

Zur Frage der alten Verkarstung des Malm im Untergrund des deutschen Molassebeckens und an dessen Nordwestrand

Autor(en): **Lemcke, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure**

Band (Jahr): **53 (1987)**

Heft 125

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-210919>

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.

Zur Frage der alten Verkarstung des Malm im Untergrund des deutschen Molassebeckens und an dessen Nordwestrand¹

Mit 5 Abbildungen
von KURT LEMCKE, München*

Zusammenfassung

Nach Darlegung von Anzeichen für alte Verkarstung (Paläokarst) des Malm unter dem Molassebecken wird — im Hinblick auf dessen sukzessive Überdeckung mit jüngeren Schichten und die damit verbundene Stilllegung des Karstes — die sedimentäre Geschichte des Alpenvorlandes ab Unterkreide kurz skizziert. Danach werden in Kreide und Tertiär die Karstwassergerinne wohl überwiegend nach Süden, Südosten und Osten abgeflossen sein. Zu ihrem System gehörte höchstwahrscheinlich auch die Blau-Höhle, die vermutlich durch juveniles CO₂ aus dem Urach-Vulkanismus außerordentlich erweitert wurde. Weit ausgedehnte und rel. mächtige Süßwasserkalke am nordwestlichen und nördlichen Beckenrand, die dort jeweils die Untere und Obere Süßwassermolasse einleiten, lassen sich vielleicht z.T. als Absätze aus artesisch aufbrechendem Karstwasser deuten. Donau (und Hochrhein) haben mit ihrem jungen Einschneiden den Paläokarst reaktiviert (aber nicht geschaffen!). Aspekte einer etwaigen Nutzung des in diesem vorhandenen Thermalwassers werden angesprochen.

Abstract

At first any symptoms of an old karstification («Palaeokarst») of the Malm formation below the Molasse basin are explained. Then the sedimentary history of the Alpine Foreland since the beginning of Lower Cretaceous is outlined briefly, with regard to the successive covering by sediments and hereby sealing of the old karst system. Accordingly, the karst streams in Cretaceous and Tertiary flowed mainly to the South, Southeast and East. To this system belonged most likely the karst cave of the Blau river enlarged probably by juvenile CO₂ from the Urach-volcanism. Extensive and relatively thick lacustrine limestones at the north-west and northern rim of the Molasse basin starting there the Lower and Upper Freshwater-molasse may partly be sediments of artesian karst springs. Danube river (and Rhine) incising into the Malm in young geological time reactivated thereby the old karst - but didn't produce it! Aspects for exploitation of the thermal water in the old karst are discussed.

¹ Nach einem Vortrag auf dem 2. Symposium des Höhlen- und Heimatvereins Laichingen e.V. «Verkarstung in Süddeutschland» in Laichingen am 25. Oktober 1986. Veröffentlicht auch in der Zeitschr. «Laichinger Höhlenfreund», 1987, Heft 2., Laichingen, Schwäb. Alb.

* Anschrift: Prof. Dr. K. LEMCKE, Fritz-Reuterstr. 19a, D 8000 München 60

I. Anzeichen für alte Verkarstung

Die ersten Informationen über eine sehr alte, voroberkretazische Verkarstung des Malm im Untergrund des Molassebeckens stammen aus den beiden Erdöltiefbohrungen Füssing 1 (1937) und Birnbach 1 (1939) südwestlich Passau (NATHAN 1949: 51 ff; CRAMER 1953; GUDDEN & ZIEGLER 1965: 228), aus denen sich inzwischen die bedeutenden niederbayerischen Thermalbäder Füssing, Griesbach und Birnbach entwickelt haben. Diese Angaben wiesen der in den gleichen Jahren im ganzen Becken beginnenden systematischen Erdölexploration den Weg zu einer regionalen Deutung ähnlicher Beobachtungen, wie sie in ihren Tiefbohrungen nun sehr bald ebenfalls gemacht wurden. In diesen kam es immer wieder beim An- oder Durchbohren des Malm — bis 350/400 m unter dessen Oberkante und unabhängig von deren Tiefenlage — zu *ruckartigen*, nicht behebbaren Verlusten der Bohrspülung ins Gebirge²⁾, begleitet bisweilen auch vom Durchfallen des Bohrmeißels in Hohlräume, was auf tief greifende, über bloße Klüftigkeit hinausgehende Verkarstung zu einer Zeit schließen ließ, als der Malm noch nicht von jüngeren Sedimenten bedeckt war. Solche, den Bohrbetrieb störenden und oft kostspielige Abhilfe erfordernden Zwischenfälle traten sowohl unter älterer Molasse wie auch unter Oberkreide und sogar tiefer Unterkreide auf (z.B. Bohrung Anzing 3, KÖWING et al. 1968: 29), so daß schon nach wenigen Jahren klar wurde, daß hier überall unter Kreide und Tertiär ein *Paläokarst* des Malm liegt (LEMCKE & TUNN 1956: 44 ff). Er ist in der Folgezeit immer aufs neue bestätigt worden, nicht nur durch zahlreiche weitere Tiefbohrungen des Erdölaufschlusses in West und Ost, sondern auch durch den reichlichen Wasserzufluß aus ihm seit Jahrzehnten in den Thermalbädern Niederbayerns, durch das schon 20 Jahre anhaltende drucklose Versenken von vielen Mio cbm Abfallflüssigkeit in ihn (in ca. 1100 m Tiefe unter Kreide) bei Moosburg (Abb. 5; AUST 1981:118 ff; 1986:29, 45 ff) und in letzter Zeit durch langdauernde, ergiebige Pumpversuche auf Malmwasser unter Kreide in einer Tiefbohrung bei Erding nordöstl. München. Warum als Ursache für dies alles statt des Nächstliegenden, einer *alten* Verkarstung, neuerdings komplizierte (und zumindest in ihrer Reichweite kaum vorstellbare) Wirkungsmechanismen von der *jungen* Donau-Eintiefung her angenommen werden (VILLINGER 1986:349 ff), ist nicht recht einzusehen.

Die bis >600 m mächtige, zusammenhängende, ursprünglich in ganzer Ausdehnung frei liegende und dabei verkarstende Kalk-Dolomit-Platte des Weißjura reichte nach ROLL (1979:55 ff) noch im Alt-Eozän vom Hochschwarzwald bis zur Böhmi-

2) In der Tiefbohrpraxis unterscheidet man — jedenfalls im deutschen Alpenvorland — allmähliche («schleichende») Spülungsverluste beim Bohren, die sich meist ohne Unterbrechung des Spülungsumlaufs durch Zusätze zur Bohrspülung (z.B. Zellophan-Schnitzel) beheben lassen, von plötzlichen, «totalen» Verlusten, bei denen die Bohrspülung, die stets schwerer ist als Wasser, schlagartig in das angebohrte Gebirge absackt, wo sie mit dessen Formationswasser den Platz tauscht und wobei der Spülungsumlauf aussetzt. Sie lassen sich in sehr vielen Fällen nicht beheben, so daß mit Wasser («verloren») weitergebohrt werden muß; von diesem verschwinden dabei weitere sehr große Mengen (größenordnungsmäßig ca. 1 m³/Bohrminute), beschwert mit dem von ihm ausgetragenen, vom Bohrmeißel auf Sohle losgeschlagenen Bohrklein, im Gebirge, zumal wenn dessen Wasserfüllung, wie meist im Malm des Alpenvorlandes, wegen der besonderen Vorflutverhältnisse zu Donau und Hochrhein (S. 11 ü. 13) nur unterhydrostatischen Druck besitzt. Vielfach wird auch zur sicheren Abdichtung der Spülungsverluststelle(n) eine Zwischenverrohrung eingebaut.

