



## Die Gliederung des Tertiärs im süddeutschen Molassebecken

von GERHARD DOPPLER, KURT HEISSIG und BETTINA REICHENBACHER

mit 3 Tabellen und Tafel XIV im Anhang

**Zusammenfassung.** Die tertiären, überwiegend sedimentären Gesteine im süddeutschen Molassebecken umfassen den Bereich vom Ober-Eozän bis zum Ober-Miozän. Die Molassesedimente werden nach ihrer überwiegenden Genese in marinem, brackischem oder lakustrin-fluviatilem Milieu in sechs lithostratigraphische Gruppen eingeteilt: Untere Meeres-, Untere Brackwasser-, Untere Süßwassermolasse, Obere Meeres-, Obere Brackwasser-, Obere Süßwassermolasse. Zusätzlich erfolgt die Unterteilung in Westmolasse und Ostmolasse. Die Westmolasse ist in zwei Sedimentationszyklen gegliedert, die durch einen Hiatus getrennt sind. Beide Zyklen beginnen transgressiv mit marinen Abfolgen und enden regressiv mit fluviatilen und lakustrinen Sedimenten. Der erste Zyklus umfasst die Untere Meeresmolasse (*Kiscellium*) sowie die Untere Süßwassermolasse (*Egerium*). Der zweite Zyklus beginnt mit der Oberen Meeresmolasse (*Eggenburgium* bis *Ottnangium*), die teils konkordant, teils diskordant von der Oberen Brackwassermolasse (oberes *Ottnangium*/unteres *Karpatium*) überlagert wird. Mit der Oberen Süßwassermolasse (*Karpatium* bis *Pannonium*) endet der zweite Zyklus. Die Ostmolasse ist bis zum Ende der zweiten marinen Phase der Westmolasse (*Ottnangium*) durchgehend marin; erst dann entstehen brackische, fluviatile und lakustrine Sedimente. Während des *Egerium* wurde im Verzahnungsbereich von West- und Ostmolasse die Untere Brackwassermolasse gebildet.

Die Fazies der West- und der Ostmolasse ist sowohl von beckenaxialen als auch von radialen Schüttungen beeinflusst. Der axiale Sedimenttransport erfolgte zur Zeit der Unteren Süßwassermolasse nach Osten und zur Zeit der Oberen Süßwassermolasse nach Westen. Radiale Schüttungen stammen vor allem aus dem alpinen Orogen, untergeordnet auch vom nördlichen Beckenrand.

**Abstract.** In the South German Molasse Basin Tertiary rocks, which are mostly of sedimentary origin, range from the Upper Eocene to the Upper Miocene in age. The Molasse sediments can be divided in six lithostratigraphic groups according to their palaeoenvironment: Lower Marine Molasse, Lower Brackish Molasse, Lower Freshwater Molasse, Upper Marine Molasse, Upper Brackish Molasse and Upper Freshwater Molasse. They are additionally classified into the Western

\* Anschriften der Autoren: Dr. G. DOPPLER, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Abteilung 10 Geologischer Dienst, Heßstraße 128, D-80797 München, Germany, E-Mail: gerhard.doppler@lfu.bayern.de.

Prof. Dr. K. HEISSIG, Bayerische Staatssammlung für Paläontologie und Geologie, Richard-Wagner-Straße 10, D-80333 München, Germany, E-Mail: k.heissig@lrz.uni-muenchen.de.

Prof. Dr. B. REICHENBACHER, LMU, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Paläontologie, Richard-Wagner-Straße 10, D-80333 München, Germany, E-Mail: b.reichenbacher@lrz.uni-muenchen.de.

Molasse and the Eastern Molasse. The Western Molasse consists of two cycles between which a hiatus is present. Both cycles begin transgressively with marine deposits and end regressively with fluvial and lacustrine sediments. The first cycle covers the Lower Marine Molasse (Kiscellian) and the Lower Freshwater Molasse (Egerian). The second cycle comprises the Upper Marine Molasse (Eggenburgian to Ottangian), which is concordantly or discordantly overlain by the Upper Brackish Molasse (late Ottangian/early Karpatian), and finally ends with the Upper Freshwater Molasse (Karpatian to Pannonian). In the Eastern Molasse, marine conditions prevail until the second marine period of the Western Molasse (Ottangian), when deposition of brackish, fluvial and lacustrine sequences (Upper Brackish and Freshwater Molasse) begins. The Lower Brackish Molasse originated during the Egerian in the transition zone of the Western and the Eastern Molasse.

The general directions of transport were axial and radial. Axial transport occurred from West to East during the Lower Freshwater Molasse and from East to West during the Upper Freshwater Molasse. Radial fans mainly originated from the Alps in the south. A greater influence from the northern rim can be observed intermittently.

## 1 Geologischer Überblick

Das süddeutsche Molassebecken ist Teil der nördlichen Vorlandtiefen der Alpen. Es gehörte über lange Zeiträume zur tertiären Paratethys, einem zeitweise abgetrennten Nebenmeer der Tethys, welches sich vom Genfer See im Westen über Süddeutschland, Niederösterreich und entlang der Karpaten bis in das Gebiet des Kaspischen Sees und Aralsees erstreckte. Die Auffüllung der nördlichen Vorlandtiefen wurde durch die Dynamik der alpinen Gebirgsbildung gesteuert (u. a. KUHLEMANN & KEMPF 2002, SCHLUNEGGER et al. 1997, SPIEGEL et al. 2000) und durch eustatische Meeresspiegelschwankungen beeinflusst (u. a. LEMCKE 1988, JIN 1995, ZWEIGEL et al. 1998). Die typische Molasse-Sedimentation ist durch Sedimentzufuhr aus den Alpen sowie durch starke Subsidenz des Ablagerungsraumes charakterisiert. Sie begann im Grenzbereich Eozän/Oligozän und dauerte rund 25 Mio. Jahre bis in das Ober-Miozän. Während dieser Zeitspanne progradierte das Molassebecken aufgrund der alpinen Orogenese mehrere Zehnerkilometer weit nach Norden. Die Sedimente wurden sowohl radial als auch beckenaxial transportiert. Verschiedene Schüttungen aus Norden sind weitgehend auf den Nordrand des Molassebeckens beschränkt. Am Alpenrand erreicht die gesamte Molasseabfolge bis zu 5000 m Mächtigkeit, nach Norden nimmt sie deutlich bis in den Zehnermeter-Bereich ab.

Die süddeutsche Molasse wird tektonisch in die autochthone ungefaltete *Vorlandmolasse* und in die allochthone *Faltenmolasse* (auch Subalpine Molasse) untergliedert. Die Faltenmolasse ist in den Deckenbau der Alpen mit einbezogen, verschuppt und in enge alpenrandparallele Synklinale gefaltet (LEMCKE 1988). Sie überschreibt die autochthone Vorlandmolasse, die als *Überfahrene Molasse* noch 30–50 km weit nach Süden unter den Alpen nachgewiesen ist. Der Großteil des heutigen süddeutschen Molassebeckens bildet eine asymmetrische Synklinale, mit einem langen, sehr flach nach Süden einfallenden Nordflügel (Vorlandmolasse) und einem kurzen, steil nach Norden einfallenden Südflügel (Aufgerichtete Vorlandmolasse), an den sich nach Süden die Falten-, Schuppen- und Indenterstrukturen der Faltenmolasse anschließen. Damit repräsentiert das süddeutsche Molassebecken heute nur noch den Nordflügel des ehemals viel breiteren Molassetroges, dessen ursprüngliche Beckenachse entlang des heutigen Alpennordrandes vermutet wird. Bedingt durch den Muldenbau wird das heutige Molassebecken oberflächig überwiegend

von den jüngeren Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse eingenommen. Diese sind weithin von quartären Abfolgen verhüllt und treten nur teilweise an steil eingeschnittenen Flusstälern zutage. Ältere Molassegesteine streichen nur am Süd- und Nordrand des Beckens sowie im würtembergischen und östlichsten niederbayerischen Teil zutage aus.

