von 2 km. Ob die Berechnungen von Kaelin et al. (1992) ohne Berücksichtigung der oben zitierten Effekte einer lateralen Kompaktion nicht mit Fehlern behaftet ist, bleibe dahingestellt. Jedenfalls bestätigen sie die gegen Westen zunehmende, starke Heraushebung der Molasse, die zu dem bereits von Lemcke (1973, 1974) grossräumig beobachteten, ostwärtigen Einfallen der Beckenachse führte. Diese asymmetrische axiale Hebung liefert auch eine hinreichende Erklärung für die oben erwähnten niedrigen Porositäten und hohen seismischen Anfangsgeschwindigkeiten im Schweizerischen Molasse-Becken.

Im Zusammenhang mit den rezenten Porositäten müssen auch die in der oberflächennahen Verwitterungszone beobachteten *sekundären Porositäten* erwähnt werden. Diese offenen Porositäten sind als Folge partieller Lösung des porenfüllenden Kalzit-zements

durch die von der Oberfläche her einsickernden Wässer zu verstehen. Sie zeigen in grobkörnigen Sedimentgesteinen mit bereits vorhandenem offenem Porenraum grosse Wirkung und werden durch die oberflächennahe «Verwitterungs-» und «Entlastungsklüftung» wesentlich begünstigt. Wie in Bohrungen bei Pfaffnau (LU) beobachtet werden konnte, geht diese Lösungsporosität meist einher mit einer braungrauen Verfärbung der Sandsteine und verleiht ihnen ein «zuckerartiges» Aussehen (vgl. Kap. 4.2). Die Zone mit junger sekundärer Porosität reicht je nach Umgebungsbedingungen bis in wenige Dekameter Tiefe; so z. B. in der vertikal stehenden USM im Gütsch-Stollen bei Luzern bis ca. 40 m und in der horizontal liegenden USM in Pfaffnau bis ca. 5 bis 15 m. Wie der in Pfaffnau hydraulisch getestete, oberflächennahe Rinnengürtel zeigt, kann die Durchlässigkeit infolge der sekundären Porosität ohne weiteres um zwei Zehnerpotenzen zunehmen (RG mit Lösungsporosität: $K = n \cdot 10^{-5}$ m/s, frische RG: $K = n \cdot 10^{-7}$ m/s, vgl. Fig. 10), wobei hier auch die oberflächennahe Kluftporosität einen Einfluss haben dürfte.

Die Hydrogeologie der Molasse wird aber nicht nur durch die primären sedimentären Eigenschaften und die Diagenese geprägt, vielmehr spielen im deformierten Vorland-Becken die *tektonischen Prozesse* eine ebenso bedeutende Rolle. So führten diese zu einer räumlichen Umgestaltung des Vorland-Beckens (Überschiebung, Faltung, Hebung etc.), einhergehend mit einer Veränderung von Struktur und Gefüge der Molassegesteine. Während die Grosstektonik und die regionale Strukturgeologie des Molasse-Beckens Gegenstand zahlreicher Publikationen ist (z. B. Heim 1919, Baumberger 1931, Renz 1937, Habicht 1945b, Lemcke 1972, Naef et al., 1985, Pfiffner 1986 sowie Jordi 1990 und Burkhard 1990), gibt es über systematische kleinräumige Struktur- und Gefügeanalysen im Molasse-Becken nur wenige publizierte Angaben (Aubert 1981, Schrader 1988). Es sind aber gerade diese kleinräumigen Strukturen wie *Klüfte*, *Spalten* und *Brüche*, die bekanntermassen einen enormen Einfluss auf die hydrogeologischen Eigenschaften der Molasse ausüben. So führen offene Brüche, Spalten und Klüfte besonders in Gesteinen mit sprödem Deformationsverhalten (Sandsteine, Konglomerate, Süsswasserkalke) zu einer weiteren Art von sekundärer Porosität, der *Fissurations-Porosität*, welche die Durchlässigkeit um einige Zehnerpotenzen erhöhen kann. Darüberhinaus können sie Aquifere miteinander in Kontakt bringen. Demgegenüber wirken geschlossene oder mit undurchlässigem Kluftsediment verfüllte Brüche und Klüfte oftmals als Siegel oder Barrieren. Kleinere Brüche und Klüfte als hochwirksame hydrogeologische Heterogenitäten sind jedoch schwer prognostizierbar, treten sie doch in einer bestimmten tektonischen Fazies stochastisch verteilt auf.

