Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage

Autor(en): **Lemcke, Kurt / Tunn, Walter**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **23 (1956-1957)**

Heft 64

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-188505

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. Schweizer. Petrol.-Geol. u. Ing., Vol. 23, Nr. 64, S. 35–56, 7 Textfig., 2 Tab., 25. Sept. 1956

Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage *

Mit 7 Abbildungen im Text und 2 Tabellen.

Von KURT LEMCKE und WALTER TUNN
Gewerkschaft Elwerath, Erdölwerke Hannover

Bei der Diskussion einer Schlumberger-Messung in der südwestlich Augsburg stehenden Bohrung Schwabmünchen 1 im Frühjahr 1955, bei der außer K. LEMCKE die Herren Dr. ROLL (Gew. Elwerath) und Dr. BETZ (Gew. Brigitta) zugegen waren, wurden die Beteiligten auf *Grenzen zwischen süßem und salzigem Porenwasser* in der tertiären Schichtenfolge aufmerksam, die sich in der Potential- und Widerstandskurve abzeichneten. Sie gaben wegen ihrer nicht ohne weiteres verständlichen Lage im Profil Veranlassung zu einem ersten Deutungsversuch, der zwar heute als wenig wahrscheinlich gelten darf, aber doch den Anstoß zu einer näheren, zunächst von K. LEMCKE allein unternommenen Überprüfung der übrigen damals vorliegenden elektrischen Bohrlochsmessungen aus dem Alpenvorland bildete. Dabei zeigte sich bereits, daß in dem ganzen Gebiet die *vertikale* Verteilung von Süß- und Salzwasser in der Molasse oft anders zu sein schien, als nach dem jeweiligen Ablagerungsmilieu der betreffenden Gesteine zu erwarten war. Da die daraus unter zusätzlicher Verwendung von Beobachtungen aus Förderversuchen gezogenen Schlüsse ziemlich weittragend waren, andererseits aber in sehr wesentlichen Punkten auf Indikationen aus *elektrischen Bohrlochsmessungen* beruhten, deren wirklicher Aussagewert nur vom Spezialisten einigermaßen sicher beurteilt werden kann, erschien eine exakte Behandlung derselben von der *physikalischen* Seite her unerläßlich. Dieser Aufgabe unterzog sich im weiteren Verlauf der Untersuchungen W. TUNN, der darüber hinaus bei der Beantwortung der sich außerdem noch ergebenden physikalischen und lagerstättenkundlichen Fragen maßgeblich mitwirkte. Auf diese Weise entstand die vorliegende Gemeinschaftsarbeit, in der nun die Autoren getrennt für ihre Sachgebiete zu Worte kommen werden. Beide Aufsätze enthalten, ohne dies immer ausdrücklich zu betonen, auch Gedankengut jeweils des anderen Autors.

Die Verfasser danken der Deutschen Erdöl-AG., der Gewerkschaft Brigitta, der Gewerkschaft Elwerath, der Internationalen Tiefbohr-AG., der Mobil Oil-AG., der Preußischen Bergwerks- und Hütten-AG. sowie der Wintershall-AG. verbindlichst für die Erlaubnis, die Unterlagen aller ihrer im süddeutschen Alpenvorland abgeteuften Bohrungen für diese Arbeit verwenden zu dürfen. Sie danken ferner der Deutschen Schachtbau- und Tiefbohr-GmbH. für die Genehmigung, die Bohrergebnisse aus der Konzession Saulgau zu benutzen. Ihr besonderer Dank gilt Herrn Dr. A. ROLL (Gew. Elwerath), der ihnen diese Arbeit ermöglichte und sie in jeder Hinsicht gefördert hat.

*) Nach einem Vortrag, gehalten auf der Jahrestagung der VSP am 23. Juni 1956 in Lugano.

I. Die Erkennung verschiedener Salinität von Gesteinswässern der süddeutschen Molasse aus elektrischen Bohrlochsmessungen und ihre Verteilung

Mit 2 Abbildungen im Text und 2 Tabellen

Von W. TUNN

Um zunächst eine Vorstellung von den *direkt* in Wässern aus Malm und Tertiär des süddeutschen Alpenvorlandes beobachteten Salzgehalten zu geben, sind in Tab. 1 einige typisch erscheinende Analysen zusammengestellt. Sie alle wurden an Wässern ausgeführt, die aus länger dauernden Förderversuchen stammen, so daß Verunreinigungen, etwa durch Spülungsfiltrat, so gut wie ausgeschlossen sein dürften. Im Vergleich zum Niedersächsischen Becken, von wo als Beispiel eine Analyse aus dem Erdölfeld Eldingen bei Hannover beigegeben ist, fällt vor allem der relativ geringe NaCl-Gehalt der Salzwässer auf, doch spricht gerade dieser — mehr als die hohen Konzentrationen in Norddeutschland — für die Anwesenheit fossilen Meerwassers in den betreffenden Schichten, zumal heutige Binnenmeere ähnliche Salzgehalte aufweisen.

Obwohl die vorhandenen Analysen bereits gewisse Tendenzen hinsichtlich der Verteilung von süßem und salzigem Wasser in der Vertikalen erkennen lassen, z. B. im Malm stets *Süßwasser* (wohl mit einer präoligozänen Verkarstung zusammenhängend, vgl. NATHAN 1949, S. 35 u. 51 ff., H. CRAMER 1953, LEMCKE 1955b, S. 52 u. 58), im marinen Tertiär Ostbayerns größtenteils *Salzwasser,* reichen sie ihrer Zahl nach nicht entfernt für die Gewinnung eines regionalen Bildes von diesen Verhältnissen aus. Dafür mußten vielmehr Indikationen aus Widerstands- und Potentialmessungen herangezogen werden, bei deren Auswertung die Analysen aber eine willkommene und notwendige Kontrolle bildeten. Im Vordergrund stand hierbei zunächst der Versuch, durch Berechnung der jeweiligen *Gesteinswasserwiderstände* außer zu qualitativen möglichst auch zu *quantitativen* Angaben über den Salzgehalt des Porenwassers der durchteuften Schichtserien zu gelangen.

a) Die Widerstandsmessung

Der Widerstand (R_o) eines wasserführenden, durchlässigen Gesteins setzt sich aus dem Formationswiderstandsfaktor (F) und dem Gesteinswasserwiderstand (R_w) in der folgenden Weise zusammen (ARCHIE 1942):

$$R_o = F \cdot R_w$$

Von diesen Größen ist F, wenn er nicht aus dem Mikrolog (z. B. TUNN 1952) oder an Kernen bestimmt werden kann, nach dem Gesteinstypus ungefähr abschätzbar. R_o läßt sich zwar theoretisch aus der normalen Widerstandskurve ablesen, doch beträgt die Eindringtiefe einer solchen Messung nur ca. 1 m. Dieser Bereich enthält aber meist schon Spülungsfiltrat, dessen Widerstand dann natürlich in die Messung eingeht und so die genaue Berechnung von R_w unmöglich macht. Anwendbar ist diese Methode nur bei Schichten unmittelbar über dem tiefsten Meßpunkt, wenn zwischen dem Durchteufen der Schicht und dem Vermessen nur wenig Zeit verstrichen ist. I. a. wird aber eine Widerstandsmessung an durchlässigen Gesteinen nur zu *qualitativen* Aussagen über die Salinität des in ihnen enthaltenen Wassers führen können.

Tabelle 1

Analysen von Gesteinswässern

	Norddeutschland	Süddeutschland					
		salzig		«süss»			
Bohrung	Eldingen 45	Ampfing 7	Schwabmünchen 1	Gendorf 1	Füssing 1[1]	Schwabmünchen 1	Gendorf 1
Formation	Lias alpha	Lattorf	Unt. Süßwasserm.	Malm	Ob. Malm	Bausteinschichten	Helvet
Teufe	1508—1526 m	1846—1849 m	1175—1178 m	2092—2095 m	916 m	1288—1289 m	440—445 m
analysiert durch	Elwerath	Schmidt & Wewers	Elwerath	Schmidt & Wewers	Schweisgut	Elwerath	Schmidt & Wewers
$Na^{\cdot}$	60 256 mg/l	4 755 mg/l	2 130 mg/l	405 mg/l	274 mg/l	190 mg/l	288 mg/l
$K^{\cdot}$	135 „	176 „	23 „	63 „	37 „	19 „	40 „
$Ca^{\cdot\cdot}$	6 230 „	328 „	121 „	125 „	18 „	43 „	105 „
$Mg^{\cdot\cdot}$	733 „	87 „	41 „	87 „	5 „	9 „	17 „
Cl'	106 306 „	6 737 „	3 436 „	780 „	162 „	38 „	312 „
SO_4''	238 „	210 „	5 „	107 „	8 „	Spuren	14 „
HCO_3'	203 „	2 971 „	160 „	417 „	555 „	658 „	663 „
NaCl [2]	175 192 „	11 103 „	5 663 „	1 285 „	267 „	63 „	514 „

[1]) zitiert nach NATHAN (1949), S. 52.

[2]) Der hier angegebene Wert für NaCl wurde durch Multiplikation des in der Analyse angegebenen Cl-Wertes mit dem Umrechnungsfaktor von Cl in NaCl (Molekulargewicht NaCl/Atomgewicht Cl) = 1,648 erhalten.

In vielen Fällen geben auch die *Tonwiderstände* Hinweise über die Höhe des Salzgehaltes, da auch sie z. T. durch den Elektrolytgehalt des im Ton befindlichen Porenwassers bestimmt werden. Wenn sie also irgendwo plötzlich absinken oder ansteigen, ohne daß der Gesteinscharakter wechselt, ist eine allerdings quantitativ nicht faßbare Änderung des Salzgehaltes im Porenwasser sicher, eine Erscheinung, die gerade in der Molasse eine erhebliche Rolle spielt.

b) Die Potentialmessung

Zwischen dem Ausschlag der Potentialkurve (E) in reinen Sanden oder Sandsteinen und den Widerständen von Spülungsfiltrat (R_{mf}) sowie dem Gesteinswasserwiderstand (R_w) besteht bekanntlich die Beziehung (z. B. WYLLIE 1949):

$$E = K \cdot \log R_{mf}/R_w$$

die, wenn der Faktor K bekannt ist, zur Bestimmung des Gesteinswasserwiderstandes verwendet werden kann. K ist im wesentlichen ein Ausdruck für die *verschiedene Beweglichkeit* der beteiligten Jonen; er liegt bei Gesteinen, in deren Wasser ausschließlich oder vorherrschend NaCl gelöst ist, nach Angaben der Literatur (Firma SCHLUMBERGER, A 10) je nach der herrschenden Meßtemperatur bei 70 bis 110. Diese Werte ließen sich auch in Norddeutschland oft für Gesteinsschichten, die normalerweise hochkonzentrierte NaCl-Lösungen (10—28 % NaCl) enthalten, zur Bestimmung von R_w verwenden. Man kann nun den Faktor nicht nur im Laboratorium, sondern in gewissen Fällen auch aus elektrischen Bohrlochsmessungen bestimmen, sofern eine Strecke mit durchlässigen Partien in einer Bohrung *zweimal mit möglichst verschieden widerständlichen Spülungen* vermessen wurde. Er läßt sich dann berechnen, weil unter diesen Umständen für jede einzelne durchlässige Schicht zwei Gleichungen aufgestellt werden können, in denen nur K und R_w als Unbekannte auftreten.

