Bemerkungen zur Verkarstung des Malms unter dem westlichen süddeutschen Molassebecken

Autor(en): **Villinger, Eckhard**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **54 (1988)**

Heft 127

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-211748

Nutzungsbedingungen

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

Haftungsausschluss

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

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

http://www.e-periodica.ch

Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing., Vol. 54, Nr. 127, Oktober 1988 - S. 41-59

Bemerkungen zur Verkarstung des Malms unter dem westlichen süddeutschen Molassebecken

Mit 6 Abbildungen und 2 Tabellen

von ECKHARD VILLINGER, Freiburg i. Br.*)

Zusammenfassung

Die Ergebnisse von weiteren Untersuchungen über Alter, Intensität und Reichweite der Verkarstung des Malms unter dem westlichen Teil des süddeutschen Molassebeckens entkräften die von LEMCKE (1987) vorgebrachten Argumente gegen die in VILLINGER (1986, 1987) beschriebene Entwicklung des Malm-Karsts. Der kretazische bis alttertiäre Paläokarst dürfte in diesem Gebiet meist keine grosse Tiefe erreicht haben. Dafür sprechen u.a. die Verteilung von Spülungsverlusten in Tiefbohrungen und die paläomorphologischen Verhältnisse. Ausserdem sind die Zementmergel (tiZ) praktisch in ganz Oberschwaben durchgehend verbreitet (Mächtigkeit 15-145 m). Eine Entstehung von Höhlen wie die Blautopfhöhle bei Blaubeuren ist zur Zeit des Paläokarsts hydrogeologisch nur schwer vorstellbar.

Summary

[Comments on the karstification of the Malm under the western molasse basin in South Germany]
The results from further investigations concerning the age, intensity, and range of the karstification of the Malm under the western part of the molasse basin in South Germany weaken LEMCKE's (1987) arguments against the Malm-Karst development described by VILLINGER (1986, 1987). Among other facts, the distribution of the mud circulation losses in deep bore-holes and the palaeomorphological conditions indicate that in this region, the Cretaceous to Lower Tertiary karstification most likely reached no great depth. Furthermore, the Zementmergel (tiZ) are distributed throughout Upper Swabia (15 — 145 m thick). The formation of caves such as the Blautopf cave near Blaubeuren during the Lower Tertiary is hydrologically practically inconceivable.

Résumé:

[Remarques sur la karstification du Malm sous le bassin molassique occidental d'Allemagne du Sud]
Les résultats des études ultérieures, portant sur l'âge, l'intensité et l'étendue de la karstification du Malm (Jura supérieur) reposant sous la partie occidentale du bassin molassique d'Allemagne du Sud, réfutent les arguments, que LEMCKE (1987) avait avancés contre les idées sur le développement du Malm-Karst, proposées par VILLINGER (1986, 1987). La karstification d'âge crétacé-paléotertiaire n'attendait pas de grandes profondeurs dans cette région. Plusieurs faits militent dans ce sens, entre autre la distribution des circulations perdues dans les forages profonds et les situations paléomorphologiques; de plus, les «Zementmergel (tiZ)» sont répandus sans lacunes dans toute la région de «Oberschwaben» avec une épaisseur variant entre 15 à 145 m. Un développement des cavernes, semblables à celle du «Blautopf» à Blaubeuren reste difficile à imaginer, en tenant compte de la situation hydrogéologique.

*) Anschrift: Dr. E. VILLINGER, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Albertstrasse 5, D-7800 Freiburg i.Br.

1. Einleitung

Die Frage nach Alter, Intensität sowie Reichweite der Verkarstung bzw. Verteilung der Wasserwegsamkeit des Malms unter dem süddeutschen Molassebecken hat in den letzten Jahren erheblich an Aktualität und Interesse gewonnen, seitdem die Nutzung der im Malm-Aquifer enthaltenen geothermischen Energie (BERTLEFF et al. 1988) zunehmend ins Blickfeld gerückt ist. Nachdem HASENMAYER (1986a, b) die Fortsetzung der Blautopfhöhle bei Blaubeuren entdeckt und beschrieben und daraus weitreichende, umstrittene Folgerungen hinsichtlich einer höhlenreichen Verkarstung des Malms unter dem Molassebecken sowie des geothermischen Energieinhalts darin gezogen hat, erreichte die Diskussion in Südwestdeutschland auch die breite Öffentlichkeit.

Die Beiträge von VILLINGER (1986, 1987) zu diesem Thema hat kürzlich LEMCKE (1987) in dieser Zeitschrift erwidert. Einige der dabei vorgebrachten Argumente und Darstellungen sollen nachfolgend kritisch beleuchtet werden. Vorab sei betont, dass sich die nachstehende Argumentation, wie auch die meiner beiden vorher zitierten Arbeiten, allein auf den Malm im Westteil des süddeutschen Molassebeckens bezieht, d.h. im Raum zwischen Hochrhein/Bodensee und etwa Iller. Sie gilt nicht unbedingt für das schweizerische und das nieder- bzw. oberbayerische Gebiet, weil hier die geologischen und landschaftsgeschichtlichen Verhältnisse grossenteils anders sind. Daher sind auch Erfahrungen aus dem Malm dieser Gebiete nicht ohne weiteres auf den Malm des oberschwäbischen Raumes übertragbar.

Den im Molassebecken tätigen Firmen BEB Erdgas und Erdöl GmbH (Hannover), Deutsche Schachtbau- und Tiefbohrgesellschaft mbH (Lingen) und Wintershall AG (Kassel) danke ich für das Einverständnis, ihre Bohrergebnisse mitverwenden zu dürfen. Die Übersetzungen der Zusammenfassung verdanke ich K. HEDIN und G. SAWATZKI; die Reinzeichnungen der Abbildungen fertigte J. CROCOLL.

2. Fragestellungen

Bei der Diskussion über die eingangs genannten Fragenkomplexe sind folgende Punkte besonders wichtig:

— Wie sind die beim Abteufen von Druckspülbohrungen (meist nach Erdöl bzw. Erdgas) im Malm häufig auftretenden Spülungsverluste zu bewerten?
— Welche Bedeutung haben bzw. hatten die den Malm-Aquifer (ki2-tiL) überlagernden Zementmergel und Hangenden Bankkalke für die Verkarstung?
— Welche Verbreitung und Mächtigkeit besitzen diese Schichten im Molassebecken?
— Gibt es Unterschiede in der Intensität und Verteilung der Verkarstungsanzeichen im Profil und in der Fläche?
— Ist eine Entstehung grosser Höhlen, wie z.B. der Blautopfhöhle, während des älteren Tertiärs hydrogeologisch möglich gewesen?

3. Bewertung von Spülungsverlusten

Nach LEMCKE (1987: 34) sind plötzliche bzw. ruckartige, vor allem aber totale Spülungsverluste beim Bohren in Karbonatgesteinen «i.a. sichere Hinweise für höhlenartig erweiterte Verkarstung». Schon die öfters registrierten totalen Spülungsverluste auch in Nichtkarbonatgesteinen des Molassebeckens zeigen, dass derartige Verluste auch in Verwerfungs- bzw. Spaltenzonen auftreten können. Anderenorts wurden starke Spülungsverluste sogar in grossen Tiefen im Grundgebirge beobachtet (SCHÄDEL & STOBER 1987: 20)

Ein überzeugendes Gegenbeispiel bietet aber vor allem der Obere Muschelkalk mit dem Trigonodus-Dolomit. In Oberschwaben und auf der angrenzenden Alb haben insgesamt 70 Druckspülbohrungen (grösstenteils der Erdölindustrie) diese Schicht durchfahren. Dabei traten in 20% aller Bohrungen totale und in weiteren 21% ruckartige, z.T. starke Spülungsverluste auf. Weitere Einzelheiten sind in Tabelle 1 angegeben. Abbildung 1 zeigt die räumliche Verteilung dieser Spülungsverluste. Der Obere Muschelkalk ist in diesem Gebiet nie einer Verkarstung ausgesetzt gewesen. Dies zeigt eindrücklich, wie «potent» Spalten- und Verwerfungszonen offenbar gerade in Karbonatgesteinen sein können, und zwar ganz ohne korrosionsbedingte Erweiterung.

Bei der Bewertung von starken Spülungsverlusten im Malm ist somit Vorsicht geboten. Eine «weitflächige, bis 200/300 m in den Malm hinreichende Verkarstung» (LEMCKE 1987:37) allein schon während der Kreidezeit lässt sich hinsichtlich ihrer Tiefenreichweite auf diese Weise, jedenfalls für das westliche süddeutsche Molassebecken, nicht schlüssig belegen.

Art der Spülungsverluste	Anzahl der Bohrungen
totale	14 (20%)
plötzliche	15 (21%)
schleichende	9 (13%)
keine Verluste	32 (46%)

Tab. 1: Spülungsverluste im Oberen Muschelkalk bei insgesamt 70 Druckspülbohrungen im westlichen süddeutschen Molassebecken und auf der benachbarten Schwäbischen Alb (grösstenteils nach den Bohrberichten von Erdöl-/Erdgasbohrungen).

Bessere Anzeichen für die Existenz von offenen Karsthohlräumen bilden das Durchfallen des Bohrmeissels über mehrere Meter und damit verbundene starke Spülungsverluste (z.B. Saulgau TB1, WERNER 1978:138): Abgesehen vom direkten Nachweis von Karsthohlräumen in Kernbohrungen (z.B. Saulgau GB3, BERTLEFF 1986:12f.; Erkundungsbohrungen bei Messkirch, KOERNER in ETZOLD et al. 1975:156) oder durch Fernsehbefahrungen im offenen Bohrloch (z.B. Wasserbohrungen Herlighof und Munderkingen, beide NE Riedlingen) ist schliesslich nur noch das Durchbohren von lehmerfüllten Kavernen hinsichtlich einer Verkarstung aussagekräftig. Selbst geophysikalische Bohrlochmessungen lassen eine klare Trennung zwischen Kluft- und Karstzonen im Gebirge meist nicht zu (vgl. ARNDT 1983).

In zahlreichen Bohrungen des gesamten Molassebeckens sind im obersten Abschnitt des Malms unter der Molasse Anzeichen für eine alttertiäre bis kretazische Verkarstung gefunden worden, die an und unter der damals nahezu 100 Mio. Jahre lang freiliegenden Landoberfläche im anstehenden Malm vor sich gegangen ist. Der Nachweis erfolgte weniger durch vereinzelte starke Spülungsverluste (s.Abschn. 4.3), sondern vor allem durch Karsthohlräume, die meist mit eingespültem Boluston plombiert sind (örtlich auch durch andere Sedimente). Im Westteil des süddeutschen Molassebeckens sind echte Spuren dieses «Paläokarsts» aber nur selten in Tiefen von mehr als etwa 80 m unter der Grenze Malm/Tertiär zu finden.

Strittig ist somit nicht die Tatsache einer vormolassischen Verkarstung im höheren Malm an sich, sondern deren Ausmass bzw. Reichweite zur Tiefe hin. Mit der von LEMCKE und mehr noch von HASENMAYER (1986 a, b) angenommenen intensiven, «höhlenartigen» Verkarstung sind, mindestens im westlichen süddeutschen Molassebecken, vor allem die in den folgenden Abschnitten dargelegten Beobachtungen nicht in Einklang zu bringen.