Ebenfalls sind Publikationen nicht bekannt, die sich mit dem Phänomen der oberflächennahen «Entlastungs-» oder «Verwitterungsklüftung» in der Molasse befassen, obwohl diese in engem Wechselspiel mit der verwitterungsbedingten sekundären Porosität im Grenzbereich zum Lockermaterial mitunter prägnante Aquifere mit lockergesteinsähnlichen Permeabilitäts-Eigenschaften bilden. So konnten beispielsweise in den Sandsteinen der Luzerner-Formation (untere OMM) der Stadt Luzern eine mehr als 10 m mächtige Zone mit «Entlastungs-» oder «Verwitterungsklüftung» beobachtet werden, deren berechnete Durchlässigkeiten zwischen $K = n \cdot 10^{-4}$ bis $K = n \cdot 10^{-5}$ m/s liegen. Während sich diese oberflächennahe «Verwitterungsklüftung» und die meist mit ihr einhergehende sekundäre Porosität insbesondere bei der Nutzung des oberflächen-

nahen Felsgrundwassers (Sodbrunnen) und bei untiefen Erdwärmesonden positiv auswirken, stellen sie vor allem für Oberflächendeponien ein grosses Problem dar.

Nach Büchi & Bodmer (1983) ist die hydrogeologisch bedeutsame Verwitterungszone auch seismisch klar erkennbar; ihre Mächtigkeit beträgt am Nordrand des Molasse-Beckens mehr als 30 m, am Südrand dagegen weniger als 20 m.

6.2 Zusammenfassende Modellvorstellung

Trotz der vielen offenen Fragen und Unsicherheiten soll an dieser Stelle versucht werden, die bisherigen Kenntnisse über den hydrogeologischen Einfluss von Diagenese und Tektonik in einem vereinfachten Modell zusammenzustellen.

Ausgehend von der unter Kapitel 5 beschriebenen synsedimentären Architektur lässt sich die Molasse als Sedimentkeil in einem hypothetischen, undeformierten Zustand darstellen (Fig. 16 oben). Obwohl diese Situation sicher nie existent war, verdeutlicht sie, dass die Isolinien gleicher Versenkungsdiagenese die lithostratigraphischen Grenzen infolge der höheren Subsidenz- und Sedimentationsraten im Süden diskordant durchschneiden. Allein aus dieser einfachen geometrischen Überlegung geht hervor, dass z. B. die Basis der OMM im Süden eine höhere diagenetische Reife – vor allem in Form der porenraumreduzierenden mechanischen Kompaktion – aufweist als im distalen Beckenteil. Dieser Trend wird umso deutlicher, wenn auch der nach dem Tortonian erodierte Sedimentstapel mitberücksichtigt wird, der im Süden wohl doppelt so mächtig war wie im Norden (Kaelin et al. 1992, vgl. Kap. 6.1). Dieser Vorstellung entsprechende Resultate lieferten beispielsweise die Untersuchungen von Smosna (1989) in der Torok Formation von Alaska.

Im schematischen Schnitt durch das zentrale rezente Vorland-Becken (Fig. 16 unten, nach Müller et al. 1988 und Burkhard 1990) wird deutlich, dass infolge von Überschiebung und Faltung Gesteine unterschiedlicher diagenetischer Reife teilweise übereinandergestapelt oder an die Oberfläche aufgebogen wurden. Somit treffen wir heute an der Felsoberfläche des Molasse-Beckens von Norden nach Süden diagenetisch zunehmend reifere Sedimente (vgl. Büchi & Bodmer 1983) und in der Subalpinen Molasse eine vertikale und horizontale Wechselfolge von Gesteinen mit unterschiedlichem diagenetischem Reifegrad an. Obwohl der laterale tektonische Druck und die überschiebungsbedingte, zusätzliche mechanische Kompaktion in Raum und Zeit nicht berücksichtigt sind (vgl. Monnier 1982 und Müller et al. 1988), veranschaulicht dieses Modell die vorgängig geschilderten, von Norden nach Süden abnehmenden Porositäten wie auch die Entstehung der Überdrucke im proximalen Molasse-Becken (vgl. Kap. 6.1).

Unter Mitberücksichtigung der hydraulisch sehr bedeutsamen tektonischen Fissurations-Porosität lässt sich das Molasse-Becken von Norden nach Süden grob in folgende vier hydrogeologisch relevante Abschnitte gliedern, wie dies bereits die Autoren des BEW (1981) versucht haben.

I Zone mit guter primärer Porosität und teilweise bedeutender Fissurations-Porosität

Dieser Bereich wird durch die tektonisierte Subjurassische Molasse mit ihrer relativ geringen Versenkungstiefe gebildet und besitzt überwiegend gute Durchlässigkeitseigenschaften. Architektur-Elemente mit hohen primären Porositäten haben

