Faciesanalyse und Ablagerungsmilieus des Permokarbons im Nordschweizer Trog

Autor(en): **Matter, Albert**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **80 (1987)**

Heft 2: **Beiträge zur Geologie der Nordschweiz : Symposium "Geologie der Nordschweiz"**

PDF erstellt am: **29.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-166000

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv.	Vol. 80	Nr. 2	Seiten 345–367	Basel, August 1987

Faciesanalyse und Ablagerungsmilieus des Permokarbons im Nordschweizer Trog

Von ALBERT MATTER[1])

ZUSAMMENFASSUNG

Durch geophysikalische Untersuchungen der Nagra sowie die Tiefbohrungen Kaisten, Riniken und Weiach wurde ein bloss 10–12 km breiter spätvariskischer Trog in der Nordschweiz nachgewiesen. Er birgt eine klastische Sedimentfüllung von Stephanien bis Oberrotliegend Alter. Detaillierte sedimentologische Faciesanalysen der z. T. vollständig gekernten Bohrungen gestatten eine Rekonstruktion der Ablagerungsmilieus und der sedimentären Entwicklung der Trogfüllung.

Eine nur in Weiach erbohrte 572 m mächtige Oberkarbon-Abfolge wird aus drei kleinzyklischen und zwei grosszyklischen Sandstein-Ton-Serien, die sich gegenseitig abwechseln sowie einer zwischengeschalteten ebenfalls grosszyklischen kohleführenden Serie aufgebaut. Die maximal 38 m mächtigen Sohlbank-Grosszyklen bestehen vielfach aus einem mehrstöckigen Sandstein-Member mit übereinandergestapelten Sohlbank-Zyklen 1. Ordnung und einem feinkörnigen Member mit laminierten Siltsteinen und warvenartig geschichteten bituminösen Peliten. Die kleinzyklischen Serien unterscheiden sich vor allem durch ihre bloss cm- bis dm-mächtigen gradierten Sandsteinbänke und ein niedriges Sandstein/Ton-Verhältnis von ≤ 2 von den grosszyklischen Abfolgen.

Generell erosive Basalkontakte, Sohlenpflaster sowie Mega- und Kleinrippelschichtung und die gegen oben abnehmende Korngrösse weisen die Grosszyklen als Flussablagerungen aus. Die grosse Mächtigkeit ihrer Sandstein-Member spricht für rasche vertikale Aggradation und Lagekonstanz der in vornehmlich tonige Abfolgen (kleinzyklische Serien) eingebetteten Rinnensysteme. Dies sind typische Merkmale eines anastomosierenden Flußsystems. Es entwässerte in der Trogachse gegen SW. Die mächtigen Pelitintervalle mit Estherien, die kleinzyklischen Serien sowie die zahlreichen Tuffitlagen und Kohleflöze repräsentieren Ablagerungen der sumpfigen Überflutungsbecken zwischen den Flussarmen. Hier wurde sandiges Material bei weitflächiger Überflutung oder in ephemere Seen als dünne Turbidite und kleine Uferbruch-Delten abgelagert. Die meisten Kohlen, wie z. B. das 6 m mächtige Hauptflöz, entstanden durch Resedimentation von allochthonem Waldmoortorf in Moorseen. Infolge Vermischung mit gleichzeitig sedimentiertem siliziklastischem Material sind bis auf zwei alle Flöze unbauwürdige Brandschiefer.

Transpressive Verengung des Troges während der saalischen Phase führte im unteren Autunien zur Ablösung der fluviatilen Facies durch diskordant auflagernde 135 m mächtige lakustrine Bildungen, welche in derselben stratigraphischen Position in den Bohrungen Weiach und Wintersingen angetroffen worden sind. Obschon daher von einem grossen Seenkomplex ausgegangen werden muss, liegt nicht ein stationärer See, sondern eine Folge sich ablösender geologisch relativ kurzlebiger Seen vor. Im Profil äussern sie sich generell als bis 18 m mächtige Sohlbank-Grosszyklen, welche mit sandigen Deltabildungen und z. T. stromatolithischen Flachwassersedimenten einsetzen und sich bis zu Fisch-reichen Gewässern mit Ostrakoden und Estherien des offenen Sees und turbiditischen Siltstein-Rhythmiten sowie bituminösen Peliten entwickeln. Dies widerspiegelt zunehmende organische Produktivität und Eutrophierung von an sich gut durchlüfteten kaum viel mehr als 10 m tiefen Seen mit anoxischem Bodenwasser.

Im oberen Autunien führten tektonische Hebungen zu erhöhtem Abtrag und zur Ablagerung von zunächst noch grauen, dann roten Breccien und Sandsteinen. Sie bauen den bis 200 m mächtigen «Unteren Schuttfächer» auf, der in Wintersingen und Weiach über die Seesedimente progradierte. Die unterschiedliche Geröllzusammensetzung zeigt, dass es sich bei diesem auch in Kaisten und Riniken angetroffenen Schuttfächer um individuelle

1) Geologisches Institut, Universität Bern, Baltzerstrasse 1, CH–3012 Bern.

radiale Schüttungen handelt. Im Gebiet Riniken führten die vermutlich mit strike-slip-Bewegungen verbundenen differentiellen Vertikalbewegungen zur Entstehung eines «pull-apart»-Beckens, welches nach LAUBSCHER (1987) eine mehrere Kilometer mächtige Sedimentfolge aufnahm von der im Liegenden des «Unteren Schuttfächers» bloss 810 m fluviatile Rotschichten erbohrt worden sind.

Der «Untere Schuttfächer» wird in den vier untersuchten Bohrungen durch bis 150 m mächtige feinkörnige Rotschichten einer Playa überdeckt, die das Relief während einer tektonischen Ruhephase weitgehend einebneten. Infolge erneuter Erweiterung und Absenkung des Grabens verbunden mit einer Akzentuierung des Reliefs baute sich im Oberrotliegenden der auf den Trogschultern von Kaisten und Wintersingen angetroffene «Obere Schuttfächer» auf.

ABSTRACT

A narrow, 10–12 km wide, late Variscan trough with a clastic fill of Stephanian to Upper Rotliegend age has recently been discovered in northern Switzerland through the geophysical investigations and deep boreholes drilled by Nagra. Sedimentological facies analysis of the continuously cored sequences from the wells Kaisten, Riniken und Weiach enables the depositional environments and the sedimentary evolution of this trough to be reconstructed.

A 572 m thick Upper Carboniferous sequence was recorded from Weiach and comprises six cyclical units. Of these, three units are characterized by large scale fining upward cycles ("Grosszyklische Series"), the middle one of which is coal-bearing. Each of these megacyclical units is interbedded and alternates with small scale fining upward cycles ("Kleinzyklische Series", Fig. 2).

The megacycles reach up to 38 m in thickness. These consist of a sandstone member, comprising stacked first-order fining upward cycles, and an argillaceous member, comprising laminated siltstone rhythmites and varvelike, bituminous dark grey mudstones.

The "Kleinzyklische Series" are characterized by the presence of cm- to dm-bedded sheet-like sandstones interbedded with siltstones, mudstones thin coals and tuffaceous ash beds. They are readily distinguished from the "Megazyklische Series" by a sandstone/shale ratio of ≤ 2.

Erosional sharp basal contacts, lag deposits, dune and ripple cross-bedding and a fining upward grain size profile identify these megacycles as fluvial deposits. The considerable thickness of their sandstone members indicates rapid vertical aggradation and channel stability. This as well as the type of sedimentary structures and the fact that the sandy channel deposits are enclosed in argillaceous sequences ("Kleinzyklische Series") suggests an anastomosing river system. Transport to the SW along the trough axis is indicated by dipmeter data and foreset measurements on oriented cores. The thick argillaceous members of the megacycles and the "Kleinzyklische Series" represent the flood basin facies of the interchannel wetland environments which were largely subaqueous. Sand was deposited in this facies as thin turbidites and small crevasse deltas in the shallow ephemeral interchannel lakes or ponds during overbanking or breaching of the levees. Most of the coals, including the 6 m thick main seam, formed by erosion of wood peat and subsequent re-deposition mixed with siliciclastic detritus in bog lakes. Consequently, most of the coals are actually non-commercial carbonaceous shales.

After transpressive narrowing of the through during the Saalian phase of deformation (lower Autunian) the fluvial regime was replaced by a complex of lacustrine environments. Some 135 m of lacustrine deposits rest unconformably on the fluvial sediments in Weiach. The same lacustrine deposits have also been discovered in the Wintersingen borehole 45 km to the SW suggesting the lake complex was laterally extensive. However, sedimentological analysis documents several lacustrine megacycles up to 18 m thick suggesting a series of geologically short-lived lakes rather than a single stationary lake. The cycles commence with sandy delta deposits and stromatolitic shallow water sands which are followed by argillaceous sediments with turbiditic siltstone rhythmites and bituminous shales. The argillaceous sediments contain abundant Estheria, ostracods, fish teeth and scales as well as plant debris. These cycles reflect the evolution from a shallow to a deeper water stage (up to ca 10 m) of an open well-aerated lake with increasing organic productivity and anoxic bottom waters.

Tectonic uplift in the upper Autunian effected a higher erosion rate resulting in the deposition of red-bed breccias and sandstones which built up a lower alluvial fan complex. This fan complex is present in all studied wells, lying directly above crystalline basement in Kaisten but prograding over the lake deposits in Weiach and Wintersingen. From the different clast composition in each well it is concluded that the lower fan complex represents several separate radial fans.

Up to 150 m of playa mudstones with abundant adhesion ripples in the lower part cover the lower fan complex. These mudstones were deposited during a phase of tectonic quiescence when the graben and flanking hinterland relief was peneplained. Subsequently, transtensive movements in the upper Rotliegend widened the

graben and rejuvenated the relief. As a result an upper alluvial fan complex recorded in the boreholes of Kaisten and Wintersingen was established. Extensive calcrete formation throughout these deposits indicates that sedimentation of the upper fan complex was intermittent prior to the regional overstep of the Buntsandstein.

1. Einleitung

In der Nordschweiz stehen an der Oberfläche, abgesehen von kleineren Vorkommen von Oberrotliegendem etwa bei Säckingen und Laufenburg, keine paläozoischen Sedimente an. Trotzdem haben die altbekannten Vorkommen von produktivem Karbon am Südfuss der Vogesen (Ronchamps) seit den ersten Steinkohle-Bohrversuchen in der Nordschweiz bei Zeiningen (1850–1889) und 1869/70 bei Wallbach (MÜHLBERG 1882, DISLER 1951) immer wieder die Hoffnung genährt – und dies besonders in den Krisenzeiten der beiden Weltkriege – dass kohleführendes Karbon auch in dieser Region vorhanden sein müsse.

Allerdings wurden die mit diesem Ziel abgeteuften Bohrungen (Fig. 1) entweder im Rotliegenden aufgelassen, wie beispielsweise die Bohrungen Mumpf (1898) und Buix (1919) oder aber sie fuhren unter Rotliegendem direkt ins Grundgebirge (Weiherfeld 1875, Wintersingen 1939 und Zuzgen 1939/40). Immerhin wurde in Wintersingen dem Grundgebirge auflagerndes Unterrotliegendes erbohrt (ERNI 1940, HOCHULI 1985). Wohl war damit der Nachweis eines in Analogie zu ähnlichen Vorkommen in den Vogesen und in Süddeutschland vermutlich ebenfalls NE–SW streichenden jungpaläozoischen Bekkens in der Nordschweiz erbracht, über seine seitliche Begrenzung, seine Fortsetzung und das eventuelle Hinzutreten kohleführender Schichten konnten jedoch weiterhin nur Vermutungen angestellt werden (SCHMASSMANN & BAYRAMGIL 1946).