In Abb. 1 sind als Beispiel für die Molasse zwei solche Messungen (Widerstand und Potential) der Bohrung Ampfing 9 nebeneinander gezeichnet. Die für die einzelnen durchlässigen Schichten daraus errechneten Faktoren K schwanken schon in dieser einen Bohrung — bei praktisch gleichen Temperaturen! — zwischen 41 und 68, und ähnliche Unterschiede wurden nach der gleichen Methode auch in anderen Bohrungen festgestellt. Man kann also hier nicht wie meist in Norddeutschland mit einem *konstant* bleibenden K rechnen, wodurch im Alpenvorland eine *quantitative* Auswertung der Potentialkurve i. a. *unmöglich* wird, da Messungen längerer Profilstrecken mit verschieden salziger Spülung wie in Ampfing 9 doch nur selten sind und direkte Bestimmungen im Laboratorium an bestenfalls vorhandenen Einzelkernen für die viel längeren, nicht gekernten Strecken nicht repräsentativ sein werden. Der Grund für diese Nichtauswertbarkeit liegt darin, daß K nicht nur von der unterschiedlichen Beweglichkeit von Na- und Cl-Jonen abhängt, sondern auch von den entsprechenden Eigenschaften der außerdem in dem betreffenden Wasser noch vorhandenen Elektrolyte. Da deren Konzentration nun gegenüber dem NaCl-Gehalt der Molassewässer relativ groß ist, während sie trotz ähnlicher Absolutwerte in den viel salzigeren norddeutschen Gesteinswässern völlig in den Hintergrund tritt, ist ihr Einfluß auf den Faktor K im Alpenvorland natürlich viel größer als in Norddeutschland. Dort wird K also praktisch konstant sein, in der Molasse aber nicht, weil deren Wässer im Verhältnis zu NaCl zu viele andere Jonen in *regellos* wechselnder Menge enthalten.

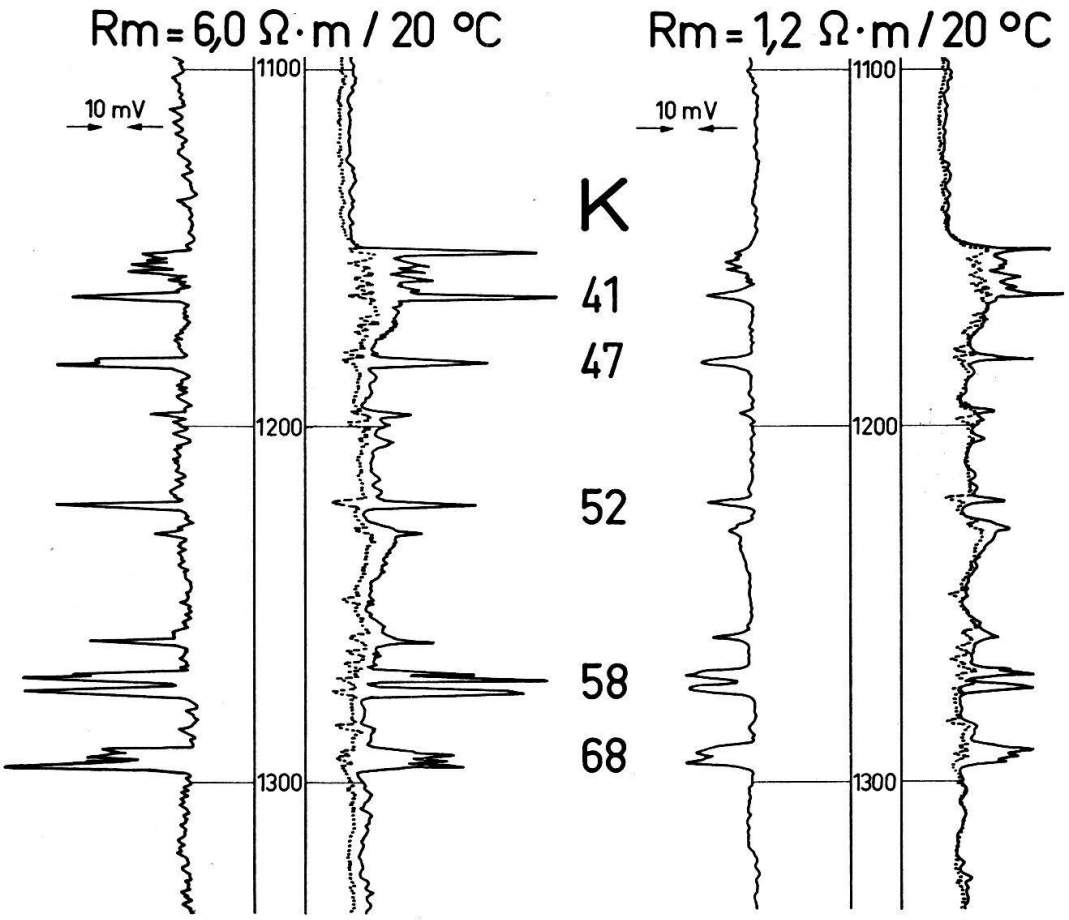

Abb. 1. — Elektrische Bohrlochsmessungen in der Bohrung Ampfing 9 bei verschiedenen Spülungswiderständen (Fa. Schlumberger v. 24. 10. und 4. 11. 55). — Die Faktoren K wurden für die einzelnen durchlässigen Schichten mit Hilfe der unterschiedlichen Potentialausschläge und Spülungswiderstände errechnet.

Es bleibt nun die Frage zu klären, ob wenigstens *qualitative* Aussagen über einen etwaigen Wechsel in der Salinität möglich sind. Wenn zwei Flüssigkeiten mit verschiedenen NaCl-Konzentrationen aneinander grenzen, wandern die Jonen der höher konzentrierten Lösung in die geringer konzentrierte hinein. Da die negativen Cl-Jonen um ca. 50 % schneller sind als die positiven Na-Jonen, eilen die ersteren voraus, so daß eine Ladungstrennung eintritt. Im Bohrloch erscheint also ein negatives Potential, wenn die Spülung süßer ist als das umgebende Gesteinswasser, ein positives im umgekehrten Falle [3]. Wenn die Gesteinswässer nur NaCl enthalten würden, wäre danach *eine Unterscheidung von Süß- und Salzwasser ohne weiteres möglich.*

Nun sind in den Molassewässern außer Na· und Cl′ in relativ großer Menge noch andere, und zwar vor allem HCO_3-Jonen vorhanden (Tab. 1). Die Beweglichkeit der letzteren ist um ca. 11 % kleiner als die des Na-Jons, so daß an der Grenzfläche zweier $NaHCO_3$-Lösungen verschiedener Konzentration das positive Na-Jon voreilt und somit in der geringer konzentrierten Lösung — im Gegensatz zu den Verhältnissen bei NaCl — ein *positives* Potential entsteht. Da nun der Unterschied der Jonenbeweglichkeit in diesem Falle nur etwa den vierten Teil von dem zwischen Na- und Cl-Jonen ausmacht, müssen in einer Lösung erheblich mehr HCO_3-Jonen als Cl-Jonen vorhanden sein, um ein durch Cl′ entstehendes negatives Potential aus-

[3]) Auf die Rolle der noch weitgehend ungeklärten Tonpotentiale (MOUNCE & RUST 1944) kann in diesem Rahmen nicht eingegangen werden.

zugleichen, während ein positives durch die Anwesenheit von $NaHCO_3$ nur noch verstärkt wird. Die bisher vorliegenden Wasseranalysen aus dem Alpenvorland (vgl. Tab. 1) zeigen nun, daß in den Salzwässern der Cl-Gehalt niemals auch nur annähernd vom HCO_3-Gehalt erreicht, geschweige denn überschritten wird, während in den Süßwässern HCO_3' meist über Cl′ liegt. Durch die Anwesenheit von HCO_3' im Gesteinswasser werden also in diesem Gebiet die Ausschläge der Potentialkurve lediglich allgemein *in positiver Richtung* verschoben, d. h. Negativausschläge werden etwas verringert, Positivausschläge etwas erhöht. Infolgedessen wird durch dieses am meisten störende Jon die qualitative Unterscheidung süßer und salziger Porenwässer mit Hilfe der Potentialkurve *nicht* beeinträchtigt.

c) Die Verteilung von Süß- und Salzwasser

Die Vermutungen über verschiedene Salzgehalte von Gesteinswässern, die schon nach der ersten, in der Einleitung erwähnten Überprüfung der Diagramme geäußert wurden, können nunmehr im wesentlichen bestätigt werden, da sie auf den gleichen Indikationen, wie soeben betrachtet, beruhten. In der Tat sind in fast allen untersuchten Bohrungen des Alpenvorlandes mehr oder minder deutliche Grenzen zwischen süßem und salzigem Porenwasser erkennbar, bei deren Festlegung beide Autoren unabhängig voneinander meist zu den gleichen Ergebnissen kamen. Besonders instruktiv ist die Bohrung Schwabmünchen 1 (Lage s. Abb. 3, S. 46), da in ihr der Elektrolytgehalt der Spülung gerade *zwischen* dem von süßem und salzigem Gesteinswasser lag, wie es übrigens infolge der relativ geringen Salzgehalte im Molassebecken bei normalen Bohrspülungen dort öfters vorkommt. Auf der Abb. 2 (links) ist in dem Diagramm dieser Bohrung bei ca. 900 m Teufe an dem Wechsel der Potentialausschläge vom Positiven ins Negative und der zugleich — von oben nach unten — erfolgenden Abnahme der Tonwiderstände eine *Süß/Salzwassergrenze* sehr gut zu erkennen, die hier innerhalb der brackischen Oberen Cyrenenschichten liegt. Ebenso deutlich ist die Untergrenze des Salzwasserbereiches an der Oberkante der brackischen Bausteinschichten, wo insbesondere der erneute Umschlag der Potentialkurve ins Positive wieder auf Süßwasser deutet. Diese dem Kurvenverlauf zu entnehmenden Aussagen werden durch Förderversuche bestätigt: Aus dem höchsten Teil der Bausteinschichten floß Süßwasser mit ca. 63 mg/l NaCl zu, aus einem Sandhorizont der Unteren Süßwassermolasse von 1174,5—1178 m hingegen Salzwasser mit ca. 5663 mg/l NaCl. *Die Salinitätsverteilung im Porenwasser ist also offensichtlich hier von dem ursprünglichen Ablagerungsmilieu der betreffenden Schichten unabhängig.*

Nach den gleichen Merkmalen konnten in einer Reihe weiterer Bohrungen mit entsprechenden Spülungseigenschaften ganz ähnliche Beobachtungen gemacht werden. Dabei zeigte sich, daß in tieferen Bohrungen des westlichen Beckens die Untergrenze des Salzwasserbereiches vielfach noch *innerhalb* der Unteren Süßwassermolasse angedeutet ist und nicht erst an deren Basis liegt, doch ist die Nennung des besten Beispiels hierfür uns leider nicht gestattet worden. In Bohrungen, in denen der Elektrolytgehalt der Spülung geringer war als selbst in den süßen Gesteinswässern, lassen sich diese Verhältnisse oft nicht so gut erkennen, da dann alle Potentialausschläge ins Negative gerichtet sind (Abb. 2, rechts); meist gibt aber deren größere Höhe zusammen mit dem Verhalten der Tonwiderstände auch dort genügend Anhaltspunkte für die ungefähre Lage des genannten Salzwasserbereiches.