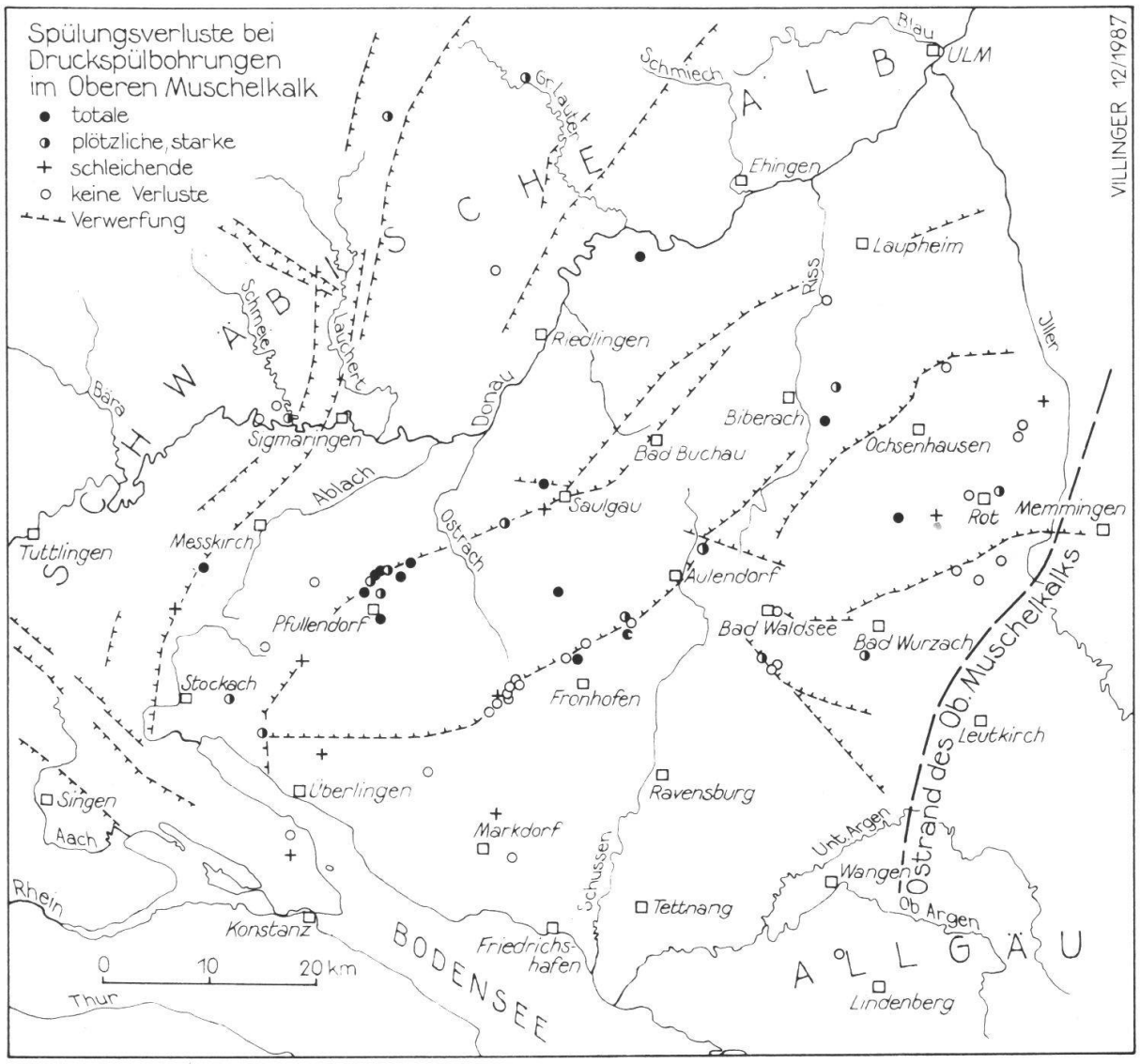


Abb. 1: Spülungsverluste im Oberen Muschelkalk beim Abteufen von Druckspülbohrungen im westlichen süddeutschen Molassebecken.

4. Zementmergel und Hangende Bankkalke

4.1 Verkarstung auf der Schwäbischen Alb

Im Gebiet der Schwäbischen Alb, und zwar in der Zone des Tiefen Karsts, umfasst das grosse, regionale Karstgrundwasserstockwerk grundsätzlich die Kimmeridge-Kalke (ki2-3) und die Liegenden Bankkalke (tiL). Die Hangenden Bankkalke (tiH) sind nur dort, wo sie — ohne Einschaltung von Zementmergeln (tiZ) — unmittelbar über den Liegenden Bankkalken folgen (ausserhalb von «Zeta-Schüsseln»), ebenfalls dem grossen Karstgrundwasserstockwerk zuzurechnen. Die Verkarstung der typischen, dünn- bis mittelbankigen Hangenden Bankkalke mit ihren mergeligen Zwischenlagen ist dabei meist weniger intensiv als die von Massenkalken. In der Tiefe unter dem grossen Karststockwerk bilden die klüftigen, jedoch nicht verkarsteten Oxford-Kalke (ox2) ein eigenständiges, wesentlich weniger ergiebiges, unteres Grundwasserstockwerk. Als Trennschicht zwischen beiden Stockwerken wirken die Kimmeridge-Mergel (ki1).

Die auf der Alb schon primär unregelmässig auftretenden und teilweise noch erhaltenen Zementmergel sind i.a. wenig wasserwegsam und nicht verkarstet (ausgenommen bei geringen Restmächtigkeiten mit oberflächennaher Auflockerung, in Kluftzonen und im Bereich eingeschalteter Zwischenkalke). Wo innerhalb bzw. über Zementmergeln bei nicht allzu geringer Verbreitung noch Zwischenkalke bzw. klüftige Hangende Bankkalke erhalten sind, bilden diese deshalb öfters kleine, über dem grossen Karststockwerk schwebende Grundwasserstockwerke, aus denen örtlich schwache Schichtquellen gespeist werden. Solche Verhältnisse sind seit langem von allen Teilen der Schwäbischen Alb beschrieben worden (u.a. SCHMIDT 1937:118, FRANK 1951:203, CARLE & PFEIFFER 1952:28, ANDRES & PFEIFFER 1955:36f., GROSCHOPF 1973:14, VILLINGER in GWINNER 1974 a: 78, WERNER 1974:83, APEL & VILLINGER 1978: 231, SCHLOZ 1984:23).

In der Zone des seichten Karsts, die auf der Schwäbischen Alb im wesentlichen deren Nordrand begleitet, sind die Verhältnisse anders: Die höchsten Tithon-Schichten sind fast gänzlich abgetragen, vor allem aber schliesst das grosse Karstgrundwasserstockwerk auch die hier partiell verkarsteten bzw. klüftigen Kimmeridge-Mergel und Oxford-Kalke mit ein. Erst die darunter liegenden Oxford-Mergel (ox1) sind als Sohlschicht des Karstgrundwassers wirksam. Im Seichten Karst der Schwäbischen Alb gibt es also grossräumig nur ein einziges Grundwasserstockwerk. Diese Dinge wurden bereits früher ausführlich dargestellt (VILLINGER 1972, 1977).

LEMCKE (1987:35) beruft sich bei seiner von diesen Darlegungen abweichenden Auffassung über die Rolle der Zementmergel bei der Verkarstung auch auf einen Satz von GEYER & GWINNER (1986:326), in dem die Hangenden Bankkalke «ausdrücklich dem Oberen Karstwasserstockwerk zugerechnet» werden. Wie jedoch aus dem oben Gesagten hervorgeht, trifft dieser Satz in dieser Form nicht zu.

4.2 Verbreitung im Molassebecken

Die Hangenden Bankkalke sind im gesamten Ablagerungsraum des schwäbischen Malms (Schwäbische Alb und Oberschwaben) ursprünglich als geschlossene «Decke von mindestens 150 m Mächtigkeit» verbreitet gewesen (SCHNEIDER 1957:86). Im Süden gehen sie in die helvetische Fazies der Quintner Kalke über. Die Zementmergel sind dagegen, wie erwähnt, im Bereich der heutigen Schwäbischen Alb nicht durchgehend, sondern in «Zeta-Schüsseln» abgelagert worden. Südlich einer etwa von Messkirch über Riedlingen nach Ulm verlaufenden Linie schliessen sich diese Schüsseln im oberschwäbischen Gebiet zu einem grossen, zusammenhängenden Zementmergelbecken zusammen. Dies deutete schon die Fazieskarte von MEYER (1981:Abb. 15) an.

LEMCKE (1987:35) schreibt demgegenüber, «die Zementmergel sind sehr verschiedenartig ausgebildet und durchaus nicht überall vorhanden». Während der erste Satzteil (mit Einschränkungen) zutrifft, gilt der zweite Teil nur für die Alb, keineswegs aber für den Hauptteil des westlichen süddeutschen Molassebeckens. Um dies zu belegen, wurden alle in diesem Raum niedergebrachten Tiefbohrungen (vornehmlich nach Erdöl/Erdgas) ausgewertet.

Soweit nicht schon von den Bearbeitern der einzelnen Bohrungen geschehen, konnte der höchste Malm mit Hilfe der geophysikalischen Bohrlochmessungen und unter Berücksichtigung der Spülprobenbeschreibungen untergliedert werden. Als besonders geeignet, die Zementmergel zu identifizieren, erwiesen sich dabei vor allem Gamma-Ray-Log, Electric- bzw. Widerstands-Log und Sonic-Log (bzw. BHC). Als Beispiel für diese Methode der Malm-Untergliederung hat VOLLMAYR (1971: Fig. 1, S.11 f.) die Erdöl-/Erdgasbohrung Pfullendorf 3 vorgestellt. Weitere Log-Interpretationen sind auch SCHNEIDER (1962: Beil. 3) zu entnehmen.

Wie auf der schwäbischen Ostalb sind im Osten bzw. Nordosten und im Südwesten Oberschwabens die Zementmergel durch die Einschaltung von Zwischenkalken in mehrere Teilabschnitte aufgespalten, weshalb sich insbesondere gegen die ebenfalls teilweise mergeligen Hangenden Bankkalke — wie auch anderenorts auf der Alb (z.B. GWINNER 1974 a:17) — manchmal keine klare Grenze ziehen lässt. In solchen Fällen können daher in den als Hangende Bankkalke abgegrenzten Schichten noch Teile der (oberen) Zementmergel erhalten sein (vgl. VOLLMAYR 1971:12). Vor allem deshalb sind in Abbildung 2 nur die genauer zu konstruierenden Isopachen für die Summe der Mächtigkeit von Zementmergeln und Hangenden Bankkalken dargestellt. Gebietsmächtigkeiten für die Zementmergel sind gesondert eingetragen.