Nachdem aber 1960 in der Bohrung Dingelsdorf (Fig. 1) unter mächtigem Rotliegendem ca. 120 m flözführendes Oberkarbon erbohrt worden waren, schien eine Fortsetzung des Nordschweizer Troges bis über den Bodensee hinaus gesichert (LEMCKE & WAGNER 1961). LEMCKE (1973, Beilage 1) postulierte schliesslich sogar einen einzigen vom Burgund bis ins süddeutsche Alpenvorland reichenden Grosstrog. Da in den Erdölbohrungen des östlichen Mittellandes nur in Pfaffnau 1, Berlingen 1 und Kreuzlingen 1 (Fig. 1) als permokarbone Bildungen interpretierte Sedimente erbohrt worden waren (BÜCHI et al. 1965), schien der Südrand dieses Grabens etwa auf der Linie Bern–Bregenz zu liegen (Fig. 28 in ZIEGLER 1982). Allerdings bestätigten eine kürzlich durchgeführte Neuaufnahme der betreffenden Kernstrecke der Bohrung Pfaffnau 1 und schwermineralogische Untersuchungen die schon von ORTLAM (1974) vertretene Ansicht, dass es sich bei diesem «Permokarbon» um Buntsandstein handelt (MATTER et al. 1987a). Ferner stellte sich das «Permokarbon» von Kreuzlingen 1 bei der Neubearbeitung als Gneis (H.-R. Bläsi, pers. Mitt. 1987) heraus.

Die seit 1981 ausgeführten geophysikalischen Untersuchungen der Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) widerlegen nun nicht nur die Existenz eines Grossgrabens, sondern mit der Bohrung Weiach (Fig. 1) wurde erstmals auch flözführendes Oberkarbon in der Nordschweiz nachgewiesen (SPRECHER & MÜLLER 1986, MATTER et al. 1987a). Die duchgehenden Kernprofile der Nagra-Tiefbohrungen Weiach und Kaisten und das weitgehend gekernte Profil der Bohrung Riniken (Fig. 1) ermöglichten eine detaillierte geologische Bearbeitung, welche die geologischen Kenntnisse über das Jungpaläozoikum der Nordschweiz wesentlich erweitern (MATTER et al.

1987 a, b, PETERS et al. 1987). Ausgehend von sedimentologischen Faciesanalysen der permokarbonen Abfolgen sollen in der vorliegenden Arbeit die Ablagerungsmilieus und die sedimentäre Entwicklung der jungpaläozoischen Trogfüllung rekonstruiert werden.

2. Nordschweizer Permokarbon-Trog

Bei Berücksichtigung der heute vorliegenden geophysikalischen Ergebnisse, der Nagra-Tiefbohrungen und den frühen Kohlebohrungen sowie den Bohrungen auf Erdöl oder Grundwasser (Fig. 1) ergibt sich ein einigermassen konkretes Bild vom Trogverlauf und der Mächtigkeit der Trogfüllung.

Der Verlauf des südlichen Trograndes wird im Deckgebirge durch die Randüberschiebung der Zeiher-Homberg–Lägern-Kette markiert und kann geradlinig gegen ENE bis zur Bohrung Berlingen 1, wo 3,7 m Rotliegendes angetroffen worden sind, extrapoliert werden (Fig. 1). Der Nordrand des Troges scheint dagegen tektonisch komplexer zusammengesetzt zu sein und ist deshalb schwieriger abzugrenzen. Die Nordgrenze, zumindest der Verbreitung von Rotliegendem, dürfte über Zurzach Richtung Schaffhausen verlaufen.

Der Trog erstreckt sich demnach bis ins süddeutsche Alpenvorland, wie weit er sich jedoch gegen WSW fortsetzt, ist vorläufig nicht bekannt. Der Nordschweizer Permokarbon-Trog (Konstanz–Frick-Trog von LAUBSCHER 1987) präsentiert sich somit als schmaler, etwa 10–12 km breiter Graben (Fig. 1). Nach SPRECHER & MÜLLER (1986) gliedert er sich in einen weniger tiefen östlichen Teiltrog mit einer etwa 1700 m mächtigen Sediment-

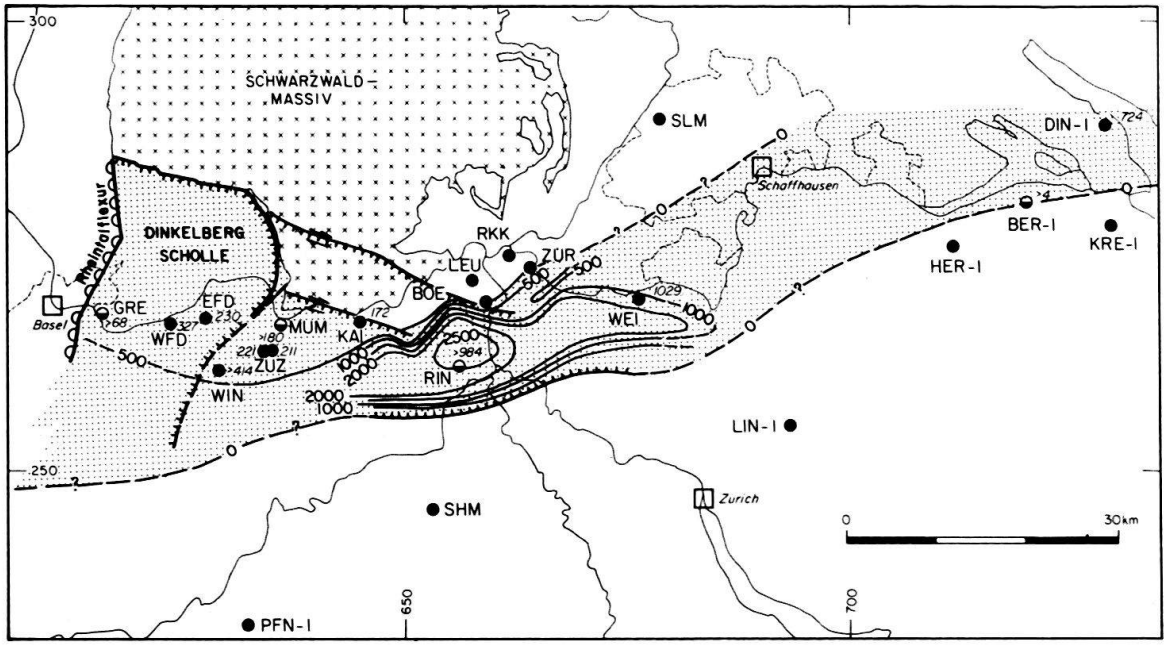


Fig. 1. Nordschweizer Permokarbon-Trog mit Isopachen des Permokarbons. Konstruiert aufgrund der Reflexionsseismik (Fig. 28 und 29 in SPRECHER & MÜLLER 1986) und Mächtigkeitsangaben aus Bohrungen. Kristallin erbohrt: volle Symbole, nicht erbohrt: halboffene Symbole.
BER Berlingen 1, BOE Böttstein, DIN Dingelsdorf 1, EFD Engerfeld, GRE Grenzach, HER Herdern 1, KAI Kaisten, KRE Kreuzlingen 1, LEU Leuggern, LIN Lindau 1, MUM Mumpf, PFN Pfaffnau 1, RKK Koblenz, RIN Riniken, SHM Schafisheim, SLM Schleitheim, WFD Weiherfeld, WEI Weiach, WIN Wintersingen, ZUZ Zuzgen 1, 2.

füllung und einen wesentlich tiefer in den kristallinen Sockel eingesenkten westlichen Teiltrog der als «pull-apart»-Becken interpretiert werden könnte (Fig. 1). Strukturell komplexe Verhältnisse kennzeichnen nicht nur die Trogränder, insbesondere den nördlichen, sondern auch die Trogfüllung. Nach LAUBSCHER (1986, 1987) wurde ein im Stephanien-Autunien gebildeter ursprünglich breiterer Trog durch Transpression während der saalischen Phase eingeengt, was zu Verfaltungen und Übschiebungen führte. Im Oberperm wurde dieser Trog durch Zerrtektonik dann wieder erweitert und abgesenkt. Zwar scheint in der Bohrung Weiach die offenbar kontinuierliche Entwicklung der Flora von der Basis des Profils bis 1252 m (Fig. 2 und HOCHULI 1985) eine Diskordanz auszuschliessen. Im Dipmeter Log ist jedoch unterhalb 1387 m eine abrupte Erhöhung des Schichtfallens von 15–20° auf 45° festzustellen. Ausserdem nimmt bei 1309 m Teufe die Klufthäufigkeit sprunghaft zu (ISCHI 1987). Diese tektonischen Deformationen werden mit der erwähnten Einengungsphase in Zusammenhang gebracht, die somit als unteres Autunien datiert ist.

Während die am Nordrand des Ost-Teiltroges niedergebrachte Bohrung Weiach unter 456 m Rotliegendem 572 m Oberkarbon antraf, wurde die in der Mitte des Westtroges gelegene Bohrung Riniken nach 984 m Rotliegendem eingestellt und die Bohrung Kaisten, auf der – während der oberpermischen Dehnungsphase gebildeten – nördlichen Trogschulter gelegen, erreichte das metamorphe Grundgebirge nach Durchfahren von 171 m Rotliegendem. Im Westtrog ist bisher in keiner Bohrung Karbon angetroffen worden; in Wintersingen wurde als Ältestes Autunien nachgewiesen (SCHMASSMANN & BAYRAMGIL 1946, HOCHULI 1985).

3. Oberkarbon und Unterrotliegendes von Weiach

3.1. Litho- und biostratigraphischer Überblick

Die Kernbohrung Weiach durchteufte im Liegenden des Buntsandsteins eine 1028,90 m mächtige, ausschliesslich kontinentale klastische Abfolge, bevor sie bei 2020,40 m das Grundgebirge erreichte. Aufgrund unterschiedlicher sedimentologischer Merkmale, insbesondere der Mächtigkeit der vorwiegend gegen oben feinkörniger werdenden fluviatilen Zyklen (Sohlbank-Zyklen, «fining upward cycles») sowie der Sedimentfarbe und von Fauna und Flora lässt sich die Abfolge in 11 lithofacielle Einheiten gliedern (Fig. 2). Auffällig ist der Farbwechsel bei 1188 m Bohrtiefe: darunter hellgraue Sandsteine und grauschwarze Tone, darüber rotbraune bis ziegelrote Sedimente, die eindeutig unter oxydierenden Verhältnissen abgelagert worden sind.

Der mächtigere, über 600 m messende untere Abschnitt des Profils, bestehend aus kleinzyklischen und grosszyklischen Sandstein-Ton-Serien sowie einer zwischengeschalteten mächtigen, ebenfalls zyklisch gegliederten, kohleführenden Serie, wird von z.T. bituminösen See-Sedimenten überlagert. Nach den palynologischen Daten (HOCHULI 1985) sowie der Makropflanzenreste (REMY 1987) umfasst dieser Bereich des Profils Stephanien bis unteres Autunien (unteres Unterrotliegendes). Im Hinblick auf ein Sedimentationsmodell des Oberkarbons bis Unterrotliegenden von Weiach ergibt sich generell das Bild einer mächtigen Abfolge von Flussablagerungen, gefolgt von lakustrinen Bildungen.