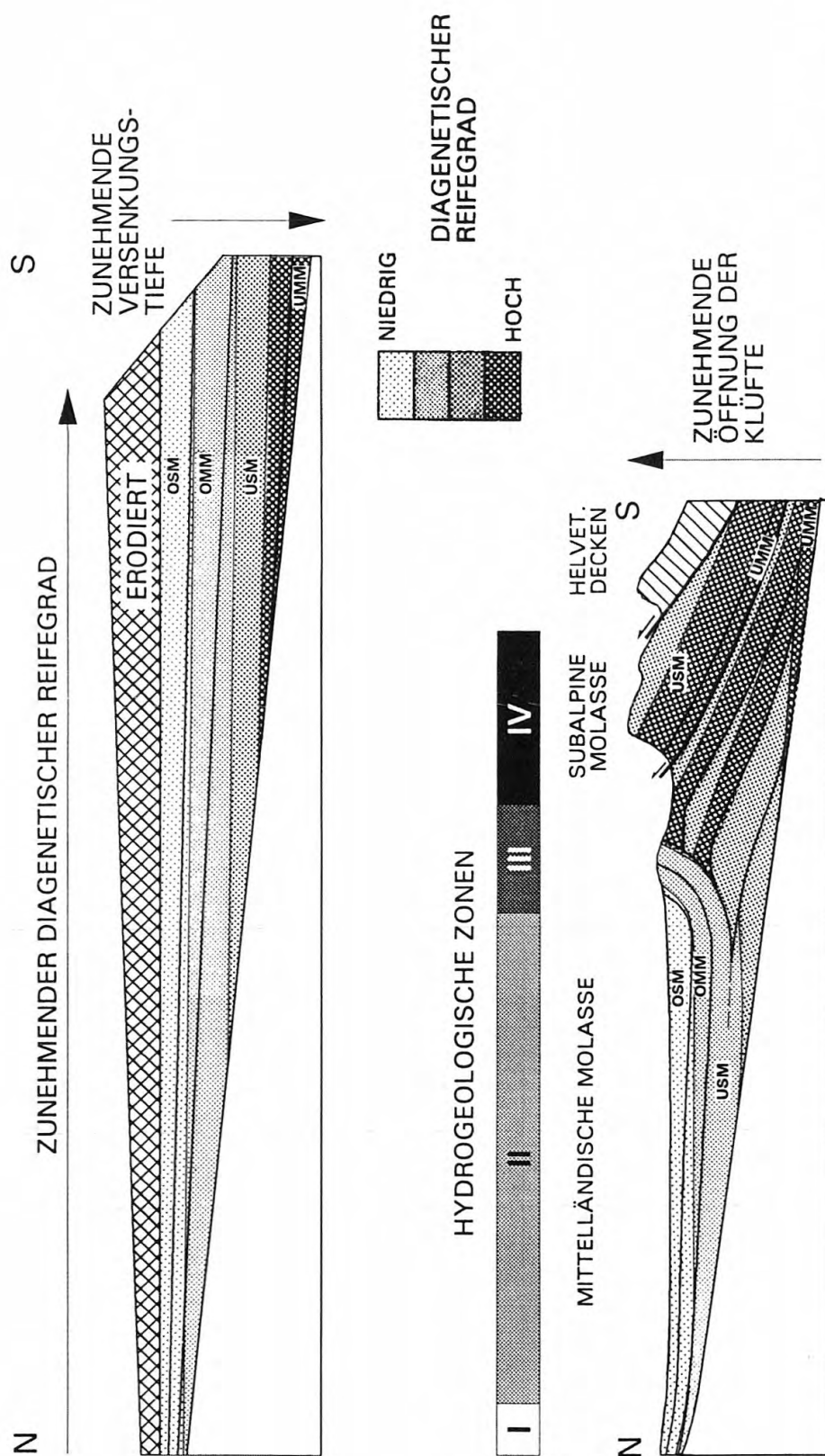


Fig. 16. Das obere Modell zeigt den Sedimentkeil des alpinen Vorlandes in einem hypothetischen undeformierten Zustand. Infolge der höheren Subsidenz im Süden werden die lithostratigraphischen Grenzen von den Isolinien gleicher Versenkungstiefe (Grenzen zwischen den unterschiedlich gerasterten Bereichen) diskordant durchschnitten. Der schematische Schnitt durch das rezente Molasse-Becken (unten) veranschaulicht, dass durch die alpine Deformation Sedimente unterschiedlicher diagenetischer Reife teilweise übereinandergestapelt oder an die Oberfläche aufgebogen wurden. Es lassen sich vier hydrogeologisch relevante Abschnitte unterscheiden: (I) Zone mit guter primärer Porosität und teilweise bedeutender Fissurations-Porosität in der tektonisierten Subjurassischen Molasse, (II) Zone mit mittlerer primärer Porosität und eher geringer Fissurations-Porosität in der Mittelländischen Molasse, (III) Zone mit Fissurations-Porosität und schwacher primärer Porosität in der gefalteten Molasse und (IV) Zone mit teilweise guter Fissurations-Porosität und unbedeutender primärer Porosität in der Subalpinen Molasse (nicht massstäblich).

in der Verwitterungszone häufig lockergesteinsähnliche Eigenschaften mit entsprechend hohen Durchlässigkeiten.

II *Zone mit mittlerer primärer Porosität und eher geringer Fissurations-Porosität*

Im Gebiet der Mittelländischen Molasse liegen infolge eher schwacher Tektonisierung und mässiger Versenkungstiefen mittlere Permeabilitätsverhältnisse vor, die stark von der synsedimentären Architektur abhängig sind.