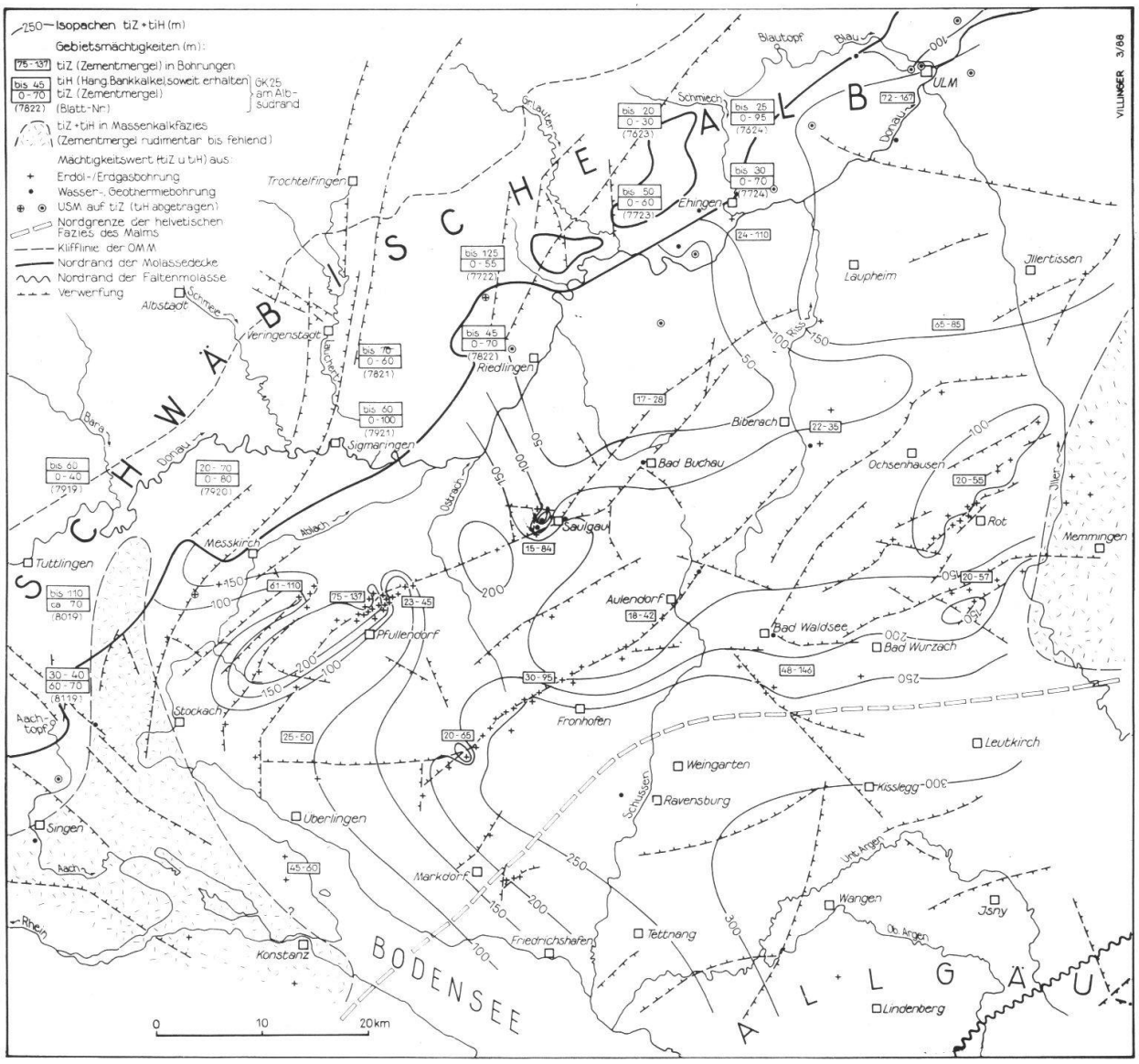


Abb. 2: Mächtigkeit der Überdeckung des Malmgrundwasserleiters (ki2-tiL) durch Zementmergel und Hangende Bankkalke (tiZ + tiH) im westlichen süddeutschen Molassebecken. Bei den zugrunde liegenden Einzelwerten der Mächtigkeit wurden Schichtausfallbeträge bei Verwerfungen, soweit bekannt, berücksichtigt. Nördlich etwa der Linie Messkirch — Riedlingen — Ulm löst sich die geschlossene Zementmergeldecke (tiZ) auf und ist primär nur noch in «Zetaschüsseln» ausgebildet. Die Mächtigkeitsangaben der Blattgebiete stammen aus BLOOS (1967), GOLWER (1978), GWINNER (1974, 1981), HAAG (1960), HAFNER (1969), HAHN (1968), HEIZMANN (1985), LILLICH (1962), SCHMIDT (1937), SCHREINER (1979 a,b). Tektonik und Nordgrenze der helvetischen Malmfazies entsprechen VILLINGER in BERTLEFF et al. (1988: Beil. 2 b). Im helvetischen Faziesbereich sind die Mächtigkeiten des Malms ab dem Mergelband aufwärts zugrundegelegt (vgl. VOLLMAYR 1971:12).

Etwa ab der Linie Bad Wurzach - Ochsenhausen nach Osten beginnen die Hangenden Bankkalke in die Massenkalkfazies überzugehen, ehe im Memminger Raum, etwa ab der Iller, davon auch die Zementmergel ergriffen werden, so dass diese nur noch rudimentär bzw. gar nicht mehr vorhanden sind. Dies ist der Ostrand des oberschwäbischen Zementmergelbeckens gegen die bayerische Ooid-Plattform (MEYER 1981:Abb.15), wo zumindest der höhere Malm durchgehend in Massenkalkfazies entwickelt ist. Im Nordosten erreicht der Ostrand des Zementmergelbeckens im Raum Günzburg die Donau. Im Südwesten schiebt sich im Raum Singen - Konstanz - Stockach - E Tuttlingen ein Riffgürtel, vom schweizerischen Gebiet ausgehend, nach Norden bis zur Donau vor (SCHREINER 1974:23ff.). In dessen Bereich verschwinden die Zementmergel ebenfalls weitgehend. Die Hangenden Bankkalke sind darüber hinausgehend nach Osten sogar bis etwa zur Linie Stockach - Markdorf teilweise in Massenkalkfazies ausgebildet. Im Bereich des Riffgürtels, wie im erwähnten Bereich östlich der Iller, besitzt dementsprechend der Malm-Grundwasserleiter (ki2-tiL bzw.-tiH) besonders hohe Mächtigkeiten (vgl. VILLINGER in BERTLEFF et al. 1988: Beil. 2 b).

Nach Süden zu gehen Zementmergel und Hangende Bankkalke ab etwa der Linie Markdorf — S Bad Waldsee — S Bad Wurzach in die rifffreie helvetische Fazies der Quintner Kalke über, wobei die stratigraphische Parallelisierung noch nicht sicher geklärt ist. Nach VOLLMAYR (1971:12) könnten die Zementmergel annähernd dem zwischen Oberem und Unterem Quintner Kalk eingeschalteten, 13 — 50 m mächtigen Mergelband entsprechen. Unter dieser Prämisse sind in Abbildung 2 die Mächtigkeitslinien bis in den helvetischen Faziesbereich hinein gezeichnet, wobei im Raum Wangen die in der Bohrung Opfenbach 1 erbohrten Zementsteinschichten über den Quintner Kalken (SCHNEIDER 1962) mit eingeschlossen sind.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in Oberschwaben zwischen den beiderseitigen Riffgebieten im Osten und Südwesten ein zusammenhängendes Zementmergelbecken existiert hat, das nach Süden in den Ablagerungsraum der Tethys übergegangen ist. Nach Nordosten, etwa ab dem Unterlauf der Iller, verliert das Becken rasch an Breite und löst sich schliesslich auf der östlichen Schwäbischen Alb auf. Die Mächtigkeiten der Zementmergel schwanken in diesem Becken zwischen 15 m (Thermalwasserbohrung Saulgau TB1) und rd 145 m S Bad Waldsee, i.a. liegen sie zwischen 25 und 80 m. Die Restmächtigkeiten der Hangenden Bankkalke betragen im molassebedeckten Bereich der schwäbischen Fazies meist zwischen etwa 50 und 100 m, mit Spitzenwerten bis 200 m im Fronhofer Gebiet. Im Randstreifen entlang dem offenen Karst, am Südrand der Schwäbischen Alb, sind die Hangenden Bankkalke dagegen praktisch durchweg abgetragen. Dort transgrediert die Untere Süsswassermolasse meist unmittelbar auf Zementmergel (Abb. 2).

Die Gesamtmächtigkeit von Zementmergeln und restlichen Hangenden Bankkalken reicht im schwäbischen Faziesraum Oberschwabens von 28 m (Wasserbohrung Herlighof NE Riedlingen) bis fast 270 m im Randstreifen entlang dem helvetischen Faziesbereich. Am häufigsten liegen die Werte zwischen 100 und 200 m (Abb. 2).

Dies macht deutlich, dass zwischen dem westlichen und dem östlichen Teil des süddeutschen Molassebeckens erhebliche Unterschiede in der Gesteinsabfolge des Tithons bestehen. Hinzu kommt, dass auch die Schichten des tieferen Tithons und Kimmeridges im östlichen Teil des Beckens durch eine wesentlich stärkere Beteiligung der «verkarstungsfreundlichen» Riffazies als im westlichen Teil gekennzeichnet sind (vgl. MEYER 1981:65ff).

4.3 Spülungsverluste im Molassebecken

Nach erfolgter Ausgliederung der Zementmergel und der Hangenden Bankkalke war es möglich, die in den insgesamt 133 abgeteuften Tiefbohrungen im höheren Malm des westlichen süddeutschen Molassebeckens beobachteten Spülungsverluste den einzelnen stratigraphischen Einheiten zuzuordnen. Nähere Einzelheiten und das Ergebnis der statistischen Betrachtung enthält Tabelle 2. Sie macht deutlich, dass im Bereich der schwäbischen Fazies bei den 3 Arten von Spülungsverlusten jeweils zwei Drittel bis über vier Fünftel aller Verluste im Grundwasserstockwerk ki2-tiL eingetreten sind. Dagegen sind in den Hangenden Bankkalken und in den Zementmergeln jeweils nur wenige Fälle von Verlusten zu verzeichnen, die zudem in einigen Fällen nachweislich an sicheren Störungszonen zu lokalisieren sind.

Art der Spülungsverluste	Anzahl der Spülungsverluste				
		schwäbische Fazies			helvet. Fazies
	ki2-tiL	tiZ	tiH	gesamt	Quintner Kalk
total	16 (67%)	3[1] (12%)	5 (21%)	24 (100%)	0
plötzlich	25 (86%)	1[1] (4%)	3 (10%)	29 (100%)	1[2]
schleichend	18 (64%)	4 (14%)	6 (22%)	28 (100%)	1
keine Verluste			55 Bohrungen		4 Bohrungen

1) jeweils bei mind. 1 Bohrung in einer Störungszone an der Basis der Zementmergel
2) in den Zementstein-Schichten

Tab. 2: Verteilung der Spülungsverluste im höheren Malm unter Molassebedeckung bei Druckspülbohrungen im westlichen süddeutschen Molassebecken. Zugrunde liegen insgesamt 133 Bohrungen, davon 6 im Bereich der helvetischen Malmfazies (Lage s. Abb. 3). Bei 7 Bohrungen erfolgten Spülungsverluste in zwei oder drei Schichtgliedern, weshalb die Gesamtzahl aller Spülungsverluste etwas grösser als die Zahl der Bohrungen ist. Die Angaben über Spülungsverluste bei Erdöl-/Erdgasbohrungen stammen grösstenteils aus den Bohrberichten der Erdölfirmen.

