Genetische Deutung der Resedimente im Obertithon des vocontischen Troges

Objekttyp: **Chapter**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **63 (1970)**

Heft 2

PDF erstellt am: **27.04.2024**

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

auch das Vorhandensein von Schichtlücken im tiefen Bereich beweist. Demnach kann es sich nur um Schlickgerölle gehandelt haben. Insofern stellen also die resedimentären Breccien des subalpinen Obertithons einen Sonderfall gegenüber anderen Resedimenten dar, die überwiegend aus «primär» klastischen, bereits verfestigten Komponenten bestehen, die durch den gravitativen Massentransport aus ihrem küstennahen Ablagerungsgebiet fortgeführt wurden. Dieser Unterschied betrifft auch die sonst sehr ähnlichen, von BERNOULLI (1964) aus dem Lias des Monte Generoso (Tessin) beschriebenen resedimentären Breccien.

In den Geröllpeliten kommt wahrscheinlich auch noch ein anderer Typ von Schlickgeröllen vor. Bei der Auslösung der Suspensionsströme hat offensichtlich die thixotrope Verflüssigung von wasserreichen Kalkschlämmen (z.B. durch Erdbebenerschütterungen) eine entscheidende Rolle gespielt. Wenn einzelne Partien des Sediments zu diesem Zeitpunkt bereits etwas stärker verfestigt waren, blieben sie bei dem Zusammenbruch des Gefüges als Restinseln erhalten, die dann als «Gerölle» in der mobilisierten Masse mitschwammen. Allerdings ist im Einzelfall oft schwer zu entscheiden, welcher Gerölltyp vorliegt.

Bei Berücksichtigung dieser Voraussetzungen ergeben sich aus den in den vorigen Kapiteln aufgeführten Tatsachen einige gemeinsame Grundzüge für alle drei der geschilderten Resedimenttypen, denen das – oder die – verschiedenen genetischen Modelle Rechnung tragen müssen.

a) In allen Fällen hat eine intensive Durchmischung des Materials stattgefunden: Komponenten verschiedenen Alters und verschiedenster fazieller Herkunft kommen im Handstückbereich direkt nebeneinander vor. Mischfaunen in der pelitischen Matrix mancher Geröllpelite zeigen eine Durchmischung bis in den Millimeterbereich an.
b) Die Suspensionsströme haben auch noch im tieferen Teil ihres Laufs kräftig erodiert, wie Schichtlücken an der Basis der resedimentären Breccien und Geröllpelite zeigen.
c) Das erodierte Material wurde in Form von ± steifplastischen Schlickgeröllen von der Strömung aufgenommen und in Suspension über Entfernungen in der Grössenordnung von Zehnerkilometern transportiert. Hier treten nur bei den Geröllpeliten aus den oben geschilderten Gründen Schwierigkeiten auf. Das Profil von Charens (Fig. 6, Chr) zeigt aber in verschiedenen Geröllpeliten im unteren Teil eine Anreicherung unregelmässig gestalteter Gerölle, die nur durch Erosion entstanden sein können.

All das lässt sich nur erklären, wenn man annimmt, dass turbulente Suspensionsströme für die Entstehung *aller* Resedimente verantwortlich waren.

V. GENETISCHE DEUTUNG DER RESEDIMENTE IM OBERTITHON DES VOCONTISCHEN TROGES

A. Bisherige Interpretation ähnlicher Resedimente in anderen Gebieten im Vergleich zu den Verhältnissen im Vocontischen Trog

Ablagerungen wie die hier beschriebenen wurden schon vielfach in allen Teilen der Welt beobachtet. CROWELL (1957) hat sich ausführlich mit der Genese der «pebbly

mudstones» befasst und nimmt für sie eine zweiphasige Entstehung an: Ablagerung von Geröllen aus turbidity currents auf einen metastabilen Schlamm bringt dessen Gefüge durch Überlastung zum Zusammenbruch und induziert einen Schlammstrom. Dazu ist allerdings die Annahme erforderlich, dass eine Hangneigung bestand, die einerseits schon die Ablagerung von Material aus turbidity currents und andererseits noch die Mobilisation von Schlammströmen erlaubte, und das erscheint mir schwierig. Wieweit solche Vorgänge in orogen aktiven Zonen durch fortlaufende Reliefübersteilung und eine zeitliche Trennung der beiden Phasen möglich sind, ist eine andere Frage, aber für den Vocontischen Trog ist diese Voraussetzung sicher nicht gegeben. Ausserdem sind hier die Gerölle durchwegs auf die eine oder andere Weise syngenetisch, so dass man keine turbidity currents als Geröllieferanten benötigt.

Auch DOTT (1963) vertritt die Ansicht, dass die «pebbly mudstones» vorzeitig steckengebliebene Schlammströme sind, die sich nicht zu turbidity currents entwickeln konnten und nie ein voll turbulentes Transportstadium erreicht haben. Interessant ist die Beobachtung von groben gradierten Konglomeraten in der oberen Kreide von Chile, die nach oben in «pebbly mudstones» übergehen, wobei die Gradierung durch schnelleres Rollen der groben Blöcke am Grund erklärt wird. Sie entsprechen in ihrem äusseren Bild ganz einigen bei Charens (Fig. 6, Chr) beobachteten Resedimenten, bei denen aber auch die gröberen Gerölle in Suspension transportiert wurden.

LINDSAY (1966, 1968) hat Geröllpelite («tilloids») im Perm von Australien sehr eingehend untersucht, vor allem im Hinblick auf die Einregelung der Gerölle. Er nimmt für die meisten dieser Bildungen einen turbulenten Transport an, allerdings in Form einer «slow boiling agitation» im Sinne von KUENEN (1956). Im letzten Stadium wird die Bewegung dann laminar. Ströme besonders hoher Viskosität wären aber demnach nie über das laminare Anfangsstadium hinausgekommen.