III *Zone mit Fissurations-Porosität und schwacher primärer Porosität*

Diese Zone liegt im Bereich der gefalteten Molasse (Monoklinale und Faltenmolasse) und besitzt wegen der ursprünglich höheren Versenkungstiefe und der stärkeren tektonischen Deformation mässige Permeabilitäten.

IV *Zone mit teilweise guter Fissurations-Porosität und unbedeutender primärer Porosität*

Die hydrogeologischen Eigenschaften im Bereich der Subalpinen Molasse werden durch die Fissurations-Porosität bestimmt und sind je nach dem Grad der Tektonisierung stark schwankend.

Infolge der axialen Kippung des Molasse-Beckens treten auch von Osten nach Westen zunehmend ältere und – in vergleichbarer Proximalität zum Alpenrand – diagenetisch reifere Sedimente an die Oberfläche (vgl. Fig. 1), was auch in dieser Richtung zu entsprechenden hydrogeologischen Verschiedenheiten führt.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass die hydrogeologischen Eigenschaften vor allem in Bereichen mit hohen Anteilen an primären Porositäten durch die sedimentäre Architektur (Kap. 5) gesteuert wird und entsprechend prognostizierbar ist. Die primäre Architektur spielt ebenso bei der Fissurations-Porosität (Zone IV) eine grosse Rolle, werden doch vor allem die kompetenten Sandsteine und Konglomerate unter Kluft- und Bruchbildung spröde deformiert. Obwohl Klüfte und Brüche in stärker tektonisierten Zonen gehäuft und geometrisch geordnet auftreten, sind sie in einem bestimmten lokalen Spannungsfeld vorwiegend stochastisch verteilt und dementsprechend schwierig zu prognostizieren. Der Vollständigkeit halber sei festgehalten, dass die Fissurations-Porosität gegen die Tiefe hin generell abnimmt (Büchi & Bodmer 1983).

Zum Schluss sei nochmals auf die grosse hydrogeologische Bedeutung der oberflächennahen Verwitterungszone mit «Druckentlastungs-» oder «Verwitterungsklüftung» und der damit häufig auftretenden sekundären Porosität hingewiesen, bilden diese doch über weite Bereiche des Mittellandes eine bis zu mehrere Meter mächtige hydraulische Einheit mit derart guten Durchlässigkeiten, dass dort die Forderungen der gegenwärtig gültigen technischen Verordnung für Abfälle (TVA) an Deponiestandorte nicht oder nur bedingt erfüllbar sind.

7. Schlussbemerkungen

Der Leser dieses Artikels mag vielleicht in der Zusammenfassung eine Tabelle mit repräsentativen Durchlässigkeitswerten und Modellen erwartet haben, wie es die Figur 7 für die distale USM wiedergibt. Trotz der von verschiedenen Unternehmungen spontan zur Verfügung gestellten hydrogeologischen Kennwerte konnte aber angesichts des spärlichen Datenmaterials im Rahmen dieses Artikels kein derartiger Überblick zusammengestellt werden. Bis wir die Hydrogeologie des für die Schweiz so bedeutsa-

men Molasse-Beckens für die Aufgaben der Zukunft hinreichend verstehen werden, sind noch zahlreiche weiterführende Untersuchungen zu leisten und systematische Datensammlungen anzulegen. Damit schliesst sich der Kreis zu Kapitel 2 «Aktueller Wissensstand und Problematik». Der vorliegende Artikel soll dazu eine bescheidene Anregung bieten.

Verdankungen

Die vorliegende Arbeit basiert im wesentlichen auf einem Vortrag, den ich unter dem Titel "Investigations of Aquifers and Seals in the Swiss Molasse Basin" am "Symposium on Swiss Molasse Basin" (Bern, 22.–23. November 1991) gehalten habe.

Für die wertvollen Diskussionen und Anregungen danke ich Dr. H. Burger (Aarau), Dr. S. Burns (Bern), Dr. Hp. Funk (Zürich), Dr. H. G. Lorenz (Luzern), Prof. A. Matter (Bern), Dr. W. Müller (Wettingen) und Dr. N. H. Platt (Surrey, GB). B. Mazenauer (Luzern) und Dr. H. G. Lorenz (Luzern) haben das Manuskript verdankenswerter Weise in sprachlicher und inhaltlicher Hinsicht kritisch überprüft. Dr. N. H. Platt (Surrey, GB) sei für die englische Übersetzung der Zusammenfassung, R. Stadelmann (Luzern) für die Reinzeichnung der geologischen Karte und B. Schleiss (Luzern) für die graphische Beratung gedankt. Auch möchte ich all jenen danken, welche mir grosszügigerweise hydrogeologische Daten zur weiteren Verwendung überlassen haben, namentlich Dr. W. Müller (NAGRA, Wettingen), R. Gemperle (SOLEXPERS AG, Schwerzenbach) und Dr. J. Wanner (Kellerhals & Haefeli, Bern). Besonderer Dank jedoch gebührt Dr. M. Weidmann (Jongny) und Dr. W. Balderer (Zürich), die das vorliegende Manuskript begutachtet und durch ihre fundierte Kritik und ihre wertvollen Anregungen wesentlich zum Gelingen dieses Artikels beigetragen haben.