Die tropisch-humide Flora des Karbons macht nach HOCHULI (1985) in der Pollenzone VCI einem trockeneres Klima anzeigenden Pflanzenbewuchs Platz, mit einer Rekur-

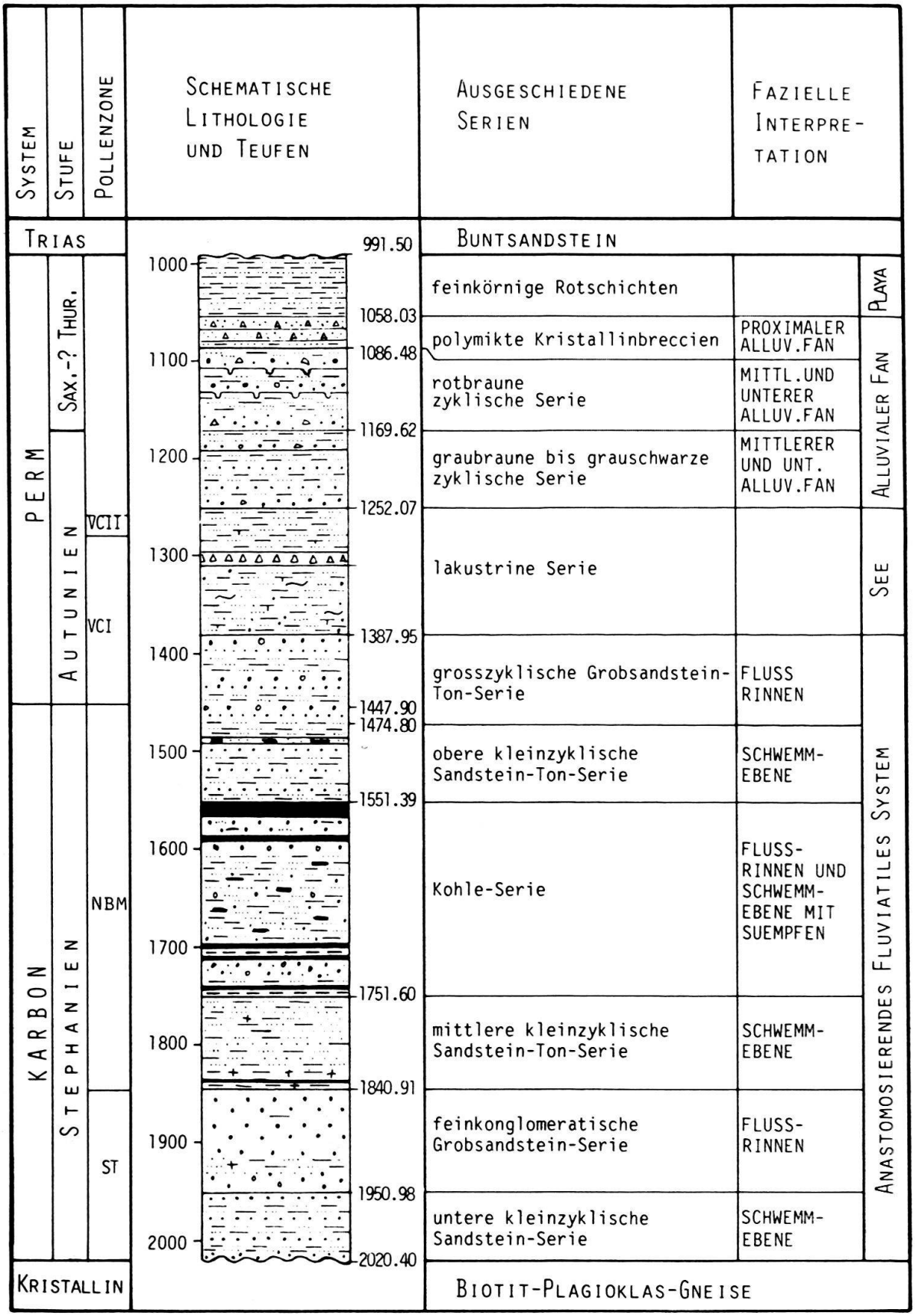


Fig. 2. Lithostratigraphisches Übersichtsprofil der Tiefbohrung Weiach (aus MATTER et al. 1987a).

renz der humiden «Karbon»-Flora in der Zone VCII (Fig. 2). Im Sediment ist dieser Wechsel nicht erkennbar; der höher im Profil erfolgende Umschlag zu roten Farbtönen dürfte somit eher der Autunien/Saxonien-Grenze entsprechen. Nicht auszuschliessen ist, dass der oberste Profilabschnitt ein Thuringien(Zechstein)-Äquivalent darstellt. Infolge der hier stark oxydierten Sedimente sind jedoch keine stratigraphisch auswertbaren Florenreste erhalten geblieben.

3.2. Ablagerungen eines anastomosierenden Flußsystems

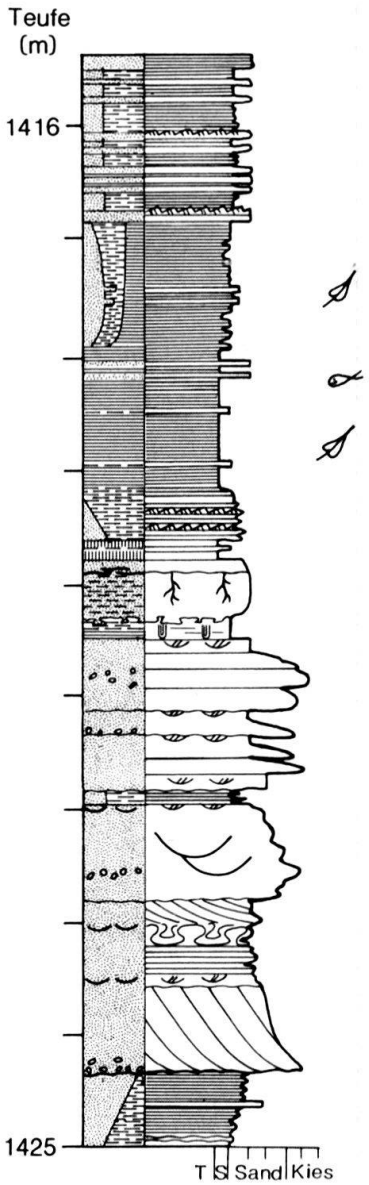
3.2.1 Grosszyklische Serien

Grobkörnigkeit der Sandsteine und grossmaßstäbliche Zyklizität sind die charakteristischen Merkmale der beiden in Figur 2 ausgeschiedenen Grobsandstein-Serien. Die vorwiegend «fining upward»-Zyklen variieren von maximal 15 m bis seltener weniger als 1 m Mächtigkeit, wobei das mächtigste Sandstein-Member 8,5 m misst.

Figur 3 zeigt typische Profilausschnitte der grosszyklischen Grobsandstein-Ton-Serie bzw. der feinkonglomeratischen Grobsandstein-Serie. Letztere unterscheidet sich durch die durchschnittlich geringere Mächtigkeit der Zyklen sowie durch ihren sandigeren Charakter von der Grobsandstein-Ton-Serie, was sich in einem unterschiedlichen Sandstein/Ton-Verhältnis von 7,4 bzw. 2,7 widerspiegelt.

Obwohl im Bohrkern nicht immer erkennbar, weisen doch viele Zyklen eindeutig eine erosive Basis auf, die häufig von Belastungsmarken überprägt wird. Kristallingerölle und Tonintraklasten finden sich als Residualsediment an der Basis mancher Zyklen. Die mächtigeren Sandstein-Members werden vielfach von mehreren, übereinandergestapelten, gegen ober feinkörniger werdenden Grauwackebänken (Sohlbank-Zyklen 1. Ordnung) mit tafeliger, häufiger jedoch trogförmiger Megarippelschichtung, gefolgt von Kleinrippelschichtung und seltener laminierten Sandsteinen aufgebaut (Fig. 3). Den Sohlbank-Zyklen 1. Ordnung fehlt meistens das siltig-tonige Member infolge Erosion oder es ist bloss als cm- bis dm-mächtige Lage ausgebildet (Fig. 3). Hingegen weisen die mehrstöckigen Grosszyklen jeweils ein mehr oder weniger mächtiges feinkörniges Member auf, mit graugrünlichen Siltsteinen, gefolgt von grauschwarzen bituminösen Peliten.

Die wenigen dm-mächtigen (Fig. 3a) bis über 1 m mächtigen (Fig. 3b) siltigen Anteile bestehen aus einer feinschichtigen bis laminierten Wechsellagerung von siltigem Ton und Siltstein- bis Feinsandsteinlagen z. T. mit Kletterrippeln (Fig. 3). Die grauschwarzen bituminösen Pelite stellen eine Wechselfolge von Doppellagen dar, jedes Paar bestehend aus einer mm- bis cm-mächtigen helleren gradierten Feinsandstein- bis Siltsteinlage und einer dunklen Tonlage. Die helleren Lagen sind z. T. schwach erosiv und teilweise gerippelt. Diese Rhythmite führen viel Pflanzenmaterial, Kohleflasern sowie Fischschuppen und Estherien. Gegen den Kopf des Grosszyklus in Figur 3a werden die Rhythmite infolge Einschaltung zahlreicher bis dm-mächtiger laminierter und gerippelter Sandsteine zunehmend sandiger d. h. es tritt gegen oben eine Kornvergrösserung ein. Ausserdem kommen in den grauschwarzen Peliten zahlreiche sich seifig anfühlende, bis 20 cm mächtige gelbbraune Tonlagen vor, die bis zu 80 % aus einem regelmässigen Illit-Smektit-Wechsellagerungsmineral bestehen. Die deutlich von der illitisch-kaolinitischen Tonmineralassoziation des Normalsediments abweichende Zusammensetzung weist diese Lagen als Tuffite aus (Fig. 3a). Obschon Tuffite vom oberen Teil der Kohle-Serie bis in die



Beschreibung	Interpretation		
Coarsening upward Sequenz: Rhythmite wie unten und mit dm-mächtigen, nicht-erosiven, laminierten oder gerippelten gradierten Sandsteinbänken.	Schwemmebene	Schwemmland-See mit Crevasse-splay Sequenz	Anastomosierendes Flussystem
Fining upward Sequenz: Rhythmite mit alternierenden mm- bis cm-mächtigen, gradierten, hellen Sand- bis Siltsteinlagen- und dunklen bituminösen Tonlagen. Tuffit an der - Basis.		Schwemmland-See mit Turbiditen (?distale Crevasse-splay Sande + Silte) Anoxischer Seeboden	
Durchwurzelter Sandstein, gegen oben zuerst gröber, dann feiner werdend. Verwühlter Liegendkontakt zu Rhythmiten.	Sandfächer eines Uferdurchbruchs (crevasse-splay)		
Mehrstöckige "fining-up" Sandsteine mit Sohlenpflaster, Rippelschichtung und trogförmiger Megarippelschichtung (Dunes).	Flussrinne	Aggradation bei Hochwassern in erweiterter Rinne und bei hohen Fliessgeschwindigkeiten	
Gegen oben zunehmend feinkörnigere Sandsteine, mit erosiver Basis, Sohlenpflaster, planarer Schrägschichtung, Lamination- und Wulstschichtung.		Hauptrinne eines Flusses mit Sandbänken	
Grauschwarze Rhythmite	See mit Turbiditen		

Fig. 3a. Sedimentologisches Profil eines Sohlbank-Grosszyklus der Grobsandstein-Ton-Serie von Weiach. Mehrstöckige Stapelung von Sohlbank-Zyklen 1. Ordnung deutet auf rasche vertikale Sedimentation.