Das Wort „Molasse“ wurde ursprünglich in der französischen Schweiz für mürbe Sandsteine verwendet (französisch „mollasse“ = sehr weich). Die oberflächennahen Molassegesteine bestehen zwar überwiegend aus den Namen gebenden, wenig oder unverfestigten Schottern, Sanden, Mergeln und Tonen, jedoch kommen auch fest gebundene Konglomerate und Sandsteine, seltener auch Kalksteine vor.

## 2 Stratigraphische Nomenklatur und Klassifikation

Traditionell werden die süddeutschen Molasse-Gesteine nach ihrer überwiegenden Genese in marinem, brackischem oder lakustrin-fluviatilem Milieu in folgende lithostratigraphische Gruppen eingeteilt (grundsätzlich von alt nach jung, aber teilweise auch diachron): Untere Meeresmolasse (UMM), Untere Brackwassermolasse (UBM), Untere Süßwassermolasse (USM), Obere Meeresmolasse (OMM), Obere Brackwassermolasse (OBM), Obere Süßwassermolasse (OSM). Außerdem bedingen die regionalen lithofaziellen Unterschiede die Differenzierung in eine *Westmolasse* und eine etwa östlich des Lechs beginnende *Ostmolasse*. Als chronostratigraphisches Bezugssystem wird die regionale Stufengliederung der Paratethys (z. B. STEININGER 1999) verwendet, deren Bezug zur internationalen Gliederung der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002 (STD 2002) entnommen werden kann.

Die lithostratigraphischen Gruppen sind auch für die Darstellung der Molasseabfolgen in der STD 2002 verwendet worden, obgleich sie für beckenweite Vergleiche und für Korrelierungen mit Gesteinsabfolgen im außeralpinen Raum aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung nur wenig geeignet erscheinen. Die Vielzahl der bestehenden informellen und jeweils nur lokal bis regional gültigen Schichten-Bezeichnungen (Tab. 1–3) waren im Rahmen der STD 2002 nicht darstellbar.

## 3 Regionale und lokale stratigraphische Einheiten

### 3.1 Westmolasse

Im Gebiet der Westmolasse bilden obereozäne Ablagerungen in Helvetikum-Fazies das älteste Tertiär. Erst im Unter-Oligozän (Kiscellium) beginnt die eigentliche Molasse-Sedimentation. Die Westmolasse lässt zwei Zyklen erkennen, die durch einen Hiatus getrennt sind. Jeder Zyklus beginnt transgressiv und endet mit einer regressiven Abfolge und einer nachfolgenden Abtragungsperiode. UMM und USM bilden den ersten Zyklus. Der Wechsel von der marinen UMM zur ausgesüßten USM erfolgt etwa an der Wende Kiscellium/Egerium. Die USM dauert das gesamte Egerium und vermutlich bis in das tiefste Eggenburgium an. Nach einer Erosionsphase beginnt mit einer Meerestransgression der zweite Zyklus, zu dem die OMM, OBM und OSM gehören. Das OMM-Meer besteht bis in das mittlere Ottnangium. Die OBM entstand während eines wechselhaften Verbra-

ckungs- und Aussüßungsprozesses im oberen Ottnangium und unterem Karpatium. Mit der OSM endet die Sedimentation in der Westmolasse. Die jüngsten Anteile der OSM werden in Süddeutschland in das Pannonium gestellt. Lithofazielle Unterschiede innerhalb der Westmolasse führen zur weiteren regionalen Differenzierung in eine *westliche Vorlandmolasse* und eine *mittlere Vorlandmolasse* (siehe Tab. 2–3) sowie in eine *westlichste Faltenmolasse* und eine *westliche Faltenmolasse* (siehe Tab. 1).

### 3.2 Ostmolasse

Im Gebiet der Ostmolasse beginnt die marine Sedimentation im Ober-Eozän (Priabonium) mit der Helvetikum-Fazies, die noch nicht zur Molasse gehört. Anders als in der Westmolasse dauert die nachfolgende marine Molassesedimentation bis in das Unter-Miozän (mittleres Ottnangium), so dass die lithostratigraphische Gruppe USM nicht vorhanden ist. Der breite Übergangsbereich der UBM zwischen der USM im Westen und der UMM im Osten kann ebenfalls noch zur Ostmolasse gerechnet werden. Auch in der Ostmolasse entstand nach Ablagerung der OBM (oberes Ottnangium) ab dem Karpatium unter festländischen Bedingungen die OSM.

### 3.3 Probleme der Korrelation und Chronostratigraphie

Die Tab. 1–3 geben eine Übersicht der derzeit verwendeten Schichten-Bezeichnungen für die süddeutschen Molasseabfolgen. Von wenigen Ausnahmen abgesehen nehmen diese „Schichten“ derzeit nicht den Rang formeller Formationen ein, weil gemäß den internationalen Richtlinien der IUGS (zuletzt MURPHY & SALVADOR 1999) abgefasste stratigraphische Definitionen bislang nicht vorliegen. Die chronostratigraphische Stellung der „Schichten“ ist häufig unsicher, weil isotopische Altersdaten (Hegau-Vulkane, Ries-Ereignis) nur punktuell vorliegen, biostratigraphische Datierungen noch nicht für alle Einheiten beckenweit verfügbar sind und magnetostratigraphische Datierungen noch ausstehen. Bedingt durch den vielfach raschen vertikalen und horizontalen Wechsel der Lithofazies ist auch eine beckenweite lithostratigraphische Korrelation nur eingeschränkt möglich.

## 4 Beschreibung der regionalen und lokalen stratigraphischen Einheiten (Tab. 1–3)

Im folgenden werden die am weitesten verbreiteten Gesteinsabfolgen kurz charakterisiert, wobei nicht auf alle in den Tab. 1–3 aufgeführten Abfolgen eingegangen werden kann. Der informelle Charakter der Schichten-Namen wird durch die Verwendung der Kursiv-Schrift verdeutlicht. Als allgemeine und vertiefende Literatur seien BACHMANN & MÜLLER (1991, 1992), BARTHELT (1989), DOPPLER (1989), DOPPLER et al. (1996), GEYER & GWINNER (1991), LEMCKE (1988), LEMCKE et al. (1953), NEUMAIER et al. (1957), LUTERBACHER (1997), REICHENBACHER (1993), SCHREINER (1965, 1995), UNGER (1989) sowie die verschiedenen Geologischen Führer und die Erläuterungen zu den Geologischen Karten 1:25.000 und 1:50.000 von Baden-Württemberg und Bayern genannt.

Tabelle 1 Schematische Übersicht der derzeitigen Gliederung der Faltenmolasse im süddeutschen Molassebecken.