LITERATURVERZEICHNIS

- ALLEN, P. A., MANGE-RAJETZKY, M., MATTER, A. & HOMEWOOD, P. 1985: Dynamic palaeogeography of the open Burdigalian seaway, Swiss Molasse basin. *Eclogae geol. Helv.* 78, 351–382.
- AUBERT, D. 1981: Géomorphologie du Gros-de-Vaud. *Mém. Soc. vaud. Sci. nat.* No. 100, Vol. 17, 57–116.
- BALDERER, W. 1979: Die Obere Süsswassermolasse als hydrogeologisches Gesamtsystem. *Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchât.* 3, 27–39.
- 1982: Berechnungsmethoden zur quantitativen Abschätzung der Durchlässigkeit von porösen Festgesteinen mit Hilfe des Quellabflusses. *Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchât.* 4, 231–258.
 - 1983: Hydrogeologie der Oberen Süsswassermolasse im Einzugsgebiet des Aubaches (Schweiz). *Steir. Beitr. Hydrogeol.* 34/35, 15–54.
 - 1989: Hydrochemie der Quellen der Oberen Süsswassermolasse im Einzugsgebiet des Aubaches (Schweiz). *Steir. Beitr. Hydrogeol.* 40, 49–74.
 - 1990: Hydrogeologische Charakterisierung der Grundwasservorkommen innerhalb der Molasse der Nordostschweiz aufgrund von hydrochemischen und Isotopenuntersuchungen. *Steir. Beitr. Hydrogeol.* 41, 35–104.
- BALLY, A. W. & SNELSON, S. 1980: Realms of subsidence. In: *Geologic basins I.* (Ed. by FOSTER, N. H. & BEAUMONT, E. A.) *Treatise of Petroleum Geol. Repr. Ser.* 1, 1–86. Amer. Assoc. Petroleum Geol., Tulsa, Oklahoma.
- BATES, R. L. & JACKSON, J. A. (Ed.) 1980: *Glossary of geology.* Second edition. Amer. Geol. Inst., Falls Church, Virginia.
- BAUMBERGER, E. 1931: Zur Tektonik und Altersbestimmung der Molasse am schweizerischen Alpennordrand. *Eclogae geol. Helv.* 24, 205–221.
- BERGER, J.-P. 1985: La transgression de la molasse marine supérieure (OMM) en Suisse occidentale. *Münchn. 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: *The chronology of the geological record.* (Ed. by SNELLING, N. J.) *Geol. Soc. London, Mem.* 10, 141–195.
- BERSIER, A. 1959: Exemples de sédimentation cyclothématique dans l'Aquitainien de Lausanne. *Eclogae geol. Helv.* 51, 842–853.