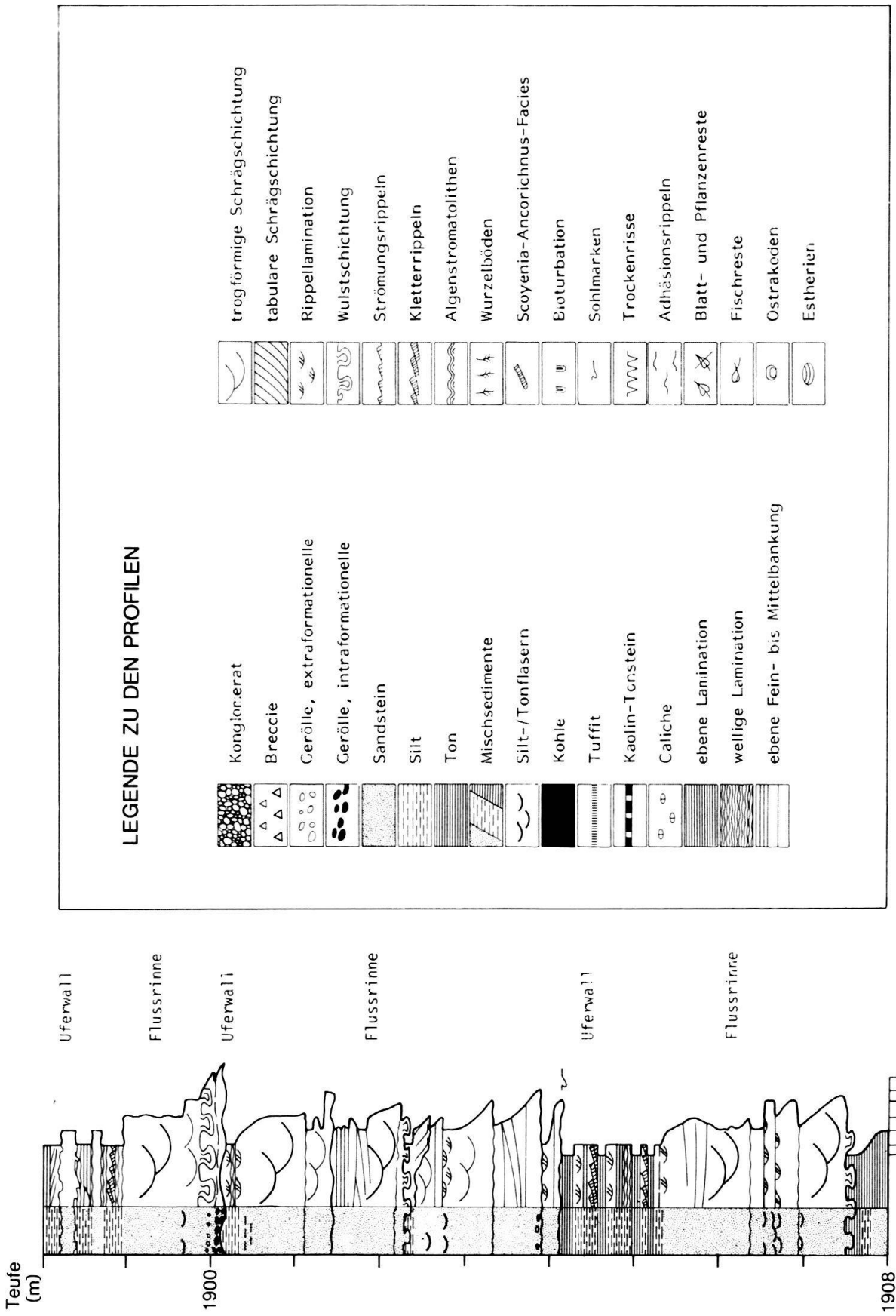


Fig. 3b. Profilausschnitt der feinkonglomeratischen Grobsandstein-Serie von Weiach mit drei Sohlbank-Grosszyklen, z. T. mehrstöckig bestehend aus mehreren Sohlbank-Zyklen 1. Ordnung. Rinnenfacies eines relativ lagestabilen Flusslaufes in einem anastomosierenden System.

lakustrine Serie anzutreffen sind, kommen sie gehäuft im Bereich von 1428–1437 m vor. Aus ihrer Assoziation mit den warvenähnlich laminierten bituminösen Tonen mit Fischschuppen und Estherien wird geschlossen, dass es sich nicht um resedimentiertes vulkanisches Material, sondern um Aschenablagerungen in stehenden Gewässern handelt.

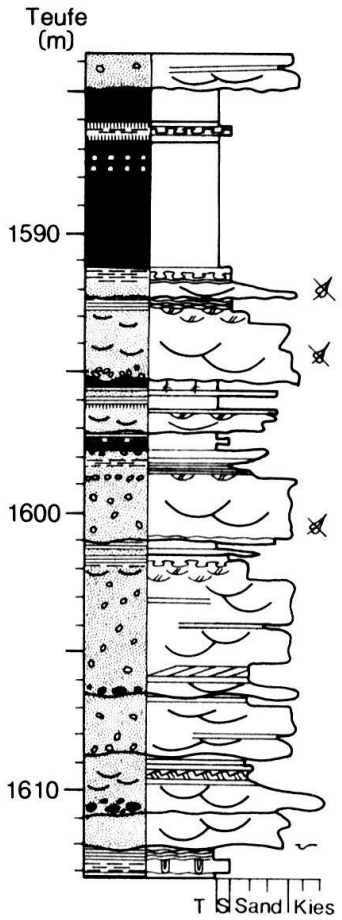
3.2.2 Kleinzyklische Serien

Im Wechsel mit den grosszyklischen Sandstein-Serien können in der Bohrung Weiach drei annähernd gleichmächtige kleinzyklische Serien von insgesamt 235 m Mächtigkeit ausgeschieden werden (Fig. 2). Sie zeichnen sich vor allem durch ein verhältnismässig niedriges Sandstein-/Ton-Verhältnis von 1,0 in der oberen, ca. 2,0 in der mittleren und 1,4 in der unteren kleinzyklischen Serie sowie durch geringmächtige Sandstein-Ton-Zyklen 1. Ordnung aus.

Es überwiegen cm- bis dm-mächtige Sandsteinlagen und -bänke, die sowohl allmählich in den hangenden Ton übergehen als auch einen abrupten Hangendkontakt aufweisen können. Ihre Basis ist immer scharf und entweder planar oder erosiv; durch Belastungsmarken überprägte Basalkontakte kommen ebenfalls vor. Häufig folgen mehrere dieser Grob- bis Feinsandsteinlagen, begrenzt durch erosive Kontakte, übereinander – sind amalgamiert – und bauen mehrstöckige Sandsteinbänke bis etwa 1 m Mächtigkeit auf, wobei die Korngrösse meistens gegen oben abnimmt. Invers gradierte Bänke kommen jedoch ebenfalls vor. Vorherrschende Sedimentstrukturen sind Klein- und Megarippelschrägschichtung. Die in ihrer Mächtigkeit stark wechselnden feinkörnigen Member der Zyklen (cm- bis 6 m) sind dunkelgraue, seltener grünliche siltige Tone oder Siltsteine. Die mächtigeren enthalten mm- bis dm-mächtige gradierte Siltstein- und/oder Feinsandsteinlagen. Die feinkörnigen Member sind somit sedimentologisch identisch mit denjenigen der grosszyklischen Serien. In der oberen kleinzyklischen Serie treten zudem vereinzelte dm-mächtige Kohleflöze auf, meistens mit einem Wurzelboden im Liegenden, sowie wenige holzkohleartige Lagen, die auf Waldbrände schliessen lassen. In der unteren und mittleren kleinzyklischen Serie kommen Feinkonglomerate sowohl als dünne Lagen wie als Sohlenpflaster vor.

3.2.3 Kohle-Serie

Die infolge ihrer sechs Kohleflözgruppen wohl auffälligste lithologische Einheit der Bohrung Weiach besteht aus neun Grosszyklen, deren mächtigster 38 m misst (MATTER et al., 1987 a). Der in Figur 4 dargestellte «fining upward»-Grosszyklus besteht aus einem Sandstein-Member und der 6 m mächtigen Hauptflözgruppe. Die Grosszyklen setzen meistens nicht erosiv über einer Kohle, sondern ohne Aufarbeitung über einem pelitischen Member ein. Das Sandstein-Member selbst besteht, ganz in Übereinstimmung mit denjenigen der grosszyklischen Serien, aus übereinandergestapelten «fining upward»-Zyklen 1. Ordnung, ebenfalls mit vorwiegend trogförmiger Megarippelschichtung und Kleinrippelschichtung. Diese bilden entweder amalgamierte Sandsteinabfolgen oder liegen als einzelne vollständige Zyklen vor, mit Kohleschicht und abschliessenden oft durchwurzelten pflanzenführenden bituminösen (bis 6,8 % C_{org}) laminierten Tonen. Die Abfolge von Sohlbank-Zyklen (fining upward) wird von ca. 1597–1595 m durch einen symmetrischen «coarsening & fining upward»-Zyklus unterbrochen (Fig. 4). Eingeschal-



Beschreibung	Interpretation
Humuskohlen aus resedimentierten Partikeln eines Waldniedermoores mit Tuffit- und Kaolin-Tonstein-Lagen. Zuoberst Zunahme der siliciklastischen Einschwemmungen auf 40%. Algen, ? Fischschuppen.	Erosion von Moorinseln und Akkumulation des allochthonen Pflanzenmaterials unter euxinischen Bedingungen im Moorsee
Sohlbank-Zyklen 1. Ordnung (wie unten).	Subsidiäre Rinnen auf Schwemmebene
Symmetrischer (coarsening & fining-up) Zyklus mit gerippelten Sandsteinen, bitumin. Tonen und Kohle.	Crevasse-splay Ablagerung
Mehrstöckige Abfolge von Sohlbank-Zyklen 1. Ordnung mit erosiver Basis und Sohlenpflaster. Feinkonglomerate bis Feinsandsteine, oft mit trogförmiger Megarippelschichtung und Kleinrippelschichtung, vereinzelten Kohleflasern, gegen oben in grünliche laminierte Siltsteine und bituminöse Tone bzw. Kohle übergehend.	Hauptrinne eines Flusses mit Sandbänken und Uferwällen
Siltsteine und bituminöse Tone.	Schwemmebene

Fig. 4. Sedimentologisches Profil des Sohlbank-Grosszyklus mit der Hauptflözgruppe. Kohle-Serie, Tiefbohrung Weiach.

tet in die schwarzen bituminösen Tone finden sich gelbliche Sideritlagen und Toneisensteine.

Die Kohle tritt gewöhnlich direkt über dem Sandstein auf und nicht im pelitischen Member wie in der liegenden Kleinzyklischen-Serie. Abgesehen von der Hauptflözgruppe und einem weiteren Flöz sind alle Flöze durch mehr als 30% anorganisches Material verunreinigt und somit unbauwürdige Brandschiefer (WOLF et al. 1987). Tuffitlagen kommen, assoziiert mit Kohlen und Peliten ebenfalls vor. Ferner wurden im Hauptflöz von WOLF et al. (l. c.) Kaolin-Kohlentonsteine gefunden, die möglicherweise aus vulkanischen Aschen und Tuffen entstanden sind.

3.2.4 Milieuinterpretation

Meist erosive Basalkontakte und die Sedimentstrukturen weisen die «fining upward»-Zyklen der Sandstein-Member als Ablagerungen in Flussrinnen mit hoher Bodenfracht aus. Die Mehrstöckigkeit der Zyklen widerspiegelt Hochwasserphasen. Bei den häufig an der Basis eines Grosszyklus anzutreffenden tafelig schräggeschichteten Sandsteinen (Fig. 3a) handelt es sich um Sandbänke in der tiefer gelegenen Hauptrinne. Demgegenüber sind die Sandsteine mit gross- und kleinmaßstäblicher, trogförmiger Schrägschichtung durch Wanderung von Megarippeln («dunes») und Strömungsrippeln bei höheren Fliessgeschwindigkeiten in dem jeweils bei Hochwässern gefüllten erweiterten Flussbett abgelagert worden. Die verhältnismässig grosse Mächtigkeit der Sandstein-Member dieser Grosszyklen lässt auf eine hohe vertikale Aggradationsrate in den Rinnen schliessen, welche von vergleichbar rascher Auflandung der angrenzenden Schwemmebenen begleitet gewesen sein muss.