«Schleichende» Verluste deuten auf Klüfte und Spalten im Gebirge, die so weit offen sind, daß sie durch den normalen Feststoffgehalt der Bohrspülung nicht voll abgedichtet werden, ferner wohl auch auf löcherige Gesteinspartien, sofern deren Kavernen ausreichend miteinander verbunden sind. Demgegenüber lassen die oft sehr großen Flüssigkeitsmengen, die bei und vor allem auch nach schlagartigen Verlusten im Gebirge verschwinden, auf mindestens entsprechend große Hohlräume in diesem schließen, die die Bohrung jeweils direkt oder über offene Spalten geöffnet hat. In Karbonatgesteinen liefern solche Vorgänge daher i.a. sichere Hinweise auf höhlenartig erweiterte Verkarstung.

schen Masse und zum Frankenwald, mit einem durchschnittlichen Einfallen damals vom Tuffschlot von Alpersbach bis zum Albsüdrand bei Engen-Sigmaringen von 6-7‰ und weiter bis zum Allgäu (Bohrung Opfenbach 1; LEMCKE & WAGNER 1961:11; LEMCKE 1975: Abb. 21) von ca. 1‰, das sich von da nach Osten noch mehr verflacht haben dürfte. Sie wurde in den fast 140 Mio Jahren seit ihrer Ablagerung von Kreide und Tertiär nach und nach eingedeckt (**Abb. 1**), zuletzt zeitweise bis hinauf auf die Schwäbisch-Fränkische Alb als auf ihren über Tage noch erhaltenen Rest, wo die Verkarstung daher nicht später begonnen haben kann als unter dem Molassebecken. Dies ist bekanntlich — mit z.T. Kegelkarst-ähnlichen Formen — für die ganze Unterkreide in der nördlichen und mittleren Frankenalb auch unmittelbar nachgewiesen, wo die entstandene, offenbar bizarre Karstlandschaft anschließend von sandig-toniger Oberkreide zugefüllt und überdeckt und dadurch bis zum Pliozän vor weiterer Zerstörung geschützt wurde (z.B. TREIBS 1977:10, 17). Bei der Herausbildung dieses Paläokarsts mag zwar auch der hier weit verbreitete und bis unter das östliche Molassebecken reichende, «verkarstungsfreundliche» Frankendolomit eine gewichtige Rolle gespielt haben; es ist aber andererseits — abgesehen von den vielen vorgenannten, handfesten Gegenbeweisen — schon von der langen Zeit der Exposition her nicht vorstellbar, daß es außerhalb dieser Fazies vor dem Einschneiden von Rhein und Donau keine tiefgreifenden Verkarstungsvorgänge gegeben haben soll (VILLINGER 1986: 337 ff, 355). Die dafür angeführten Argumente, daß die Überdeckung mit Zementmergeln und Hangenden Bankkalken dort die Verkarstung bis zu deren großflächiger Abtragung verhindert habe, sind wenig überzeugend:

- 1) Die Zementmergel sind sehr verschiedenartig ausgebildet und durchaus nicht überall vorhanden.
- 2) Die Hangenden Bankkalke ähneln lithologisch den Wohlgeschichteten Kalken des Malm beta, die als Unteres Karststockwerk seit langem bekannt sind. Von GEYER & GWINNER (1986: 326) werden sie zudem ausdrücklich dem Oberen Karstwasserstockwerk zugerechnet.
- 3) Aus dem Untergrund des Molassebeckens ist nicht bekannt, daß Zementmergel und Hangende Bankkalke die Verkarstung ihres Liegenden irgendwo behindert hätten. Letztere sind vielmehr selbst nicht selten verkarstet.
- 4) Bei so extrem langer Exposition wie hier verkarstet schließlich jeder Kalk, ob gebankt oder nicht.

II. Zur Geschichte des Paläokarstes in Kreide und Tertiär

Bekanntlich funktioniert die zu Verkarstung führende CO₂-Verwitterung frei liegender Kalk- und Dolomitgesteine so lange, wie die von oben eindringenden CO₂-haltigen Wässer unter Tage zu einem Vorfluter abfließen, und hört erst auf, wenn dies nicht mehr möglich ist, weil dann kein kalkuntersättigtes und damit lösungsfähiges Wasser nachströmen kann. Für eine Diskussion der Geschichte des Paläokarstes im Alpenvorland (LEMCKE 1976; 1979: 312) sowie seiner Verbreitung und Wegsamkeit bietet sich daher zunächst ein kurzer, auf sie bezogener Streifzug durch die paläogeographische Entwicklung dieses Gebietes seit dem Malm an:

Als Abschluß der Eindeckung des paläozoischen Vindelizischen Landes zwischen Schwarzwald und Bayerischem Wald durch von W nach E mit immer jüngeren Schichten transgredierende Trias und Jura überflutet im Malm das Meer das ganze heutige deutsche Molassebecken, mit einer in Oberösterreich erkennbaren primären Ostküste (LEMCKE 1981: Fig. 1). Dabei schiebt sich von S her, aus der Tethys-Region, die helveti-

sche Fazies tieferen Wassers der bituminösen Quintner Kalke in den Süden des heutigen Alpenvorlandes vor, sich dort mit den Flachwasserablagerungen der germanischen Fazies verzahnend (LEMCKE 1981: Fig. 3).

Aus dieser Gesamtüberflutung wird am Ende des Malm, vor ca. 140 Mio Jahren, eine totale Regression. Dabei bildet sich östlich München als Vorläufer der späteren «Ostbayernsenke» (= «Ostbayerische Randsenke», VOIGT 1954:22 u. 35; LEMCKE 1973: 10) ein Senkungsgebiet heraus, auf das die evaporitisch-salinaren und schließlich aussüßenden Regressionssedimente des Purbeck beschränkt sind, die das abziehende Meer hinterläßt. Auf seinem zur Böhmischen Masse ansteigenden und sich mit ihr nun heraushebenden NE-Flügel wird in der Unterkreide, also während der nächsten >40 Mio Jahre, vor allem der Malm unter intensiver Verkarstung um mehrere 100 m denudiert, bis hier die längs des späteren Donaurandbruchs nach NW vorrückende Oberce-noman-Transgression diesen Zerstörungsprozeß beendet; sie signalisiert zugleich das beginnende Einsinken des bisherigen Hochgebiets und seine Umformung zu einer nach SW ansteigenden Pultscholle (Abb. 1). Deren aufgekipppte, NW-SE streichende südwestliche Bruchkante zwischen Landshut und der Salzach ist das vielgenannte «Landshut-Neuöttinger Hoch», auf dessen Kristallin + Paläozoikum heute — primär