Auf diese Weise wurden nun in den nachstehend aufgeführten, von W nach E geordneten Bohrungen (vgl. Abb. 3 u. 7) die folgenden Salinitätsgrenzen bestimmt (ca.-Teufe in m):

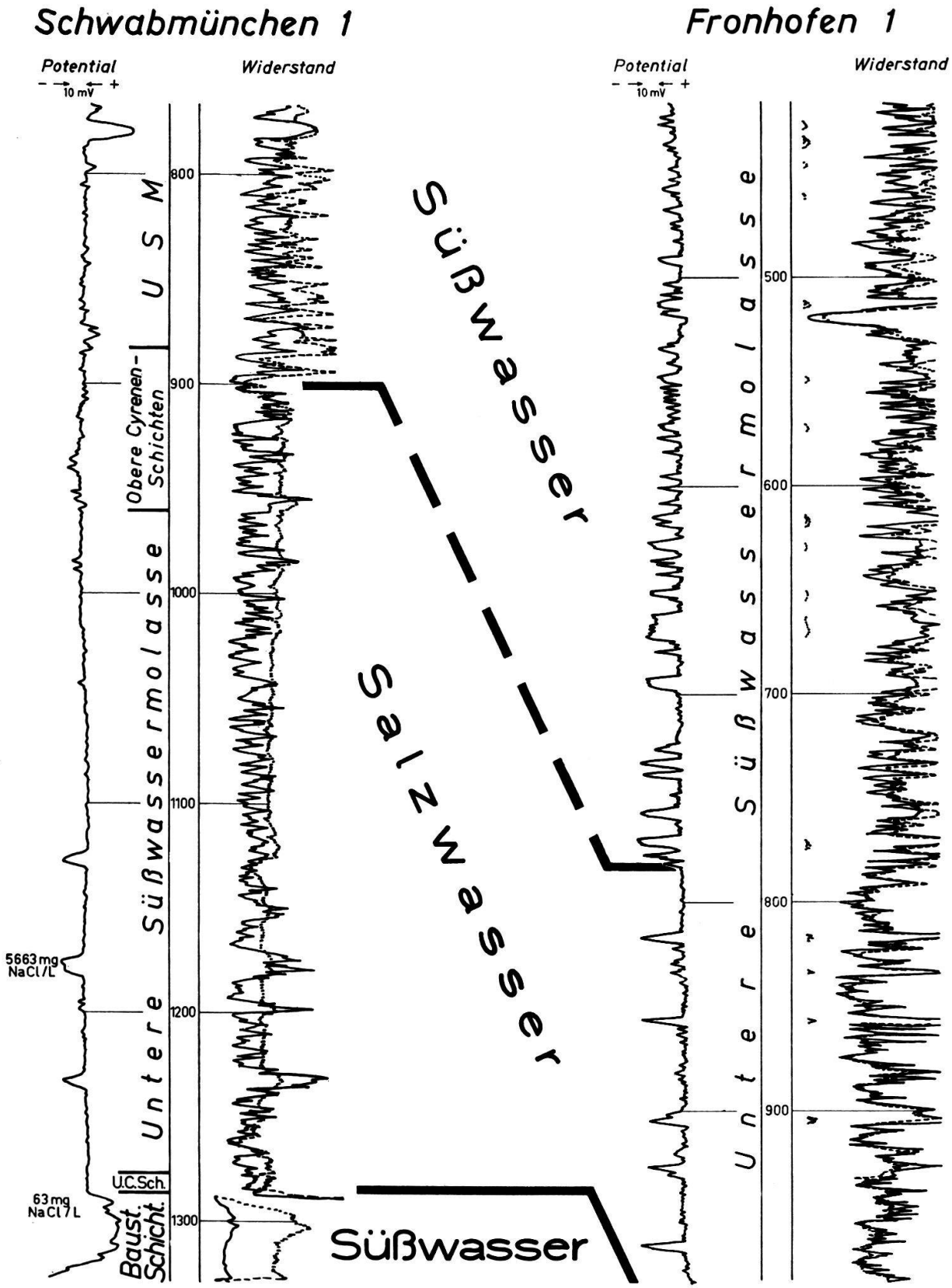

Abb. 2. — Elektrische Bohrlochsmessungen in den Bohrungen Schwabmünchen 1 und Fronhofen 1 (Fa. Schlumberger v. 10. 2. 55 bzw. 10. 3. 54) als Beispiele für die Unterscheidung von süßem und salzigem Gesteinswasser. — Erläuterung s. Text.

Tabelle 2

Bohrung	Oberkante Salzwasser-Bereich	Lage im Profil	Unterkante Salzwasser-Bereich	Lage im Profil	Oberkante Malm (Teufe in m)
Baitenhausen 1	950	Unt. Süßwassermolasse (USM)	1380	USM	1480
Ettenkirch 1	925 n. LEMCKE: 1140	USM USM	?		1957
Fronhofen 1	780	USM	1182?	USM-Basis	1182
Fronhofen 2	850	USM	1170?	USM	1204
Saulgau 1	290	USM	?460?	USM	531
Altshausen 1	675	USM	935	USM-Basis	935
Gaisbeuren 1	950	USM	1360?	USM	1575
Wurzach 1	1230	USM	1550	USM	2028,5
Mönchsrot 1	1000	USM	1519,5	Basis Bausteinschichten	1519,5
Rieden 1	975	USM	1455	Oberkante Bausteinsch.	1507
Scherstetten 1	1000	USM	1274	„	1342
Siebnach 1	1000	Ob. Cyrenenschichten	1453	„	1550
Schwabmünchen 1	900	„	1287	„	1365
Unterbrunn 1	1125	Aquitan	nicht erreicht		2701
Landsham 1	890 od. 1075 (nicht sicher!)	„	?		
Hohenlinden 1	850	Grenze Helvet/Burd.	2335	Turon	2364,5
Isen 1	655	Helvet	nicht erreicht		nicht erreicht
Ampfing 9	600	„	„		„
Kastl 2	515?	„	1679	Lattorf	1822
Gendorf 1	unterh. 445 (n. Test)	Helvet?	1941 (n. Förderversuchen)	Basis Lattorf	1941

Ganz allgemein waren diese Bestimmungen westlich des Lech sicherer als östlich davon, z. T. deshalb, weil im Osten in den fraglichen Profilabschnitten öfters zu wenig durchlässige Partien vorhanden sind. So konnte z. B. aus diesem Grunde in Gendorf 1 die Lage der oberen Süß/Salzwassergrenze nur sehr unvollkommen abgeschätzt werden. In einigen, hier nicht aufgeführten Bohrungen waren die Diagramme aus meßtechnischen Gründen (Irrströme u. ä.) für den vorliegenden Zweck nicht auswertbar. Unklar sind die Verhältnisse in Albaching 1, wo aus unbekannten Gründen stellenweise die Analysen aus Förderversuchen den nach den Bohrlochsmessungen

möglichen Aussagen widersprechen, so daß hier die Festlegung von Salinitätsgrenzen ebenfalls nicht möglich war. — Bemerkenswert ist noch, daß die obere Süß/Salzwassergrenze nach Osten in ein stratigraphisch immer höher liegendes Niveau rückt.

Aufgegliedert nach Formationen ergibt sich das folgende Bild von der Verteilung der Salzgehalte im Molassebecken:

Malm: Nach Förderversuchen Süßwasser (wohl *Karstwasser,* vgl. S. 36, ? Ausnahme [s. Abschnitt LEMCKE, S. 44]: Unterbrunn 1)

Sandsteine der Oberkreide- oder Tertiärbasis (Bausteinschichten, Ampfinger Sandstein des Lattorf) *direkt auf Malm:* Meist Süßwasser

Sandsteine der Tertiärbasis auf toniger Oberkreide: Salzwasser

Marines Tertiär in Ostbayern (Lattorf bis Helvet): Meist Salzwasser, in höheren Teilen des Helvet stets Süßwasser

Untere Süßwassermolasse (+ Cyrenenschichten) im westlichen Becken: Im unteren oder mittleren Teil Salzwasser, sonst Süßwasser

Obere Meeresmolasse im westlichen Becken: Süßwasser

Obere Süßwassermolasse im Gesamtbecken: Süßwasser

Hieran ist besonders interessant das Vorhandensein von *Salz*wasser innerhalb der Unteren *Süß*wassermolasse, jene anfänglich nur vermutete, nunmehr aber bestätigte Erscheinung, die zum wohl wesentlichsten Ausgangspunkt dieser Untersuchungen wurde.

II. Bewegungen des Tiefenwassers im Malm und Tertiär des süddeutschen Molassebeckens und ihre möglichen Folgen für Erdöllagerstätten

Mit 5 Abbildungen im Text

Von K. LEMCKE

Die im vorigen Abschnitt (S. 38) erwähnte Änderung der Tonwiderstände wurde schon in Scherstetten 1, der ersten Tiefbohrung des 1948 begonnenen Erdölaufschlusses, beobachtet, wo ab etwa 1000 m Teufe in der Unteren Süßwassermolasse (USM) plötzlich das allgemeine Widerstandsniveau niedriger wird. Diese Erscheinung wurde seinerzeit auf fazielle Ursachen wie das Zurücktreten von Sandsteinen zurückgeführt (LEMCKE und v. ENGELHARDT & FÜCHTBAUER 1953, S. 18; LEMCKE 1955a, S. 17); da sie auch in späteren Bohrungen der Westmolasse erkennbar war, glaubte man zunächst, in ihr eine willkommene Unterteilungsmöglichkeit dieser so schwierig zu gliedernden Serie gefunden zu haben. Erst die Anfang 1955 abgeteufte Bohrung Schwabmünchen 1, die sich auch im USM-Bereich mit Scherstetten 1 infolge der Einschaltung der Oberen Cyrenenschichten stratigraphisch verknüpfen läßt, zeigte dann die Bedenklichkeit dieser Vorstellung bereits dadurch, daß die gleiche Widerstandsänderung in beiden Profilen an verschiedener Stelle liegt. Vor allem aber ließ sich hier, wie auf S. 40 dargelegt, besonders eindrucksvoll und repräsentativ der Nachweis führen, daß es sich in Wirklichkeit gar nicht um eine Faziesgrenze, sondern um eine *Grenze zwischen süßem Porenwasser im Hangenden und salzigem im Liegenden* handelt (vgl. Abb. 2, S. 41). Bei der Erklärung dafür dachte man nun anfangs an die Kennzeichnung einer Flushing-Erscheinung (SCHUPPLI 1950, S. 27) etwa in dem Sinne, daß bis zu dieser Süß/Salzwassergrenze der Einfluß zirkulierender Tageswässer reiche und daß darunter bis zur Oberkante der wieder mit Süßwasser — vielleicht aus Karstklüften des unterlagernden Malms — gefüllten Bausteinschichten primäres, salzigeres Formationswasser folge. Aber diese Vorstellung befriedigte nicht

recht, vor allem wegen des Vorhandenseins von relativ *salzigem* Gesteinswasser in der Unteren *Süß*wassermolasse, also in einer zweifellos limno-fluviatilen Serie, welche auch keinerlei Mineralien enthält, die die benötigten Chlormengen etwa im Laufe der Diagenese hätten abgeben können. Außerdem blieb hierbei unklar, warum in manchen, besonders den tieferen Bohrungen des Westgebietes die Untergrenze des Salzwasserbereiches noch *innerhalb* der Unteren Süßwassermolasse gefunden wurde (vgl. Tab. 2, S. 42), u. U. also hoch über dem Malm bzw. den ihm auflagernden Bausteinschichten mit ihrer allem Anschein nach mit der Verkarstung des ersteren zusammenhängenden Süßwasserführung (s. S. 36). So mußte eine andere Deutung versucht werden.