- BEW 1981: Geothermische Datensynthese der Schweiz. Mit Korrekturliste vom 27. Juni 1983. Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW), Studie Nr. 26, Bern.
- BLÜMLING, P. & HUFSCHMIED, P. 1989: Fluid Logging in Tiefbohrungen. Nagra Informiert 3 + 4, 24–38.
- BÖGLI, A. 1978: Karsthydrographie und physische Speläologie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- BREDDIN, H. 1958: Die regionale tektonische Fossil- und Gesteinsdeformation in der Molasse der Ost- und Mittelschweiz. *Eclogae geol. Helv.* 51, 378–379.
- BÜCHI, U. P. 1958: Zur Geologie der Molasse zwischen Reuss und Seetal (Baldegger-/Hallwilersee/Aabach). *Eclogae geol. Helv.* 51, 279–298.
- 1959: Zur Stratigraphie der Oberen Süsswassermolasse (OSM) der Ostschweiz. *Eclogae geol. Helv.* 52, 449–460.
- 1971: La recherche du pétrole en Suisse – Historique et perspectives. *Gas, Eaux, Eaux usées* 51(1), 17–21.
- 1975: Wasser- und Energiegewinnung aus der Oberen Meeresmolasse und dem Mesozoikum. *Inst. Bauwiss. Forsch.* 34.
- BÜCHI, U. P. & BODMER, PH. 1983: Der Tiefenverlauf der seismischen Geschwindigkeiten in den Molassesedimenten des schweizerischen Mittellandes. *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.* 49/116, 3–13.
- 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.
- BÜRGISSER, H. M. 1980: Zur mittel-miozänen Sedimentation im nordalpinen Molassebecken: Das «Appenzellergranit»-Leitniveau des Hörnli-Schuttfächers (Obere Süsswassermolasse, Nordostschweiz). *Diss. ETH Zürich*, 6582.
- 1981: Fazies und Paläohydrologie der Oberen Süsswassermolasse im Hörnli-Fächer (Nordostschweiz). *Eclogae geol. Helv.* 74, 19–28.
- 1984: A unique mass flow marker bed in a Miocene streamflow Molasse sequence, Switzerland. In: *Sedimentology of gravels and conglomerates* (Ed. by. Koster, E. H. & Steel, R. J.). *Can. Soc. Petr. Geol. Mem.* 10, 147–163.
- BURKHARD, M. 1990: Aspects of the large-scale Miocene deformation in the most external part of the Swiss alps (Subalpine Molasse to Jura fold belt). *Eclogae geol. Helv.* 83, 559–583.
- DIEM, B. 1986a: Die Untere Meeresmolasse zwischen Saane (Westschweiz) und Ammer (Oberbayern). *Eclogae geol. Helv.* 79, 493–560.
- 1986b: Die untere Meeresmolasse zwischen der Saane (Westschweiz) und der Ammer (Oberbayern), Teil III: Datenmaterial. *Diss. Univ. Bern*.
- DOLLINGER, H., HARSCH, W. & TRIPET, J.-P. 1991: Hydrogeologische Untersuchungen der Unteren Süsswassermolasse im SBB-Grauholztunnel. *Abstr. Symp. Swiss Molasse Basin*, Bern, 22.–23. Nov. 1991, *Eclogae geol. Helv.* 85, 796–797.
- FASEL, J.-M. 1986: Sédimentologie de la Molasse d'eau douce subalpine entre le Léman et la Gruyère. *Thèse, Univ. Fribourg*, No. 907.
- FREI, H.-P. 1979: Stratigraphische Untersuchungen in der subalpinen Molasse der Nordost-Schweiz zwischen Wägitaler Aa und Urnäsch. *Mitt. geol. Inst. ETH und Univ. Zürich N. F.* 233.
- FÜCHTBAUER, H. 1964: Sedimentpetrographische Untersuchungen in der älteren Molasse nördlich der Alpen. *Eclogae geol. Helv.* 57, 157–298.
- 1967: Die Sandsteine in der Molasse nördlich der Alpen. *Geol. Rdsch.* 56, 266–300.
- FÜCHTBAUER, H. & MÜLLER, G. 1977: *Sediment-Petrologie, Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 3. Aufl.
- HABICHT, K. 1945a: Geologische Untersuchungen im südlichen sanktgallisch-appenzellischen Molassegebiet. *Beitr. geol. Karte Schweiz N.F.* 83, Schweiz. Geol. Komm.
- 1945b: Neuere Beobachtungen in der subalpinen Molasse zwischen Zugersee und dem st. gallischen Rheintal. *Eclogae geol. Helv.* 38, 121–150.
- HABICHT, K. 1987: Internationales stratigraphisches Lexikon. Bd. Europa, Fasz. 7 Schweiz, Fasz. 7b Schweizerisches Mittelland (Molasse). Schweiz. Geol. Komm. und Landeshydrol. und -geol., Basel.
- HÄBERLE, J. 1990: Der Nagelfluhaquifer in der Oberen Süsswassermolasse (OSM) auf dem Seerücken (Kt. Thurgau). *Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchât.* 9, 113–122.
- HALDORSEN, H. H. 1983: Reservoir characterisation procedures for numerical simulation. *Ph. D. Dissertation, Univ. Texas at Austin*.