Lithostratigraphische Gruppen	Westlichste Faltenmolasse (Bodensee-Wertach)	Westliche Faltenmolasse (Wertach-Isar)	Östliche Faltenmolasse (Isar-Inn)	Östlichste Faltenmolasse (Inn-Salzach)
Obere Süßwasser-molasse (OSM)	Keine weitere Untergliederung			
Obere Brackwasser-molasse (OBM)	Nicht vorhanden			
Obere Meeres-molasse (OMM)	Keine weitere Untergliederung			
Untere Süßwassermolasse (USM)	Hauchenberg-Schichten Kojen-Schichten Granitische Molasse Steigbach-Schichten Weißbach-Schichten	Obere Bunte Molasse Untere Bunte Molasse	vertreten durch UBM	vertreten durch UMM
Untere Brackwassermolasse (UBM)	vertreten durch USM		Oberste Cyrenen-Sch. Obere Cyrenen-Sch. Daser-Schichten	vertreten durch UMM
			Hauptcyrenen-Schichten Schwaiger Schichten Untere Cyrenen-Sch.	
Untere Meeresmolasse (UMM)	vertreten durch USM		Nantesbuchsandstein Promberger Schichten Nonnenwald-Sandstein	Aquitan-Fischschiefer Aquitan-Sand-Mergel-Folge / Obere Puchkirchener Serie Hangende Tonmergel Chatt-Sand / Untere Puchkirchener Serie
	Baustein-Schichten Tonmergel-Schichten Deutenhausener Schichten / Fischschiefer			Liegende Tonmergel Tonmergel-Schichten Fischschiefer

Tabelle 2 Schematische Übersicht der derzeitigen Gliederung der Vorlandmolasse im süddeutschen Molassebecken (ohne Nordrandfazies).

Lithostratigraphische Gruppen	Westliche Vorlandmolasse (westlich der Iller)	Mittlere Vorlandmolasse (Iller-Lech)	Östliche Vorlandmolasse (östlich des Lech)
<b>Obere Süßwassermolasse (OSM)</b>	Obere Sande Erolzheimer Sande / Grobsandsch./ Öhninger Schichten Steinbalmensande obere Haldenhofmergel	Obere Serie Geröllsandserie Fluviale Untere Serie Limnische Untere Serie / Obere Bunte Mergelserie	Hangendserie / Moldanubische Serie / Mischserie Südlicher Vollschotter Quarzrestschotter / Nördliche Vollschotter-Abfolge Süßwasserschichten / Ortenburger Schotter
<b>Obere Brackwassermolasse (OBM)</b>	untere Haldenhofmergel / OSM-Süßwasserkalkzone / Kirchberg-F. Albstein	Untere Bunte Mergelserie / Kirchberg-Formation / Albstein	Oncophora-Schichten / Sand-Kalkmergel-Serie / Kirchberg-Formation
<b>Obere Meeresmolasse (OMM)</b>	Helicina-Schichten / OMM-Deckschichten Baltringer Schichten Sandschiefer Heidenlöcher-Schichten	Feinsandserie Baltringer Schichten Sandmergelserie OMM-Basissschichten	Glaukonitsande / Blättermergel Neuhofener Schichten Eggenburg-Sand-Mergel-Folge / Ortenburger Meeressand
<b>Untere Süßwassermolasse (USM)</b>	nicht durchgehend untergliedert	Jüngere Untere Süßwassermolasse Ältere Untere Süßwassermolasse	vertreten durch UBM / UMM
<b>Untere Brackwassermolasse (UBM)</b>	vertreten durch USM	Obere Cyrenen-Schichten	Oberste Cyrenen-Schichten Obere Cyrenen-Schichten Haupt-Cyrenen-Schichten Untere Cyrenen-Schichten
<b>Untere Meeresmolasse (UMM)</b>	vertreten durch USM, UBM		Aquitan-Fischschiefer Aquitan-Sand-Mergel-Folge Hangende Tonmergel / Glassand Chatt-Sand
	Baustein-Schichten Tonmergel-Schichten Fischschiefer		Liegende Tonmergel Rupel-Tonmergel Bändermergel Heller Mergelkalk Fischschiefer

Tabelle 3 Schematische Übersicht der derzeitigen Gliederung der Vorlandmolasse in Nordrandfazies im süddeutschen Molassebecken.

Lithostratigraphische Gruppen	Nordrandfazies der westlichen Vorlandmolasse (Albrand)	Nordrandfazies der mittleren Vorlandmolasse (Albrand)	Nordrandfazies der östlichen Vorlandmolasse (Albrand und Böhm. Masse)
Obere Süßwassermolasse (OSM)	Oggenhauser Sande / Jüngere Jurangelfluh / Sylvestrina-Schichten Silvana-Schichten	Monheimer Höhensand Sylvestrina-Schichten Silvana-Schichten	Braunkohlentertiär Rittsteiger Schichten
Obere Brackwassermolasse (OBM)		Kirchberg-Formation Grimmelfinger Schichten Albstein	Schneckenkalk Herrnwahlanner Schichten
Obere Meeresmolasse (OMM)	Heliciden-Schichten / Alpines Konglomerat / Randen-Grobkalk / Erminger Turritellenplatte	Keine weitere Untergliederung	Ortenburger Meeressand
Untere Süßwassermolasse (USM)	Ältere Jurangelfluh / Ulmer Schichten Ehinger Schichten / USM-Süßwasserkalkzone	Ulmer Schichten Ehinger Schichten	Nicht vorhanden
Untere Brackwassermolasse (UBM)		Nicht vorhanden	
Untere Meeresmolasse (UMM)		Nicht vorhanden	

Soweit nicht anders angegeben, wurden diese Arbeiten als Quellen für den nachfolgenden Text verwendet.

#### 4.1 Ober-Eozän

Die Abfolgen des Ober-Eozän (Taf. XIV) im Molassebecken gehören noch zur Fazies des Helvetikum-Meeres, also noch nicht zur „Molasse“. Klastische Schüttungen kamen von Norden, z. B. von dem im Nordosten gelegenen Landshut-Neuöttinger Hoch. Südliche Abtragungsgebiete standen erst später durch die alpine Orogenese zur Verfügung. Das Ober-Eozän beginnt mit dem gering mächtigen *Basis-Sandstein*, der zwischen Isar und Inn einen guten Erdölspeicher bildet. Der bis 80 m mächtige *Ampfinger Sandstein* ist gleichaltrig bis jünger, bildet einen etwa 20–27 km breiten Schüttungssaum entlang des Landshut-Neuöttinger Hochs und ist ebenfalls ein Erdöl- und Erdgas-Speichergestein. Der darüber folgende, über 100 m mächtige *Lithothamnien-Kalk* ist ein biogenes, flachmarines Sediment, das u. a. reichlich Kalkalgen (Lithothamnien) sowie Klein- und Großforaminiferen (Nummuliten, s. HAGN 1978) enthält und ebenfalls Erdöl- und Erdgas-Lagerstätten birgt.

#### 4.2 Untere Meeresmolasse (UMM)

Die UMM umfasst gebietsweise noch das jüngste Ober-Eozän, ansonsten das gesamte Unter-Oligozän (Kiscellium) und in der Ostmolasse auch das Ober-Oligozän und einen Teil des Unter-Miozän (Egerium). Die stratigraphische Einstufung der UMM erfolgt auf der Grundlage von Foraminiferen (HAGN 1978, REISER 1987) und Nannoplankton (MARTINI 1981). Die ältesten, über Tage aufgeschlossenen Schichten der UMM sind am Südrand der Faltenmolasse im Allgäu, in Vorarlberg und im westlichen Oberbayern erhalten.

##### 4.2.1 UMM der Westmolasse (s. Tab. 1–2)

Die *Deutenhausener Schichten* (s. Tab. 1) sind bis zu 650 m mächtige turbiditische Sandsteine und Pelite, die nach oben sandiger und konglomeratisch werden. Charakteristisch ist der vergleichsweise hohe Anteil von karbonatischem Schutt aus den Alpen. Die *Deutenhausener Schichten* gehören weitestgehend in das frühe Kiscellium. Nach Norden und Osten ändert sich die Fazies in die wenige Meter mächtigen, dunklen, bituminösen *Fischschiefer*, die reichlich Fischschuppen führen. Die darüber folgenden tonig-mergeligen, zuoberst auch sandhaltigen *Tonmergel-Schichten* erreichen im Süden eine Mächtigkeit von mehr als 1.800 m und werden ebenfalls in das Kiscellium eingestuft. Als *Baustein-Schichten* werden gebankte Kalk-Dolomit-Arenite, untergeordnet auch Konglomerate, bezeichnet. Die Mächtigkeit dieser produktiven Speichergesteine beträgt im Süden bis zu 200 m. Sie zeigen eine starke Verflachung des Beckens und Regression des Meeres an, was in Zusammenhang mit dem globalen Meeresspiegelabfall am Ende des Unter-Oligozän stehen könnte. Die *Baustein-Schichten* gehören überwiegend in das späte Kiscellium, im höheren Teil bereits in das Egerium (s. UHLIG et al. 2000: 512).