a) Druckbeobachtungen aus dem Malm und seinem unmittelbaren Hangenden

Wie die bisherigen Ergebnisse der Erdölexploration zeigen, setzt sich die Malmtafel des Schwäbischen und Fränkischen Jura in praktisch unveränderter Fazies und ähnlicher Mächtigkeit mit leichtem allgemeinem Südfallen unter die süddeutsche Molassesenke fort (Bentz 1949, S. 49; Roll 1952, S. 244, 247; Lemcke 1955b, S. 62; Weber 1955, S. 83). In ihr wird im Westen der Malm direkt von Tertiär überlagert, während in Ostbayern zwischen beide Formationen meist noch mehr oder minder mächtige Oberkreide eingeschaltet ist (Heermann 1954; Elberskirch & Lemcke 1955, S. 318). Schon bei den ersten Bohrungen im Bayerischen Innviertel vor dem Kriege zeigte sich, daß der dort unter bis fast 1000 m Oberkreide angetroffene Malm stellenweise erheblich *verkarstet* war (Nathan 1949, S. 35). Förderversuche auf ihn in Birnbach 1 und Füssing 1 (Abb. 3) ergaben mäßige bis kräftige Süßwasserzuflüsse, die in beiden Fällen frei ausliefen und deren Spiegelhöhen nach dem jeweils am Bohrlochskopf gemessenen Schließdruck bei ca. + 370 m NN liegen dürften. Da in nicht allzu weiter Entfernung bei Ortenburg der Malm in ganz ähnlicher Höhenlage zu NN über Tage ausstreicht, gab diese Tatsache bereits Nathan (1949, S. 56, vgl. auch H. Cramer 1953, S. 166) Anlaß, hier hydrologische Zusammenhänge in dem Sinne zu vermuten, daß der Druck im Karstwasser der Bohrungen unmittelbar *durch die Höhenlage des freien Karstwasserspiegels* im Ausgehenden bestimmt werde. Diese Annahme erhielt in letzter Zeit eine gewichtige Stütze durch einen Förderversuch in der Bohrung Gendorf 1 (Malzahn 1956, S. 221), der dort im Jahre 1955 aus technischen Gründen auf stark verkarsteten Malm unternommen wurde. Auch hier stellte sich der Spiegel des reichlich zufließenden Süßwassers auf ca. + 370 m NN ein, so daß das Druckniveau des Karstwassers in diesem ganzen, nun schon ziemlich großen Gebiet einheitlich auf das Ausgehende des Malms bei Ortenburg bezogen zu sein scheint.

Aus dem übrigen Ostbayern liegen keine Beobachtungen über Karstwasser vor, da der auch dort wohl meist verkarstete bzw. klüftige Malm (z. B. in Ampfing 1 nach Heermann 1955, S. 73, mit 534 m nicht durchteuft) unter der mächtigen Oberkreidedecke nur selten erreicht wurde und sich die Förderversuche auch dann fast stets auf sehr viel höher liegende Horizonte beschränkten. In der südwestlich München stehenden Bohrung Unterbrunn 1 (Malzahn 1956, S. 221) war zwar bei einigen Testen außer der Tertiärbasis etwas Malm offen, aber nach seiner Gesteinsbeschaffenheit wohl nicht verkarstet, so daß auch kein Süßwasser, sondern Salzwasser mit 7 bis 8 g NaCl/l zufloß, das wahrscheinlich nur zum kleinen Teil aus dem Malm stammen dürfte.

Im westlichen Molassebecken wurde klüftiger und mehr oder minder verkarsteter

Malm in vielen Fällen angeritzt, gelegentlich auch (mit Mächtigkeiten um 400 m) durchteuft (Boigk & Krzywicki 1954, S. 147; Lemcke 1955b; Volz 1956, S. 7). Förderversuche wurden auf ihn selbst zwar nicht unternommen, wohl aber auf Schichten der Tertiärbasis, mit denen er angesichts ihrer nahen Nachbarschaft und ihrer z. T. unverhältnismäßig starken Wasserführung etwa über Störungen, offene Klüfte oder auch infolge direkter Überlagerung in relativ ungehinderter hydrologischer Verbindung stehen könnte. Zu nennen sind hier zunächst die drei nahe benachbarten Bohrungen Scherstetten 1, Schwabmünchen 1 und Siebnach 1 (Lemcke 1955c, S. 140; Malzahn 1956, S. 221), in denen u. a. jeweils hochdurchlässige Partien der dort die Tertiärbasis bildenden Bausteinschichten untersucht wurden. In allen Fällen erfolgten rasche und starke Süßwasserzuflüsse, deren Spiegel 140—185 m unter Gelände stehen blieben. Ganz ähnliches zeigte sich in den Bohrungen Pfullendorf 1 und Saulgau 1 (Haus 1952, S. 26; Schuppli 1952, S. 35 u. 53; Lögters 1952, S. 281; Volz 1953) bei Förderversuchen auf die tiefsten Horizonte der hier unmittelbar auf dem Malm liegenden Unteren Süßwassermolasse, die ebenfalls starke Süßwasserzuflüsse mit konstant bleibenden Spiegelständen von 53 bzw. 70 m unter Flur erbrachten.

Auf der Abb. 3 sind u. a. alle beobachteten Spiegelhöhen in ihrer Lage über NN den betr. Bohrungen beigeschrieben. In *Ostbayern* werden durch starke Verbindungslinien die bereits erwähnten Beziehungen zwischen den Bohrungen Gendorf 1, Füssing 1, Birnbach 1 und dem ausstreichenden Malm von Ortenburg angedeutet. Im *Westen* ergeben sich ganz analoge und ebenso dargestellte Zusammenhänge zwischen den dortigen Bohrungen und den jeweils etwa nächstgelegenen, gleichfalls eingetragenen *Mittelwasserständen der Donau,* so daß allem Anschein nach dort das in der Tertiärbasis erschlossene Wasser mit dieser kommuniziert. Da es nun teils wegen der faziellen Ausbildung der Unteren Süßwassermolasse (linsiger Aufbau aus Mergeln und Sanden), teils wegen des Auskeilens der Bausteinschichten weit südlich der Donau sehr unwahrscheinlich ist, daß sich diese Verbindung im Tertiär selbst vollzieht, wird sie vermutlich über den durch Klüfte und wohl auch Karsthohlräume viel besser wegsamen Malm erfolgen, für dessen ober- wie unterirdischen Karst ja die Donau von oberhalb Sigmaringen bis Regensburg den *tiefsten freien Spiegel* darstellt. Dies ist zugleich ein wichtiger weiterer Hinweis für die oben schon vermuteten hydrologischen Zusammenhänge zwischen Malm und Tertiärbasis, so daß man mindestens wohl die in letzterer angetroffenen, durch die Steighöhen gekennzeichneten Drücke als ungefähr repräsentativ für die Druckverhältnisse im Karstwasser wird ansehen können.

Das auf diese Weise erkennbare Druckniveau im Malmkarst besitzt, wie aus den Zahlen an den Bohrungen hervorgeht, ein ähnliches Gefälle wie die Donau selbst, so daß sich die Verbindungslinien von dieser zu den Bohrungen in erster Annäherung als *Linien gleicher Spiegelhöhe* bzw. als Isobaren auffassen lassen. Senkrecht zu ihnen ist mit einer Fließbewegung des sich durch oberirdischen Zufluß wohl immer wieder ergänzenden Druckwassers im Malm zu rechnen, die — angedeutet durch den langen Pfeil im Mittelteil der Zeichnung — zum absolut tiefsten freien Karstwasserspiegel bei Regensburg (ca. + 330 m NN) gerichtet sein wird, wo die Donau den Malm endgültig verläßt. Da andererseits in Ostbayern die Verbindung Gendorf 1—Malm bei Ortenburg ebenfalls eine Linie gleicher Spiegelhöhe darstellt, die um etwa 40 m höher als die Donau bei Regensburg liegt, wird dorthin auch von hier aus eine Bewegung des gespannten Malmwassers erfolgen (s. Pfeil). Die vermutlich auf solche Weise dem *Druckminimum* dauernd artesisch zufließenden Wassermengen treten