- 1986: Simulator parameter assignment and the problem of scale in reservoir engineering. In: Reservoir characterization (Ed. by LAKE, L. W. & CARROLL, H. B. JR.) Academic Press, Inc., Orlando, San Diego, New York, Austin, London, 293–349.
- HALDORSEN, H. H. & LAKE, L. W. 1984: A new approach to shale management in field-scale models. *Soc. Petr. Engen. Jour.* 24, 447–457.
- HAQ, B. U., HARDENBOL, J. & VAIL, P. R. 1988: Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. In: Sea-level changes: an integrated approach (Ed. by WILGUS, C. K., HASTINGS, B. S., KENDALL, C. G. ST. C., POSAMENTIER, H. W., ROSS, C. A. & VAN WAGONER, J. C.) *Soc. Econ. Paleont. Miner. Spec. Publ.* 42, 71–108.
- HANTKE, R. 1991: Landschaftsgeschichte der Schweiz und ihrer Nachbargebiete: Erd-, Klima- und Vegetationsgeschichte der letzten 30 Millionen Jahre. Ott. Verlag, Thun.
- HEIM, ALB. 1919: Geologie der Schweiz. Bd. I: Molasseland und Juragebirge. Tauchnitz, Leipzig.
- HERB, R. 1988: Eocaene Paläogeographie und Paläotektonik des Helvetikums. *Eclogae geol. Helv.* 81, 611–660.
- HOFMANN, F. 1951: Zur Stratigraphie und Tektonik des st. gallisch-thurgauischen Miozäns (Obere Süßwassermolasse) und zur Bodenseegeologie. *Ber. st. gall. natw. Ges.* 74, 3–87.
- 1960: Beitrag zur Glimmersandsedimentation in der oberen Süßwassermolasse der Nord- und Nordostschweiz. *Eclogae geol. Helv.* 53, 1–25.
- HOMEWOOD, P. 1981: Faciès et environnements de dépôt de la Molasse de Fribourg. *Eclogae geol. Helv.* 74, 29–36.
- HOMEWOOD, P., KELLER, B., SCHOEPPER, P. & YANG, C. S. 1989: Faciès, processus de sédimentation et reconstitution des conditions paléomarines dans la Molasse marine supérieure suisse. *Bull. soc. géol. France* 8, 1015–1027.
- JÄCKLI, H. & KEMPF, TH. 1972: Hydrogeologische Karte der Schweiz, Blatt Bözberg-Beromünster, 1:100 000. Mit Erläuterungen. Schweiz. geotech. Komm./Schweiz. geol. Komm., Zürich.
- 1980: Hydrogeologische Karte der Schweiz, Blatt Bodensee, 1:100 000. Mit Erläuterungen. Schweiz. geotechn. Komm./Schweiz. geol. Komm., Zürich.
- JORDI, H. A. 1990: Tektonisch-strukturelle Übersicht Westschweizerisches Molassebecken. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 56/130, 1–11.
- KÄELIN, B., RYBACH, L. & KEMPTER, E. H. K. 1992: Rates of deposition, uplift and erosion in the Swiss Molasse Basin, estimated from sonic- and density-logs. *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.* 58/133, 9–22.
- KELLER, B. 1989: Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (Unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. Diss. Univ. Bern.
- KELLER, B., BLÄSI, H. R., PLATT, N. H., MOZLEY, P. S. & MATTER, A. 1990: Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süßwassermolasse und ihre Beziehungen zur Diagenese und den petrophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrungen Langenthal. Nagra Tech. Ber. NTB 90-41, Baden.
- KISSLING, D. 1974: L'Oligocène de l'extrémité occidentale du bassin molassique suisse. Stratigraphie et aperçu sédimentologique. Univ. Genève, Thèse No. 1648, Faculté des Sciences.
- KOPP, J. 1955: Erdgas und Erdöl in der Schweiz. Verl. Räber & Cie, Luzern.
- KRONMÜLLER, R. & KRONMÜLLER, K. 1987: Die Bausteinschichten – Sedimentologie und Diagenese eines Speichergesteins. *Erdöl Erdgas Kohle* 103, 61–66.
- KÜPFER, TH., HUFSCHMIED, P. & PASQUIER, F. 1989: Hydraulische Tests in Tiefbohrungen der Nagra. Nagra Informiert 3 + 4, 7–23.
- LATELTIN, O. 1988: Les dépôts turbiditiques oligocènes d'avant-poys entre Annecy (Haute-Savoie) et le Sa-netsch (Suisse). Thèse Univ. Fribourg, No. 949.
- LEJAY, A. 1991: Stratigraphie haute-résolution des dépôts de marées du bassin molassique suisse. Thèse Univ. L. Pasteur, Strasbourg.
- LEMCKE, K. 1972: Die Lagerung der jüngsten Molasse im nördlichen Alpenvorland. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 39/95, 29–41.
- 1973: Zur nachpermischen Geschichte des nördlichen Alpenvorlandes. *Geologica bavar.* 69, 5–48.
- 1974: Vertikalbewegungen des vormesozoischen Sockels im nördlichen Alpenvorland vom Perm bis zur Gegenwart. *Eclogae geol. Helv.* 67, 121–133.
- 1976: Übertiefe Grundwässer im süddeutschen Alpenvorland. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 42/103, 9–18.
- 1981: Das heutige geologische Bild des deutschen Alpenvorlandes nach drei Jahrzehnten Öl- und Gasexploration. *Eclogae geol. Helv.* 74, 1–18.