#### 4.2.2 UMM der Ostmolasse (s. Tab. 1–2)

In der Ostmolasse beginnt die UMM mit den bis 30 m mächtigen *Fischschiefern*. Darüber folgen den *Tonmergel-Schichten* der Westmolasse vergleichbare *Rupel-Tonmergel* und *Liegende Tonmergel*, die zusammen bis 1.200 m mächtig werden. An ihrer Basis lässt sich eine karbonatreichere Abfolge (*Heller Mergelkalk*, *Bändermergel*) abgrenzen. Eine Regressionsphase setzt erst im Egerium mit verstärkten Sandschüttungen aus dem Westen, nur untergeordnet auch aus dem Süden bzw. Nordosten, ein. Der Schüttungskegel dieser *Chatt-Sande* ist als Kohlenwasserstoffspeicher von Interesse. Bis ins späte Unter-Egerium kamen daneben mächtige marine, teils turbiditische Tonmergelabfolgen (*Hangende Tonmergel*, *Untere Puchkirchener Serie* bis 1.500 m) zum Absatz. An der Wende Unter-/Ober-Egerium transgredieren Tonmergel und Sande der Promperger Schichten kurzfristig weiter nach Westen. Auch das Ober-Egerium zeigt in der Ostmolasse eine vergleichbare marine Entwicklung (z. B. *Aquitan-Sand-Mergel-Folge*, bis 250 m mächtige bituminöse *Aquitan-Fischschiefer*, *Obere Puchkirchener Serie*).

### 4.3 Untere Süßwassermolasse (USM)

Die USM umfasst das gesamte Egerium sowie vermutlich die tiefsten Teile des Eggenburgium. Sie ist in ihrer typischen fluviatilen bis lakustrinen Fazies nur in der Westmolasse ausgebildet. Im Übergangsbereich zur marinen Ostmolasse bildeten sich brackisch-lagunäre Sedimente mit paralischen Kohlen (= Untere Brackwassermolasse, s. unten). Am Ende des Egerium, also nach Abschluss der USM-Sedimentation (bzw. der UMM in der Ostmolasse) kam es möglicherweise beckenweit zur Erosion.

Die stratigraphische Einstufung der USM basiert vor allem auf der europäischen Säugetier-Zonierung; bislang sind MP 25, MP 30, MN 1 und MN 2 nachgewiesen (u. a. FAHLBUSCH & HEISSIG 1987, HEIZMANN et al. 1989, UHLIG 1999, 2002, WERNER 1994, ZIEGLER & WERNER 1994). Auch die Otolithen-Zonierung der Paratethys wurde angewendet (Zone OT-O2, REICHENBACHER 1999). Zur Korrelation und Biostratigraphie können außerdem Landgastropoden (ZÖBELEIN 1952, 1953) und Ostrakoden (MÜLLER 1985) genutzt werden.

Für die USM sind aufgrund der lithofaziellen Unterschiede drei Faziesräume unterscheidbar.

(1) Westlichste und westliche Faltenmolasse (s. Tab. 1): Im Süden, entlang des Alpenrandes, sind die Molassegesteine stark Geröll-führend und erreichen mit bis zu 3.500 m die höchsten Mächtigkeiten. Sie werden in eine proximale westlichste und in eine weiter östlich gelegene, distalere westliche Faltenmolasse unterschieden. In der westlichsten Faltenmolasse (Allgäu) sind die *Weißbach-Schichten* eine bis zu 1.100 m mächtige, oft bunt gefärbte Mergel-Sandstein-Folge. Darüber folgen die *Steigbach-Schichten*, eine bis zu 1.700 m mächtige Folge aus grauen Mergeln und sehr groben Konglomeraten. Beide Einheiten werden traditionell in das Unter-Egerium gestellt, obgleich Fossilien nur stellenweise nachgewiesen sind (s. SCHOLZ 1999). Die darüber liegenden *Kojen-Schichten* erreichen eine Mächtigkeit von 1.200 m und ähneln lithologisch den *Steigbach-Schichten*, seltene Fossilfunde sprechen für Ober-Egerium. Die *Hauchenberg-Schichten*, die in das

Eggenburgium eingestuft werden, sind durch die Einschaltung von groben Konglomeratbänken charakterisiert (s. SCHOLZ 1999, 2000). In der westlichen Faltenmolasse sind die Abfolgen nicht ganz so reich an Konglomeraten. Die dort abgelagerte, bis 4.000 m mächtige *Bunte Molasse* besteht aus braunfleckigen Mergeln und Sandsteinen mit eingeschalteten Konglomeratbänken. Die *Untere Bunte Molasse* (bis 2.800 m) ist von der *Oberen Bunten Molasse* (bis 1.200 m) durch die marinen, bis 300 m mächtigen *Promberger Schichten* getrennt, zumindest im östlichen Gebiet der Westmolasse. Die *Obere Bunte Molasse* wird bereits in das Ober-Egerium gestellt.

(2) Westliche und mittlere Vorlandmolasse (s. Tab. 2): Im zentralen Becken herrschen tonig-mergelig-sandige Abfolgen vor, die weitgehend fossilfrei sind. Sie dürften den Fossil-führenden Abfolgen der Nordrandfazies (s. u.) entsprechen und wären dann ebenfalls in das Unter-Egerium und das Ober-Egerium einzustufen.

(3) Nordrandfazies (s. Tab. 3): Im distalen nördlichen Molassebecken ist eine kalkige Fazies entwickelt, die Land- und Süßwassergastropoden sowie Wirbeltierreste enthält. Säugetierfunde bestätigten die Datierung der bis 70 m mächtigen *Ehinger Schichten* in das späte Unter-Egerium (MP 30) und der bis 90 m mächtigen *Ulmer Schichten* in das Ober-Egerium (MN 1, MN 2a). Die *Ulmer Schichten* überlagern nach Norden mit immer jüngeren Anteilen den Jura der Albtafel. In die kalkige Fazies der USM sind lokal konglomeratische Schüttungen von Norden (Schwäbische Alb) eingeschaltet (*Ältere Jurana-gelfluh*).

#### 4.4 Untere Brackwassermolasse (UBM)

Im Verzahnungsbereich der fluviatilen Westmolasse (USM) und der marinen Ostmolasse (UMM) wurde in einem deltaischen bis marin-brackischen Faziesgürtel die UBM abgelagert, die das gesamte Egerium umfasst. Ihre wechselhafte Lithofazies resultiert aus der Milieu-Verzahnung im Küstenbereich und abwechselnd transgressiven und regressiven Tendenzen. Die UBM wird aufgrund der häufigen Brackwassermuschel *Polymesoda convexa* (= *Cyrena convexa*) auch als *Cyrenen-Schichten* bezeichnet und in *Untere Cyrenen-Schichten*, *Hauptcyrenen-Schichten*, *Obere* und *Oberste Cyrenen-Schichten* unterteilt (s. Tab. 1–2). Die Grenzen dieser in einem wandernden Faziesgürtel abgelagerten Schichtglieder verlaufen naturgemäß stark diachron. Die Sedimente sind dolomitische Mergel mit wechselnden Ton- und Sandanteilen sowie dolomitische Sandsteine und Kohlen. Durch den orogenen Einfluss entstanden aus Küstensümpfen steinkohleartige Pechkohlen, die in der Vergangenheit in den Revieren Miesbach, Au, Penzberg und Peißenberg-Peiting bergmännisch abgebaut wurden. Die Mächtigkeiten der UBM sind im Osten (Haushamer Mulde) mit über 1.000 m am höchsten und nehmen nach Westen ab. Eine genaue stratigraphische Einstufung ist bisher nur für die *Unteren Cyrenen-Schichten* erfolgt, die aufgrund von Säugetieren, Otolithen und Charophyten in das älteste Unter-Egerium gestellt werden (REICHENBACHER & SCHWARZ 1997, UHLIG et al. 2000, REICHENBACHER et al. 2004). Die oberen Cyrenen-Schichten werden mit dem Meeresvorstoß der Promberger Schichten (UMM) an der Wende Unter-/Ober-Egerium korreliert.