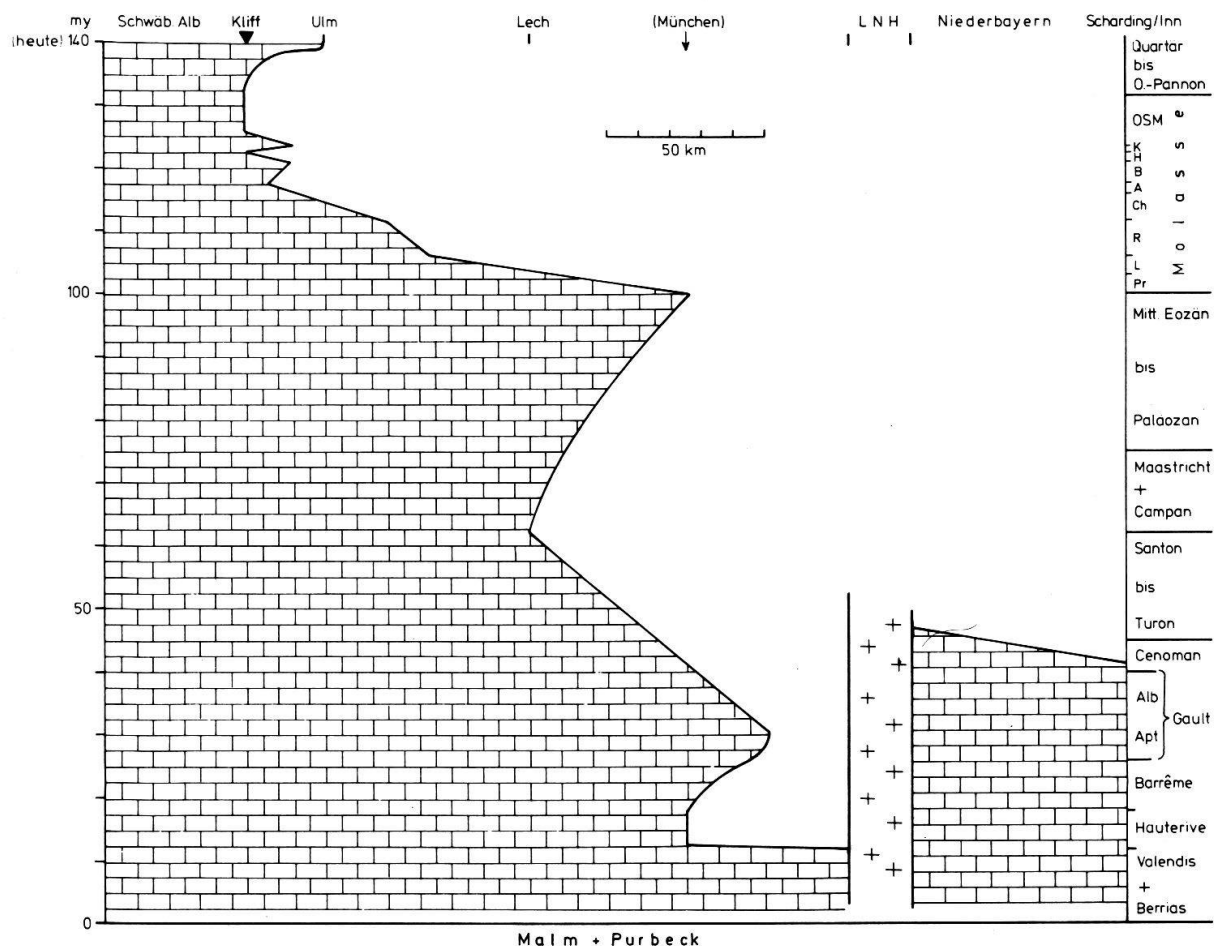


Abb. 1 Offen liegender und damit möglicher Verkarstung ausgesetzter Malm auf der Schwäbischen Alb und im Molassebecken vom Beginn der Unterkreide bis zur Gegenwart in absoluten Zeiten, auf einem West-Ost-Schnitt von der Schwäbischen Alb westlich Ulm bis Scharding bei Passau. Mauersignatur = Malmoberfläche zur jeweiligen Zeit ohne nennenswerte Bedeckung; ohne Signatur = Jüngere Sedimente zur jeweiligen Zeit auf Malm; Kreuze = Landshut-Neuöttinger Hoch (nur Lagebezeichnung, kein frei liegendes Kristallin andeutend!); my = Jahrmillion. Wie die Grafik zeigt, hat sich der Paläokarst im Alpenvorland größtenteils in der Kreide und im Alttertiär entwickelt.

oder infolge Abtragung — das Mesozoikum fehlt (**Abb. 5**; LEMCKE 1981: Fig. 2). Es unterteilt die nunmehrige Ostbayernsenke in den östlichen niederbayerischen und den westlichen «Wasserburger Trog» (OSCHMANN 1963: 7), in dem seinerzeit im Purbeck die Eintiefung begann.

Hier dringt schon wenige Jahrmillionen nach der Malm-Regression im Ober-Berrias bis Unter-Hauterive das Meer golfartig aus dem Schelfbereich des alpinen Nordhelvetikums für ca. 10 Mio Jahre über bereits bis > 250 m tief verkarsteten Malm (KÖWING et al. 1968: 29) bis südl. Landshut vor und legt mit seinen plombierenden Sedimenten vermutlich bereits den Malmkarst im südlichen Ostbayern z.T. still - trotz anschließendem Rückzug und teilweiser Wiederabtragung (**Abb. 1**) in den nächsten 12 Mio Jahren bis zum tieferen Apt (MEYER & RISCH 1981: Taf. 4/ Fig. 1). Sodann erfolgt, eingeleitet von den Gault-Sanden, ein erneuter Meeresvorstoß in den Wasserburger Trog, der im Cenoman Regensburg erreicht, wo er sich mit dem von SE entlang der Böhmisches Masse vorrückenden Meeresarm vereinigt. In der Folgezeit dehnt sich das Meer nach N bis in die Gegend von Kulmbach aus, nach W bis zum Lech und Ries und nach E bis zum «Pfahl» im Bayerischen Wald; es gibt dieses Gebiet erst im Obercampan wieder frei, also nach 40 Mio Jahren, in denen der Malmkarst im östlichen Alpenvorland von den bis > 1000 m mächtigen Oberkreide-Ablagerungen nun vollends eingedeckt und stillgelegt wird.

Während dieser ganzen Zeit, fast 70 Mio Jahre lang, unterliegt die nicht vom Kreidemeer bedeckte Malmtafel westl. München (LEMCKE 1981: Fig. 4) — und natürlich auch die Alb als ihr heutiges Ausgehendes — bei ziemlich gleichmäßig warmfeuchtem Klima einer allgemeinen Denudation, die infolge allmählicher Schiefstellung der Schichten nach SSE in Richtung auf die Alb meist stratigraphisch immer tiefer greift und mit weitflächiger, bis 200/300 m in den Malm hineinreichender Verkarstung verbunden ist. Dies setzt sich auch weitere etwa 30 Mio Jahre bis ins Obereozän fort, in denen zwischen Lech und Isar wahrscheinlich randliche Oberkreidesedimente bis zum Malm herunter abgetragen werden (**Abb. 1**), so daß dort dessen durch sie vermutlich unterbrochene Verkarstung wieder aufleben kann.

Im Obereozän (Priabon) entwickelt sich zwischen Westschweiz und Ostösterreich im Gebiet der heutigen Kalkalpen — nördlich der von S heranrückenden kalkalpinen Decken — ein W-E streichender Tiefseetrog («Flyschmolasse-Trog», LEMCKE 1984: Abb. 1), gewissermaßen die Keimzelle des sich nun rasch herausbildenden Molassebeckens, zu dessen Nordflügel die seit langem trocken liegende Landoberfläche aus Kreide und verkarstetem Malm westlich und östlich München (LEMCKE 1981: Fig. 5) unter sukzessiver Abbiegung nach S umgestaltet wird. Über sie transgrediert das Meer aus dem Tiefseetrog heraus, und zwar zunächst in der Ostbayernsenke, deren aus der Kreidezeit überkommene Senkungstendenz damit wieder auflebt. Es hinterläßt dort u.a. die ausgedehnten Riffbildungen des Lithothamnienkalks und rückt dann unter Vertiefung rasch weiter nach N und vor allem nach W vor; dort erreicht und überschreitet es schon im Unteroligozän bei Memmingen-Lindau mit den dunklen Fischechiefern des Lattorf die Iller, womit es bereits ansehnliche Teile der alten Malmoberfläche der weiteren Verkarstung entzieht. Dieser Prozeß setzt sich durch das überwiegend tonige Rupel (LEMCKE 1977: Abb. 4) bis zu den unterchattischen sandigen Bausteinschichten fort, wobei das Meer im Westen bis etwa zur Linie Friedrichshafen — Ochsenhausen — Aichach vordringt (**Abb. 2**).

Einer wohl durch Meeresspiegelsenkung herbeigeführten anschließenden Regression bis zu einer nun lange Zeit ± stabil bleibenden Küste etwa auf dem Meridian von München folgen die limnofluviatilen, von SW nach E geschütteten tonig-sandigen, bunten Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse (USM) des restlichen Chatt + Aquitan, mit denen die Eindeckung des Malm im Molassebecken und damit die Stille-

gung seiner Verkarstung zum Abschluß kommt. Weit ausgedehnte Süßwasserkalke, die auf den Basisbereich dieser Abfolge und den Raum zwischen Alb und Küstenlinie des Bausteinschichtenmeeres beschränkt sind, könnte man vielleicht mit artesisch aufbrechendem Karstwasser (analog den Langenau-Quellen bei Ulm) in Verbindung bringen, das nach dem Zurückweichen der Küste nach E nun nicht mehr direkt ins Meer abfließen konnte.