Es stellt sich die Frage, um welchen Grundtyp von Flußsystem es sich handelt. Hohe Bodenfracht und vor allem das Fehlen typischer Gleithangabfolgen schliessen ein mäandrierendes Flußsystem aus, währenddem der hohe Anteil pelitischer Intervalle insbesondere in den kleinzyklischen Serien und der Kohle-Serie gegen ein sandiges verwildertes (braided) Flußsystem sprechen. Die grosse Mächtigkeit der vorwiegend sandigen grosszyklischen Serien und die Tatsache, dass diese in vorwiegend tonige Serien eingebettet sind, spricht für Lagekonstanz der Flussrinnen. Diese Phänomene sind charakteristisch für den anastomosierenden Flusstyp. Er stellt nach SMITH & PUTNAM (1980) einen niederenergetischen Komplex untereinander verbundener Flussläufe dar, welche durch semipermanente, vorwiegend von Wasser bedeckten, grasbewachsenen «Feuchtgebiet-Inseln» (wetlands) getrennt werden. Diese können flächenmässig 50–90% des anastomosierenden Systems ausmachen.

Die häufig im Hangenden der Rinnensandsteine (Fig. 3b), aber auch in den kleinzyklischen Serien vorkommenden grünlichen dünnschichtigen feinkörnigen Sedimente stellen die Uferwallfacies dar. Die gerippelten Feinsandsteine und Siltsteine mit erosiver Basis wurden durch das sedimentbeladene überbordende Flusswasser abgelagert, anschliessend setzte sich die Suspensionsfracht als siltige Tonlage darüber ab.

Die bituminösen Rhythmite gelangten dagegen auf Grund ihrer Feinkörnigkeit, niederenergetischen Gefügen und assoziierten Sequenzen in den eigentlichen Überflutungsbecken (wetlands von SMITH & PUTNAM 1980) zur Ablagerung. Einerseits enthalten sie neben Turbiditen – vor allem in den kleinzyklischen Serien – symmetrische Zyklen (Fig. 4) oder «coarsening upward»-Zyklen, welche alle Merkmale von subaquatisch in

Seen gebildeten d.h. delta-artigen «crevasse-splay»-Ablagerungen (SMITH & PUTNAM 1980, SCHÄFER 1986) aufweisen. Andererseits wurden auch «fining upward»-Zyklen, die teils kleine Rinnenfüllungen (Basis erosiv), teils subaerische «crevasse-splay»-Ablagerungen sind, beobachtet. Das Fehlen von Trockenrissen und die weitverbreitete Bioturbation lassen jedoch darauf schliessen, dass diese Schwemmebenen grossflächig mit einer Wasserschicht bedeckt gewesen sein müssen oder zumindest der Grundwasserspiegel an der Sedimentoberfläche stand. Damit im Einklang steht der paläobotanische Befund einer Pflanzenvergesellschaftung, welche ausschliesslich feuchte, sumpfige Standorte bevorzugte (REMY 1987).

Bei den zwischen den Flussarmen gelegenen Flutbecken handelt es sich um eigentliche Sumpflandschaften mit Torfmooren und Moorseen. Häufige detritische Zufuhren durch die überbordenden Flüsse sowie vordringende Crevasse-Rinnen und -Deltas unterbrachen die Akkumulation organischen Materials bzw. erodierten die Moore. So entstanden bloss detritusreiche Kohlen. Das Hauptflöz beispielsweise entstand aus allochthonen Partikeln eines Waldmoores, die zusammen mit den im Wasser lebenden Algen in einem Moorsee abgelagert worden sind (WOLF et al. 1987). Solche Verhältnisse charakterisieren nach SMITH & SMITH (1980) und SMITH & PUTNAM (1980) «wetlands» rezenter anastomosierender Flußsysteme. Die Entstehung von Kohlen im Zusammenhang mit einem anastomosierenden Flußsystem ist jedoch nicht auf das Karbon (z.B. RUST et al. 1984) beschränkt, wie Beispiele aus dem Perm (CASSHYAP & TEWARI 1984) und dem Paläocän (FLORES & HANLEY 1984) belegen.

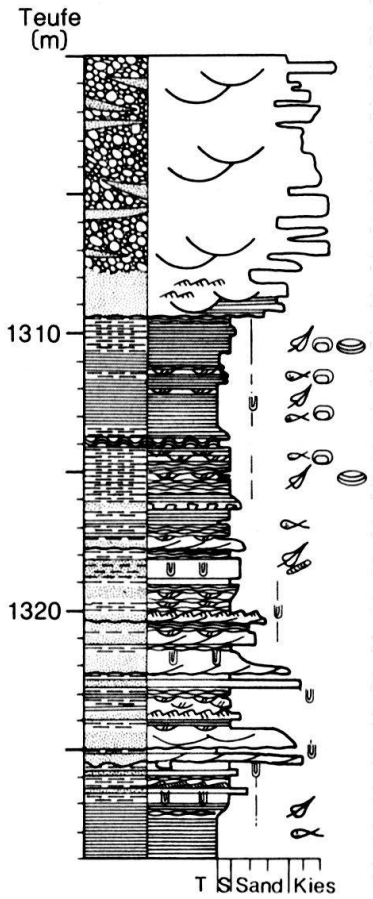
3.4. Seeablagerungen

Wohl waren Seen auch in den Flutbecken des anastomosierenden Flußsystems verbreitet, sie wurden jedoch von fluviatilen Prozessen dominiert (s. o.) und waren daher sehr kurzlebig. Im unteren Autunien wird nun die fluviatile Facies durch lakustrische Bildungen abgelöst, welche gleichaltrig (Pollenzone VCI) in Weiach und in der 45 km entfernten Bohrung Wintersingen erbohrt worden sind (Fig. 7). Dies deutet auf einen Seenkomplex grösserer Ausdehung hin.

Die lakustrine Serie von Weiach (Fig. 2) besteht ebenfalls vorwiegend aus «fining upward»-Zyklen verschiedener hierarchischer Ordnung mit bis 18 m mächtigen Grosszyklen (MATTER et al. 1987a). Sie ist mit ihren häufigen Facieswechseln die sedimentologisch komplexeste Serie des Permokarbons.

Ein typisches Beispiel eines lakustrischen «fining upward»-Grosszyklus, welcher die wichtigsten Faciestypen aufweist, ist in Figur 5 dargestellt. Das Profil setzt über bituminösen Tonen bei 1327 m mit einer gegen oben zunehmend grobkörnigeren Sequenz von gradierten Siltstein-Rhythmiten bis Feinsandsteinen ein, die von erosiv schräggeschichteten Grobsandsteinen mit gegen oben abnehmender Korngrösse überlagert werden. Mit dieser durch Delta-Vorschüttung entstandenen Abfolge verlandete der ältere See im Liegenden.

Die im Hangenden der Delta-Rinnensandsteine folgende Einheit wird vor allem durch die starke Verwühlung der in die flaserigen grünlichen Siltsteine eingeschalteten cm- bis m-mächtigen ehemals kreuzgeschichteten Sandsteine geprägt (Fig. 5). Es handelt sich um die Scoyenia-Ancorichnus-Spurenfossilassoziation (det. B. Keller), welche für strandnahe Ablagerungen ephemerer Seen typisch ist (EKDALE et al. 1984, S. 160). Die im



Beschreibung	Interpretation
Konglomerat aus Kristallingeröllen bis 8cm Ø, Komponenten- und z.T. matrix-gestützt, normal-, seltener invers-gradiert. Sandiger Top der Bänke schräggeschichtet. Penekonkordante Auflagerung der basalen laminierten und kreuzgeschichteten Sandsteine.	Fan-Delta mit sandiger Deltastirn, schichtflut-artigen Schuttströmen und traktivem Kiestransport in verästelten Rinnen
Siltstein-Rhythmite, gradiert, grünlich.	Pro-Delta Turbidite
Ton, kalkig bis Kalkmergel, bituminös, bräunlich. Rhythmisch laminiert. Algenstromatolithlagen an der Basis.	Eutropher See mit klastischer Mangelsedimentation, hoher organischer Produktivität; anoxisches Boden-wasser
Siltstein-Rhythmite, gradiert, z.T. flaserig und verwühlt, grünlich.	Turbidite in durchlüftetem See
Sandsteinlagen, gerippelt, z.T. erosiv, stark verwühlt (Scoyenia-Ancorichnus-Facies), wechsel-lagernd mit Siltsteinen, flaserig, grünlich.	Bucht zwischen Deltarinnen oder Seerandbereich mit subaquatischen Schlammflächen
Sandsteine mit erosiver Basis, schräggeschichtet, "fining-up" zu unregelmässig laminierten und gerippelten grünlichen Siltsteinen.	Erosive Deltarinne und ? subaerische Uferwall-Ab-lagerungen
Siltstein-Rhythmite, gradiert, grünlich, überla-gert von verwühlten Silt- und Feinsandsteinen.	Progradierende Mündungs-Bank
Tone, bituminös, kalkfrei, schwarz; rhythmisch laminiert.	Eutropher See mit klastischer Mangelsedimentation

Fig. 5. Sedimentologisches Profil des Sohlbank-Grosszyklus der lakustrinen Serie, der mit einer «coarsening-up»-Sequenz einsetzt und von Fan-Delta-Konglomeraten überlagert wird; Tiefbohrung Weiach.

Vordergrund stehenden Bildungsmilieus sind in zwischen den Deltaflussrinnen liegenden, subaquatischen Schlammflächen zu sehen. Die gerippelten Sandsteine zeigen jedoch, dass zeitweise Sand in dieses niederenergetische Milieu eingebracht wurde.

Im Profil treten in drei Niveaus Siltstein-Rhythmite auf. Sie bestehen aus einer mm- bis cm-mächtigen helleren grünlichen gradierten Siltsteinlage und einer etwas dunkleren siltigen Tonlage. Rhythmisch geschichtete Siltsteine sind in der Literatur häufig im Zusammenhang mit lakustrinen Serien beschrieben worden (z. B. CHERVEN 1984, HASZELDINE 1984). Sie entstehen in rezenten klastischen Seen bei Hochwasser des Zuflusses durch turbiditische «underflows» oder «interflows» (STURM & MATTER 1978, LAMBERT & HSÜ 1979). Sie stellen daher nicht a priori echte Warven dar. Zunehmende Grobkörnigkeit und sandige Lagen deuten auf grössere Nähe der Flussmündung. Demzufolge dürfte die unterste Siltstein-Einheit bei ca. 1326 m in Figur 5 im distalen Bereich einer Mündungs-Bank, die oberste im Pro-Deltabereich und die mittleren z. T. verwühlten Siltstein-Rhythmite in der ufernahen Zone eines durchlüfteten offenen Sees (Fischfauna, Ostrakoden) abgelagert worden sein. Die mittleren Siltstein-Rhythmite werden von Algenstromatolithen überlagert, welche flaches und durchlichtetes Wasser anzeigen.

Die vorwiegend schwach kalkigen laminierten bituminösen Tone bräunlicher Farbe mit vereinzelten, maximal wenige mm mächtigen Siltsteinlaminae akkummulierten als Sapropele bei vermindertem klastischem Eintrag. Sind die häufigen Fischschuppen und -zähne, Ostrakoden und Estherien ein Indiz für limnische Verhältnisse und sauerstoffreiches Wasser, so sprechen die fehlende Verwühlung und der hohe organische Gehalt des Sediments für sauerstoffarmes Bodenwasser und anoxische Bedingungen im Sediment.