Diese Vormacht der Spülungsverluste in der Karbonatserie ki2-tiL kann zwar — wie im Abschnitt 3 beschrieben — nicht unbesehen allein als Ausdruck entsprechender Intensität der Verkarstung ausgelegt werden (zumal viele Hohlräume des Paläokarsts, vor allem in den Hangenden Bankkalken, mit Boluston usw. weitgehend plombiert sind und damit beim Durchbohren kaum mehr Spülungsverluste verursachen dürften). Dennoch lassen sich solche grossen Unterschiede zwischen den Einheiten mit der Vorstellung einer weitflächig mehrere hundert Meter tief in den Malm hinabgreifenden, «höhlenartigen» Verkarstung in der Kreide und im Alttertiär schwerlich vereinbaren: In diesem Fall wäre ein über das Profil wesentlich gleichmässiger verteiltes Auftreten von starken Spülungsverlusten zu erwarten. Damit relativiert dieser Befund auch die Aussage von LEMCKE (1987:35): «Bei so extrem langer Exposition wie hier, verkarstet schliesslich jeder Kalk, ob gebankt oder nicht».

Ähnliches gilt auch für die flächenmässige Verteilung dieser Spülungsverluste, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist. Die weitaus meisten starken Verluste scharen sich um die Verwerfungssysteme in der nordwestlichen Hälfte des Gebiets, während in der südöstlichen, offenbar verwerfungsärmeren Hälfte kaum mehr stärkere Spülungsverluste zu verzeichnen sind. Dies deutet auf die wichtige Rolle der Tektonik für die Wasserwegsamkeit im Malm, auch wenn die Fazies der Dolomite bzw. kavernösen Dedolomite (Lochfels) in diesem Zusammenhang noch grössere Bedeutung hat. Dies zeigen Bohrungen, bei denen trotz Durchfahren von Verwerfungen keine Spülungsverluste aufgetreten sind, weil keine Lochfels-Fazies entwickelt ist (z.B. die Geothermiebohrung Bad Waldsee, vgl. VILLINGER in BERTLEFF et al. 1988: Kap. 2.6).

Bei einer tiefgreifenden, alten Verkarstung des Malms im ganzen ehemaligen Festlandsgebiet bis zu den Alpen, wie sie LEMCKE annimmt, müssten hingegen starke Spülungsverluste sowie weitere der im Abschnitt 3 genannten Karstindizien auch flächen-

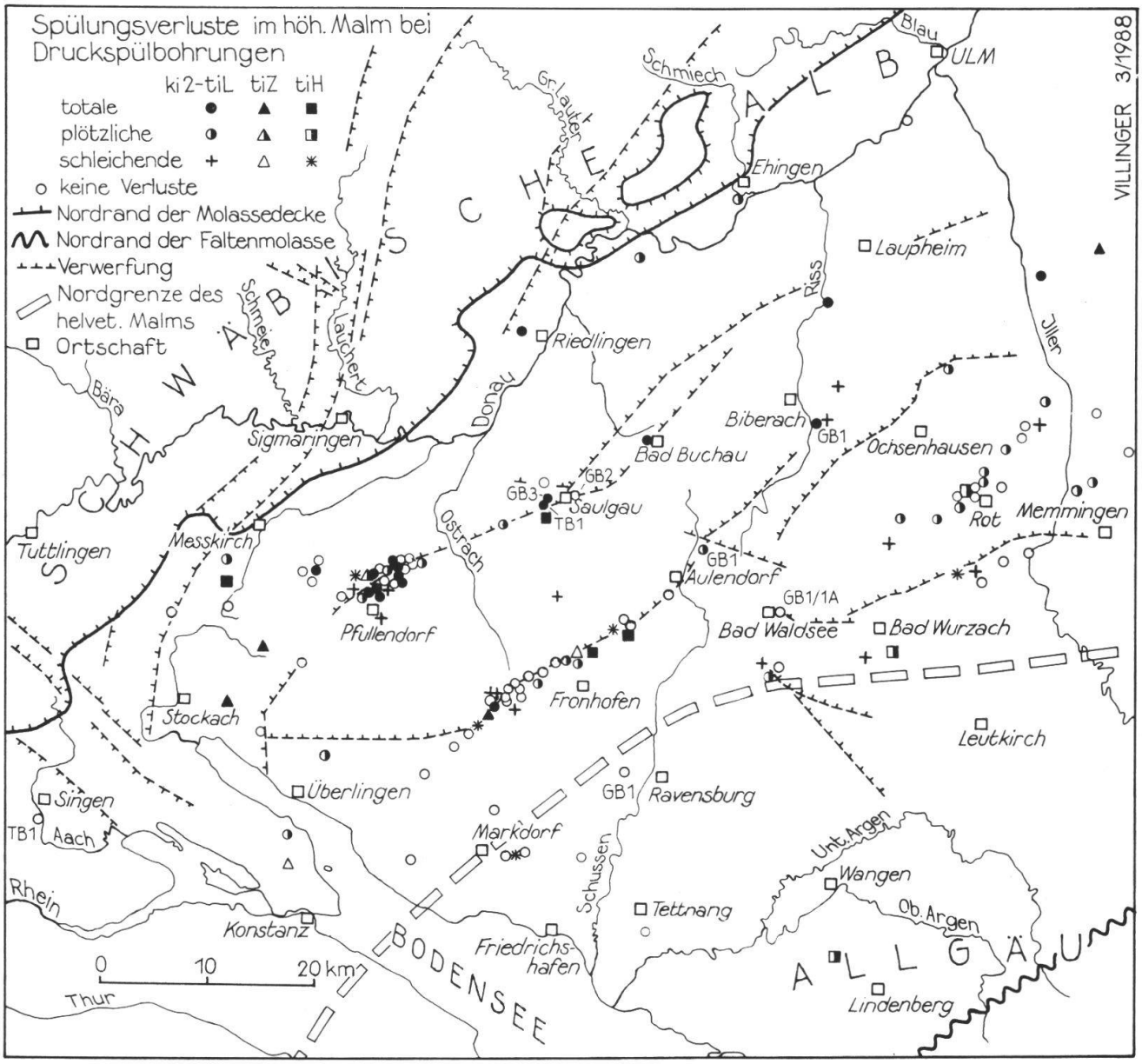


Abb. 3: Verteilung der Spülungsverluste in den stratigraphischen Einheiten des höheren Malms beim Abteufen von Druckspülbohrungen im westlichen süddeutschen Molassebecken. Weitere Einzelheiten siehe Text zu Tabelle 2.

haft ähnlich häufig vorkommen. Im höheren Malm der helvetischen Fazies waren statt dessen Spülungsverluste besonders spärlich (in 2 von 6 Bohrungen), was auf geringe Wasserwegsamkeit der Quintner Kalke hinweist. Dies führte z.B. zum Scheitern des Erschliessungsversuchs im Malm der Geothermiebohrung Ravensburg (Näheres s. VILLINGER in BERTLEFF et al. 1988: Kap. 2.5). Die in den Zementsteinschichten in der Bohrung Opfenbach 1 beobachteten starken, plötzlichen Spülungsverluste sind somit keineswegs ein Beweis für die Verkarstung dieser Schichten, sondern — entsprechend dem bisher Gesagten — viel eher auf lokale tektonische Spaltenzonen zurückzuführen. Gegen eine nennenswerte Verkarstung und damit Wasserwegsamkeit des Malms im Südteil von Oberschwaben sprechen auch isotopenhydrologische und hydrochemische Befunde (BERTLEFF 1986, PRESTEL in BERTLEFF et al. 1988: Kap. 3.3).

Die einzigen sicheren Spuren der alten Verkarstung unter der Molassedecke, die wirklich weitflächig auftreten, sind die Bolustone auf der Malm-Oberfläche und — allerdings selten mehr als etwa 80 m in den Malm hineinreichende — plombierte Lösungshohlräume. Wo die Hangenden Bankkalke ganz oder weitgehend abgetragen worden waren (entlang dem Beckennordrand), können derartige verfüllte Karstspalten und Kavernen örtlich auch bis in die Zementmergel reichen, wie dies z.B. in der Thermalwasserbohrung Bad Buchau festgestellt wurde (STRAYLE in BERTLEFF et al. 1988: Kap. 2.2). Demgegenüber waren in Kernbohrungen bei Messkirch die Zementmergel nicht verkarstet (KOERNER in ETZOLD et al. 1975: 156).

4.4 Folgerungen für die Verkarstung

Summa summarum lässt sich feststellen, dass die mächtige Decke aus Zementmergeln plus Hangenden Bankkalken, in Verbindung mit den paläogeographischen bzw. paläohydrologischen Verhältnissen (s. dazu Abschn. 5), im grössten Teil des westlichen süddeutschen Molassebeckens nicht nur die Entstehung eines bis in die Karbonatserie ki2 — tiL reichenden Grundwasser-Zirkulationssystems, sondern auch deren Verkarstung von der prämolassischen, nur schwach über das Meer ansteigenden Landoberfläche aus weitgehend verhindert haben muss. Dies um so eher, als die meisten tektonischen Brüche und Spaltenzonen als Wegbereiter der Verkarstung im westlichen süddeutschen Molassebecken erst im mittleren oder jüngeren Tertiär entstanden sind.

Dies gilt nicht gleichermassen für das höhergelegene Gebiet der Alb, wo die Zementmergel schon primär unregelmässig auftreten und zudem bis zum Alttertiär vielfach wieder abgetragen waren: Hier dürften erste kleinere Karstgrundwassersysteme entstanden sein, die im Gebiet der westlichen mittleren Alb und der Westalb wohl auch zu Karstquellen entwässert haben, welche im Südosten am Rand der dort einsetzenden, geschlossenen tiZ + tiH-Decke ausgetreten sein dürften. Solche Quellen mögen später zur Entstehung der Süsswasserkalke an der USM-Basis beigetragen haben, ähnlich wie es LEMCKE (1987: 39) sieht. Hinsichtlich der auf der östlichen Alb zu vermutenden Verhältnisse sei auf das folgende Kapitel verwiesen.

Keine wesentliche Rolle mehr gespielt haben diese «Deckschichten» des Malm-Grundwasserleiters im schwäbischen Molassebeckens erst — allerdings nur im Nordteil —, nachdem sich (Aare-) Donau und Hochrhein, vor allem im Pliozän nach dem Ende der Molassezeit tief in die Malmtafel, und zwar bis unter die Zementmergel, einzuschneiden begonnen hatten. Dadurch muss für das bis dahin vorflutlose, unter der Molassedecke praktisch ruhende, thermale Grundwasser in den Klüften der Karbonatserie ki2-tiL mit seiner hochliegenden, vielleicht sogar teilweise überflurgespannten Druckfläche ein beträchtliches Gefälle zu diesen neuen Vorflutern entstanden sein. Das hat sicherlich Fliessvorgänge dorthin ausgelöst, zunächst in der Umgebung dieser Flüsse,

später nach und nach weitere Bereich erfassend. Durch das vom inzwischen wieder teilweise freigelegten Karst her nachströmende kühle, CO2-reiche Grundwasser konnten damit einhergehend allmählich Verkarstungsvorgänge auch unter der Molassedecke einsetzen. Im einzelnen ist jedoch nicht geklärt, welche der verschiedenen Korrosionsmechanismen bei dieser tiefphreatischen Verkarstung wie mitgewirkt haben (Einzelheiten s. VILLINGER 1986: 350). Die primär höheren Wasserwegsamkeiten entlang den seit etwa Miozän entstandenen Verwerfungszonen dürften jedenfalls eine wesentliche Rolle als Wegbereiter für die Korrosion gespielt haben.