Nach dem Rückzug des Aquitan-Meeres aus dem östlichen Vorland nach S und dem etwa gleichzeitigen Aufhören der terrestrischen Zufuhren der Unt. Süßwassermolasse liegt im Westen die Landoberfläche im Burdigal zunächst trocken und wird erst im Helvet vom Meer der Oberen Meeresmolasse überflutet, das auf die heutige Alb bis zu der bekannten Klifflinie übergreift (LEMCKE 1984: Abb. 5). Seine dortigen Ablagerungen werden bei der anschließenden Eintiefung der oberhelvetischen Graupensandrinne (GEYER & GWINNER 1986: Abb. 121 u. 122), des mutmaßlichen Unterlaufs des Ur-Mains (LEMCKE 1985: Fig. 1), großenteils wieder entfernt, die nun vorübergehend zwischen Ulm und Bodensee auf weite Strecken den Malm öffnet (KIDERLEN 1931: 282). Nach ihrer Auffüllung durch Grimmelfinger und Kirchberger Schichten greifen die Ablagerungen des großen, E-W abströmenden Flußsystems der Oberen Süßwassermolasse (LEMCKE 1984: Abb. 9) ab Baden (früher «Torton») bis Unterpannon allmählich erneut auf die Alb über, bis zur Klifflinie und darüber hinaus, sich im tieferen Teil mit ausgedehnten Süßwasserkalken verzahnend - analog vielleicht dem Basisbereich der Unteren Süßwassermolasse. Auch sie sind von der nachunterpannonen, schließlich mit der Herausbildung des Donausystems verbundenen Abtragung der letzten etwa 8 Mio Jahre dort inzwischen bis auf Reste wieder abgeräumt worden.

Was in dieser jüngeren Molassezeit, also in den etwa 20 Mio Jahren vom Burdigal bis zum Unterpannon und danach bis zum beginnenden Einschneiden der Donau im höheren Pliozän auf und in der Alb geschah, ist für unser Thema nicht gleichgültig. Die tiefliegenden, damals von einem nach NW ansteigenden und um die Wende Baden/Sarmat (Scharnhauser Vulkanschlott; CARLÉ et al. 1969: Abb. 4) noch bis mindestens Stuttgart reichenden Einzugsgebiet gespeisten Karstgerinne der Alb (LORENZ 1982: 173) waren ja nicht stillgelegt wie die im Molassebecken; sie haben sich daher sicherlich ihre Ausflußöffnungen nordwestlich und nördlich der Überdeckung mit Unterer Süßwassermolasse, am *Stau* also gegen den außer Funktion gesetzten Paläokarst des Beckens, über Spalten und Klüfte geschaffen — entsprechend vielleicht dem «Notausgang» der Blauhöhle (HASENMAYER 1984: 37 f; 1986: 26) —, da sie dort vermutlich unter hydrostatischem *Überdruck* von ihrem höher liegenden Ausgehenden her standen (Abb. 3). Sie werden zunächst im Burdigal über Tage nach SW abgeflossen und im Unter- und Mittelhelvet ins transgredierende Meer der Ob. Meeresmolasse übergetreten sein. Im Oberhelvet dürfte der Graupensandfluß ihr Wasser nach SW abgeführt haben und ebenso in der Ob. Süßwassermolasse in gleicher Richtung deren großes Flußnetz, nachdem es auf die Alb übergegriffen hatte. Die dort (z.B. im Tautschbuch, Landgericht, Bussen) erhalten gebliebenen Süßwasserkalke, mit denen sich die frühesten Ablagerungen dieser Flüsse verzahnen, sind vermutlich die Zeugen jener — kalkliefernden! — Karstwasseraustritte — schon ihre nicht seltene Bezeichnung als «fossiler Kalktuff, Pisolith, Pflanzenkalk, Sprudelsinter» usw. (z.B. ZÖBELEIN 1977) deutet dies an.

Besonders interessant aber ist, daß in die Zeit der jüngeren Molasse (vor 16-20 Mio Jahren nach GEYER & GWINNER 1986: 216) der Uracher Vulkanismus fällt, in dessen Bereich bis heute juveniles CO₂ vorkommt (Säuerlinge des Filstals und von Kleinengstingen, GEYER & GWINNER 1986: 332; CO₂-Ausbruch aus dem Muschelkalk der Tiefbohrung Buttenhausen 1, (Abb. 5 und WIRTH 1958: 110). Er wird vermutlich während seiner Förderperiode und noch lange danach das Karstwasser in seinem Umkreis so

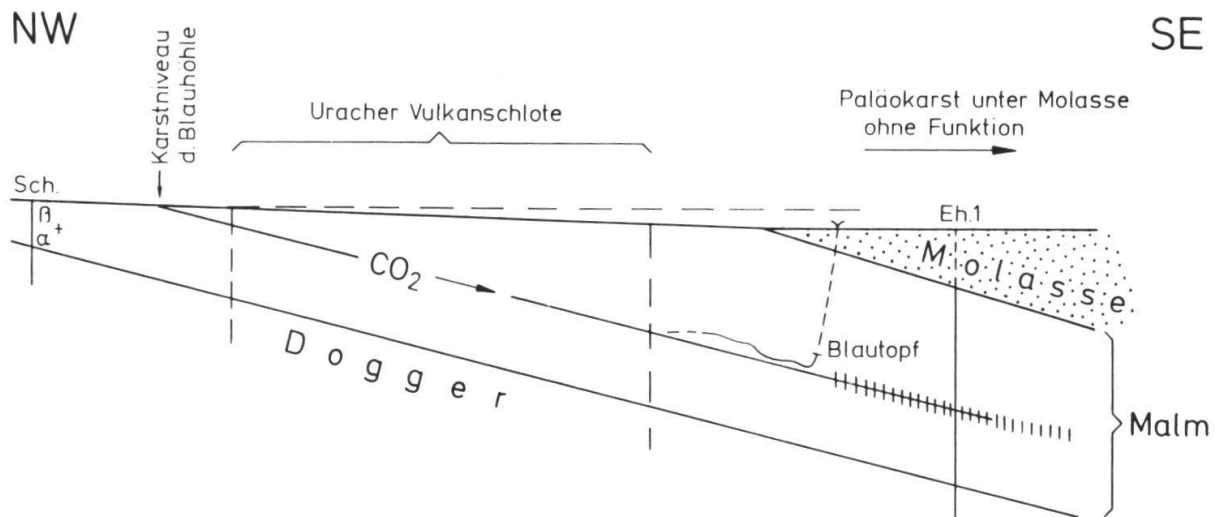


Abb. 3 Prinzipskizze (30-fach überhöht): In der Umgebung des Scharnhäuser Vulkans bei Stuttgart, in dessen Schlot als jüngste Auswürflinge Gesteine des Malm beta gefunden wurden (z.B. GEYER & GWINNER 1986: 297), könnte zur Zeit des Ausbruchs nach der paläogeologischen Gesamtsituation der Malm (alpha + beta z.T.) ca. 100 m mächtig gewesen sein. Aus der Kombination mit den Profilen der am Albsüdrand stehenden Tiefbohrungen Upflamör 1 (WIRTH 1960: 132) und Ehingen 1 (BENTZ 1949: Abb. 3) errechnet sich — bei Vernachlässigung von Bruchstörungen — ein damaliges SE-Fallen des Malm von ca. 0,75‰ (ca. 0,43°), wobei die Landoberfläche wie heute schwach nach SE geneigt gewesen sein dürfte. Daraus ergibt sich zu jener Zeit für den Blautopf eine — theoretische — Steighöhe des Karstwassers von ca. 280 m über dessen heutigen Spiegel hinaus, die zur Überwindung des Höhenunterschiedes zur angrenzenden Albhochfläche ausgereicht haben müsste, dies auch bei Einkalkulierung unvermeidlicher Unsicherheiten bei der Abschätzung von Ausgangsdaten (vgl. auch LEMCKE 1976: 15 f). Das um die gleiche Zeit vom Uracher Vulkanismus produzierte CO₂ dürfte entscheidend zu der außergewöhnlichen Erweiterung z.B. der Blauhöhle beitragen haben. Sch. = Scharnhäuser Vulkan, Eh. 1 = Bohrung Ehingen 1.

sehr mit CO₂ angereichert haben, daß darin, zumal in Verbindung mit dessen vorerwähntem Überdruck, die Ursache für die außerordentliche Erweiterung von Karsthöhlen liegen dürfte wie z.B. des «Mörike-Doms» von HASENMAYER (1986: 46); dies könnte vielleicht auch für den von VILLINGER (1978: 74) erwähnten auffallenden Dolinenreichtum im Einzugsgebiet des Blautopfs gelten sowie für die Häufung bedeutender Karstquellen und -höhlen am SE-Rand des Vulkangebietes (**Abb. 5**), von denen letztere in der Südlichen und Mittleren Frankenalb — trotz Frankendolomit! — kaum eine Rolle spielen (ANDRES & CLAUS 1964: 199). Bezeichnend ist ferner der Umstand, daß (mdl. Hinweis von Prof. Dr. REIFF/Stuttgart) die Blauhöhle als solche den Albtrauf nicht erreicht — verständlich, weil das mit juvenilem CO₂ beladene Karstwasser nach SE und nicht zu ihm abfloß (**Abb. 3**). — Es liegt im übrigen nahe, an ähnliche Zusammenhänge auch zwischen Aachquelle und Hegau-Vulkanismus zu denken.