## 4.5 Obere Meeresmolasse (OMM)

Die OMM beginnt im mittleren Eggenburgium und endet im mittleren Ottnangium. Die Transgression erfolgte über einen schmalen Meeresarm am Alpenrand von Westen über das Rhônetal aus dem mediterranen Raum sowie von Osten aus dem ostalpinen Raum. Die marinen Sedimente progradierten immer weiter nach Norden und reichen noch über das Verbreitungsgebiet der USM hinaus. Die Mächtigkeit beträgt distal wenige Zehnermeter, im zentralen Molassebecken meist bis 200 m, im Allgäu und in Ostbayern auch 600–1.000 m. Es herrschen graue bis grünliche, oft glaukonitische Mergel und Sandsteine vor. Konglomeratschüttungen treten vor allem in der westlichsten Faltenmolasse (Allgäu, Tab. 1), Karbonatgesteine in der Nordrandfazies der Vorlandmolasse (Tab. 3) auf. Innerhalb der OMM des zentralen Beckens sind zwei Hauptzyklen unterscheidbar, deren Trennung jedoch in der Faltenmolasse und in der Nordrandfazies nicht immer möglich ist (vgl. Tab. 1, 3). Die stratigraphische Einstufung der süddeutschen OMM basiert auf Foraminifern (HAGN 1960, 1961, WENGER 1987).

### 4.5.1 OMM der Westmolasse

Die etwa 50 m mächtigen *Heidenlöcher-Schichten* sowie die darüber folgenden, etwa 60 m mächtigen *Sandschiefer* oder *Sandmergelserie* bilden den ersten Zyklus der OMM in der westlichen Vorlandmolasse (Tab. 2). Beide Einheiten werden in das untere Ottnangium gestellt. Die einige Meter mächtige fossilreiche *Erminger Turritellenplatte* und der bis 10 m mächtige fossilreiche *Randengrobkalk* sind zeitgleiche kalkige Bildungen der Nordrandfazies (Tab. 3). Der zweite Zyklus beginnt transgressiv mit einer 0,3 bis 10 m mächtigen Grobsandlage, die an der Basis alpine Gerölle enthält sowie teilweise reich an Auster- und Haizähnen ist (*Alpines Konglomerat* bzw. *Baltringer Schichten* mit *Baltringer Horizont*). Darüber folgen die bis 7 m mächtigen feinsandigen *Deckschichten* bzw. die *Feinsandserie*. Während des zweiten Zyklus, der zeitlich dem mittleren Ottnangium entspricht, entstand auf der Schwäbischen Alb eine von der Brandung geschaffene Klifflinie, die streckenweise noch heute eine markante Geländestufe bildet. Die Verlandung des OMM-Meeres wird durch die terrestrischen *Helicidenmergel* und den teils terrestrischen, teils lakustrinen *Albstein* angezeigt, der i. a. bereits zur OBM gerechnet wird.

### 4.5.2 OMM der Ostmolasse

Die OMM beginnt hier mit dem transgressiven, grobsandigen bis feinkiesigen, fossilreichen *Ortenburger Meeressand* (Tab. 2), der in das Eggenburgium eingestuft wird und eine Küstenfazies darstellt, die nur in Ostbayern entwickelt ist. Die bis 220 m mächtigen mergeligen bis feinsandigen *Neuhofener Schichten* sind reich an Foraminiferen und Ostrakoden und entsprechen zeitlich und faziell dem ersten Zyklus der OMM in der Westmolasse aus dem unteren Ottnangium. Darüber folgen, mit fließenden Übergängen untereinander und miteinander verzahnt, bis 25 m mächtige *Blättermergel* sowie bis 45 m mächtige, grünliche *Glaukonitsande*. Beide werden in das mittlere Ottnangium eingestuft und sind dem zweiten Zyklus der OMM äquivalent.

## 4.6 Obere Brackwassermolasse (OBM)

Die OBM umfasst eine wechselvolle, meist fossilreiche Abfolge von überwiegend brackischen, teilweise auch fluviatilen und lakustrinen Sedimenten. Die OBM wird in das obere Ottangium bis untere Karpatium eingestuft, wobei die Biostratigraphie auf zahlreichen Fossilgruppen basiert, darunter Säugetiere, Fische, Charophyten und Pollen (s. REICHENBACHER et al. 1998).

### 4.6.1 OBM der Westmolasse

In der Westmolasse erfolgte die Regression der OMM im mittleren Ottangium. Eine bis 80 m tiefe und 8–13 km breite Erosionsrinne (Graupensandrinne), die sich am Nordrand des Beckens von Nordosten nach Südwesten erstreckt und in das noch bestehende schweizerische OMM-Meer mündete, wird meist als Flusssrinne gedeutet. In ihrem Bereich wurde die OMM und teilweise auch noch die gesamte USM ausgeräumt. Südlich und nördlich der Rinne entstanden möglicherweise weiterhin *Albstein* und *Helicidenmergel*. Der Graupensandfluss, dessen Quellgebiete Frankenwald und Moldanubikum waren, lagerte die teils fluviatilen, teils ästuarienen, bis 20 m mächtigen *Grimmelfinger Schichten* ab. Sie sind durch einen hohen Anteil von Quarzen in der Feinkies-Fraktion (*Graupensande*) sowie einen hohen Feldspatanteil (10–20 %) gekennzeichnet. Über den Grimmelfinger Schichten folgt die *Kirchberg-Formation*, eine Wechselfolge von brackischen, fossilreichen Mergeln, Sanden und Kalken, die bis 25 m mächtig ist (s. REICHENBACHER 1989). Eine stärker klastische Fazies der Kirchberg-Formation ist im nordwestlichen Bodensee-Gebiet ausgebildet. Dort entstanden im Mündungsbereich der Graupensandrinne (= Erweiterte Graupensandrinne) der bis 7 m mächtige *Mischgeröllhorizont* und darüber die bis 15 m mächtigen *Samtsande*. Kalkreiche, schwach brackische oder lakustrine Abfolgen, die zeitlich den tieferen Teilen der Kirchberg-Formation entsprechen, wurden teils in der Graupensandrinne (*untere Haldenhofmergel*), teils nördlich davon (*Süßwasserkalkzone*, *Schneckenkalke*) abgelagert (s. Tab. 2–3). Im Zentrum des Beckens, im Gebiet der mittleren Vorlandmolasse, akkumulierte die bis 17 m mächtige *Untere Bunte Mergelserie*. Die darüber folgende, bis 41 m mächtige *Obere Bunte Mergelserie* gehört dagegen bereits zur OSM.