Auf diese Weise dürfte die Karbonatserie ki2-tiL zunächst im Gebietsstreifen zwischen der Donau und der Linie Singen - Saulgau - Laupheim, wo die Pfullendorf-Saulgauer Störungszone, im Südwesten auch andere Verwerfungssysteme (vgl. Abb. 2) verlaufen, von der jungen Verkarstung erfasst worden sein. Danach und in stark eingeschränktem Masse geschah dies vielleicht auch noch im südlich anschliessenden Gebietsstreifen bis etwa zur Linie Überlingen — Fronhofen — Rot. a.d.Rot, wo ebenfalls Störungszonen den Malm durchschlagen. Südlich davon ist — wie oben beschrieben — mit keiner nennenswerten Verkarstung mehr zu rechnen.

Eine Reaktivierung von noch offenen Hohlräumen des Paläokarsts durch die junge Verkarstung ist auf der Alb und entlang dem Beckennordrand dort denkbar oder sogar wahrscheinlich, wo die Restmächtigkeiten der tiZ + tiH-Decke unter der Molasse sehr gering sind (Abb. 2), und wo der ganze höhere Malm aus Massenkalken besteht. Hier konnte schon die alte Verkarstung in die tiefere Karbonatserie vordringen; im Südwesten auch deshalb, weil die Hebung des Gebiets weiter fortgeschritten war.

Anders dagegen in Südostbayern: Infolge der dort schon im Malm bzw. in der Unterkreide einsetzenden starken tektonischen Beanspruchung des Malms (mit Vertikalbewegungen von mehreren hundert Metern, UNGER & SCHWARZMEIER 1987: 7,10), konnte offenbar bereits die kretazische bis alttertiäre Verkarstung tief in den Malm hinabgreifen (LEMCKE 1981: 57; 1987: 34).

5. Zur Frage einer prämolassischen Höhlenbildung am Beispiel der Blautopfhöhle

LEMCKE (1987: 42f.) stützt die These von HASENMAYER (1984, 1986 b), wonach eine von der Landoberfläche aus tiefreichende Verkarstung schon im älteren Tertiär soweit fortgeschritten gewesen sei, dass damals, vor 25 — 30 Mio. Jahren, neben vielen anderen Höhlen auch die Blautopfhöhle bei Blaubeuren entstehen konnte. Ergänzend zur Darstellung in VILLINGER (1987: 90f.) sei deshalb auf die damals anzunehmenden hydrogeologischen Verhältnisse in diesem Teilgebiet nochmals genauer eingegangen.

Die Küste des Rupel-Meeres als Vorflut für ein etwaiges, die Höhle bildendes Karstgrundwasser im Malm lag ungefähr 60 km von Blaubeuren entfernt im Südosten (Abb. 4 nach LEMCKE 1977: Abb. 4). Unterstellt ist dabei, dass eine Grundwasserströmung am ehesten etwa in Richtung des Schichtfallens erfolgt sein dürfte. Vom Meer stieg die Landoberfläche der leicht schief gestellten Albtafel nach LEMCKE (Vortrag am 25.10.1986 in Laichingen) um durchschnittlich nur 0,1 - 0,2% nach Nordwesten an. Nimmt man den höheren Wert, hatte sie also bei Blaubeuren eine Höhe von 120 m ü.NN. Ungefähr 5 Mio. Jahre später transgredierte die Untere Süsswassermolasse (USM) auf die Alb. Ihre Sedimente liegen heute in Blaubeuren-Seissen ziemlich genau 200 m über der Blautopfhöhle auf Liegenden Bankkalken. Nimmt man einen Flurabstand der Grundwasseroberfläche von damals vielleicht 10 - 20 m an (wofür u.a. sedimentologische Indizien in Bolustonen sprechen könnten) und stellt man für die 5 Mio.

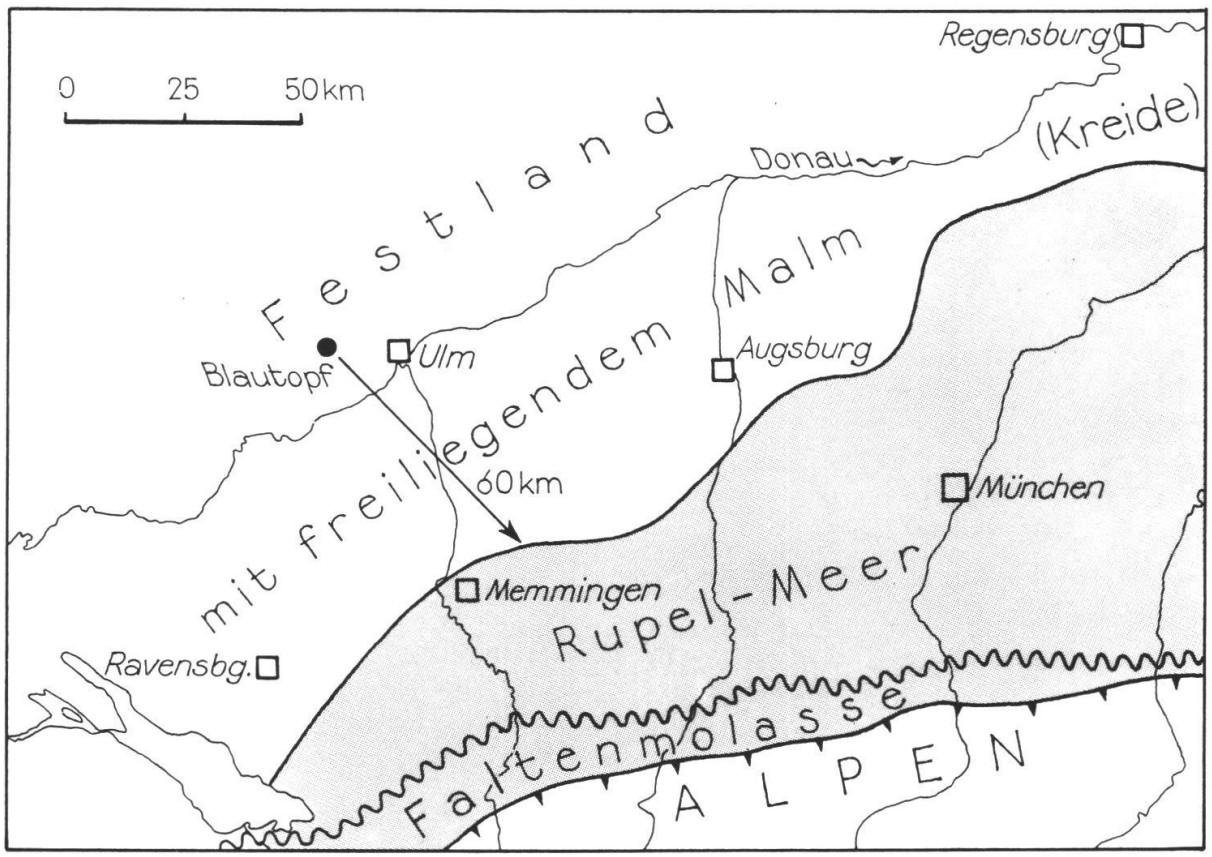


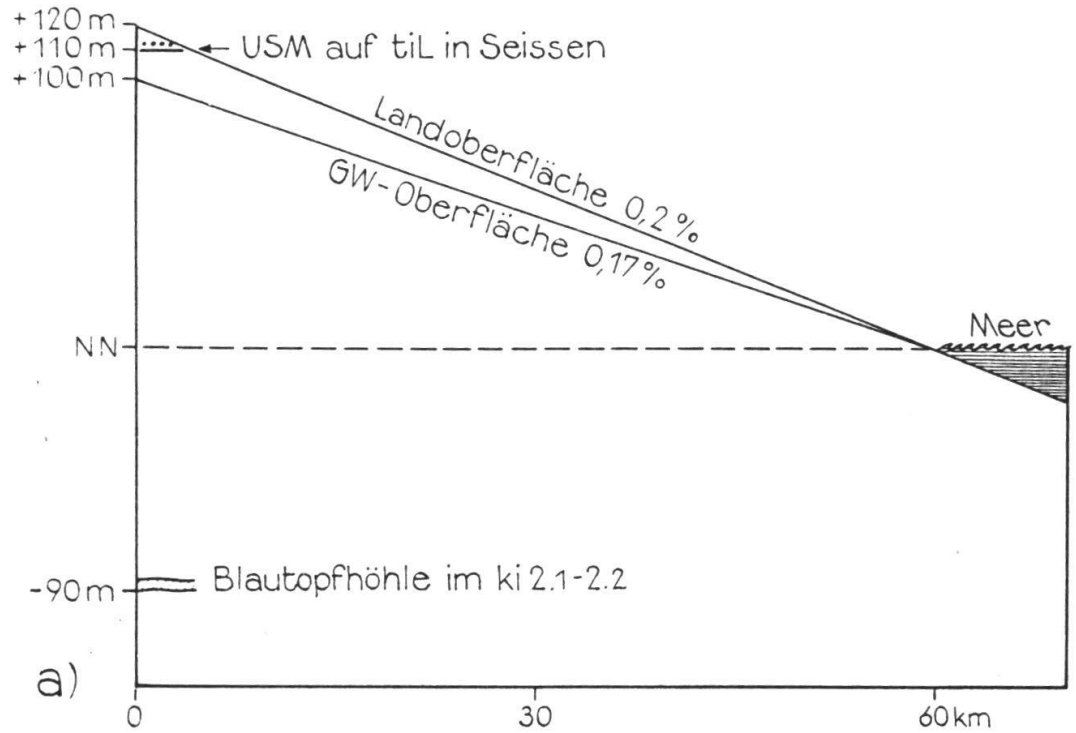
Abb. 4: Land und Meer im Mitteloligozän (Rupel), vor etwa 30 Mio. Jahren (nach LEMCKE 1977: Abb. 4). Eine schon damals entstehende Blautopfhöhle hätte eine Entfernung von wenigstens 60 km (Luftlinie!) bis zum Vorfluter Meer überwinden müssen.

Jahre noch eine Landabtragung von wenigstens 10 m in Rechung[1)], so hätte die Blautopfhöhle in einer Tiefe von 180 — 190 m unter der Grundwasseroberfläche bzw. 90 m unter dem Niveau des Meeresspiegels entstehen müssen (Abb. 5a). Dies war sicherlich nicht möglich. Verdoppelt man vorsichtigerweise den durchschnittlichen Anstieg der Landoberfläche auf 0,4%, bei sonst gleichen Annahmen wie oben, so wäre die Blautopfhöhle 30 m über dem Meeresniveau entstanden, was ein Gefälle zum Meer von nur 0,05 % bedeuten würde (Abb. 5b).[2)]

Abbildung 6 zeigt den Versuch eines paläogeologischen Schnitts, der von einer postulierten alttertiären Blautopfhöhle parallel zur mutmasslichen Grundwasserströmungsrichtung nach Südosten zum Rupel-Meer verläuft. Unterstellt wurde dabei eine mittlere Neigung der Landoberfläche von 0,4%, wie in Abbildung 5b skizziert. Mit den gleichen Annahmen bezüglich der USM-Auflagerung und den dementsprechend «eingehängten» Bohrungen entlang der Schnittlinie ergibt sich das dargestellte Bild: die Füllung des ehemaligen Zementmergelbeckens der Jura-Zeit ist tief eingesenkt in die Massenkalke, Dolomite und Dedolomite des Kimmeridges und Tithons, die im Nordwesten (Alb) und Südosten (Ooid-Plattform) grosse Mächtigkeiten erreichen. Von der Land-

1) Abgeschätzt nach dem für die Abtragung von mindestens 200 m tiZ + tiH benötigten Zeitraum von 100 Mio. Jahren seit Ende der Jurazeit.