Auf der Albhochfläche selbst wird während dieser ganzen Zeit wahrscheinlich die Oberflächenentwässerung dominiert haben, bei rel. hoch liegendem Karstwasserspiegel infolge der Druckverhältnisse im Karst und/oder des Niveaus der Vorfluter. Hierfür sprechen u.a. die Jüngerer Juranagelfluhen, die durch Vorläufer der heutigen Täler (und Trockentäler) antransportiert sein dürften.

III. Mutmaßliche Abflußrichtungen im Paläokarst und seine Reaktivierung ab höherem Pliozän

Der Versuch erscheint reizvoll — u.a. für eine Abschätzung heutiger Wegsamkeit im Paläokarst unter dem Molassebecken —, die mutmaßlichen, z.T. unterirdischen Abflußrichtungen von den jeweils noch frei liegenden, verkarstenden Malmflächen zu den zugehörigen Vorflutern wenigstens umrißhaft zu rekonstruieren, Schritt für Schritt der fortschreitenden Eindeckung mit Kreide und Molasse folgend (**Abb. 4**):

- 1) Tiefere Unterkreide (bis Unter-Hauterive): Abfluß zunächst nach S in Richtung Tethys, wo die küstennahe Urgon-Fazies stellenweise, wie vielleicht in Miesbach 1, in die Malmverkarstung einbezogen worden sein könnte, anschließend auch nach E, SE und S, in Niederbayern nach SW, zum nach N vorrückenden ostbayerischen Flachmeergolf; ferner nach SW zur Westschweiz.
- 2) Ober-Hauterive bis Unter-Apt: Abfluß nach S zur Tethys.
- 3) Gault bis Obercampan: Im Gault Abfluß nach E zum Ostbayerngolf, anschließend, der nach N vorrückenden Transgression folgend, auf NE in Richtung Regensburg drehend, ferner nach S wie bisher und nach SW zur Westschweiz.
- 4) Obercampan bis Obereozän: Abfluß nach S zur Tethys, in der Schweiz nach SE.

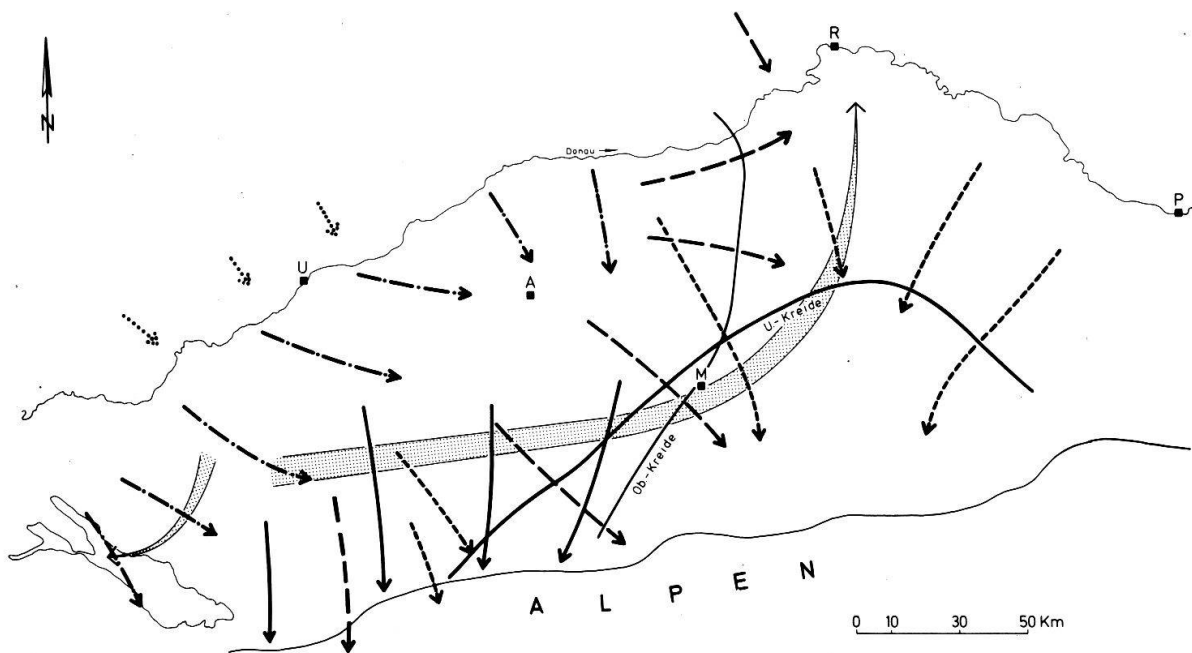


Abb. 4 Mutmaßliche Abflußrichtungen im Paläokarst des deutschen Alpenvorlandes (Schema-Skizze). Starke Linie in SE-Bayern = etwa Nordgrenze der Transgression der tieferen Unterkreide; mittelstarke Linie bei München = etwa Westgrenze der heutigen Oberkreideverbreitung (einschl. Gault-Sande); Pfeile = mutmaßliche Abflußrichtungen: kurz gestrichelt = in der Unterkreide, lang gestrichelt = vom Gault bis zum Obercampan, ausgezogen = vom Obercampan bis zum Obereozän, strichpunktiert = im Oligozän, punktiert = im Mio-/Pliozän; Pfeile mit Punktraster = heutige Abflußrichtungen (entsprechend Abb. 5). - A = Augsburg, M = München, P = Passau, R = Regensburg, U = Ulm.