Der lakustrische «fining upward»-Grosszyklus wird durch ein ca. 10 m mächtiges Kristallinkonglomerat abrupt beendet. Der Wechsel von ungeschichteten und z. T. invers-gradierten Konglomeratbänken mit schräggeschichteten Konglomeraten und Sandsteinen deutet auf einen Wechsel von schichtflutartigen Debris-Flow-Schüttungen und traktivem Kies- und Sandtransport in Rinnen eines Schuttfächers. Auf Grund seiner unmittelbaren Auflagerung auf Pro-Deltasedimente wird er als Fan-Delta interpretiert.

Aus der in Figur 5 dargestellten faciellen Abfolge und den Mächtigkeiten der einzelnen Faciestypen geht hervor, dass es sich hier um sehr flache Seen von weniger als 10 m Wassertiefe gehandelt haben muss, die in geologisch verhältnismässig kurzer Zeit verlandeten. Dafür sprechen auch die Estherien, welche typisch für kurzlebige Seen und Tümpel sind. Das Auftreten mehrerer solcher lakustriner Zyklen übereinander zeigt indessen, dass, obschon der einzelne See kurzlebig war, im Autunien während geologisch längerer Zeit ein Seenkomplex im Nordschweizer Trog vorhanden war.

4. Alluviale Schuttfächer des Rotliegenden

In den Bohrungen Weiach und Wintersingen folgen im Hangenden der Seeablagerungen zunächst graue dann rote klastische Sedimente (Fig. 7). Sie sind meistens als unvollständige Sohlbank-Zyklen 1. Ordnung im dm- bis m-Bereich ausgebildet, beginnend mit konglomeratischen bis brecciösen Grobsandsteinen, welche bei zunehmender Korngrössenabnahme in Mittel- bis Feinsandsteine und Siltsteine übergehen. Vielfach bauen diese Zyklen 1. Ordnung Zyklen höherer Ordnung mit bis zu 5 m Mächtigkeit und diese wiederum bis 15 m mächtige Grosszyklen auf. Diese Ablagerungen stellen Bildungen im mittleren und distalen Bereich eines alluvialen Schuttfächers dar. Der Wechsel von grauer

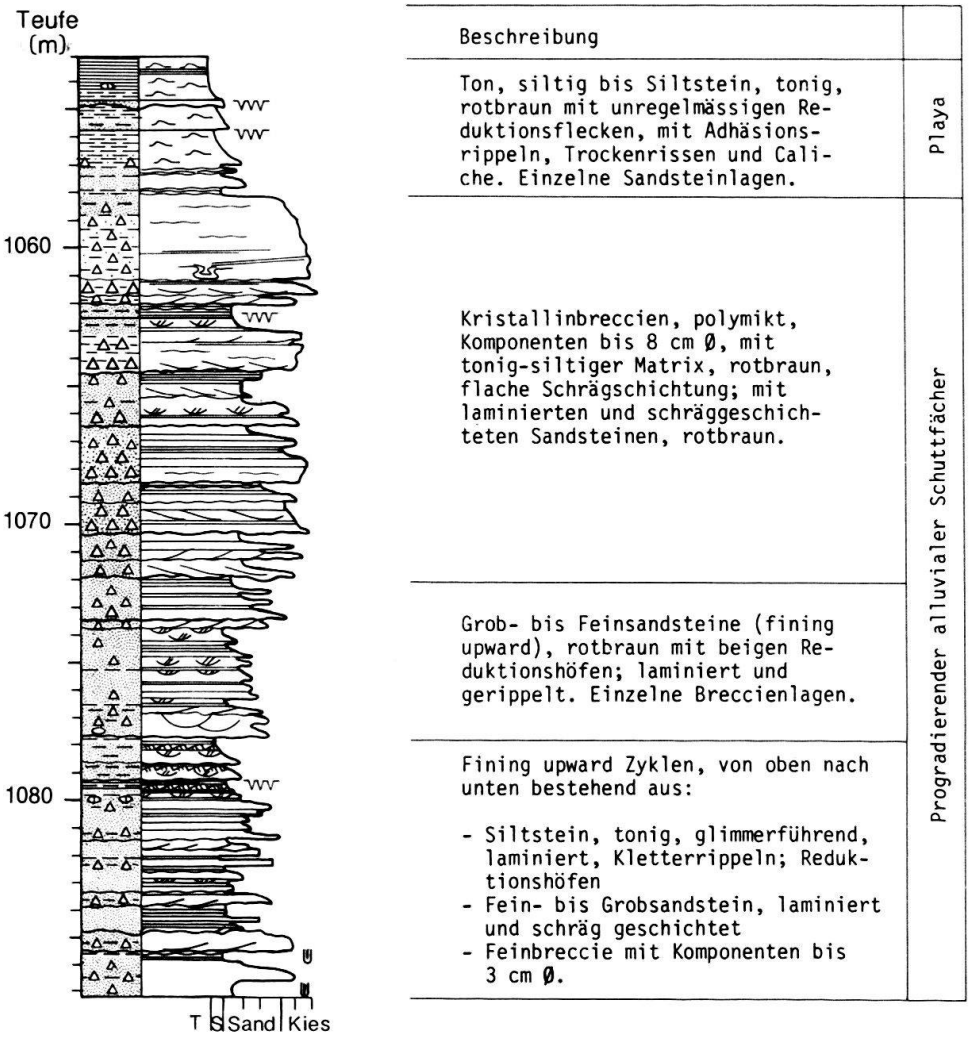


Fig. 6. Sedimentologisches Profil des «Unteren Schuttfächers» und des basalen Teils der Playa-Serie (Oberrotliegendes), Tiefbohrung Weiach.

zu roter Sedimentfarbe und die Abnahme der Bioturbation gegen das Hangende zeugen vom Umschwung eines semi-humiden zu einem ariden bis semi-ariden Klima.

Figur 6 zeigt ein sedimentologisches Profil des obersten Teils des aluvialen Schuttfächers von Weiach. Währenddem die undeutlich geschichteten Breccienhorizonte Debris-Flow-Ablagerungen darstellen, sind die weitaus häufigeren, schräggeschichteten und laminierten Schichten durch fliessendes Wasser abgelagert worden. Vereinzelte Calicheknollen sind ein Indiz für Bodenbildung und Sedimentationsunterbrüche.

Der alluviale Schuttfächer zeigt gegen oben zunehmende Korngrösse, d. h. der Fächer baute sich vor. Er wird abrupt von ziegelroten Tonen und Siltsteinen, die viele Adhäsionsrippeln, Trockenrisse, Calicheknollen und vereinzelte Anhydritkonkretionen aufweisen, überlagert. Eingeschaltet in die feinkörnigen Sedimente finden sich dünne Sandsteine mit meistens planarer Basis, Lamination, Rippeln und Kletterrippeln. Auffallendstes Merkmal dieser Rotschichten sind die im Anschnitt senkrecht zur Schichtung abgeflachten, elliptischen grünen Reduktionshöfe (MATTER et al. 1987a).

Das Fehlen jeglicher Lebensspuren verbunden mit dem Vorkommen von Caliche- und Anhydritknollen sind Anzeichen eines lebensfeindlichen semi-ariden Milieus mit hoher Evaporationsrate. In diesem Klimabereich entstehen durch diagenetische Prozesse

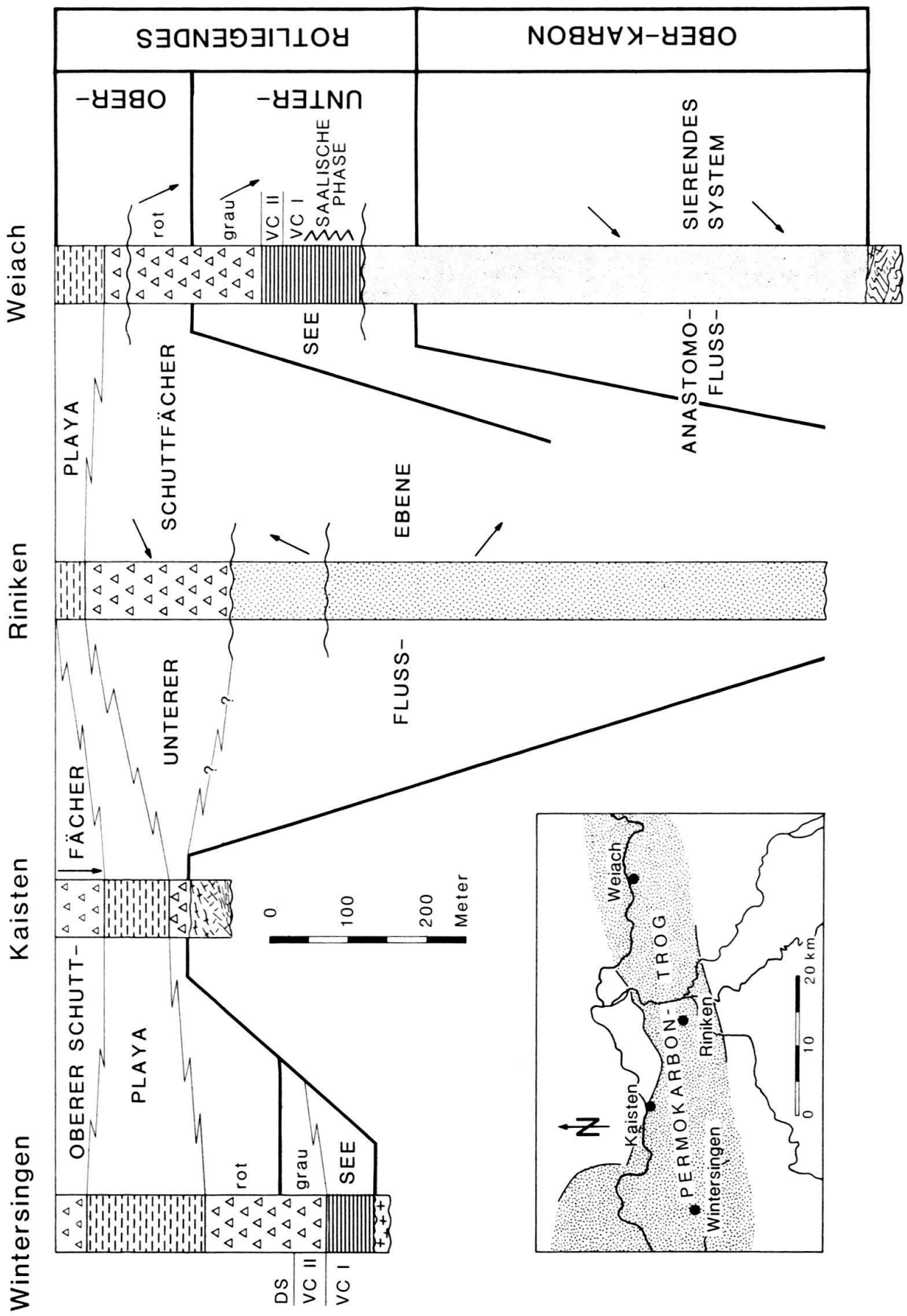


Fig. 7. Stratigraphische Korrelation und lithofacielle Einheiten (schematisch) im Rotliegenden des Nordschweizer Troges. Pollenzonen nach HOCHULI (1985). Pfeile: Schüttungsrichtungen (vgl. Diskussion im Text).

typischerweise Rotschichten (WALKER 1976). Die eingeschalteten dünnen Sandsteinlagen widerspiegeln episodische Regenfälle im Einzugsgebiet, wobei die Schichtfluten bei hohen Fliessgeschwindigkeiten den Sand in die Playa hinaus verfrachteten. Wie zahlreiche Trockenrisse anzeigen, trocknete diese jeweils rasch aus. Andererseits entstehen Adhäsionsrippeln, wenn der Wind Sand über eine feuchte Sedimentoberfläche verfrachtet. Die nach oben seltener werdenden Adhäsionsrippeln sprechen deshalb für zunehmende Trokkenheit. Es ergibt sich somit das Bild einer Playa im Innern eines Grabens.