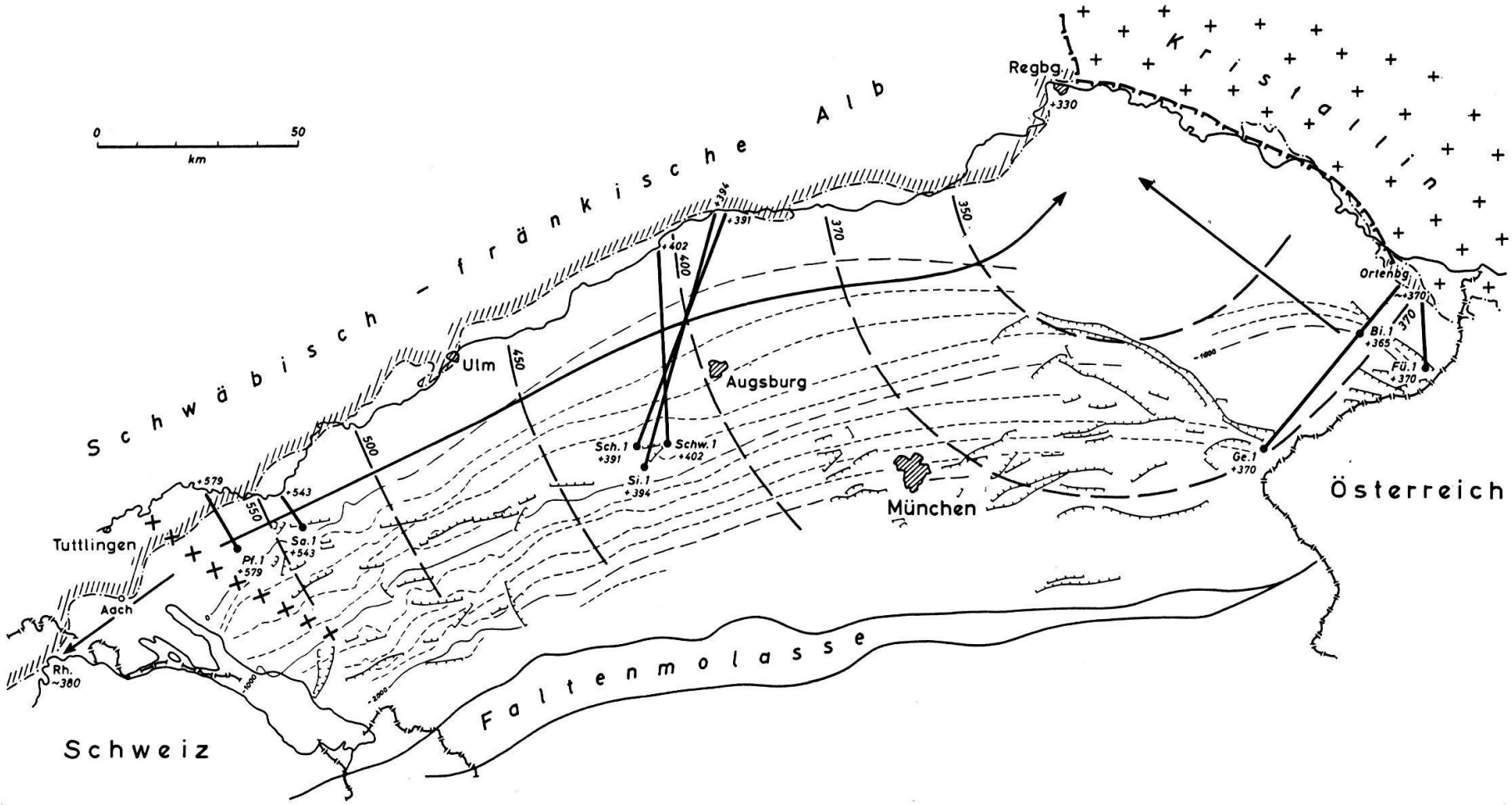

Abb. 3. — Beziehungen zwischen den Spiegelhöhen des Wassers aus Malm bzw. Tertiärbasis im Becken und dem tiefsten Karstwasserspiegel am Beckenrand. — Mittelstarke bogenförmige Linien = Mögliche Isobaren im Malmkarstwasser mit beigeschriebenen Druckhöhen über NN; feine, meist gestrichelte Linien und Störungssignaturen = Tiefenlinien der Malmoberkante in m unter NN und deren Störungen. Rh. = Rheinfall (m üb. NN), Pf. = Pfullendorf, Sa. = Saulgau, Sch. = Scherstetten, Si. = Siebnach, Schw. = Schwabmünchen, Ge. = Gendorf, Fü. = Füssing, Bi. = Birnbach. — Übrige Signaturen s. Text.

dort anscheinend unbemerkt in die Donau über, jedenfalls sind nach freundlicher Mitteilung der Herren Prof. Dr. NEUMAIER (Inst. f. allg. u. angew. Geologie d. Univ. München), Direktor Dr. NATHAN (Bayer. Geol. Landesamt), Regierungsrat Dr. CLAUS (Bayer. Landesamt f. Wasserversorgung) und der Bayer. Landesstelle f. Gewässerkunde in dem fraglichen Gebiet bzw. im Donaulauf selbst keine besonders auffallenden Quellaustritte bekannt.

Die Isobaren im Malmkarstwasser, die an den ihrer jeweiligen Druckhöhe entsprechenden Mittelwasserständen der Donau ansetzen und zunächst senkrecht zu dieser verlaufen werden, könnten im Ganzen vielleicht die auf der Abb. 3 angegebene bogenförmige Gestalt besitzen, da sich ihre bisher durch die Bohrungen bekannt gewordenen Teilstücke aus Ost und West anscheinend irgendwo im Süden treffen. Diese Darstellung ist jedoch einstweilen rein hypothetisch und vor allem als Anschauungshilfe gedacht. Beziehungen zu den der Vollständigkeit halber miteingezeichneten Tiefenlinien der Malmoberkante und deren Störungen (n. ELBERSKIRCH & LEMCKE 1955, einer freundlicherweise zur Verfügung gestellten, noch unveröffentlichten Karte von Herrn Dr. HEERMANN/Celle und eigenen Ergänzungen) sind danach nicht vorhanden und wohl auch kaum zu erwarten.

Ein weiteres *Druckminimum* liegt ganz im Südwesten, wo der Rhein bei Schaffhausen den Malm in wesentlich geringerer Meereshöhe als die benachbarte Donau öffnet. Auch zu ihm hin muß daher eine Bewegung des gespannten Karstwassers erfolgen, die durch den nach SW gerichteten Pfeil im linken Teil der Abb. 3 angedeutet wird. Da die Bohrung Pfullendorf 1 noch mit der Donau kommuniziert, wird die *unterirdische Wasserscheide* zwischen Donau- und Rheinsystem südlich von ihr, vielleicht etwa längs der durch liegende Kreuze markierten Zone verlaufen, die ihrerseits zwanglos an die bekannte Wasserscheide der Donauversickerung bei Tuttlingen anschließt. Über einen möglichen Verlauf von Isobaren läßt sich nichts sagen, da hier alle direkten Beobachtungen fehlen.

b) Bewegungen des Porenwassers in der Molasse

Da Donau und Rhein für das ganze Gebiet die oberflächlichen Vorfluter bilden, wird nirgends das auf ihr Niveau bezogene Karstwasser bis zur Tagesoberfläche ansteigen können, so daß sein *Druck überall geringer als der jeweils normalerweise zu erwartende hydrostatische Druck* sein wird. Andererseits ist aber oberhalb des Malms (bzw. Tertiär- oder Oberkreidebasis, vgl. oben) wohl grundsätzlich mit annähernd hydrostatischen Druckverhältnissen zu rechnen, was im Osten durch die Befunde in den dortigen Lagerstätten (Ampfing, Gendorf) direkt bestätigt wird, im Westen zwar mangels Testen genügender Dauer noch nicht bewiesen ist, sich in Analogie zu Ostbayern und aus allgemeinen Erwägungen aber mit einiger Wahrscheinlichkeit annehmen läßt. Dieser Druckunterschied wird nun wie in einem kommunizierenden System mit ungleich hohen Schenkeln zu einer Abwärtsbewegung des in dem druckhöheren, «hydrostatischen Schenkel» enthaltenen Wassers führen, die durch das Nachsinken von Tageswässern und die damit verbundene Verhinderung eines Druckverlustes ständig in Gang gehalten wird und auf diese Weise *das Porenwasser der hangenden Schichten allmählich in den verkarsteten Malm einwandern* läßt [4]). Dies wird zwar wegen der vielen Tongesteine in Kreide und Tertiär nur sehr langsam vor sich gehen, doch sind diese andererseits ja auch nicht absolut undurchlässig, sondern besitzen — auch abgesehen von etwaigen offenen Klüften und Haarrissen — min-

[4]) Wie dieses Fließen den Druck im Hangenden des Malms im einzelnen beeinflußt, läßt sich, da von zahlreichen unbekannten und lokalen Faktoren abhängig, nicht übersehen.

destens eine gewisse «Säkular-Durchlässigkeit», so daß man die Folgerichtigkeit dieser Bewegung wohl wird zugeben müssen [5]). Der dem Karstwasser auf diese Weise ständig überall zugeführte Wasserüberschuß wird in Richtung auf den Überlauf, also zur Donau und zum Rhein hin, abgeleitet werden. Da nun im größten Teil des Beckens wahrscheinlich bereits eine Fließbewegung des Karstwassers parallel zur Donau von SW nach NE existiert, wird diese Ableitung hier nicht senkrecht zur Donau erfolgen, sondern um irgendeinen Winkel nach NE abgelenkt sein.

Der Druckunterschied zwischen Malm und Hangendem wird sich erst entwickelt haben, als die Absenkung des Karstwasserspiegels der Alb durch die sich einschneidende Donau und durch den Rhein begann, also etwa seit dem Oberpliozän bis Frühquartär (z. B. GRAUL 1943, S. 40; LEMCKE und v. ENGELHARDT & FÜCHTBAUER 1953,

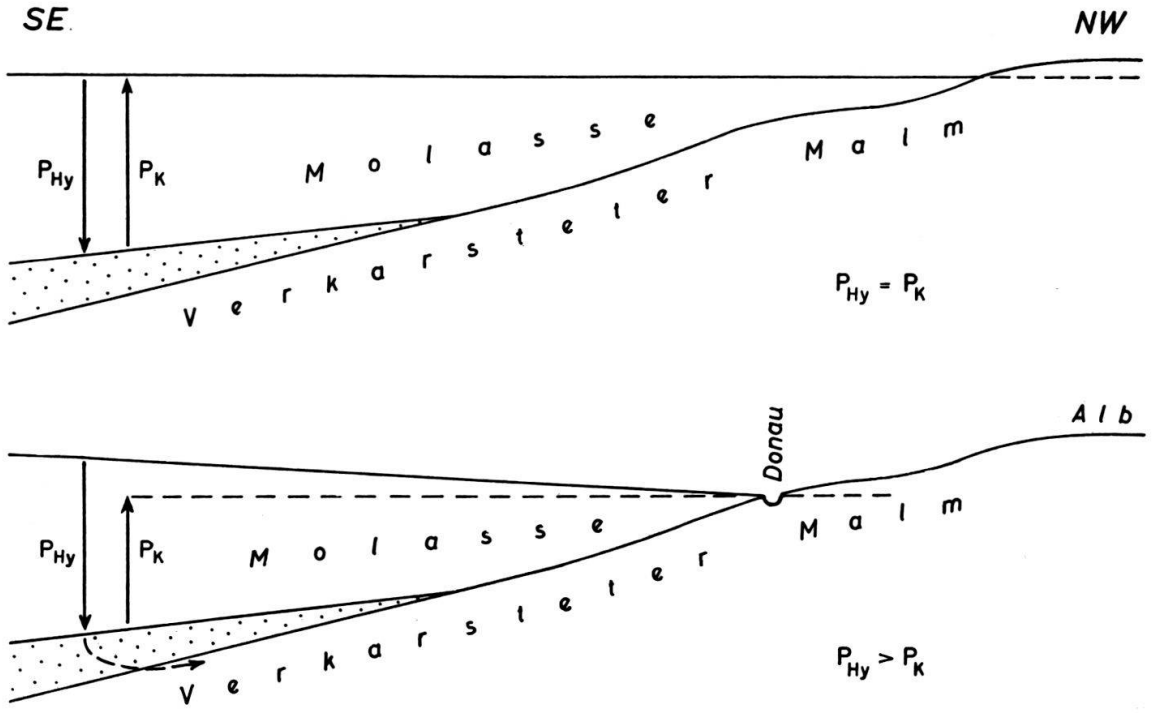

Abb. 4. — Schematische Darstellung der Absenkung des Karstwasserspiegels im westlichen Molassebecken (Vertikalschnitt), Erläuterung s. Text. — Gestrichelte Linie = Karstwasserspiegel, punktiert = Bausteinschichten, P_{Hy} = Hydrostatischer Druck, P_k = Druck im Karstwasser.

S. 80). Abb. 4 zeigt oben schematisch den Zustand nach dem Ende der Molassesedimentation, durch die das Becken wahrscheinlich bis zur Klifflinie der Oberen Meeresmolasse, im Osten darüber hinaus (ELBERSKIRCH & LEMCKE 1955, S. 320), aufgefüllt war. Zu jener Zeit dürfte der Druck im Karstwasser dem hydrostatischen entsprochen haben. Der heutige Zustand wird durch die untere Skizze verdeutlicht: Der Karstwasserspiegel ist durch die Donau tiefer gelegt, so daß sich jene Fließbewegung herausbilden konnte, die die ständige Abführung von Porenwasser aus dem Hangenden des Malms in diesen und schließlich weiter zur Donau hin bewirkt.