- 5) Obereozän (Priabon) bis Bausteinschichten (tiefstes Chatt): Abfluß nach E, SE und S zu dem sich von Ostbayern her nach N und bis über die Iller nach W ausdehnenden Meer; in der Schweiz im Priabon und Lattorf nach SE zum «Flyschmolassetrog».
- 6) Untere Süßwassermolasse (USM; restliches Chatt + Aquitan): Nach Meeresrückzug im tiefen Chatt etwa zum Meridian von München Blockierung des unterirdischen Abflusses zum Meer, daher zunächst artesische Karstwasseraufbrüche (à la Langenau-Quelle) nordwestlich der alten Küstenlinie mit Absatz zahlreicher Süßwasserkalklagen, die auf einer ausgedehnten Fläche überall den Basisbereich der immer weiter vorrückenden USM bilden (**Abb. 2**), in deren von der Schweiz zugeführten Sedimenten sie nach anfänglicher Verzahnung schließlich aufgehen. Nach Plombierung und Stillegung des restlichen Submolasse-Karstes bis zum Albsüdrand im Aquitan weiterhin Oberflächenabfluß des nun an diesem austretenden Karstwassers mit den USM-Flüssen nach E zum ostbayerischen Meer, abschließend, nach dessen Regression, wohl mit eigenen Gerinnen nach SE zum damaligen Trogachsenbereich (= etwa heutige Faltenmolasse, LEMCKE 1984: Abb. 11). - Wenig oberflächliche Schuttabfuhr von der Alb (Ältere Juranagelfluh).
- 7) Obere Meeresmolasse (Burdigal bis Mittelhelvet): Nur Oberflächenabfluß nach S, SE und E zum bis auf die Alb transgredierenden Meer.
- 8) Süßbrackwassermolasse + Obere Süßwassermolasse (Oberhelvet bis Unterpannon): Nach dem Meeresrückzug im nordwestlichen Randbereich des Beckens zunächst Ablagerung von Süßwasserkalken/Knollenkalken (z.T. «Albstein»), bei Riedöschingen/Hegau u.a. als «Sprudelsinter» oder Travertin beschrieben (ZÖBELEIN 1985: 54), vielleicht Analogon zu den Süßwasserkalken der USM-Basis, hier als Auftakt zur Oberen Süßwassermolasse (als übergeordnetem Sedimentationsvorgang). Dann stellenweise Öffnung des Malm durch die Graupensandrinne, kurzfristig unterirdischer Abfluß zu ihr (auch aus dem gespannten Paläokarst wie heute zur Donau, s.u.). Nach Plombierung der Rinne durch Grimmelfinger und Kirchberger Schichten vor allem auf der Südabdachung der Alb Süßwasserkalkbildung (ANDRES 1951: 22 ff; SCHNITZER 1956: 18 ff; ZÖBELEIN 1977), z.T. wohl aus artesischen Karstwasseraufbrüchen, Oberflächenabfluß (z.T. Jüngere Juranagelfluh) nach SW mit dem Hauptflußsystem der Ob. Süßwassermolasse.
- 9) Höheres Pannon bis heute: Umstellung des Oberflächenabflusses nach E, ab höherem Pliozän mit der sich eintiefenden Donau, später auch nach S zum Hochrhein; dabei allmähliches Trockenfallen des höchsten Karststockwerks auf der Alb, einschl. z.B. der im Plio-/Pleistozän angelegten Bärenhöhle (LORENZ 1982: 174).

Diese Zusammenstellung zeigt, daß im Paläokarst des deutschen Alpenvorlandes die Abflüsse von der Alb in allgemein östlicher und südlicher Richtung erfolgt sein dürften; die NE-Richtung auf Regensburg zu konnte hingegen nur einmal eingeschlagen werden, im Obercenoman/Unterturon, also während etwa 5-6 Mio Jahren. Insgesamt ergibt sich das Bild einer seit dem Trockenfallen des Malm andauernden Verkarstung, die mit zunehmender Eindeckung durch jüngere Sedimente nach und nach stillgelegt wurde, zuerst in Ostbayern durch die Kreide, dann von E nach W und N fortschreitend durch die Molasse. Die heutige Albtafel war also der Verkarstung am längsten ausgesetzt (**Abb. 1**).

Das im höheren Pliozän, vor 3-4 Mio Jahren, begonnene Einschneiden der Donau in die Südalb im Zuge der allgemeinen Heraushebung Süddeutschlands — und des Schwarzwaldschildes im besonderen — leitet eine neue Phase ein. Mit ihrem immer tiefer greifenden *Aufschlitzen* des Malm hat die Donau nicht nur die Verkarstung der Albhochfläche weiter belebt und schließlich die tief liegenden alten Karstgerinne der

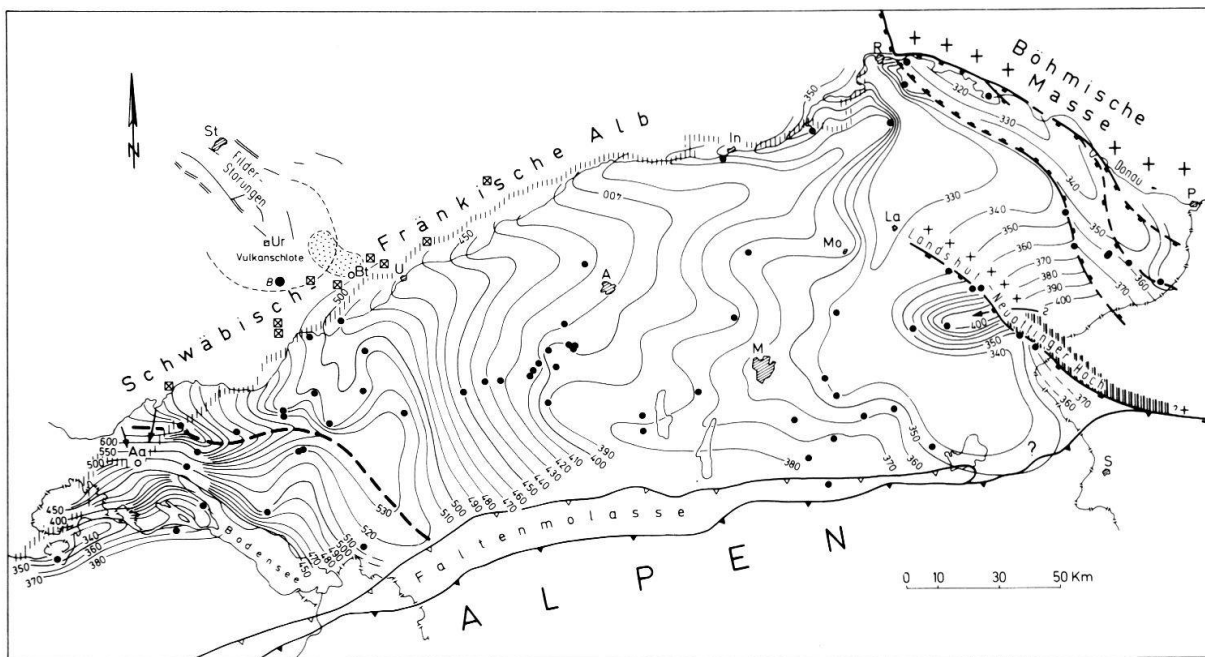


Abb. 5 Linien gleicher Spiegelhöhen des gespannten Malm-Karstwassers (m ü. NN).

Punkte = Beobachtungspunkte (meist Tiefbohrungen) für die Spiegelhöhen; starke gerissene Linie nördl. des Bodensees = mutmaßliche Druckwasserscheide im gespannten Malmkarstwasser; kurze Senkrechtschraffur = Südostrand des anstehenden Malm der Alb; Kreuze bzw. Senkrechte Dick/dünn-Schraffur = Kristallin bzw. Paläozoikum des Landshut-Neuöttinger Hochs (LNH) unter Molasse; Aa = Aach-Quelle, Bt = Blautopf, (mit punktiertem Karstwassereinzugsgebiet nach GROSCHOPF 1973: Abb. 6), B = Tiefbohrung Buttenhausen 1, Quadrate mit liegendem Kreuz = wichtige Karstquellen und -höhlen am SE-Rand der Schwäbischen Alb (nach GEYER & GWINNER 1986: Abb. 217); Pfeile = Karstwasserabfluß zur Aachquelle und (möglicherweise) über das LNH zum Wasserburger Trog Ostbayerns. - A = Augsburg, In = Ingolstadt, M = München, Mo = Moosburg, La = Landshut, P = Passau, R = Regensburg, S = Salzburg, St = Stuttgart, U = Ulm, Ur = Urach. - (Nach LEMCKE 1976: Fig. 1; revidiert und ergänzt).

Alb wie den Blautopf geöffnet — sie hat auch den Paläokarst unter Kreide und Molasse *reaktiviert* (und *nicht* etwa geschaffen!). Ihr Spiegel bildet auch für das gespannte Wasser in diesem von Tuttlingen bis Regensburg den tiefsten freien Karstwasserspiegel, bis zu dessen *Niveau* es nach Erbohren — entsprechend dem U-Rohr-Prinzip — höchstens *ansteigen* kann (LEMCKE & TUNN 1956: 44 ff; LEMCKE 1979: Abb. 4). Aus zahlreichen Einzelbeobachtungen läßt sich mit Linien gleicher Steighöhe dieses Wassers der Druckspiegel des zugehörigen, offenbar mindestens druckmäßig zusammenhängenden Grundwasserstockwerks darstellen (**Abb. 5**), das man als System kommunizierender Röhren auffassen kann. Er hat natürlich keine Beziehungen zu den Tiefenlinien der Malmoberkante (s. Tertiärbasis bei LEMCKE 1984: Abb. 10) und ist generell — ohne Berücksichtigung seiner internen, hier außer Betracht bleibenden Konturen — von einer Druckwasserscheide etwa Ostrach-Aulendorf-Kißlegg entsprechend dem Donaugefälle mit etwa 1‰ nach E auf Regensburg zu geneigt, etwas steiler nach S zum Hochrhein, für den ähnliches wie für die Donau gilt. Diesen Gefällerrichtungen folgt im Paläokarst der heutige Karstwasserabfluß, im Donaubereich nach den bisherigen spärlichen Informationen mit Durchschnittsgeschwindigkeiten von höchstens wenigen m/Jahr (GEYH & GROSCHOPF 1978: Tab. 2; Bertleff 1986: 191).