Die Abfolge alluvialer Schuttfächer, überlagert von Playa-Sedimenten, wurde in allen untersuchten Bohrungen angetroffen (Fig. 7). In den an den Trograndern gelegenen Bohrungen Wintersingen und Kaisten werden die Playa-Sedimente von einem oberen alluvialen Schuttfächer überlagert. Die grosse Häufigkeit pedogener Konkretionen (Caliche) in Kaisten (PETERS et al. 1987) spricht für einen äusserst diskontinuierlichen, langsamen Aufbau dieses Schuttfächers.

Die Bohrung Riniken fällt mit ihrer mächtigen Abfolge grobklastischer Rotschichten, die auf Grund ihrer Farbe und in Analogie mit den Verhältnissen in Weiach ins Oberrotliegende gestellt werden, aus dem Rahmen. Die Abfolge unterhalb der obersten Diskordanz ist gekennzeichnet durch vollständige Sohlbank-Zyklen mit gut ausgebildetem, pelitischem Member. Sie werden als fluviatile Bildungen der Alluvialebene oder als distales Alluvium eines Schuttfächers betrachtet. Die im Hangenden der Diskordanz erbohrten tonigen Sandsteine und Kristallinbreccien stellen dagegen Schuttfächer-Ablagerungen dar.

Falls die Bildung der erwähnten Diskordanz und die Verkippung der Schichten in ihrem Liegenden im Zusammenhang stehen mit der Entstehung der Trogschulter von Kaisten während der permischen Dehnungsphase, so entsprechen sich die beiden Serien auch altersmässig, wie in Figur 7 dargestellt. Diese Auffassung wird durch die geringe Schichtneigung von weniger als 5–10° oberhalb der obersten Diskordanz in Riniken sowie in der ganzen Permokarbon-Abfolge von Kaisten untermauert.

5. Schüttungsrichtungen und Geröllzusammensetzung

Während aus der Geröllzusammensetzung und ihrer zeitlichen Veränderung ein Bild der Geologie des Hinterlandes und die Abtragungsgeschichte rekonstruiert werden können, lässt sich aus Strömungsstrukturen (Schrägschichtung etc.) die Fliessrichtung der Paläoflüsse ableiten. Die Schichtorientierung wird in Bohrlöchern mittels des Dipmeter-Logs festgestellt oder – wie im Falle der orientiert gezogenen Kerne der Bohrung Weiach – zusätzlich durch Abwicklungen am Kern (MATTER et al. 1987a).

Nach Korrektur der Messwerte um den Betrag der post-permischen Verkippung (ISCHI 1987) ergibt sich eine gegen SE gerichtete Schüttungsrichtung des unteren alluvialen Schuttfächers von Weiach und eine trogparallele, südwestliche Richtung für das Schüttungssystem des Oberkarbons.

Sowohl der obere Schuttfächer von Kaisten, wie auch der untere von Riniken bauten sich generell gegen Süden bzw. SE vor. In Riniken ist unterhalb der Diskordanz bei 1053 m Bohrteufe über ca. 100 m zwar zunächst ein NE Schichtfallen (? tektonische Verkippung) zu erkennen, darunter, bis 1615 m, zeigt das Dipmeter-Log ein sehr konstantes, wiederum gegen SE gerichtetes Einfallen der Schichten (MATTER et al. 1987b). Daraus geht hervor, dass die Auffüllung des Grabens im Rotliegenden durch seitliche

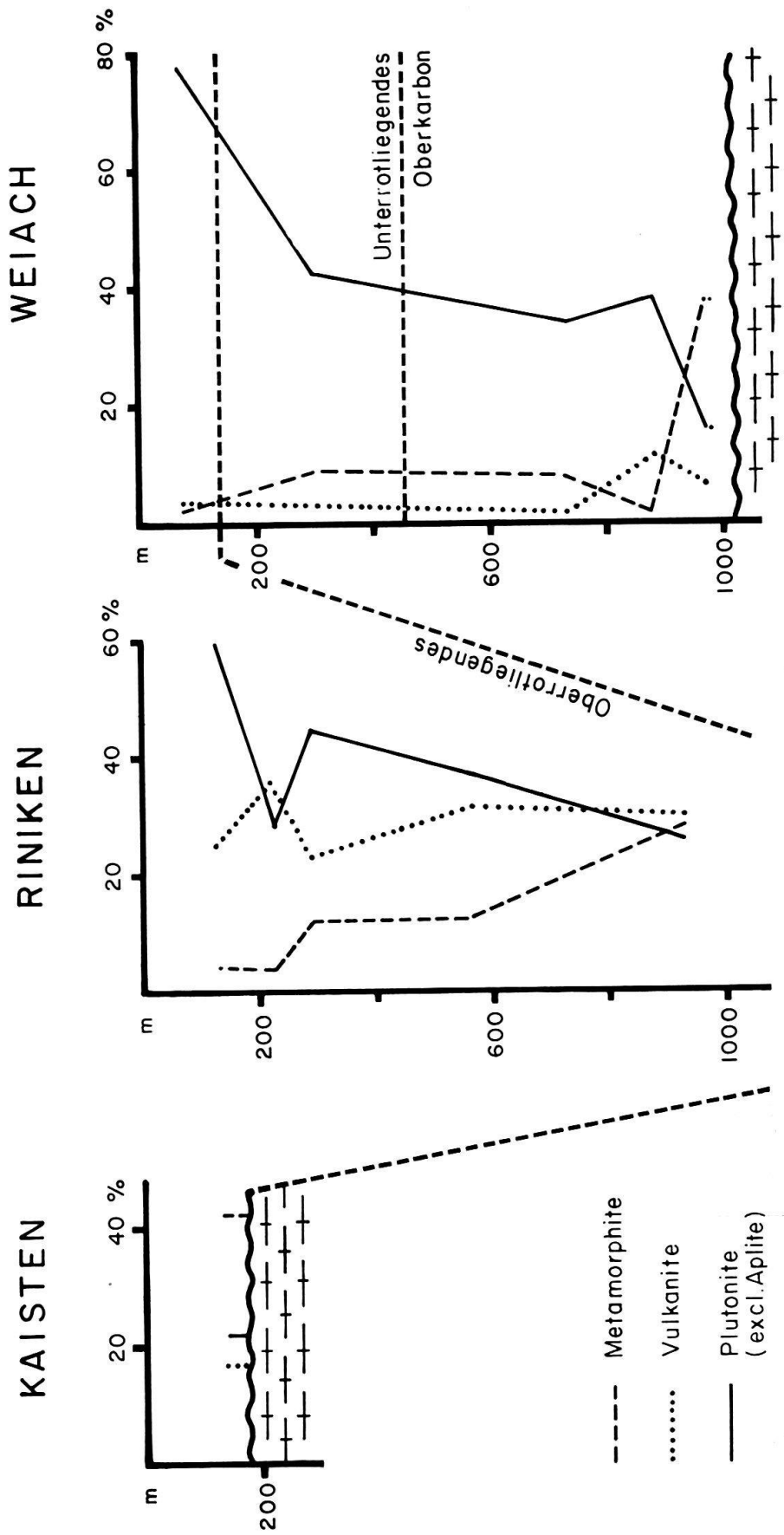


Fig. 8. Geröllzusammensetzung (Fraktion > 6 mm) von Konglomeraten und Breccien des Permokarbons der Nagra-Tiefbohrungen. Aplite, Feldspäte und Intraklaste nicht dargestellt. Prozente bezogen auf Anzahl Gerölle. Aus MATTER et al. 1987a, b, und PETERS et al. 1987.

alluviale Schuttfächer erfolgte, wobei – eventuell wegen der Lage der Nagra-Bohrungen – nur die vom Nordrand des Grabens ausgehenden Schuttfächer festgestellt wurden.

Das Ergebnis der petrographischen Geröllanalysen ist in Figur 8 dargestellt. In der Bohrung Weiach ist die deutliche Zunahme der plutonischen Komponenten, vornehmlich Biotitgraniten, vom unteren Stephanien zum Oberrotliegenden erkennbar. Ein hoher Gehalt an metamorphen Geröllen liegt nur gerade an der Basis des Profils vor. Diese Geröllentwicklung kann mit der Abtragung eines stockwerkartigen Kristallins, bestehend aus einer Gneishülle mit Granitkörpern in unterschiedlicher Tiefe, erklärt werden (MATTER et al. 1987a). Ein gleichartiger Trend lässt sich auch im Oberrotliegenden von Riniken ausmachen.

Die deutlich verschiedene Geröllzusammensetzung des Oberrotliegenden der drei Bohrungen (Fig. 8) untermauert die Interpretation, dass die oben erwähnten, vom nördlichen Grabenrand ausgehenden, radialen Schüttungen verschiedene Schuttfächer darstellen, welche geologisch unterschiedlich aufgebaute kristalline Einzugsgebiete entwässerten.

6. Schlussfolgerungen

Die in Weiach erbohrte mächtige Abfolge oberkarboner klastischer Sedimente ist in einem vermutlich ursprünglich wesentlich breiteren ENE verlaufenden spätvariskisch angelegten Trog durch ein axiales gegen SW entwässerndes anastomosierendes Flußsystem abgelagert worden. Dieser fluviatile Stil, der nach SMITH & PUTNAM (1980) typisch für subsidierende und gleichzeitig aufschüttende Becken (z. B. intramontane Tröge, Molassebecken) ist, weist viele morphologische und facielle Gemeinsamkeiten mit der unteren Deltaebene auf. So deuten die sedimentologischen Merkmale der Rinnensandsteine des Karbons von Weiach vielmehr auf vorwiegend vertikale Aufschüttung als auf laterale Anlagerung. Ausserdem ist die Uferwallfacies in der Abfolge häufig. Beides sind Indizien für Lagestabilität der Flussrinnen und somit auch der zwischen ihnen gelegenen Sumpflandschaften mit Mooren und Seen. Andererseits zeugen zahlreiche Crevasse-splay-Sandsteine, laminierte Tone und vorwiegend dünne, allochthone und aschereiche Kohlen von häufigen Uferdurchbrüchen und Eintrag von klastischem Material. Cordaiten-Waldmoore und Calamitesgürtel an Flüssen und Seeufern wurden dabei erodiert und das organische Material in distaleren Gebieten der Schwemmebene sowie in kurzlebigen, flachen Seen sedimentiert. Erst im Autunien entstanden Seebildungen, deren facielle Differenzierung besagt, dass es grössere, doch ebenfalls nur wenige Meter tiefe Seen waren, die zumindest zwischen Wintersingen und Weiach einen Seenkomplex bildeten. Delten bauten sich in diese Seen vor, wobei Flüsse mit hoher Bodenfracht flache Mündungsbänke aufschütteten. Hochwasser-induzierte Turbidite führten im Seebecken zur Bildung warvenartiger Rhythmite und sorgten für eine gute Durchlüftung der Wassermasse. Infolge weitgehender Abschnürung von der klastischen Zufuhr – möglicherweise infolge ansteigendem Seespiegel – fand eine Eutrophierung des von Fischen, Ostrakoden, Estherien und Algen belebten Sees statt, und da die Turbidite ausblieben, wurde das Bodenwasser anoxisch, wobei es zur Bildung von Faulschlamm kam. Die Progradation eines Deltas oder Fan-Deltas in den See führte zu dessen Verlandung und leitete gleichzeitig einen weiteren lakustrinen «fining upward»-Grosszyklus ein, der von der Entstehung eines neuen Sees zeugt.