[5]) Vermutungen über Vertikalbewegungen des Porenwassers in Tertiär und Oberkreide Ostbayerns sind, anknüpfend vor allem an Betrachtungen über den Chemismus dort erbohrter Wässer, schon bei NATHAN (1949, S. 51, 57) sowie bei H. CRAMER (1953, S. 166 ff.) angedeutet.

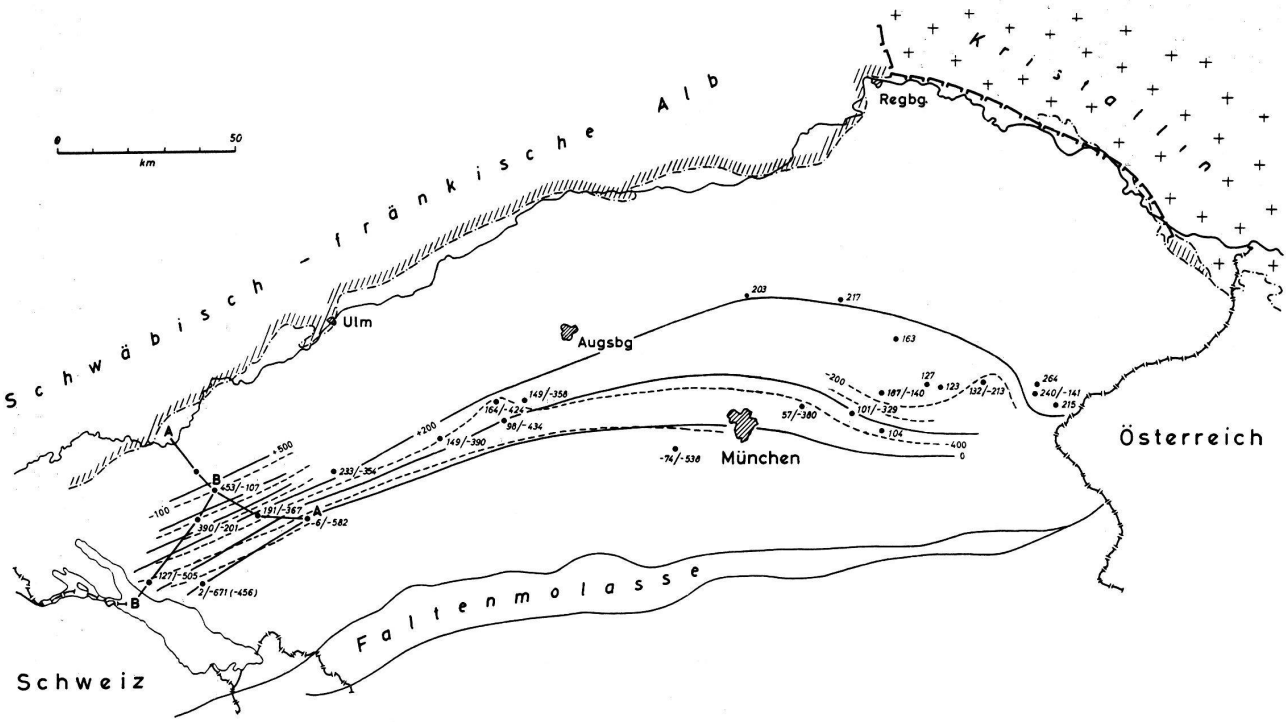

Abb. 5. — Streichlinien der Oberkante der Oberen Meeresmolasse (ausgezogene Linien) und der oberen Süß/Salzwassergrenze (gestrichelt). — Alle Zahlen = m zu NN. Ausgefüllte Kreise = Bohrungen, an diesen 1. Zahl = Oberkante der Oberen Meeresmolasse, 2. Zahl = Süß/Salzwassergrenze. Linien A—A und B—B: Profilschnitte der Abb. 6.

Diese zunächst rein theoretischen Überlegungen werden nun gerade durch *die* Beobachtungsbefunde gestützt, die zu der ursprünglichen Fragestellung führten. Wenn nämlich das Porenwasser tatsächlich abwärts wandert, müssen auch etwa vorhandene Grenzen in seiner Zusammensetzung diese Bewegung mitmachen. Eine solche, im Westen wie im Osten gleich markante Grenze wird vor allem die des Marins, also der Oberen Meeresmolasse bzw. im Osten der brackischen Oncophoraschichten, gegen die überlagernde Obere Süßwassermolasse sein, wo man also normalerweise oben süßes, unten salziges Formationswasser erwarten müßte. Dies ist aber nicht der Fall, vielmehr liegt die oberste Grenze zwischen süßem und salzigem Wasser überall ganz erheblich tiefer, im Westen sogar innerhalb der Unteren Süßwassermolasse, was ja besonders rätselhaft erschien (S. 44). Dieser Widerspruch löst sich jetzt zwanglos unter der Annahme, daß *diese Süß/Salzwassergrenze nichts anderes darstellt als die bis zu der betreffenden Teufe seit Tieferlegung des Karstwasserspiegels herabgewanderte Grenze zwischen den Formationswässern des Marins und der Oberen Süßwassermolasse,* so daß sie gleichsam als Projektion der Marinoberkante in die Tiefe anzusehen ist.

Ist diese Auffassung richtig, so sind enge Beziehungen zwischen Marinoberkante und Süß/Salzwassergrenze zu erwarten. Wie Abb. 5 zeigt, ist dies auch tatsächlich der Fall, da dort die Streichlinien beider Grenzen bis auf geringfügige Überschneidungen, auf die gleich noch zurückzukommen sein wird, einander annähernd parallel laufen. Vielleicht noch deutlicher erkennt man diese Zusammenhänge auf den beiden Profilschnitten der Abb. 6, die fast im Streichen und fast senkrecht dazu liegen. Die als geschlängelte Linie eingetragene Oberkante des Salzwasserbereiches geht in beiden Fällen der Oberkante der Oberen Meeresmolasse fast genau parallel, liegt in Saulgau 1 freilich so hoch, daß man dort oberflächliche Aussüßung nicht ausschließen

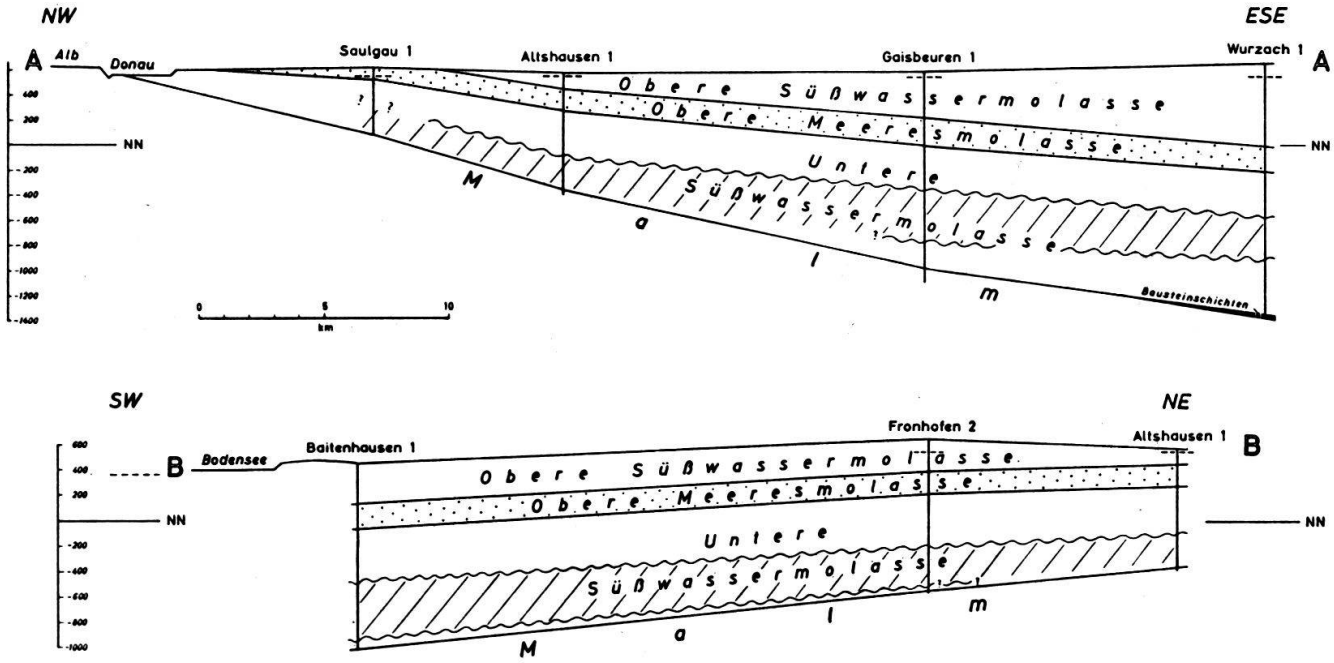

Abb. 6. — Profilschnitte im westlichen Molassebecken (Lage s. Abb. 5). — Gestrichelte Linie = Niveau des Donauwasserspiegels im Becken, auf der unteren Zeichnung ganz links = Niveau des Rheinfalls bei Schaffhausen. Geschlängelte Linien = Grenzen des durch Schrägschraffur angedeuteten Salzwasserbereiches.

kann. Ganz ähnlich verhält sich die *Unterkante* des Salzwasserbereiches, die allerdings — vielleicht infolge von Diffusionsvorgängen — meist weniger deutlich zu sein pflegt, doch gibt es auch Beispiele, wo sie in vollster Klarheit entwickelt ist. Man wird sie nunmehr entsprechend der Obergrenze als die herabgewanderte Marinunterkante ansehen dürfen und den gesamten Salzwasserbereich als Formationswasser, das hier ursprünglich in der Oberen Meeresmolasse eingeschlossen war und dessen heutige Lage in der Unteren Süßwassermolasse das seitherige Ausmaß der Abwärtsbewegung anzeigt. Je nachdem, wie groß diese war, und vor allem, wie viel mehr Platz als in der Oberen Meeresmolasse das Salzwasser in der viel tonigeren USM einnimmt, was sich in den Profilen in der größeren Mächtigkeit des Salzwasserbereiches ausdrückt, wird dessen Unterkante teils bereits das Süßwasser an der Tertiärbasis erreicht haben, teils noch in der Unteren Süßwassermolasse liegen, womit auch die zweite der eingangs gestellten Fragen (S. 44) beantwortet ist. Demgegenüber kann in Ostbayern die Abwärtsbewegung nur durch die *obere* Süß/Salzwassergrenze registriert werden, weil in der dortigen, durchgehend marinen, tieferen Molasse das salzige Porenwasser von vornherein nach unten an den Karstwassereinflußbereich grenzte.