### 4.6.2 OBM der Ostmolasse

In der Ostmolasse erfolgt am Ende des mittleren Ottangium keine Regression. Die marine Sedimentation dauert zunächst an, doch die Isolation dieses Restmeeres und die Einmündung eines Alpenflusses im Nordosten (*Ortenburger Schotter*) führen zur allmählichen Verbrackung und Aussüßung. Die so entstandenen, 40–60 m mächtigen, brackischen *Oncophora-Schichten* (benannt nach der Muschel *Rzebakia*, früher *Oncophora*) werden wie die Kirchberg-Formation in das obere Ottangium bis untere Karpatium eingestuft. Sie sind sandiger als die Abfolgen der Kirchberg-Formation und oft noch fossilreicher als diese. Nach Westen hin entspricht den *Oncophora-Schichten* die *Sand-Kalkmergel-Serie*, die in eine *sandige untere Abteilung* und eine *kalkmergelige obere Abteilung* gegliedert werden kann (LEMCKE et al. 1953).

## 4.7 Obere Süßwassermolasse (OSM)

Die OSM beendet den marinen Einfluss im gesamten süddeutschen Alpenvorland. In einem nach Westen ins Rhônetal gerichteten Stromsystem werden in der Beckenachse fluviatile, aber auch lakustrine Sedimente abgelagert. Vom Karpatium bis ins höhere Badenium greift die Grobfazies mit Schottern immer weiter nach Westen vor, um anschließend wieder in die östlichen Bereiche des Alpenvorlands zurückzuweichen. Den Konglomerat-dominierten Radialfächern aus den Alpen ist nach Norden, im Übergangsbereich zu den Axialschüttungen, eine vorwiegend feinkörnige Lithofazies vorgelagert. Der Einfluss der Einschüttungen vom Beckennordrand bleibt mit Ausnahmen gering. Zu nennen ist vor allem das *Braunkohlentertiär* (Tab. 3), eine aus dem Norden geschüttete Abfolge des Naabtalsystems, welche das dortige Paläorelief auf Jura-, Kreide- und Kristallingesteinen verfüllte. Während in größeren Flussrinnen Kiese und Sande abgelagert wurden, entstanden in Altarmen und Stillgewässern ausgedehnte Braunkohlelager und Tone. Diese entsprechen zeitlich der axialen *Nördliche Vollschorter-Abfolge* (Tab. 2). Insgesamt erreicht die OSM in den zentralen Beckenbereichen einige 100 m Gesamtmächtigkeit mit ansteigender Tendenz nach Westsüdwesten, wo im Bereich des Adeleggfächers auch über 1.000 m erreicht werden können.

Aufgrund der wechselhaften fluviatilen Sedimentationsbedingungen ist die lithostratigraphische Korrelation von Einheiten der OSM schwierig. Die biostratigraphische Einstufung erfolgt vorwiegend mit Hilfe von Säugetieren. Nach DEHM (1955) werden eine Ältere, eine Mittlere und eine Jüngere Serie unterschieden. Eine feinere Gliederung der Älteren und Mittleren Serie lässt acht unterscheidbare Faunengruppen erkennen (HEISIG 1997, BÖHME et al. 2001). Die Jüngere Serie kann, wegen der geringeren Zahl von Fundstellen, nur in einen mittelmiozänen und einen obermiozänen Anteil gegliedert werden. Die Einstufungen von Sägerfaunen aus der Oberen Süßwassermolasse reichen vom Karpatium (oberes MN 4b) bis ins tiefere Pannonium (MN 9). Floren und andere Tiergruppen zeigen eine geringere Trennschärfe. Isotopische Datierungen lieferten bisher das Ries-Ereignis mit  $14,9 (\pm 0,36)$  Mio. Jahren (STORZER et al. 1995) bzw. neuerdings  $14,3 (\pm 0,1)$  Mio. Jahren (BUCHNER et al. 2003), die etwas höher im Profil liegenden Bentonite mit ca.  $14,6 (\pm 0,8)$  Mio. Jahren (STORZER & GENTNER 1970) und die Hegau-Vulkanite mit Altern zwischen etwa 16 und 6,5 Mio. Jahren (s. GEYER & GWINNER 1991).

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf verbreitete Einheiten der Becken-axialen OSM-Schüttungen. Die Beschreibung erfolgt in Schüttungsrichtung von Osten nach Westen, in der generell eine Kornverfeinerung zu beobachten ist. Die OSM der südlichen und nördlichen Beckenränder ist derzeit nicht lithostratigraphisch gegliedert bzw. nur lokal verbreitet.

### 4.7.1 OSM der östlichen Vorlandmolasse

Die OSM beginnt allgemein mit vorwiegend feinkörnigen Sedimenten einer offenbar nur langsam durchströmten Schwemmlandebene (s. BÖHME 2002). Zwischen den im Osten einsetzenden Sand-, seltener auch Kiesschüttungen, die sich allmählich nach Westen ausbreiten, bleiben limnische Auenbereiche mit tonig-mergeliger Sedimentation erhalten.

Alle diese bis mehrere Zehnermeter mächtigen Bildungen aus dem Karpatium werden im östlichen Becken als *Süßwasserschichten* (Tab. 2) bezeichnet. Etwa den Abschnitt des Badenium umfasst die *Nördliche Vollschotter-Abfolge*, deren grobe, quarzreiche Schotter im Lauf der Zeit immer weiter nach Westen ausgreifen. In diesem Bereich lassen sich mehrere Schüttungszyklen unterscheiden (HEISSIG 1997, BÖHME et al. 2001). Ab dem mittleren Badenium entstehen durch Abtragung Schichtlücken, denen im Westen Umlagerungsereignisse entsprechen. Auf das entstandene Relief lagern sich in Form des *Brockhorizonts* Trümmer des Riesimpakts ab, später auch die Hauptmasse von vulkanischen Glasaschen noch unsicherer Herkunft, die zu Bentoniten verwittern. Für die Nördliche Vollschotter-Abfolge können etwa 150 m als höchste Gesamtmächtigkeit veranschlagt werden. Durch Verwitterung im jüngeren Teil des Badenium entsteht in Ostniederbayern aus den Karbonat- und Kristallin-führenden Nördlichen Vollschottern der *Quarzrestschotter*, der an seiner Oberfläche zum sog. *Quarzitkonglomerat* verfestigt ist. Von Südosten her wird in diese Verwitterungsbildungen später die sog. Peracher Rinne eingetieft, in der annähernd 100 m mächtiges, frisches alpines Material als *Südlicher Vollschotter* abgelagert wird. Die anschließend etwa im Zeitraum des Sarmatium und tieferen Pannionium von Südosten aus den Alpen geschütteten, bis mehrere Zehnermeter mächtigen Schotter und Sande mit Feinsediment-Einschaltungen werden als *Hangendserie* bezeichnet. Sie verzahnhen sich anfangs mit ähnlichen Wechselsequenzen, die aus dem Grundgebirgsbereich im Nordosten durch die axiale Schüttung vergleichsweise weit nach Westen transportiert werden. Wo sie eine Mischung alpiner und nordbayerischer Schwermineralspektren aufweisen, werden sie *Mischserie* genannt, beim Auftreten reiner Grundgebirgspektren *Moldanubische Serie*.

#### 4.7.2 OSM der mittleren Vorlandmolasse

Die Bereiche der frühesten, teilweise humosen Ton-Feinsand-Wechselsequenzen aus dem Karpatium werden im westlichen Oberbayern und Bayerisch-Schwaben als *Limnische Untere Serie* (Tab. 2) bezeichnet und erreichen etwa 80 m Mächtigkeit. Die Rinnenfazies der darüber folgenden *Fluviatilen Untere Serie*, in deren jüngsten Anteilen örtlich Ries-Auswürflinge (*Brockhorizont*) eingelagert sind, wird aus geröllfreien Sanden gebildet. Zusammen mit der diachron überlagernden *Geröllsandserie*, deren Geröllkomponenten selten die Mittelkiesgröße überschreiten, stellt die Fluviatile Untere Serie die westliche Fortsetzung der Nördlichen Vollschotter-Abfolge des Badenium dar und erreicht einschließlich der Geröllsandserie mehr als 150 m Gesamtmächtigkeit. Bis etwa zur Iller treten einzelne Bentonithorizonte im höchsten Teil der Geröllsandserie auf. Die *Obere Serie* in Fortsetzung der sarmatisch-pannonischen *Hangendserie* ist bereits wieder weitgehend geröllfrei. Sie schwilkt vor allem im Süden zu beträchtlichen Mächtigkeiten bis gegen 300 m an.