- 1984: Geologische Vorgänge in den Alpen ab Obereozän im Spiegel vor allem der deutschen Molasse. *Geol. Rdsch.* 73, 371–397.
- LEMCKE, K. & TUNN, W. 1956: Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 23/64, 35–56.
- MIALL, A. D. 1984: *Principles of sedimentary basin analysis*. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo.
- 1985: Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Sci. Rev.* 22, 261–308.
- 1988: Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: Lessons from outcrop studies. *Bull. Amer. Assoc. Petroleum Geol.* 72, 682–697.
- MONNIER, F. 1979: *Coorlations minéralogiques et diagenèse dans le bassin molassique suisse*. Thèse Univ. Neuchât.
- MONNIER, F. 1982: Thermal diagenesis in the Swiss molasse basin: implications for oil generation. *Canad. J. Earth Sci.* 19, 328–342.
- MÜLLER, M., NIEDERDING, F. & WANNINGER, A. 1988: Tectonic style and pressure distribution at the northern margin of the Alps between Lake Constance and the River Inn. *Geol. Rdsch.* 77, 787–796.
- MÜLLER, W. H. 1991: Lokale Charakterisierung der USM am Beispiel des Erdsondenfeldes Burgdorf. *Anwendung der Fluidlogging Methode*. Abstr. Symp. Swiss Molasse Basin, Ber, 22.–23. Nov. 1991, *Eclogae geol. Helv.* 85, 785–786.
- NAEF, H., DIEBOLD, P. & SCHLANKE, S. 1985: *Sedimentation und Tektonik im Tertiär der Nordschweiz*. Nagra Tech. Ber. NTB 85-14. Nagra, Baden.
- NAGRA 1988: *Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988*. Nagra Tech. Ber. NTB 88-25. Nagra, Baden.
- PARRIAUX, A. 1981: *Contribution à l'étude des ressources en eau du bassin de la Broye*. Thèse EPF-Lausanne, No. 393.
- PASQUIER, F. 1977: Les conditions hydrogéologiques du stockage souterrain d'eau chaude en Suisse. *Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchât.* 2, 63–81.
- PASQUIER, F. & PERSOZ, F. 1977: Oxidation des calcaires mesozoïques sous la molasse du plateau suisse et paleokarst. *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 43/103, 21–28.
- PEARSON, F. J., BALDERER, JR. W., LOOSLI, H. H., LEHMANN, B. E., MATTER, A., PETERS, T., SCHMASSMANN, H. & GAUTSCHI, A. (Eds.) 1991: *Applied isotope hydrogeology. A case study in northern Switzerland*. Elsevier Sci. Publ. Amsterdam, New York.
- PIFFNER, O. A. 1986: Evolution of the north Alpine foreland basin in the Central Alps. In: *Foreland basins*. (Ed. by ALLEN P. A. & HOMEWOOD), P. Spec. Publ. Int. Assoc. Sedimentol. 6, 219–228.
- PLATT, N. H. 1992: Freshwater carbonates from the Lower Freshwater Molasse (Oligocene, western Switzerland): Sedimentology and stable isotopes. *Sedimentology* (im Druck).
- PLATT, N. H. & KELLER, B. 1992: Distal alluvial deposits in a foreland basin setting: the Lower Freshwater Molasse (lower Miocene), Switzerland: sedimentology, architecture and paleosols. *Sedimentology* 39, 545–565.
- RENZ, H. H. 1937: Die subalpine Molasse zwischen Aare und Rhein. *Eclogae geol. Helv.* 30, 87–214.
- RYBACH, L., BÜCHI, U. P., BODMER, PH. & KRÜSI, H. R. 1980: Die Tiefengrundwässer des schweizerischen Mittellandes aus geothermischer Sicht. *Eclogae geol. Helv.* 73, 293–310.
- SCHLUNEGGER, F. 1991: *Stratigraphie, Sedimentologie und Tektonik der USM östlich von Thun*. Unpubl. Lizentiatsarb. Univ. Bern.
- SCHMASSMANN, H. 1990: *Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malmaquifere*. Nagra Tech. Ber. NTB 88-07, Baden.
- SCHOEPFER, P. 1989: *Sédimentologie et stratigraphie de la Molasse marine supérieure entre le Gibloux et l'Aar*. Thèse Univ. Fribourg, No. 965.
- SCHRADER, F. 1988: Das regionale Gefüge der Drucklösungsdeformation an Geröllen im westlichen Molassebecken. *Geol. Rdsch.* 77, 347–369.
- SMOSNA, R. 1989: Compaction law for Cretaceous sandstones of Alaska's north slope. *J. sediment. Petrol.* 59, 572–584.
- SPICHER, A. 1980: *Geologische Karte der Schweiz 1 : 500 000*. Schweiz. geol. Komm.
- THIERRIN, J. 1988: *L'eau de la Molasse Marine Supérieure en Suisse occidentale*. *Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchât.* 8, 93–119.
- 1990: *Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale)*. Thèse Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchât.

- TRÜMPY, R. 1973: L'évolution de l'orogénèse dans les Alpes Centrales: Interprétation des données stratigraphiques et tectoniques. *Eclogae geol. Helv.* 66, 1–10.
- 1980: An outline of the Geology of Switzerland. In: *Geology of Switzerland, a guide-book (Part A)*. Wepf, Basel/New York.
- VAN DE GRAAFF, W. J. E. & EALEY, P. J. 1989: Geological modeling for simulation studies. *Amer. Assoc. Petroleum Geol. Bull.* 73, 1436–1444.
- VOLLMAYR, T. 1983: Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz. *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 46/116, 15–27.
- 1985: Temperature in the subsurface of the Swiss and German Alpine foreland. *Jour. Geodyn.* 4, 305–319.
- VOLLMAYR, T. & WENDT, A. 1987: Die Erdgasbohrung Entlebuch 1, ein Tiefenaufschluss am Alpennordrand. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 53/125, 67–79.
- WEIDMANN, M. 1991: Histoire de la prospection et de l'exploitation des hydrocarbures en Pays vaudois. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 80, 365–402.

Manuskript erhalten 14. April 1992

Revidierte Fassung akzeptiert 30. August 1992