IV. Aspekte zur Nutzung des Thermalwassers im Paläokarst

Schon angesichts dieser überaus langsamen Fließbewegung ist kaum vorstellbar, daß sich das Höhlensystem der Blaubeurer Alb mit ähnlich großen Querschnitten unter das Molassebecken fortsetzt, zumal das juvenile CO₂, das vermutlich zur Erweiterung der Alb-Höhlen wesentlich beigetragen hat, den blockierten Submolassekarst garnicht erreichen konnte (wie ja in entgegengesetzter Richtung auch eine NW-Fortsetzung der Blauhöhle am Albtrauf nicht identifizierbar ist). Gleichwohl läßt sich jedoch die *Möglichkeit* nicht bestreiten, aus dem Malm des Beckenuntergrundes Heißwasser auch in größeren, balneologische Bedürfnisse übersteigenden Mengen zu gewinnen. Sie ist in geologischer Hinsicht seit Jahrzehnten bekannt und wird spätestens seit dem Ende der 70er Jahre auch in Veröffentlichungen diskutiert (z.B. HÖRAUF & WIRTH 1979; UDLUFT ?1980) und mit einem seit Jahren laufenden Forschungsvorhaben auf alle Aspekte hin eingehend untersucht (WERNER 1987). Ohne deren Ergebnissen vorgreifen zu wollen, sieht es nach den vorliegenden Bohrungsdaten so aus, als wäre das Risiko einer etwaigen Erschließung westlich des Lech, wo in Ölfeldern oft Bohrungen mit und ohne Verkarstung dicht nebeneinander stehen, größer als im Osten, wo die Verkarstung gleichmäßiger zu sein scheint, vermutlich infolge der dortigen Ausbildung mächtiger Malmabschnitte als verkarstungsfreundlicher «Frankendolomit». Andererseits wurden auch in den bisher nur im Süden des Westmolasse-Beckens erbohrten Quintner Kalken der helvetischen Malm-Fazies — entgegen landläufiger Meinung — unübersehbare Anzeichen für Verkarstung beobachtet. Beziehungen der letzteren — allgemein — zu den mutmaßlichen vorburdigalen Abflußrichtungen sind nirgends erkennbar, doch könnte für die Langsamkeit des heutigen Fließens immerhin von Bedeutung sein, daß diese von den jetzigen Hauptabflüssen zum Hochrhein und nach Regensburg meist gequert werden (**Abb. 4**), die damit auf weniger wegsame Verbindungen zwischen ihnen angewiesen wären. Auch die im Verhältnis zum großen Einzugsgebiet sehr geringe Breite des Ausflusses bei Regensburg könnte vielleicht eine Rolle spielen.

Bei dieser Sachlage kann man jedenfalls schon beim gegenwärtigen Wissensstand annehmen, daß ein Ersatz von etwa entnommenem Karstwasser durch Nachfließen von der Alb oder der Donau her *nicht* zu erwarten ist, geschweige denn, da viel zu langsam (u.a. BERTLEFF 1986: 66), durch Zusickern aus dem Hangenden. Voraussichtlich könnte aber, infolge zwangsläufiger Druckabsenkung bei der Entnahme, die *Expansion* der im Malm-Aquifer enthaltenen, außerordentlich großen gespannten Wassermenge ausreichenden Nachschub liefern - sie würde sich pro at Druckabnahme auf etwa 1/20000 des Ausgangsvolumens belaufen und aus *allen* Richtungen wirksam werden. Sofern dieses Volumen konstant gehalten würde (über Schlucksonden in ausreichend weitem Abstand von der jeweiligen Entnahme), müßte sich daher — zumindest theoretisch — ein geothermischer Kreislauf aufbauen lassen. Ob so etwas wirtschaftlich werden könnte, steht hier nicht zur Diskussion.

Prognosen über lukrative Karstwasservorkommen im Untergrund des Molassebeckens und vor allem für deren Ergiebigkeit sind mit den heutigen geowissenschaftlichen Methoden nicht möglich und auch nicht in Sicht, doch sind dank der Allgegenwart des Karstwassers die Chancen für Zufallsfunde relativ groß, im Osten anscheinend größer als im Westen. Ob dabei Bohrlokationen an Störungen generell besonders aussichtsreich wären (BERTLEFF 1986: 49), ist fraglich, weil die Erdölbohrungen, die die meisten Spülungsverlust-Indikationen geliefert haben, fast stets an Störungen stehen, so daß hier Zusammenhänge vorgetäuscht sein könnten; außerdem ist die Bruchtektonik meist jünger als die alte Verkarstung und schließlich gibt es auch «totale»

Spülungsverluste weitab von Störungszonen. In fast jedem Fall müßte das Wasser allerdings mit Tiefpumpen zu Tage gebracht werden, da es nur bis zum *Spiegelniveau* von Donau und Rhein aufsteigen könnte (S. 43), die ihrerseits als Vorfluter für die Oberfläche des Molassebeckens fungieren und damit i.a. tiefer liegen als diese.