Die Abstände zwischen Marinoberkante und oberer Süß/Salzwassergrenze (Abb. 7) sind zwar in gewissen Bereichen von sehr ähnlicher Größenordnung, nehmen zugleich aber regional von W nach E ab, worauf das vorerwähnte Überschneiden der Streichlinien zurückgeht. Diese Erscheinung könnte mit dem jeweiligen Abstand der heutigen Landoberfläche von den Spiegelhöhen des Karstwassers zu-

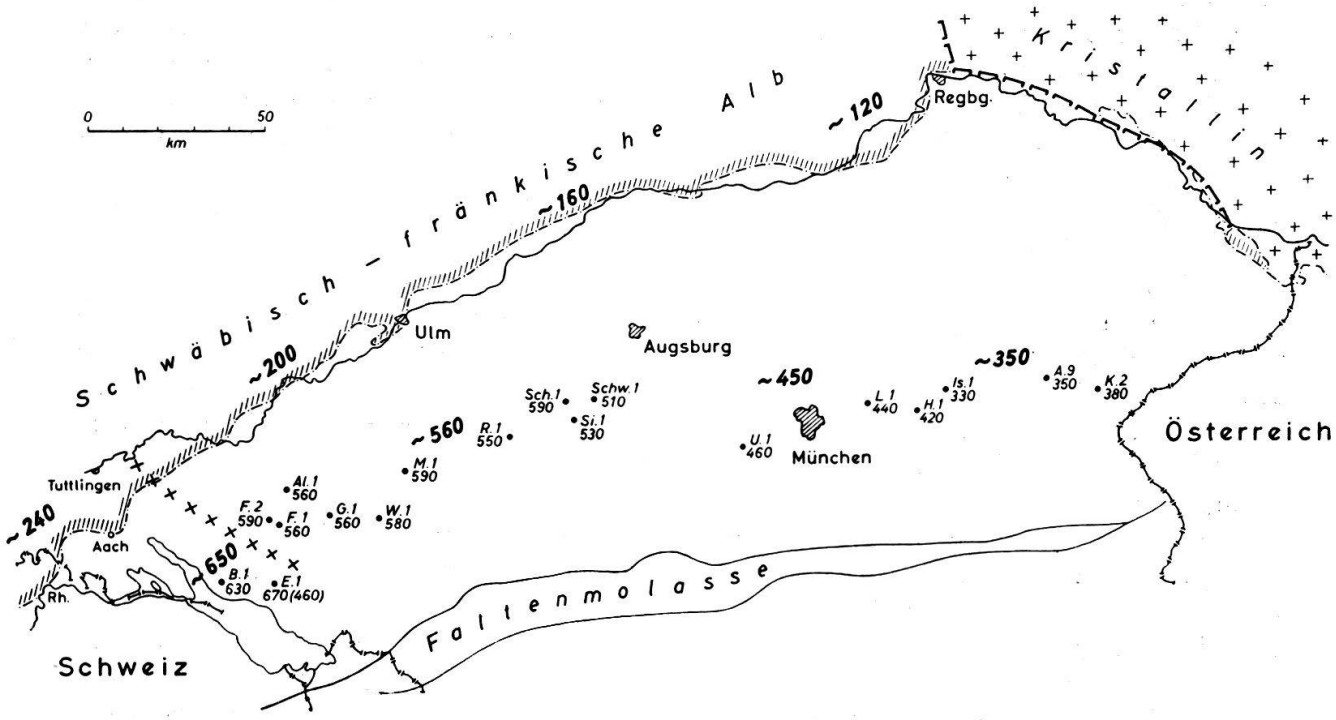

Abb. 7. — Abstände zwischen Marinoberkante und oberer Süß/Salzwassergrenze in m (kleine Zahlen an den Bohrungen, ca.-Werte). — Große Zahlen s. Text, liegende Kreuze = Mutmaßliche unterirdische Wasserscheide zwischen Donau- und Rheinsystem (vgl. Abb. 3). Rh. = Rheinfall, B. = Baitenhausen, E. = Ettenkirch, F. = Fronhofen, Al. = Altshausen, G. = Gaisbeuren, W. = Wurzach, M. = Mönchsrot, R. = Rieden Sch. = Scherstetten, Si. = Siebnach, Schw. = Schwabmünchen, U. = Unterbrunn, L. = Landsham, H. = Hohenlinden, Is. = Isen, A. = Ampfing, K. = Kastl.

sammenhängen, doch ergab eine genauere Überprüfung kein befriedigendes Bild. Viel wahrscheinlicher ist es, daß eine verschieden starke Absenkung des Karstwasserspiegels und nicht die mehr oder minder zufällige heutige Beckenoberfläche die entscheidende Rolle dabei spielt. Als große Zahlen sind daher auf der Zeichnung die Durchschnittswerte in Metern für das Herabwandern der Süß/Salzwassergrenze eingetragen, ferner am Beckenrand die ungefähren Beträge des Einschneidens der Vorfluter in den Karst seit dem Oberpliozän, wie man sie u. a. etwa aus den Erosionsrelikten der Molasse auf der Alb oder aus der heutigen Lage der Klifflinie der Oberen Meeresmolasse abschätzen kann (z. B. GRAUL 1943, Karte 5; ELBERSKIRCH & LEMCKE 1955, Abb. 4, S. 317). In allen Fällen liegt das Verhältnis der jeweils zusammengehörenden Werte um etwa 1 : 2,8, was überzufällig sein dürfte. Die Tieferlegung der Süß/Salzwassergrenze steht also offenbar in direkter Beziehung zur Tieferlegung des Karstwasserspiegels und dem dadurch im Becken sich entwickelnden Druckgefälle. *Dies aber ist nichts anderes als der regionale Ausdruck des Darcy'schen Gesetzes.*

c) Mögliche Folgerungen für die Erdölexploration

Es bleibt noch zu erörtern, ob von diesen Erscheinungen erdölgeologische Konsequenzen zu erwarten sind und welcher Art sie gegebenenfalls sein könnten. Die erste Frage wird man dahin beantworten müssen, daß es wahrscheinlich nicht gleichgültig ist, wenn eine Öllagerstätte über längere Zeiträume hinweg in vertikaler Richtung von Wasser durchflossen wird, auch wenn dies nur äußerst langsam geschieht. Die Vorgänge dabei im einzelnen zu erfassen, ist allerdings sehr schwierig, wenn nicht unmöglich, so daß man einstweilen mit theoretischen Überlegungen zufrieden sein muß, in denen natürlich noch manche Unsicherheiten stecken. Falls sich eine Lagerstätte in einiger Entfernung über dem verkarsteten Malm befindet, wie es z. B. in Ampfing der Fall ist, wo zwischen Tertiärbasis und Malm noch einige 100 Meter meist tonige Oberkreide liegen (HEERMANN 1954, S. 17), werden die Wirkungen des durchfließenden Porenwassers vermutlich nur sehr gering sein. Die Fließbewegung ist von oben nach unten gerichtet, und zwar sowohl in der Lagerstätte selbst wie auch in ihrem Randwasserbereich. Es besteht also keine Möglichkeit zu einem seitlichen Auswandern des Öls etwa ins Randwasser hinein, und ebenso ist auch ein Abwärtswandern des Öls zusammen mit dem Wasser unmöglich, da das tonige Liegende wohl für Wasser, nicht aber für Öl durchlässig ist. In einem solchen Falle wird also vielleicht der Wassergehalt durch das hindurchsickernde Porenwasser etwas erhöht werden, im übrigen aber wird die Lagerstätte vermutlich intakt bleiben.

Weit ungünstiger erscheint demgegenüber die Situation bei einer Lagerstätte in einem Sandstein z. B. der Bausteinschichten der Westmolasse, falls er ohne hinreichende Abdichtung direkt auf verkarstetem Malm liegt und mit diesem in hydrologischem Zusammenhang steht, so daß das Rand- und Bodenwasser mindestens druckmäßig zum Karstwasserregime gehört. Da in diesem das unablässig langsam von oben her zusickernde Porenwasser des Hangenden als Überschuß seitlich zur Donau oder zum Rhein hin abgeleitet werden muß, ist es wohl nicht ausgeschlossen, daß auch *das Öl einer solchen Lagerstätte in diese Bewegung zum Druckminimum hin* einbezogen wird. Nach Überlegungen von W. TUNN könnte sich dies vielleicht so abspielen, daß das eindringende Wasser etwa entsprechend den Vorgängen bei künstlicher Entölung das Öl nach unten vor sich her treibt und schließlich in die zur Donau hin gerichtete Bewegung des Karstwassers einschleust, mit dem es dann

übrigens relativ leicht auch in weit von seinem mutmaßlichen Muttergestein entfernte Gebiete, wie z. B. das der bekannten Ölspuren von Ehingen südwestlich Ulm (z. B. BENTZ 1949, S. 43; ROLL 1953; vgl. dazu auch HEERMANN 1954, S. 20) gelangen könnte. Auf diese Weise würde eine allmähliche Zerstörung solcher Lagerstätten vor sich gehen, die, da geologische Zeiträume zur Verfügung stehen, letzten Endes vielleicht sogar zu einer vollständigen Entfernung des Öls führen müßte.

Von einem derartigen Vorgang würden wohl die jeweils gut durchlässigen Partien eines Trägers immer zuerst betroffen werden, und es ist nun sehr interessant, daß sich ein entsprechendes Bild auch tatsächlich oft in den bisher untersuchten vermuteten Lagerstätten der Bausteinschichten bietet. Besonders bezeichnend waren in dieser Hinsicht die Bohrungen Schwabmünchen 1, Siebnach 1 und Rieden 1 (MALZAHN 1956, S. 221); sie alle wiesen in den oberen, gut bis sehr gut durchlässigen Teilen des Trägers noch *Restölspuren* auf, die z. T. an etwas weniger gut durchlässige Flasern gebunden schienen, und führten im übrigen in dieser Region Süßwasser mit einem meist dem Malmkarstwasser entsprechenden Druck (S. 45). In den tieferen Teilen der Bausteinschichten fanden sich hier demgegenüber in sehr viel schlechter durchlässigen Sandsteinen öfters relativ gute Ölspuren, die in Schwabmünchen 1 sogar eine kleine, wenn auch unwirtschaftliche Produktion erbrachten. Es ist daher denkbar, daß in diesen drei Fällen einstmals vorhandene Lagerstätten tatsächlich durch derartige Auswaschungsprozesse weitgehend zerstört worden sind und daß auch andere Rückschläge im westlichen Molassebecken z. T. auf entsprechenden Erscheinungen beruhen, da es sich in allen diesen Fällen um vermutete Lagerstätten in Gesteinen handelt, für die Verbindungsmöglichkeiten zu dem Malmkarstwasser nicht auszuschließen sind. Das gleiche gilt anscheinend auch für einige Bohrungen in Ostbayern, z. B. für die Basissande des Tertiärs in Gendorf 1, eventuell auch in Kastl 1 (MALZAHN 1956, S. 221) und 2. Schon jetzt spricht jedenfalls manches dafür, das *in Trägern, die unmittelbar auf Malm liegen, meist trotz günstiger struktureller Position die Ölmöglichkeiten eingeschränkt* sein werden, sofern — und das ist natürlich entscheidend — das im Malm befindliche Wasser einen geringeren Druck als den hydrostatischen besitzt.