#### 4.7.3 OSM der westlichen Vorlandmolasse

Die überwiegend feinkörnig ausgebildeten, vermutlich karpatischen, ältesten Teile der Oberen Süßwassermolasse sind im württembergischen Alpenvorland die *oberen Halden-hofmergel* (Tab. 2). Sie erreichen im westlichen Bodenseeraum etwa 50 m Mächtigkeit. Die

darüber lagernden *Steinbalmensande* des Badenium werden bis zu 350 m mächtig und bestehen wie die etwa gleichaltrigen sandigen Folgen der mittleren Vorlandmolasse aus glimmerreichen Sanden, die bereichsweise kalkig verfestigt sein können. Die *Öhninger Schichten*, bekannt durch eine Fossilfundstelle in nur 10 m mächtigen Mergeln, gehören ebenso wie die teilweise äquivalenten *Erolzheimer Sande* weiter östlich noch ins Badenium. Diese teilweise noch Fein- bis Mittelkies führende Schüttung setzt die Geröllsandserie der mittleren Vorlandmolasse mit maximal wenigen Zehnermetern Mächtigkeit nach Westen fort. Darüber folgen die ebenfalls geringmächtigen *Oberen Sande* im westlichen Bodenseebereich bzw. mehr als 100 m mächtige, Ton-Silt-Sand-Wechselfolgen im zentralen Becken östlich des Sees, die vermutlich mit den sarmatisch-pannonischen Bildungen weiter ostwärts korrelieren.

## Literatur

- BACHMANN, G. H. & MÜLLER, M. (1991): The Molasse basin, Germany: evolution of a classic petrolierous foreland basin. – In: SPENCER, A. M. (Ed.): Generation, accumulation, and production of Europe's hydrocarbons. – Spec. Publ. Europ. Assoc. Petrol. Geosc., **1**: 263–276; Oxford (University Press).
- BACHMANN, G. H. & MÜLLER, M. (1992): Sedimentary and structural evolution of the German Molasse Basin. – Eclogae geol. Helv., **85** (3): 519–530; Basel.
- BARTHELT, D. (1989): Faziesanalyse und Untersuchung der Sedimentationsmechanismen in der Unteren Brackwasser-Molasse Oberbayerns. – Münchener Geowiss. Abh., **A 17**: 1–118; München.
- BÖHME, M. (2002): Paläoklima und aquatische Ökosysteme im Neogen Europas – Neue Forschungsansätze auf der Basis von Niederen Wirbeltieren. – Unveröff. Habilitationsschrift am Dep. f. Geo- und Umweltwiss. der LMU München, 194 S.; München.
- BÖHME, M., GREGOR, H.-J. & HEISSIG, K. (2001): The Ries- and Steinheim meteorite impacts and their effect on environmental conditions in time and space. – In: BUFFETAUT, E. & KOEBER, C. (eds.): Geological and Biological Effects of Impact Events, 215–235; Berlin (Springer).
- BUCHNER, E., SEYFRIED, H. & VAN DEN BOOGARD, P. (2003):  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser probe age determination confirms the Ries impact crater as the source of glass particles in Graupensand sediments (Grimmelfingen Formation, North Alpine Foreland Basin). – Int. J. Earth Sci., **92**: 1–6; Amsterdam.
- DEHM, R. (1955): Die Säugetierfaunen in der Oberen Süßwassermolasse und ihre Bedeutung für die Gliederung. – Erl. Geol. Übersichtskte. Süddt. Molasse, Hrsg. Geol. Landesamt: 81–88; München.
- DOPPLER, G. (1989): Zur Stratigraphie der nördlichen Vorlandmolasse in Bayerisch-Schwaben. – Geol. Bavarica, **94**: 83–133; München.
- DOPPLER, G., SCHWERD, K. & UNGER, H. J. (1996): Gesteinsfolge des Molassebeckens und der inneralpinen Tertiärbecken. – In: Bayerisches Geol. Landesamt (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000. – 4. Aufl.: 326 S.; München.
- FAHLBUSCH, V. & HEISSIG, K. (1987): Rodents at the Oligocene/Miocene boundary near Rottenbuch (Southern Bavaria). – Münchener Geowiss. Abh., **A 10**: 85–92; München.
- GEYER, O. F. & GWINNER, M. P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg. – 4. Aufl.: 482 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- HAGN, H. (1960): Die Gliederung der bayerischen Miozän-Molasse mit Hilfe von Kleinföraminiferen. – Mitt. geol. Ges. Wien, **52**(1959): 133–141; Wien.

- HAGN, H. (1961): Die Gliederung der Oberen Meeresmolasse nördlich vom Überlinger See (Bodensee) in mikropaläontologischer Sicht. – Jh. geol. Landesamt Baden-Württ., **5**: 293–321; Freiburg.
- (1978): Die älteste Molasse im Chiemgau/östliches Oberbayern (Katzenloch-Schichten, Priabon). – Mitt. Bayer. Staatsamml. Paläont. histor. Geol. **18**: 167–235; München.
- HEISSIG, K. (1997): Mammal faunas intermediate between the reference faunas of MN 4 and MN 6 from the Upper Freshwater Molasse of Bavaria. – In: AGUILAR, J.-P., LEGENDRE, S. & MICHAUX, J. (eds.): Actes du congrès BioChroM'97. – Mém. Trav. E. P. H. E., Inst. Montpellier, **21**: 537–546; Montpellier.
- HEIZMANN, E. P. J., BLOOS, G., BÖTTCHER, R., WERNER, J. & ZIEGLER, R. (1989): Ulm-Westtangente und Ulm-Uniklinik: Zwei neue Wirbeltier-Faunen aus der Unteren Süßwasser-Molasse (Unter- miozän) von Ulm (Baden-Württemberg). – Stuttgarter Beitr. Naturkde., **B 153**: 1–14; Stuttgart.
- JIN, J. (1995): Dynamic stratigraphic analysis and modeling in the south-eastern German molasse basin. – Tübinger geowiss. Arb., **A 24**: 1–153; Tübingen.
- KUHLEMANN, J. & KEMPF, O. (2002): Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. – Sedimentary Geol., **152**: 45–78; Amsterdam.
- LEMCKE, K. (1988): Geologie von Bayern I. Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit. – VII + 175 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- LEMCKE, K., ENGELHARDT, W. VON & FÜCHTBAUER, H. (1953): Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen im Westteil der ungefalteten Molasse des süddeutschen Alpenvorlandes. – Beih. Geol. Jb., **11**: 182 S.; Hannover.
- LUTERBACHER, H. (1997): Stratigraphy and facies evolution of a typical foreland basin – the Tertiary Molasse Basin (Lake Constance Area and Allgäu). – Gaea heidelbergensis, **4**: 123–140; Heidelberg.
- MARTINI, E. (1981): Nannoplankton in der Ober-Kreide, im Alttertiär und im tieferen Jungtertiär von Süddeutschland und dem angrenzenden Österreich. – Geol. Bavarica, **82**: 345–356; München.
- MÜLLER, D. (1985): Biostratigraphische Untersuchungen in der subalpinen Unteren Süßwassermolasse zwischen Inn und Lech anhand von Ostracoden. – Palaeontographica, **A 187**: 1–57; Stuttgart.
- MURPHY, M. A. & SALVADOR, A. (eds.) (1999): International Stratigraphic Guide – An abridged version. – Episodes, **22**(4): 255–271.
- NEUMAIER, F., BLISSENBACH, E., WITTMANN, D., GRIMM, W.-D., STIEFEL, J., BATSCHE, H. & MAYR, M. (1957): Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen in der ungefalteten Molasse Niederbayerns. – Beih. Geol. Jb., **26**: 384 S.; Hannover.
- REICHENBACHER, B. (1989): Feinstratigraphische Gliederung der Kirchberger Schichten (Unter-Miozän) an der Typuslokalität Illerkirchberg bei Ulm. – Geol. Bavarica, **94**: 135–177; München.
- (1993): Mikrofaunen, Paläogeographie und Biostratigraphie der miozänen Brack- und Süßwassermolasse in der westlichen Paratethys unter besonderer Berücksichtigung der Fisch-Otolithen. – Senckenbergiana lethaea, **73**(2): 277–374; Frankfurt/Main.
  - (1999): Preliminary otolith-zonation in continental Tertiary deposits of the Paratethys and adjacent areas. – N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **214**(3): 375–390; Stuttgart.
- REICHENBACHER, B., BÖTTCHER, R., BRACHER, H., DOPPLER, G., VON ENGELHARDT, W., GREGOR, H.-J., HEISSIG, K., HEIZMANN, E. P. J., HOFMANN, F., KÄLIN, D., LEMCKE, K., LUTERBACHER, H., MARTINI, E., PFEIL, F., REIFF, W., SCHREINER, A. & STEININGER, F. F. (1998): Graupensandrinne – Ries-Impakt: Zur Stratigraphie der Grimmelfinger Schichten, Kirchberger Schichten und Oberen Süßwassermolasse. – Z. dt. geol. Ges., **149**(1): 127–161; Stuttgart.
- REICHENBACHER, B. & SCHWARZ, J. (1997): Charophyten und Otolithen aus den Cyrenen-Schichten des nördlichen Alpenvorlandes. – Paläont. Z., **71**(3/4): 173–188; Stuttgart.
- REICHENBACHER, B., UHLIG, U., KOWALKE, T., BASSLER, B., MATZKE-KARASZ, R. & SCHENK, B. (2004): Biota, palaeoenvironments and biostratigraphy of continental Oligocene deposits from the south german Molasse basin (Penzberg Syncline). – Palaeontology, **47** (in press).
- REISER, H. (1987): Die Foraminiferen der bayerischen Oligozän-Molasse; Systematik, Stratigraphie und Paläobathymetrie. – Zitteliana, **16**: 3–131; München.