Schriftenverzeichnis

- ANDRES, G. (1951): Die Landschaftsentwicklung der südlichen Frankenalb im Gebiet Hofstetten-Gaimersheim-Wettstetten nördlich von Ingolstadt. - Geol. Bavarica, 7: 57 S., 8 Abb., 4 Taf., 1 geol. Karte 1:25000; München.
- ANDRES, G. & CLAUS, G. (1964): Das Karstwasser in der Südlichen und Mittleren Frankenalb. - Geol. Bavarica, 53: 194-208, 4 Abb., 1 Beil.; München.
- AUST, H. (1981): Deep-well waste disposal in the Federal Republic of Germany - a state of-the-art-report. - The Science of the Total Environment, 21: 113-125, 4 Fig., 1 Tab.; Amsterdam.
- (1986: Geowissenschaftliche Kriterien der Aquiferspeicherung von Abwässern und flüssigen Abfällen. - In: «Prof. Dr. Ferdinand Neumaier 80 Jahre», Festkolloquium 17.1.1986: 18-48, 19 Abb.; Inst. f. Radiohydrometrie d. GSF München.
- BENTZ, A. (1949): Bau und Erdölhoffigkeit des Molassetrogs von Oberbayern und Oberschwaben. - Erdöl u. Kohle, 2: 41-51, 10 Abb.; Hamburg.
- BERTLEFF, B.W. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens. - Abb. geol. Landesamt Baden-Württ., 12: 1-271, 64 Abb., 15 Tab., 8 Anl.; Freiburg/Br.
- CARLÉ, W., REIFF, W. & STRÖBEL, W. (1969): Führer zu den Exkursionen anlässlich der 90. Tagung des Oberrheinischen Geologischen Vereins in Ludwigsburg und Stuttgart vom 8. bis 12. April 1969. - Arb.a.d. Geol.-Paläont. Inst. d. Univ. Stuttgart, N.F. 57: 87 S., 24 Abb., 19 Tab.; Stuttgart.
- CRAMER, H. (1953): Thermalwasser aus tiefliegenden Karsthöhlen des Bayerischen Innviertels. - Geol. Bavarica, 17: 164-177; München.
- GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. (1986): Geologie von Baden-Württemberg, 3. Aufl. - 472 S., 254 Abb., 26 Tab.; Verlag E. Schweizerbart, Stuttgart.
- GEYH, M.A. & GROSCOPF, P. (1978): Isotopenphysikalische Studie zur Karsthydrologie der Schwäbischen Alb. - Abh. geol. L.A. Baden-Württ., 8: 7-58, 9 Abb., 5 Tab.; Freiburg/Br.
- GROSCOPF, P. (1973): Gewässer. - In: Der Stadt- und der Landkreis Ulm, 63-79, 7 Abb., 3 Tab.; Ulm.
- GUDDEN, H. & ZIEGLER, J.-H. (1965): Die Thermalwasserbohrungen Füssing 2 und 3 und ihre geologischen Befunde. - Geol. Bavarica, 55: 216-230, 5 Abb., 2 Tab.; München.
- HASENMAYER, J. (1984): Zum Alter der Blautopf-Unterwasserhöhle. - Laichinger Höhlenfreund, 19: 37-40, 1 Abb.; Laichingen.
- (1986): Blautopf - Blauhöhle. - In: Blaubeuren. Die Entwicklung einer Siedlung in Südwestdeutschland: 19-30, 2 Abb., 1 Höhlenprofilschnitt; Verlag J. Thorbecke Sigmaringen.
- HÖRAUF, H. & WIRTH, H. (1979): Geothermische Energie im Tiefengrundwasser des bayerischen Molassebeckens. - Deutsche Gewässerkundliche Mitt., 23: 113-117, 2 Abb.; Koblenz.
- KIDERLEN, H. (1931): Beiträge zur Stratigraphie und Paläogeographie des süddeutschen Tertiärs. - N.Jb. Mineral. usw., Beil. Bd. 66B: 215-384, 15 Abb., 2 Taf.; Stuttgart.
- KÖWING, K., KRAUS, L. & RÜCKERT, G. (1968): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Bl. 7837 Markt Schwaben. - 147 S., 19 Abb., 7 Tab., 1 Beil.; Bayer. Geol. L. - Amt München.
- LEMCKE, K. (1973): Zur nachpermischen Geschichte des nördlichen Alpenvorlandes. - Geol. Bavarica, 69: 5-48, 11 Abb., 2 Beil.; München.
- (1975): Molasse und vortertiärer Untergrund im Westteil des süddeutschen Alpenvorlandes. - Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., N.F. 57: 87-115, 25 Abb.; Stuttgart.
- (1976): Übertiefe Grundwässer im süddeutschen Alpenvorland. - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u.-Ing., 42/103: 9-18, 4 Fig.; Basel.
- (1977): Erdölgeologisch wichtige Vorgänge in der Geschichte des süddeutschen Alpenvorlandes. - Erdöl-Erdgas-Z., 93 (Sonderausgabe): 50-56, 9 Abb.; Hamburg/Wien.
- (1979): Dreißig Jahre Öl- und Gassuche im süddeutschen Alpenvorland. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. 61: 305-319, 4 Abb.; Stuttgart.

- (1981): Das heutige geologische Bild des deutschen Alpenvorlandes nach drei Jahrzehnten Öl- und Gasexploration. - *Ecl. geol. Helv.*, **74**: 1-18, 12 Fig.; Basel.
- (1984): Geologische Vorgänge in den Alpen ab Obereozän im Spiegel vor allem der deutschen Molasse. - *Geol. Rdsch.*, **73**: 371-397, 14 Abb.; Stuttgart.
- (1985): Flußfracht von Ur-Main und Ur-Naab in der Schweiz und im deutschen Molassebecken. - *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u.-Ing.*, **51/121**: 13-21, 1 Fig.; Losone.
- LEMCKE, K. & TUNN, W. (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage. - *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u.-Ing.*, **23/64**: 35-56, 7 Abb., 2 Tab.; Basel.
- LEMCKE, K. & WAGNER, R. (1961): Zur Kenntnis des vortertiären Untergrundes im Bodenseegebiet. - *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u.-Ing.*, **27/73**: 9-14, 1 Abb.; Basel.
- LORENZ, V. (1982): Zur Vulkanologie der Tuffschlote der Schwäbischen Alb. - *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver.*, N.F. **64**: 167-200, 6 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- MEYER, R. & RISCH, H. (1981): Rekonstruktion der Vorstoßetappen des Kreidemeeres nach heutigen Funden. - In: *Erläuterungen z. Geol. Karte v. Bayern 1:500 000*, 3 Aufl.: Taf. 4/ Fig. 1; Bayer. Geol. L.-Amt München.
- NATHAN, H. (1949): Geologische Ergebnisse der Erdölbohrungen im Bayerischen Innviertel. - *Geol. Bavarica*, **1**: 68 S., 5 Abb., 1 Taf.; München.
- OSCHMANN, F. (1963): Introduction into the Regional Geology of the South German Molasse Basin. - *Excursion Guide Book III*, 6th World Petrol. Congr. Frankfurt a.M. 1963: 5-17, 10 Fig.; Hannover.
- ROLL, A. (1979): Versuch einer Volumenbilanz des Oberrheintalgrabens und seiner Schultern. - *Geol. Jb.*, **A 52**: 3-82, 38 Abb., 6 Tab.; Hannover.
- SCHNITZER, W.A. (1956): Die Landschaftsentwicklung der südlichen Frankenalb im Gebiet Denkendorf-Kösching nördlich von Ingolstadt. - *Geol. Bavarica*, **28**: 47 S., 7 Abb., 1 geol. Karte 1:25 000; München.
- TREIBS, W. (1977): Geographischer und geologischer Überblick. Landschaftsgeschichte. - In: *Geol. Karte v. Bayern 1:25 000*, Erl. z. Bl. 6435 Pommelsbrunn: 7-20; Bayer. Geol. L.-Amt München.
- UDLUFT, P. (?1980): Projekt Geotherm, Erschließung und Nutzung geothermer Energie. - 12 S., 4 Abb.; München.
- VILLINGER, E. (1978): Zur Karsthydrologie des Blautopfs und seines Einzugsgebietes (Schwäbische Alb). - *Abh. geol. Landesamt Baden-Württ.*, **8**: 59-127, 17 Abb., 14 Tab.; Freiburg/Br.
- (1986): Untersuchungen zur Flußgeschichte von Aare-Donau/Alpenrhein und zur Entwicklung des Malm-Karsts in Südwestdeutschland. - *Jh. geol. Landesamt Baden-Württ.*, **28**: 295-362, 10 Abb., 2 Tab., 3 Beil.; Freiburg/Br.
- VOIGT, E. (1954): Das Norddeutsch-Baltische Flachland im Rahmen des europäischen Schollenmosaiks. - *Mitt. Geol. Staatsinst.*, **23**: 18-37, 5 Abb.; Hamburg.
- WERNER, J. (1987): Das Forschungsvorhaben «Hydrogeothermische Energienutzung und Grundwasserhaushalt des Malmkarsts im Süddeutschen Molassebecken» - Ziele und Zwischenergebnisse. - Vortrag a.d. 10. Tagung d. Fachsektion Hydrogeologie v. 25. - 29.5.1987 in Regensburg, *Nachr. Dt. Geol. Ges.*, **36**, 37; Hannover.
- WIRTH, E. (1958): Die Schichtenfolge der Erdölaufschlußbohrung Buttenhausen 1, Schwäbische Alb. - *Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver.*, N.F. **40**: 107-128, 3 Abb.; Stuttgart.
- (1960): Die Schichtenfolge der Erdölaufschlußbohrung Upflamör 1, Schwäbische Alb. - *Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver.*, N.F. **42**: 129-160, 4 Abb.; Stuttgart.
- ZÖBELEIN, H.K. (1977): Anstehende und eiszeitlich verschleppte Obere Süßwassermolasse (Ober-Miozän) im Bereich des Riedlinger Beckens (Baden-Württemberg). - *Mitt. Bayer. Staatsslg. hist. Geol.*, **17**: 291-334, 5 Tab., 1 Beil.; München.
- (1985): Helicidenschichten und Albstein in der miozänen Vorlandmolasse Südwestdeutschlands. - *Jh. geol. Landesamt Baden-Württ.*, **27**: 41-92, 1 Abb.; Freiburg/Br.