Selbstverständlich kann diese «Regel» durch zusätzliche Faktoren verschiedener Art modifiziert werden, so daß es Ausnahmen gibt wie die von VOLZ (1956) beschriebene Lagerstätte von Heimertingen, in der die Ölführung der Bausteinschichten auf eine vom Karstwasser durch dichte Sandsteine getrennte Linse beschränkt zu sein scheint. Es braucht aber auch in anderen Fällen das betreffende Vorkommen nicht restlos zerstört zu sein, falls nämlich die Auswaschung des Öls ins Liegende hinein aus irgendwelchen Gründen nur lokal an bestimmten Stellen und nicht flächenhaft erfolgt. Außerdem wird die Malmoberfläche auch sicherlich stellenweise in hinreichender Ausdehnung von nicht verkarstungsfähigen Gesteinen wie z. B. den Zementmergeln des Portland eingenommen sein, so daß dort die Karstwassereinflüsse auf die Basis des Hangenden nicht wirksam werden können, was vielleicht in der auf S. 44 erwähnten Hochlage von Unterbrunn der Fall ist. Abgesehen von diesen Möglichkeiten ist schließlich nicht sicher, daß das aus den Lagerstätten etwa abwandernde Öl auch wirklich zur Donau gelangt, da sich an der Unterkante der Molasse wahrscheinlich genügend Unebenheiten finden, an denen es sich *in geschützter Position* erneut anreichern kann. Trotzdem bedeutet dies alles natürlich eine wesentliche Erschwerung der Explorationsarbeiten, da man — u. U. unter Verzicht auf herkömmliche Vorstellungen — nunmehr z. T. neue Wege wird gehen müssen, um die auch jetzt noch gebotenen Chancen auszuschöpfen, die man im

Augenblick vielleicht erst in Umrissen erkennen kann. Unabhängig davon wird es zweckmäßig sein, den Aufschluß in der Westmolasse, wie es bereits geschieht, teilweise mehr in jene südlichen Gebiete zu verlagern, wo zwischen den prospektiven Horizonten der Bausteinschichten und dem Malm die abdichtenden Tone des Rupel bzw. des Lattorf zu erwarten sind.

Die Voraussetzungen, unter denen eine Zerstörung von Erdöllagerstätten *durch Auswaschung von oben her* überhaupt denkbar wird, sind im nördlichen Alpenvorland nicht überall vorhanden. Sie scheinen vielmehr im wesentlichen auf den *deutschen* Anteil beschränkt zu sein, wo nicht nur der tiefste freie Spiegel eines Karstwassersystems mit den Vorflutern des Gesamtgebietes identisch ist, so daß ein Gefälle vom hydrostatischen Druck zum Karstwasser entstehen konnte, sondern wo auch die Mächtigkeit der verkarstungsfähigen Malmgesteine so groß ist (vgl. S. 44 & 45), daß die Fließbewegungen in ihnen durch Störungen normaler Sprunghöhe kaum beeinträchtigt sein werden. Diese Vorbedingungen sind z. B. in *Oberösterreich* wahrscheinlich nicht verwirklicht, weil dort die als Vorfluter dienende Donau den Malmkarst nicht öffnet und auch die Mächtigkeit des Malms nach den Ergebnissen der Bohrung Puchkirchen 1 nordöstlich Salzburg (Erdölzeitschrift 72, 1956, S. 374) erheblich abzunehmen scheint, so daß die Fündigkeit dieser Bohrung in der auf Jura liegenden Tertiärbasis (Erdöl u. Kohle 9, 1956, S. 423) den hier geäußerten Vermutungen über mögliche Auswaschungsvorgänge nicht widerspricht. Ähnlich werden die Verhältnisse wahrscheinlich in der *Schweiz* liegen, wo — abgesehen von der in weiten Gebieten des südwestlichen Mittellandes wohl vorhandenen Einschaltung von z. T. toniger Unterkreide zwischen Malm und Tertiär — die Mächtigkeit der verkarstungsfähigen Malmgesteine ebenfalls oft nicht groß genug sein dürfte, um über die Verbiegungen und die dort vermutlich auch vorhandenen Störungen hinweg ein ungehindertes Funktionieren eines Karstwassermechanismus im beschriebenen Sinne zu erlauben. Dafür spricht unmittelbar die Bohrung Altishofen 1 nordwestlich Luzern, die in dem nur ca. 140 m mächtigen, verkarstungsfähigen oberen Malm kein Süßwasser, sondern Salzwasser antraf (Kopp 1955a, S. 2), so daß hier Einflüsse eines oberflächlichen Karstes in der Tat zu fehlen scheinen. Der deutsche Anteil des Alpenvorlandes, besonders die Westmolasse, ist also gegenüber den Nachbargebieten im Osten wie im Südwesten wahrscheinlich in mancher Hinsicht benachteiligt, doch haben andererseits vor allem die letzten Erfolge in Heimertingen (Erdöl u. Kohle 9, 1956, S. 492) gezeigt, daß auch in den durch Karstwasser besonders gefährdeten *westlichen Beckenteilen durchaus mit wirtschaftlichen Lagerstätten* zu rechnen ist, die aufzufinden eine trotz aller Schwierigkeiten besonders reizvolle Zukunftsaufgabe sein wird.

Wichtigste Literatur

Abele, G. (1950): Die Heil- und Mineralquellen Südbayerns. — Geologica Bavarica 2, 112 S., 2 Taf., München.

Archie, G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. — AIME (American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Dallas/Texas), Trans. Vol. 146.

Bentz, A. (1949): Bau und Erdölhöffigkeit des Molassetrogs von Oberbayern und Oberschwaben. — Erdöl u. Kohle 2, S. 41—52, Hamburg.

Boigk, H. & Krzywicki, E. (1954): Die Erdölbohrtätigkeit des Jahres 1953 in Westdeutschland. — Erdöl u. Kohle 7, S. 137—148, Hamburg.

Cramer, H. (1953): Thermalwasser aus tiefliegenden Karsthöhlen des Bayerischen Innviertels. — Geologica Bavarica 17, S. 164—177, München.

Elberskirch, W. & Lemcke, K. (1955): Zur Tektonik der nordalpinen Molassesenke. — Z. deutsch. geol. Ges. 105 (1953), S. 307—323, Hannover.

Graul, H. (1943): Zur Morphologie der Ingolstädter Ausräumungslandschaft. — Forschungen z. deutsch. Landeskunde 43, 114 S., 8 Karten, Leipzig.

Haus, H. A. (1952): Das Molassebecken im südwestdeutschen Gebiet. — Bull. Ver. Schweizer. Petrol-Geol. u. Ing. 19, Nr. 57, S. 25—30, Basel.

Heermann, O. (1954): Erdölgeologische Grundlagen der Aufschlußarbeiten im ostbayerischen Molassebecken. — Bull. Ver. Schweizer. Petrol-Geol. u. Ing. 21, Nr. 60, S. 5—22, Basel.

— (1955): Bau und Erdölhöffigkeit des ostbayerischen Molassebeckens. — Erdöl u. Kohle 8, S. 69—74, Hamburg.

Keilhack, K. (1935): Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde. — 3. Aufl., Berlin.

Kiderlen, H. (1931): Beiträge zur Stratigraphie und Paläogeographie des süddeutschen Tertiärs. — N. Jb. Mineral. usw., Beil. 66 B, S. 215—384, Stuttgart.

Kopp, J. (1955a): Erdölanzeichen in der Trias der Bohrung Altishofen. — Bull. Ver. Schweizer. Petrol-Geol. u. Ing. 21, Nr. 61, S. 1—6, Basel.

— (1955b): Die Ergebnisse der Erdölbohrung Altishofen. — Mitt. Naturf. Ges. Luzern, Bd. 17, Luzern.

Lemcke, K. (1955a): Die Fazies der Molasse der Bohrung Scherstetten 1. — Geologica Bavarica 24, S. 12—21, München.

— (1955b): Die Fazies des Jura der Bohrung Scherstetten 1. — Geologica Bavarica 24, S. 52—64, München.

— (1955c): Öl, Gas und Wasser in der Bohrung Scherstetten 1. — Geologica Bavarica 24, S. 139—141, München.

— *und v. Engelhardt, W. & Füchtbauer, H.* (1953): Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen im Westteil der ungefalteten Molasse des süddeutschen Alpenvorlandes. — Geol. Jahrb., Beih. 11, 109 S., 9 Taf., 72 Tab., Hannover.

Lögters, H. (1952): Die Erdölbohrtätigkeit des Jahres 1951 in Deutschland. — Erdöl u. Kohle 5, S. 273—282, Hamburg.

Malzahn, E. (1956): Die Erdölbohrtätigkeit des Jahres 1955 in Westdeutschland. — Erdöl u. Kohle 9, S. 209—222, Hamburg.

Mounce, W. D. & Rust, W. M. (1944): Natural potentials in sedimentary rocks. — AIME, Trans. Vol. 155.

Nathan, H. (1949): Geologische Ergebnisse der Erdölbohrungen im Bayerischen Innviertel. — Geologica Bavarica 1, 68 S., 1 Taf., München.

Prinz, E. (1923): Handbuch der Hydrologie, 1. Bd. — 2. Aufl., Berlin.

Roll, A. (1952): Der unmittelbare Nachweis des vindelizischen Rückens unter der süddeutschen Molasse. — Geol. Rdsch. 40, S. 243—248, Stuttgart.

— (1953): Stand der Erdölexploration im Molassetrog. — Erdöl u. Kohle 6, S. 683, Hamburg.

Rutte, E. (1953): Der fossile Karst der südbadischen Vorbergzone. — Jber. u. Mitt. Oberrh. Geol. Ver., N. F. 33 (1951), Freiburg i. Br.

Schlumberger Well Surveying Corp. Log Interpretation Charts (1955).

Schuppli, H. M. (1950): Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, III. Teil. — Beitr. z. Geologie d. Schweiz, Geotechn. Serie, Lief. 26, Teil 3, 41 S., 4 Taf., Bern.

— (1952): Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, IV. Teil. — Beitr. z. Geol. d. Schweiz, Geotechn. Serie, Lief. 26, Teil 4, 79 S., 4 Taf., Bern.

Schwille, Fr. (1956): Jonenumtausch und der Chemismus von Grund- und Mineralwässern. — Z. deutsch. geol. Ges. 106 (1954), Hannover.

Tschopp, H. J. (1954): Erdölmöglichkeiten in der Schweiz. — Erdöl u. Kohle 7, S. 617—622, Hamburg.

Tunn, W. (1952): Erfahrungen mit dem Mikrolog in deutschen Erdölfeldern. — Erdöl u. Kohle 5, S. 539—545, Hamburg.

Vonderschmitt, L. & Tschopp, H. J. (1953): Die Jura-Molasse-Grenze in der Bohrung Altishofen (Kanton Luzern). — Bull. Ver. Schweizer. Petrol-Geol. u. Ing. 20, Nr. 58, Basel.

Volz, E. (1953): Geologische Untersuchungen in der tertiären Molasse des Saulgauer Gebiets. — N. Jb. Geol. u. Pal., Abh. 97, S. 189—219, Stuttgart.

— (1956): Die Molassestrukturen Heimertingen und Lauben. — Erdoel-Zeitschrift 72, S. 293 bis 302, Wien—Hamburg.

Weber, E. (1955): Die Makrofossilien des Jura aus der Bohrung Scherstetten 1. — Geologica Bavarica 24, S. 65—85, München.

Weidenbach, F. (1954): Über einige Wasserbohrungen im Jura. — Jber. u. Mitt. Oberrh. Geol. Ver., N. F. 36, Stuttgart.

Wyllie, M. R. J. (1949): A quantitative Analysis of the electrochemical component of the SP-curve. AIME, Trans. Vol. 186.