- SCHLUNEGGER, F., MATTER, A., BURBANK, D.W. & KLAVER, E.M. (1997): Magnetostratigraphic constraints on relationships between evolution of the central Swiss Molasse basin and Alpine orogenic events. – *GSA Bull.*, **109**: 225–241; Boulder.
- SCHOLZ, H. (1999): Die „klassische“ Molasse-Gliederung vom Südrand des Molassebeckens in Südwestbayern – bewährt oder problematisch? – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **214**(3): 391–413; Stuttgart.
- (2000): Die tertiären Grobschüttungen am Südrande des Molassebeckens im Allgäu (Südwestbayern) – eine Synopsis. – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **218**(1/2), Katzung-Festschrift: 61–84; Stuttgart.
- SCHREINER, A. (1965): Die Juranagelfluh im Hegau. – *Jh. Geol. Landesamt Bad.-Württ.*, **7**: 303–354; Freiburg.
- (1995): Hegau und westlicher Bodensee. 2. Aufl. – Samml. Geol. Führer, **62**: 93 S.; Berlin (Borntraeger).
- SPIEGEL, C., KUHLEMANN, J., DUNKL, I. & FRISCH, W. (2001): Paleogeography and catchment evolution in a mobile orogenic belt: the Central Alps in Oligo-Miocene times. – *Tectonophysics*, **341**: 33–47; Amsterdam.
- STEININGER, F.F. (1999): Chronostratigraphy, Geochronology and Biochronology of the Miocene „European Land Mammal Mega-Zones“ (ELMMZ) and the Miocene „Mammal-Zones (MN-Zones)“. – In: RÖSSNER, G. & HEISSIG, K. (Eds.): *Land Mammals of Europe*: 9–24; München (Pfeil).
- STORZER, D. & GENTNER, W. (1970): Spaltpuren-Alter von Riesgläsern, Moldaviten und Bentoniten. – *Jber. Mitt. Oberrhein. geol. Ver.*, N.F. **52**: 97–111; Stuttgart.
- STORZER, D., JESSBERGER, E.K., KUNZ, J. & LANGE, J.-M. (1995): Synopsis von Spaltpuren- und Kalium-Argon-Datierungen an Ries-Impaktgläsern und Moldaviten. – *Exkursionsführer Veröff. GGW*, **195**: 79–80; Berlin.
- UHLIG, U. (1999): Neue Kleinsägerfunde aus dem Oligozän (MP 24, 25) der subalpinen Molasse Oberbayerns. – *Mitt. Bayer. Staatsslg. Paläont. Geol.*, **39**: 151–164; München.
- (2002): Gliridae (Mammalia) aus den oligozänen Molasse-Fundstellen Gröben 2 in Bayern und Bumbach 1 in der Schweiz. – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **223**(2): 145–162; Stuttgart.
- UHLIG, U., REICHENBACHER, B. & BASSLER, B. (2000): Säugetiere, Fisch-Otolithen und Charophyten aus den Unteren Cyrenen-Schichten (Oligozän) der bayerischen Faltenmolasse (Murnauer Mulde). – *Eclogae geol. Helv.*, **93**: 503–516; Basel.
- UNGER, H.J. (1989): Die Lithozonen der Oberen Süßwassermolasse Südostbayerns und ihre vermutlichen zeitlichen Äquivalente gegen Westen und Osten. – *Geol. Bavaria*, **94**: 195–237; München.
- WENGER, W.F. (1987): Die Foraminiferen des Miozäns der bayerischen Molasse und ihre stratigraphische sowie paläogeographische Auswertung. – *Zitteliana*, **16**: 173–340; München.
- WERNER, J. (1994): Beiträge zur Biostratigraphie der Unteren Süßwassermolasse Süddeutschlands – Rodentia und Lagomorpha (Mammalia) aus den Fundstellen der Ulmer Gegend. – *Stuttgarter Beitr. Naturkde.*, **B 200**: 1–265; Stuttgart.
- ZIEGLER, R. & WERNER, J. (1994): Die Kleinsägerfauna von Lautern 2 bei Ulm – Ein Beitrag zur Biostratigraphie der Unteren Süßwasser-Molasse Süddeutschlands. – *Stuttgarter Beitr. Naturkde.*, **B 207**: 1–69; Stuttgart.
- ZÖBELEIN, H. K. (1952): Die Bunte Molasse bei Rottenbuch (Obb.) und ihre Stellung in der Subalpinen Molasse. – *Geol. Bavaria* **12**: 3–86; München.
- (1953): Zur Altersdeutung der Cyrenenschichten in der subalpinen Molasse Oberbayerns. – *Geol. Bavaria*, **17**: 113–134; München.
- ZWEIGEL, J., AIGNER, T. & LUTERBACHER, H. (1998): Eustatic versus tectonic controls on Alpine foreland basin fill: sequence stratigraphy and subsidence analysis in the SE German Molasse. – In: MASCLE, A., PUIGDEFÀBREGAS, C., LUTERBACHER, H. P. & FERNÀNDEZ, M. (Eds.): *Cenozoic Foreland Basins of Western Europe*. – *Geol. Soc. Spec. Publ.*, **134**: 299–323; London.