2) Bei den in VILLINGER (1987:91) genannten Gefällswerten sind die versehentlich hinzugefügten %-Zeichen zu streichen. Richtig sind die Zahlen nur in Dezimal-Schreibweise.



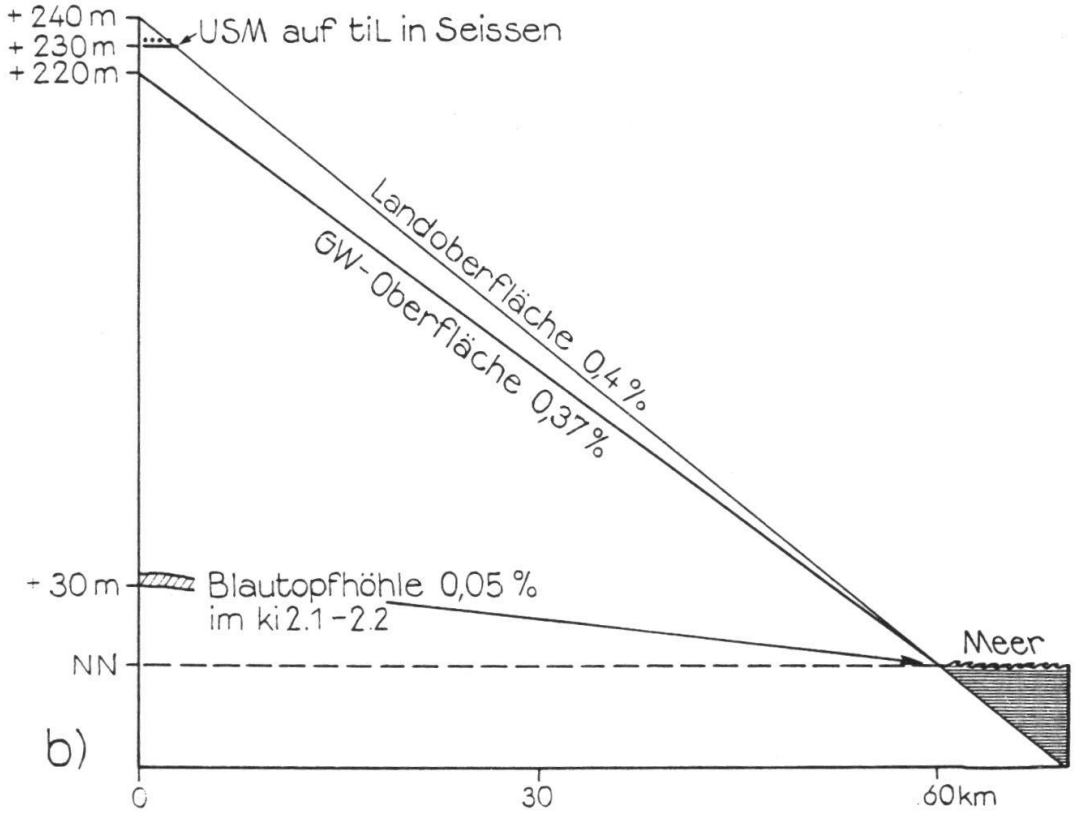


Abb. 5: Schematische Skizzen zur Situation einer etwaigen Blautopfhöhle vor etwa 30 Mio. Jahren (Rupel, Mitteloligozän), vor dem Vorstoss der Unteren Süsswassermolasse (USM) bis auf die Alb.

a) Bei einem durchschnittlichen Gefälle der Landoberfläche von 0,2% hätte die Höhle weit unter dem Meeresspiegel entstehen müssen.

b) Bei einem durchschnittlichen Gefälle von 0,4% hätte die Höhle nur ein Gefälle von 0,05% zum Vorfluter Meer gehabt.

Die Blautopfhöhle liegt rd. 200 m unter dem Auflageniveau der USM in Seissen auf dem Malm (tiL).

oberfläche her ist die Verkarstung etliche Zehner Meter, örtlich vielleicht bis über 80 m tief in den Malm vorgedrungen. Eine Blautopfhöhle zur damaligen Zeit hätte sich von ihrem Niveau an der Basis der Kimmeridge-Kalke bei Blaubeuren (ca. 30 m ü.NN) auf dem Weg zum Vorfluter, zur Meeresküste in ca. 60 km Entfernung, schräg durch die gesamte Schichtenfolge des höheren Malms und darin vor allem durch die «Plombe» aus Zementmergel-Schichten hindurch entwickeln müssen. Dieser Weg ist hydrogeologisch nicht vorstellbar, zumal eine tektonische Auflockerung des Malms in diesem Gebiet — wie erwähnt — nicht vorhanden gewesen sein dürfte.

Vergleiche mit dem erdgeschichtlich jungen Karstsystem Donau-Versinkung-Aachtopf gehen fehl, obwohl hier das Donauwasser auf seinem 11,7 km langen Fliessweg von Immendingen zum Aachtopf (mittleres Gefälle ca. 1,3‰) alle Malm-Schichten vom Oxford-Kalk (ox2) bis zu den Liegenden Bankkalken (tiL) durchströmt: Das Wasser benützt tektonisch vorgezeichnete Wege entlang zahlreicher, in Fliessrichtung verlaufender Verwerfungen und Spaltenzonen (VOGELSANG & VILLINGER 1987). Infolge der geringen Gesamthärte des versickernden Donauwassers (um 3,5 mval/1) — und nicht durch vulkanogene Kohlensäure, wie LEMCKE (1987:40) meint — konnten diese Zonen korrosiv zu regelrechten unterirdischen Abflussbahnen, teilweise mit Höhlencharakter wie am Aachtopf selbst, erweitert werden.

Denkbar ist hingegen ein grösseres Zirkulationssystem von Grundwasser innerhalb der Karbonatserie ki2-kiL, das von der östlichen mittleren Alb und der Ostalb her (Ausstrichbereich dieser Schichten, s. Abb. 6) gespeist und unter der in diesem Raume nur noch relativ schmalen tiZ + tiH-»Plombe» hindurch, nach Südosten auf die Meeresküste im Bereich der Ooid-Plattform ausgerichtet gewesen sein könnte. In diesem

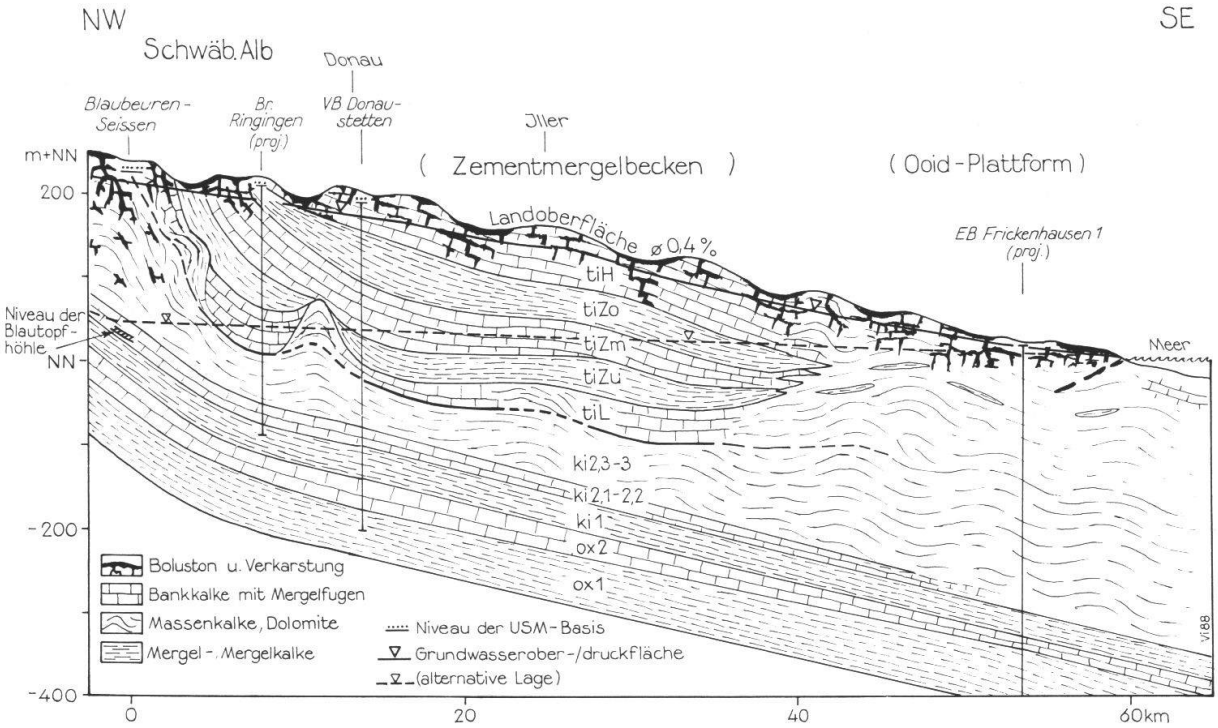


Abb. 6: Versuch eines geologischen Schnittes parallel zum Schichtfallen von der Schwäbischen Alb bei Blaubeuren zum mitteloligozänen Rupel-Meer, bei Annahme einer mit durchschnittlich 0,4‰ nach Nordwesten ansteigenden Landoberfläche. Die verwendeten Bohrungen (EB Frickenhausen 1 nach JERZ & WAGNER 1978: 110) sind so eingesetzt, dass die rupelzeitliche Landoberfläche etwa 10 m über der etwas jüngeren und deshalb wohl weiter abgetragenen Auflagefläche der USM liegt. Es wurden keine tektonische Störungen angenommen, da die Bruchtektonik i.a. erst später eingesetzt hat.

System sind auch prämolassisch schon erste korrosive Klufterweiterungen bis unter den Nordwestrand der «Plombe» zu vermuten. Dass aber der für eine Höhlenbildung 180 - 190 m unter der Grundwasseroberfläche notwendige Grundwasserumsatz erreicht worden sein könnte, erscheint angesichts von deren geringem Gefälle von 0,17% bzw. 0,37% (s. Abb. 5), ziemlich unwahrscheinlich.

Gerade wegen des erforderlichen grossen Wasserumsatzes und des damit verbundenen Korrosionspotentials entstehen derartige Höhlen bekanntlich in erster Linie im Schwankungsbereich der Grundwasseroberfläche oder wenig tiefer (und allenfalls noch an der die Korrosion fördernden Süss-/Salzwassergrenze nahe der Meeresküste: angedeutet in Abb. 6). Bei einer prämolassischen Entstehung der Blautopfhöhle nahe der Grundwasseroberfläche hätte die Höhle Folglich etwa 210 m unter der Landoberfläche gelegen, was wiederum für letztere einen Anstieg von mindestens 0,35% verlangt, damit die Grundwasseroberfläche überhaupt ein Gefälle zum Meer hätte haben können. Dieses wäre also auf jeden Fall äusserst gering gewesen, was die bereits geschilderten Folgen hinsichtlich des Grundwasserumsatzes und der geologischen Bedingungen auf dem Fliessweg in weit höherem Mass mit sich gebracht hätte. Höhlenbildung ist also auch in diesem Fall eher unwahrscheinlich. Die in diesem Raum von der Alboberfläche herkommende Anfangsverkarstung der Karbonatserie ki2-tiL dürfte später durch die pliozäne und quartäre Hauptverkarstung überprägt und weitergeführt worden sein. Die Argumente für eine Entstehung der Blautopfhöhle während des Pleistozäns sind ausführlich in VILLINGER (1987: Kap. 4.2) beschrieben.