Die Ablösung des fluviatilen Regimes durch ein lakustrisches im Autunien scheint weniger mit der von HOCHULI (1985) postulierten überregionalen Klimarekurrenz und der infolge des trockeneren Klimas reduzierten Detrituszufuhren zusammenzuhängen als vielmehr mit der in diese Zeit fallenden Einengung und morphologischen Rekonstruktion des Troges (Saalische Phase). Grössere zusammenhängende Seen sind auch vom Saar-Nahe-Becken bekannt; sie sind dort vor allem auf die Altenglan-Schichten beschränkt (SCHÄFER 1986), die HOCHULI (1985) ebenfalls in die Pollenzone VCI eingestuft.

Eine erneute Zunahme des Reliefs führte zu erhöhtem Abtrag im kristallinen Hinterland und zum Aufbau des unteren alluvialen Schuttfächers, welcher in den Bohrungen Weiach und Wintersingen über die Seebildungen progradierte. In der grauen verwühlten Facies des distalen Fächers klingt noch der Einfluss des reduzierenden limnischen Milieus nach. Demnach war dieser Teil des Fächers eindeutig häufig von Wasser bedeckt. Die Geröllluntersuchungen lassen erkennen, dass es sich beim unteren Schuttfächer in den vier Bohrungen um verschiedene Fächer handelt. Ihre Untergrenze ist heterochron, womit die Korrelation zwischen Riniken und Weiach vorläufig offen bleibt.

Einen weiteren Hinweis auf eine bedeutende Hebungsphase liefert der Reifegrad des organischen Materials der Bohrung Weiach. Auf Grund von Modellberechnungen der organischen Maturität gelangt KEMPTER (1987) zum Schluss, dass im Bereich zwischen der Basis des Schuttfächers und der Grenze graue/rote Sedimentfarbe eine Erosionslücke von ca. 1000 m angenommen werden müsse. Diese an der Wende Unter/Oberrotliegendes erfolgten, vermutlich mit strike-slip-Bewegungen verbundenen differentiellen Vertikalbewegungen führten andererseits im Gebiet Riniken zur Entstehung eines «pull-apart»-Beckens, welches mit einer mächtigen Abfolge von Rotschichten aufgefüllt wurde.

Die asymmetrische «coarsening upward»-Megasequenz des unteren alluvialen Schuttfächers und seine Progradation werden als Antwort auf tektonische Hebung des Hinterlandes betrachtet. Dieses Verhalten ist typisch für Schuttfächer an tektonisch aktiven Grabenrändern. Die unmittelbare Überlagerung durch feinkörnige Sedimente der Playa lässt den Schluss zu, dass infolge längerer Eintiefung der Zufuhrrinne die Sedimentation auf den Fuss des Fans konzentriert blieb. Nach HEWARD (1978) tritt eine solche Situation bei Abnahme der klastischen Zufuhr oder bei Vertiefung der Erosionsbasis auf. Ersteres ist wahrscheinlicher, da Playa-Sedimente in allen vier untersuchten Bohrungen den unteren Schuttfächer überlagern. Die reduzierte Detrituszufuhr ist das Resultat von zunehmend arideren Bedingungen, die sich u. a. in einem Verschwinden der Adhäsionsrippeln gegen das Hangende und einer zunehmenden Häufigkeit von Calicheknollen widerspiegeln. Während einer offenbar längeren tektonischen Ruhephase wurde der Trog durch feinkörnige Playa-Sedimente aufgefüllt und das Relief weitgehend eingeebnet. Erst durch die erneute Erweiterung des Grabens entstand wiederum genügend Relief, welches zur Entstehung des oberen Schuttfächers auf den Grabenschultern führte.

Verdankungen

Die vorliegende Arbeit basiert auf den Ergebnissen eines im Auftrag der Nagra am Geologischen und Mineralogischen Institut der Universität Bern durchgeführten geologisch-mineralogischen Untersuchungsprogrammes der Nagra-Tiefbohrungen. Der Autor dankt der Nagra, insbesondere ihrem Chefgeologen Dr. Marc Thury, für die Erlaubnis zur Veröffentlichung der Resultate. Besonderer Dank gebührt den Mitarbeitern an beiden Instituten: Dr. H. R. Bläsi, Dr. C. Isenschmid, Dr. J. Meyer und Dr. D. Morariu. W. Blüm stellte freundlicherweise

die im Rahmen seiner Dissertation durchgeführte Neuaufnahme des Profils der Bohrung Wintersingen zur Verfügung. B. Keller zeichnete die sedimentologischen Profile neu und war ein kritischer Gesprächspartner in zahlreichen Diskussionen über die nicht immer leichte sedimentologische Interpretation der Bohrprofile. Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und zahlreiche Anregungen bin ich Dr. P. Dieblold (Herznach) und B. Keller (Bern) sehr zu Dank verpflichtet. Frau I. Blaser und Frau L. Vogt-Fonatsch danke ich für die Schreibarbeiten.

LITERATURVERZEICHNIS

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, 7–28.

CASSHYAP, S. M., & TEWARI, R. S. (1984): Fluvial models of the Lower Permian coal measures of Son-Mahanadi and Koel-Damodar Valley basins, India. – Spec. Publs int. Ass. Sediment. 7, 121–147.

CHERVEN, V. B. (1984): Early Pleistocene glacial outwash deposits in the eastern San Joaquin Valley, California: a model for humid-region alluvial fans. – Sedimentology *31*, 823–836.

DISLER, C. (1951): Die Steinkohlenbohrversuche bei Zeiningen, in Wallbach und in Mumpf im letzten Jahrhundert. – Vom Jura zum Schwarzwald, N. F., Jg. 26, 49–64. – Fricktalisch-badische Ver. f. Heimatkunde u. Heimatschutz.

EKDALE, A. A., BROMLEY, R. G., & PEMBERTON, S. G. (1984): Ichnology: Trace fossils in sedimentology and stratigraphy. – Soc. econ. Paleont. Mineral., Short Course No. 15.

ERNI, A. (1949): Unterpermische Ganoidfische aus der Bohrung Wintersingen (Kt. Basel-Land). – Eclogae geol. Helv. *33*, 230–252.

FLORES, R. M., & HANLEY, J. H. (1984): Anastomosed and associated coal-bearing fluvial deposits: Upper Tongue River Member, Paleocene Fort Union Formation, northern Powder River Basin, Wyoming, U. S. A.. – Spec. Publs int. Ass. Sediment. *7*, 85–103.

HASZELDINE, R. S. (1984): Muddy deltas in freshwater lakes, and tectonism in the Upper Carboniferous Coalfield of NE England. – Sedimentology *31*, 811–822.

HOCHULI, P. A. (1985): Palynostratigraphische Gliederung und Korrelation des Permo-Karbons der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. *78*/3, 719–831.

ISCHI, H. (1987): Strukturgeologie der Sondierbohrung Weiach, In: MATTER, A. et al.: Sondierbohrung Weiach – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86–01. – Nagra, Baden (im Druck).

KEMPTER, E. H. K. (1987): Fossile Maturität, Paläothermogradienten und Schichtlücken in der Bohrung Weiach im Lichte von Modellberechnungen der thermischen Maturität. – Eclogae geol. Helv. *80*/2, 543–552.

LAMBERT, A., & HSÜ, K. J. (1979): Non-annual cycles of varvelike sedimentation in Walensee, Switzerland. – Sedimentology *26*, 453–461.

LAUBSCHER, H. P. (1986): Expertenbericht zum Projekt Gewähr: Struktur des Grundgebirges und des Paläozoikums der Nordschweiz. – Bundesamt für Energiewirtschaft, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen. – Würenlingen, (unveröff.).

— (1987): Die tektonische Entwicklung der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. *80*/2, 287–303.

LEMCKE, K. (1973): Zur nachpermischen Geschichte des nördlichen Alpenvorlandes. – Geologica bavar. *69*, 5–48.

LEMCKE, K., & WAGNER, R. (1961): Zur Kenntnis des vortertiären Untergrundes im Bodenseegebiet. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. *27*/73, 9–14.

MATTER, A., PETERS, TJ., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ISCHI, H. (1987a): Sondierbohrung Weiach – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86–01. – Nagra, Baden (im Druck).

MATTER, A., PETERS, TJ., ISENSCHMID, CHR., BLÄSI, H.-R., & ZIEGLER, H.-J. (1987b): Sonderbohrung Riniken – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86–02. – Nagra, Baden (im Druck).

MÜHLBERG, F. (1882): Übersicht der Steinkohlenbohrversuche im Aargau. – Mitt. aargau. natf. Ges. *3*, 184–191.

ORTLAM, D. (1974): Inhalt und Bedeutung fossiler Bodenkomplexe in Perm und Trias von Mitteleuropa. – Geol. Rdsch. *63*, 850–884.

PETERS, TJ., MATTER, A., ISENSCHMID, CHR., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ZIEGLER, H.-J. (1987): Sondierbohrung Kaisten – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86–04. – Nagra, Baden (im Druck).

REMY, W. (1987): Paläobotanische Auswertung der Pflanzenfunde, In: MATTER, A. et al.: Sonderbohrung Weiach – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86–01. – Nagra, Baden (im Druck).

RUST, B. R., GIBLING, M. R., & LEGUN, A. S. (1984): Coal deposition in an anastomosing-fluvial system: the Pennsylvanian Cumberland Group south of Joggins, Nova Scotia, Canada. – Spec. Publs int. Ass. Sediment. *7*, 105–120.

SCHÄFER, A. (1984): Die Sedimente des Oberkarbons und Unterrotliegenden im Saar-Nahe-Becken. – Mainzer geowiss. Mitt. *15*, 239–365.

SCHMASSMANN, H. J., & BAYRAMGIL, O. (1946): Stratigraphie, Petrographie, Paläogeographie der Perm-Formation im schweizerischen Tafeljura und die Steinkohlenfrage der Nordschweiz. – Tätber. natf. Ges. Basell. *15*, 17–117.

SMITH, D. G., & PUTNAM, P. E. (1980): Anastomosed river deposits: modern and ancient examples in Alberta, Canada. – Canad. J. Earth Sci. *17*, 1396–1406.

SMITH, D. G., & SMITH, N. D. (1980): Sedimentation in anastomosed river systems: Examples from alluvial valleys near Banff, Alberta. – J. sediment. Petrol. *50*/1, 157–164.

SPRECHER, C., & MÜLLER, W. (1986): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Reflexionsseismik 1982. – Nagra Technischer Bericht, NTB 84–15. – Nagra, Baden.

STURM, M. & MATTER, A. (1978): Turbidites and varves in Lake Brienz (Switzerland): deposition of clastic detritus by density currents. – Spec. Publs int. Ass. Sediment. *2*, 147–168.

WOLF, M., HAGEMANN, W. H., HAVERKAMP, S., & LINNENBERG, W. (1987): Kohlenpetrographie und -chemie, In: MATTER, A. et al.: Sondierbohrung Weiach – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86–01. – Nagra, Baden (im Druck).

ZIEGLER, P. A. (1982): Geological Atlas of Western and Central Europe (Textband und Atlas). – Shell Int. Petr. Maatsch. – (Elsevier, Amsterdam/New York).

Manuskript eingegangen am 10. April 1987
Revision angenommen am 30. April 1987