Zur Erklärung «für die ausserordentliche Erweiterung von Karsthöhlen», insbesondere der grossen Dimensionen der Blautopfhöhle zieht LEMCKE (1987:40) Kohlensäure aus dem Uracher Vulkangebiet heran. Für diesen — unabhängig von der Altersfrage — durchaus diskutablen Mechanismus spreche, neben dem Dolinenreichtum dieses Gebietes, eine «Häufung bedeutender Karstquellen und -höhlen am SE-Rand des Vulkangebietes». Hierzu ist allerdings anzumerken, dass eine derartige Häufung von Quellen und Höhlen nicht vorhanden ist. Für die Quellen zeigt dies ein Blick auf die karsthydrologischen Übersichtskarten in VILLINGER (1977: Taf. 1) und APEL & VILLINGER (1978:223), für die Höhlen die Kartenübersichten in BINDER (1977). Bei der Kohlensäure-Theorie bleibt auch nicht verständlich, warum nur die vom eigentlichen Uracher Vulkangebiet rd. 20 km entfernte Blautopfhöhle von der Kohlensäure so stark erweitert worden sein soll, wo doch im gesamten sonstigen Vulkangebiet keine karsthydrologisch signifikanten Spuren eines Kohlensäureaufstiegs in Form übermässiger Verkarstung erkennbar sind.

6. Anmerkungen zur Hydraulik des Malm-Grundwassers im Molassebecken

Zu der von LEMCKE (1987: Abb. 5) gegebenen Darstellung der Grundwasser-Druckfläche des Malm-Aquifers unter dem süddeutschen Molassebecken ist folgendes zu bemerken:

Im westlichen Teil des Beckens wurde das Potentiallinienbild seit den ersten Bearbeitungen durch LEMCKE (1976: Fig. 1) und VILLINGER (1977: Abb. 6) mehrfach fortgeschrieben, zuletzt in VILLINGER (1986: Abb. 9). Eine erneut aktualisierte Darstellung mit nennenswerten Änderungen vor allem im Bodensee-Hochrhein-Gebiet ist bei VILLINGER in BERTLEFF et al. (1988: Abb. 9) enthalten. Im östlichen Drittel des Beckens haben bereits ANDRES & FRISCH (1981: Beil. 1) erhebliche Veränderungen vorgenommen, die neuerdings von FRISCH & STIER (1988: Abb. 3) dem aktuellen Stand eines derzeit laufenden Forschungsvorhabens angepasst worden sind (vgl. WERNER 1987:

Abb. 3). Dies betrifft vor allem die Lage des Austrittsbereiches für das zur Donau strömende Malm-Grundwasser: Während er früher im Durchbruchstal der Donau zwischen Kelheim und Regensburg vermutet wurde, mehren sich schon seit einiger Zeit die Argumente für einen Aufstieg des Malm-Grundwassers in oberflächennahe Aquifere entlang der Donau im Straubinger Raum.

Bei der Erörterung einer eventuellen Nutzung des thermalen Malm-Grundwassers geht LEMCKE (1987:44) davon aus, dass ein «Ersatz von etwa entnommenem Karstwasser durch Nachfliessen von der Alb oder der Donau nicht zu erwarten ist». Dies passt nicht recht zu der Ansicht einer intensiven und tiefreichenden Verkarstung des Malms, insbesondere entlang den vermuteten altkretazischen und alttertiären Entwässerungsrichtungen. Wäre die Verkarstung und damit die Wasserwegsamkeit des Malms überall so gross, dann wäre eine Regeneration von gefördertem Thermalwasser durch starken Zustrom kühlen Wassers aus dem unbedeckten Karst auf diesen alten Fliesswegen zu erwarten.

Tatsächlich haben Modellrechnungen für den Bereich der oberschwäbischen Thermalwasser- bzw. Geothermiebohrungen Saulgau, Bad Buchau, Jordanbad/Biberach und Aulendorf gezeigt, dass bei jahrzehntelanger Förderung riesige Druckabsenkungsmulden entstehen werden (MICHEL et al. im Abschlussbericht Saulgau 1985 : 304ff.). Zu ihnen hin wird allmählich, z.T. unter der Donau hindurch, innerhalb des Aquifers seitlicher Zustrom vom offenen Karst her einsetzen, weil in diesem nördlichen, donauparallelen Gebietsstreifen der Malm — wie erwähnt — verkarstet und wasserwegsam ist (obwohl keine grösseren Höhlen anzunehmen sind). Zum Stand der anderen bisher vorliegenden Erkenntnisse aus der geothermischen Prospektion im westlichen süddeutschen Molassebecken sei auf BERTLEFF et al. (1987, 1988) verwiesen.

7. Ergebnis

Die weiteren Untersuchungen im Malm des westlichen süddeutschen Molassebeckens, teils ausgeführt im Rahmen des Forschungsvorhabens «Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malm-Karsts im süddeutschen Molassebecken» (WERNER 1987), teils ausgelöst durch die Ausführungen von LEMCKE (1987), geben keinen Anlass zu wesentlichen Änderungen an dem in VILLINGER (1986, 1987) beschriebenen Modell der Entwicklung des Malm-Karsts in Südwestdeutschland. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass im westlichen süddeutschen Molassebecken die alte, oberirdische, kretazische bis alttertiäre Verkarstung im allgemeinen nicht die von LEMCKE vermutete Intensität (Höhlenreichtum) und Reichweite zur Tiefe hin gehabt haben dürfte. Dafür sprechen in erster Linie die Verteilung der Spülungsverluste in Tiefbohrungen, die Verbreitung und Mächtigkeit der Zementmergel und Hangenden Bankkalke sowie die mutmasslichen paläomorphologischen und paläohydrogeologischen Verhältnisse.

Die das thermale Grundwasserstockwerk bildenden Karbonatgesteine des Kimmeridges und der Liegenden Bankkalke (ki2-tiL) haben eine tiefphreatische Verkarstung im wesentlichen erst ab dem Pliozän erlebt, jedoch nur im Nordteil des Gebietes und bevorzugt in den Massenkalken und Dolomiten/Dedolomiten der Schwamm-Algen-Riffe.

Von der östlichen mittleren und der Ostalb ausgehend, könnte sich zwar schon prämolassisch ein grösseres Zirkulationssystem des Grundwassers in der Karbonatserie des höheren Malms, unter der dort nur schmalen Füllung des ehemaligen Zementmergelbeckens hindurch, zur Meeresküste im Südosten entwickelt haben. Eine prämolassi-

sche Entstehung z.B. der Blautopfhöhle ist darin aber aus hydrogeologischen Gründen ziemlich unwahrscheinlich. Dies ist zu folgern aus der paläomorphologischen Situation, der daraus abzuleitenden Tiefenlage der Höhlen unter der Grundwasseroberfläche, dem geringen Gefälle zur Vorflut und aus den geologischen Verhältnissen auf dem infrage kommenden Fliessweg des Grundwassers zur Vorflut.

Schriftenverzeichnis

ABSCHLUSSBERICHT Geothermisches Demonstrationsprojekt Saulgau (1985).— Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forsch. bericht 03 E-4404-A: 354 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Bonn.

ANDRES, G. & FRISCH, H. (1981): Hydrogeologie und Hydraulik im Malmkarst des Molassebeckens und der angrenzenden Fränkisch-Schwäbischen Alb.- In: Die Thermal- und Schwefelwasservorkommen von Bad Gögging.- Schriftenr. Bayer. Landesamt f. Wasserwirtsch., 15:108-117, Abb. 48, 1 Beil.; München.

ANDRES, G. & PFEIFFER, D. (1965): Erläuterungen zu Blatt Augsburg.- Hydrogeol. Übersichtskarte 1:500000: 154 S., 13 Abb., 39 Tab., 1 Beil.; Remagen.

APEL, R. & VILLINGER, E. (1978): Die Schwäbisch-Fränkische Alb und ihr nördliches Vorland.- In: Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, Textband: 222-235, 3 Abb., 3 Tab.; Boppardt.

ARNDT, M. (1983): Erkennung von grundwasserführenden Klüften und Karsthohlräumen bei Tiefbohrungen mit Hilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen am Beispiel der Thermalwasserbohrung Saulgau TB-3/Oberschwaben. - Dipl.-Arb. Univ. Freiburg: 97 S., 19 Abb., 6 Tab., zahlr. Anl.; Freiburg i.Br. (unveröff.)

BERTLEFF, B. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens. - Abh. geol. Landesamt Baden-Württ., 12:1-271, 64 Abb., 15 Tab., 8 Anl.; Freiburg i. Br.

BERTLEFF, B., HAMMER, W., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E. & WERNER, J. (1987): Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. Eine Übersicht.-Z. dt. geol. Ges., 138: 411-423, 8 Abb., 1 Tab.; Hannover.

BERTLEFF, B., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., LEIBER, J., OHMERT W., PRESTEL, R., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E. & WERNER, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg.-Jh. geol. Landesamt Baden-Württ., 30: 27-116, 30 Abb., 6 Tab., 1 Taf., 2 Beil.; Freiburg i.Br.

BINDER, H. (1977): Höhlenführer Schwäbische Alb.- 200 S., 15 Abb., 30 Bilder, zahlr. Kärtchen; Stuttgart-Aalen (Theiss).

BLOOS, G. (1967): Über Jura und Tertiär im Gebiet von Ehingen/Donau (Baden-Württemberg).-Jber. Mitt. oberrh. geol. Ver., N.F. 49: 75-115, 8 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.

CARLE', W. & PFEIFFER, D. (1952): Erläuterungen zu Blatt Stuttgart.-Hydrogeol. Übersichtskarte 1:500000:70 S., 8 Abb., zahlr. Tab., 1 Beil.; Remagen.

ETZOLD, A., HAHN, W. & KOERNER, U. (1975): Keuper, Jura und Tertiär in Bohrungen der Planungsgemeinschaft BN-Stollen zwischen Bodensee und Neckar.-Jh. geol. Landesamt Baden-Württ., 17: 89-255, 13 Abb., 1 Taf.; Freiburg i.Br.

FRANK, M. (1951): Der Wasserschatz im Gesteinskörper Württembergs.- VIII + 252 S., 31 Abb., zahlr. Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).

FRISCH, H. & STIER, P. (1988): Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im Süddeutschen Molassebecken. Teilprojekt Geohydraulik und Grundwasserhaushalt.-Statusreport 1988 Geotechnik und Lagerstätten: 235-246, 4 Abb.; Jülich.

GOLWER, A. (1978): Erläuterungen zu Blatt 7821 Veringenstadt.- Geol. Karte Baden-Württ. 1:25000: 151 S., 9 Abb., 10 Tab., 8 Taf., 5 Beil.; Stuttgart.

GROSCHOPF, P. (1973): Geologischer Bau.- In: Der Stadt- und der Landkreis Ulm: 5-37, 6 Abb., 6 Tab.; Stuttgart.

GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. (1986): Geologie von Baden-Württemberg.- 3. völlig neubearb. Aufl.: 472 S., 254 Abb., 26 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).

GWINNER, M.P. (1974 a) mit Beiträgen von E. VILLINGER und O. MÄUSSNEST: Erläuterungen zu Blatt 7522 Urach.- Geol. Karte Baden-Württ. 1:25000: 102 S., 8 Abb., 3 Tab., 4 Taf., 1 Beil.; Stuttgart.

— (1974 b): Oberer Jura.- In: Erläuterungen zu Blatt 7723 Munderkingen.- Geol. Karte Baden-Württ. 1:25000: 5-11, 1 Tab.; Stuttgart.

— (1981): Erläuterungen zu Blatt 6723 Mehrstetten.- Geol. Karte Baden-Württ. 1:25000: 60 S., 3 Tab., 4 Beil., 4 Taf.; Stuttgart.

HAAG, H. (1960): Die Geologie des Blattes Zwiefalten (Nr. 7722) 1:25000 (Stratigraphie und Tektonik der Zwiefalter Alb).- Arb. geol.- paläont. Inst. TH Stuttgart, N.F. 28: 121 S., 6 Abb., 2 Taf.; Stuttgart.

HAFNER, G. (1969): Die Geologie des Blattes Nendingen (Nr. 7919) 1:25000 (Schwäbische Alb).- Arb. geol.- paläont. Inst. TH Stuttgart, N.F. 58: 246 S., 20 Abb., 4 Tab., 12 Taf.; Stuttgart.

HASENMAYER, J. (1984): Zum Alter der Blautopf-Unterwasserhöhle (7524/43).- Laichinger Höhlenfreund, 19 (1): 37-40, 1 Abb.; Laichingen.

— (1986 a): Das Geheimnis des Blautopf.- Geo, 5/1986: 10-38, zahlr. Abb.; Hamburg.

— (1986 b): Blautopf - Blauhöhle. Schlüssel für ein neues Verkarstungsbild des Schwäbischen Juras.- In: DECKER-HAUFF, H. & EBERL, J. (Hrsg).: Blaubeuren - Die Entwicklung einer Siedlung in Südwestdeutschland.- S. 19-48, mehrere Abb.; Sigmaringen (Thorbecke).

HEIZMANN, W. (1987): Erläuterungen zu Blatt 7822 Riedlingen.- Geol. Karte Baden-Württ. 1:25000: 149 S., 28 Abb., 12 Tab., 4 Taf., 1 Beil. Stuttgart.

JERZ, H. & WAGNER, R. (1978): Erläuterungen zum Blatt Nr. 7927 Amendingen.- Geol. Karte Bayern 1:25000: 132 S., 20 Abb., 7 Tab., 4 Beil., 1 Kte,; München.

LEMCKE, K. (1976): Übertiefe Grundwässer im süddeutschen Alpenvorland.- Bull. Ver. schweiz. Petrol.-Geol. u. -Ing., 42 (103): 9-18, 4 Abb.; Basel.

— (1977): Erdölgeologisch wichtige Vorgänge in der Geschichte des süddeutschen Alpenvorlandes.- Erdöl-Erdgas-Z., 93, Sonderausg. 1977: 50-56, 10 Abb.; Hamburg.

— (1981): Erdgeschichtlicher Rahmen und Tektonik.- In: Die Thermal-und Schwefelwasservorkommen von Bad Gögging.- Schriftenr. Bayer. Landesamt f. Wasserwirtsch., 15: 55-63, Abb. 26-30; München.

— (1987) Zur Frage der alten Verkarstung des Malm im Untergrund des deutschen Molassebeckens und an dessen Nordwestrand.- Bull. Ver. schweiz. Petrol.-Geol. u.-Ing., 53 (125): 33-46, 5 Abb.

LILLICH, W. (1962): Die Geologie der Blätter Mehrstetten und Schelklingen (Nr. 7623 und Nr. 7624) 1:25000 (Schwäbische Alb).- Arb. geol.- paläont. Inst. TH Stuttgart, N.F. 34:111 S., 8 Abb., 2 Tab., 6 Taf.; Stuttgart.

MEYER, R. (1981): Malm (Weisser oder Oberer Jura).- In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500000, 3., neubearb. Aufl.: 62-68, Abb. 12-15; München.

SCHÄDEL, K. & STOBER, I. (1987): Zur Wasserführung des kristallinen Grundgebirges in Südwestdeutschland.- Geol. Jb., C 50: 3-23, 14 Abb., 3 Tab.; Hannover.

SCHLOZ, W. (1984): Zur Geologie und Hydrogeologie der im Egauwasserwerk der Landeswasserversorgung genutzten Buchbrunnenquelle.- LW-Schriftenr., 4: 20-34, 9 Abb., 4 Tab.; Stuttgart.

SCHMIDT, M. (1937): Erläuterungen zu Blatt Sigmaringen der Geologischen Spezialkarte von Württemberg.- 135 S., 2 Abb., 10 Bilder; Stuttgart. (unveränd. Ausg. der 1. Aufl.: 1971).

SCHNEIDER, J. (1952): Stratigraphie und Entstehung der Zementmergel des Weissen Jura in Schwaben.- Arb. geol.-paläont. Inst. TH Stuttgart, N.F. 11: 95 S., 10 Abb., 4 Taf.; Stuttgart.

— (1962): Der Jura in Erdölbohrungen des westlichen Molassetroges.-Hermann-Aldinger-Festschrift: 163-172, 3 Beil. Stuttgart.

SCHREINER, A. (1974): Erläuterungen zur geologischen Karte des Landkreises Konstanz mit Umgebung 1:50000.- 2., ber. Aufl.: 286 S., 28 Abb., 11 Taf., 5 Beil.; Stuttgart.

— (1979 a): Erläuterungen zu Blatt 8119 Eigeltingen.- Geol. Karte Baden-Württ. 1:25000: 82 S., 8 Abb., 4 Tab., 4 Beil., 2 Taf.; Stuttgart.

— (1979 b): Erläuterungen zu Blatt 8019 Neuhausen ob Eck.- Geol. Karte Baden-Württ. 1:25000: 86 S., 6 Abb., 6 Tab., 4 Taf., 3 Beil,; Stuttgart.

UNGER, H.J. & SCHWARZMEIER, J. (1987): Bemerkungen zum tektonischen Werdegang Südostbayerns.- Geol. Jb. A 105: 3-23, 4 Abb., 2 Tab., 2 Taf.; Hannover.

VILLINGER, E. (1972): Seichter Karst und Tiefer Karst in der Schwäbischen Alb.- Geol. Jb., C 2 : 153-188, 9 Abb.; Hannover.

— (1977): Über Potentialverteilung und Strömungssysteme im Karstwasser der Schwäbischen Alb (Oberer Jura, SW-Deutschland).- Geol. Jb., C 18 : 3-93, 9 Abb., 11 Tab., 2 Taf.; Hannover.

— (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 i.Br.

— (1987): Die Blautopfhöhle bei Blaubeuren als Beispiel für die Entwicklung des Karstsystems im schwäbischen Malm.- Geol. Jb., C 49:71-103, 8 Abb., 1 Taf.; Hannover.

VOGELSANG, D. & VILLINGER, E. (1987): Elektromagnetische und hydrogeologische Erkundung des Donau-Aach-Karstsystems (Schwäbische Alb).- Geol. Jb., C 49: 3-33, 8 Abb., 1 Tab., 3 Taf.; Hannover.

VOLLMAYR, T. (1971): Zur Geologie des Feldes Pfullendorf-Ostrach.- Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. -Ing., 37 (92): 1-20, 16 Abb.; Basel.

WERNER, J. (1974): Hydrogeologie.- In: Erläuterungen zu Blatt 7723 Munderkingen.- Geol. Karte Baden-Württ. 1:25000 : 81-92, Abb. 7, Tab. 4; Stuttgart.

— (1978): Die Thermalwasserbohrung Saulgau (Württ.).- Abh. geol. Landesamt Baden-Württ., 8:129-164, 12 Abb., 2 Tab.; Freiburg i.Br.

— (1987): Das Forschungsvorhaben «Hydrogeothermische Energienutzung und Grundwasserhaushalt des Malmkarsts im süddeutschen Molassebecken». Ziele und Zwischenergebnisse.- Z. dt. geol Ges., 138: 399 - 409, 8 Abb., 1 Tab.; Hannover.

Buchbesprechungen

Thermal Methods of Oil Recovery (1988)

by T.C BOBERG
X + 411 p., num. figs. and tabs; £ 65.—
John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK

Das Buch behandelt die verschiedenen, praktisch erprobten Methoden der Petroleum-Produktions-Verstärkung mittels Dampf-Flutung, zyklischer Dampf-Injektion, Heisswasserflutung, In-situ-Energienutzung; unter Berücksichtigung von technischen Installationen und Möglichkeiten der Wärmeverlust-Dämmung und Bohrungs-Installationen. Vor Allem den Untersuchungen möglicher Endnutzungsgrade und der Wahl der dazu nötigen optimalen Einrichtungen wird breiter Raum gewährt. Der dazu notwendige mathematische Rahmen soll erste «Computerfreie» Methodenwahl ermöglichen.
Die in fast 30 Jahren von der Firma Exxon (und deren Vorgängerin) gesammelten Erfahrungen der «secundary recovery» ermöglicht Petroleum-Ingenieuren und anderen Interessenten einen grundlegenden Einblick in dieses Zukuntfs-Gebiet.

GABRIEL WIENER

Das Jahrtausend des Methans (1988)

von THOMAS GOLD
256 S., 19 Abb.; DM 39.80
ECON — Verlag-Düsseldorf, Wien, New York

Dieses Buch ist eine Übersetzung der englischen Originalausgabe «Power from the Earth, Deep Earth Gas-Energy for the Future (1987) «welches in unserem letzten Bulletin (126, Vol. 54, S. 38) ausführlich beschrieben wurde. Leider hatte sich in dieser Besprechung ein wichtiger Fehler eingeschlichen, der bei dieser Gelegenheit korrigiert werden soll. Es heisst dort: «Die hier vorgebrachten Argumente zu einer Hypothese, die zutreffenderweise sehr grosse Auswirkungen auf die Weltwirtschaft hätte, haben — je nach Standpunkt — einen unterschiedlichen Stellenwert: in der Reihe:

Utopie — Hypothese — Theorie — Beweis — Wissen

dürfte meiner Ansicht nach der Stand des oben fett gedruckten Bereichs nach diesem Buch möglich sein». Die Auszeichnung hatte in der erwähnten Besprechung nicht stattgefunden, sie gilt natürlich auch für die deutsche Version.
Im Weiteren ist zur deutschen Ausgabe zu bemerken, dass das Buch mit einem Druckfehler-und Literaturverzeichnis geliefert werden **muss**. Der in dieser Ausgabe mitgelieferte Untertitel: «*Die Energie der Zukunft — unerschöpflich, umweltfreundlich*» und der rückseitige Klappentext: «*Wir alle stehen auf einem faktisch unbegrenzten Energiereservoir: Methan, das überall in der Erdkruste eingeschlossen ist und sinnvoll genutzt alle bisherigen fossilen und atomaren Brennstoffe ablösen könnte.*« stammen nach Angabe von Prof. GOLD nicht von ihm. Trotzdem findet er die deutsche Uebersetzung lesenwert.

GABRIEL WIENER