Im allgemeinen besteht also die Tendenz, genetisch scharf zwischen echten Turbiditen (entstanden aus turbulenten Suspensionsströmen) und Ablagerungen aus zähflüssigen, nicht oder wenigstens nicht voll turbulenten Schlammströmen zu unterscheiden, die ein steckengebliebenes Vorstadium in der Entwicklung zum turbidity current darstellen. Es ist in diesem Zusammenhang auch immer wieder von «eingefrorenen» Strukturen die Rede. Eine Ausnahme macht hier nur SAMES (1965), der für das mehrere Meter mächtige, gradierte Baganza-Konglomerat im nordapenninen Oberkreideflysch einen turbulenten Transport hoher Geschwindigkeit annimmt, und zwar wegen der intensiven Durchmischung von Geröllen verschiedenen Alters.

Nach den neu gewonnenen Ergebnissen lässt sich die oben dargestellte scharfe Trennung, wie ich sie seinerzeit selbst auch vertreten habe (REMANE 1960) aber nicht mehr aufrechterhalten, zumindestens nicht für die Resedimente im Obertithon des Vocontischen Troges. Trotz der so grundsätzlich verschiedenen Ablagerungsgefüge müssen die Suspensionsströme in allen Fällen ein voll turbulentes Stadium durchlaufen haben. Anders lassen sich die weitgehenden Übereinstimmungen in Durchmischungsgrad, Materialbestand und Erosionseigenschaften nicht erklären. Deshalb erscheint es mir wichtig, deutlich zwischen Transport- und Ablagerungsmechanismus zu unterscheiden. Die sedimentären Gefüge können direkt nur über den Ablagerungsmechanismus Auskunft geben. Die Rückschlüsse auf den Transportmechanismus ergeben sich da-

gegen in erster Linie aus dem Materialbestand, und dabei sind paläökologische und stratigraphische Kriterien entscheidend.

Man kommt durch diese Befunde zwangsläufig zu dem Schluss, dass grundsätzlich homologe Transportmechanismen, die sich nur graduell unterschieden haben, unter geeigneten Bedingungen in ganz verschiedene Ablagerungsmechanismen ausmündeten. Die interessanten Untersuchungen von SANDERS (1965) zeigen jedoch, dass im Stadium der Ablagerung Übergänge existieren, die bisher übersehen wurden, denn offensichtlich wurde auch bei den klassischen Turbiditen nur ein geringer Teil des Materials direkt aus turbulenten Suspensionen sedimentiert.

B. Besondere Gegebenheiten des Sediments, verfügbare physikalische Grundlagen

1) Spezielle lithologische Eigenschaften des untersuchten Sediments

Zunächst ist daran zu erinnern, dass wir es im Obertithon des Vocontischen Troges mit reinen Kalkpeliten zu tun haben, die sich durch ihr wesentlich geringeres Thixotropieverhalten (WINKLER 1938) von entsprechenden Tonsuspensionen unterscheiden.

Ein anderer wichtiger Punkt ist, dass die diagenetische Verfestigung von Kalkschlämmen naturgemäss ganz anders verläuft als die von tonigen Sedimenten. Untersuchungen über die Diagenese rezenter bis quartärer Kalke (FRIEDMAN 1964) beziehen sich schon aus rein technischen Gründen hauptsächlich auf Flachwasserablagerungen. Die bisher bekanntgewordenen Beispiele für Verfestigung von karbonatischen Sedimenten in grösseren Meerestiefen (FRIEDMAN 1964, MILLIMAN 1966, FISCHER und GARRISON 1967) lassen sich nicht auf das Untersuchungsgebiet anwenden. Ich glaube aber, dass man auf jeden Fall davon ausgehen kann, dass bei den Löslichkeitsunterschieden zwischen Aragonit, Magnesiokalzit und Kalzit, und bei dem Hinzukommen einer leichten Drucklösung an den Kornkontakten früher oder später lokale $CaCO_3$-Übersättigungen im Porenwasser auftraten, die wahrscheinlich zur Ausfällung von Kalzit in der Nähe der Kornkontakte und damit zu einer Punktverschweissung der Körner führten. So liesse sich jedenfalls die Bildung stärker kohäsiver Schlicke erklären, die sich in der ausserordentlich grossen Häufigkeit von steifplastischen Schlickgeröllen in den Resedimenten des Vocontischen Troges äussert.

2) Zähigkeitsverhalten von Kalksuspensionen bei niedrigen Schergeschwindigkeiten

Was die rein pelitische[10]) Suspension unter Vernachlässigung einer eventuellen grobklastischen Fracht anbetrifft, so lag es nahe, zunächst einmal ihr Zähigkeitsverhalten in Abhängigkeit von der Dichte, d.h. der Volumenkonzentration der suspendierten Partikel zu untersuchen. Als Modellsediment wurde dabei dänische Schlämm-

[10]) Nach E. FLÜGEL (1967, Abb. 2) reicht die Korngrösse bei rein pelagischen Calpionellenkalken bis 5μ und zeigt ein ausgeprägtes Maximum bei 1μ. Da offensichtlich aufgrund der Präparationsmethode nur die scheinbaren Korndurchmesser erfasst wurden, muss man in Wirklichkeit mit etwas höheren Werten rechnen.

kreide verwendet, deren Korngrössen nach mikroskopischen Messungen zwischen 1μ und 15μ liegen, mit einem Dichtemittel unter 5μ. Die Messungen wurden mit Kapillar-Viskosimetern verschiedener Kapillarenweiten durchgeführt. Man darf dabei natürlich nicht vergessen, dass die Zähigkeitsbegriffe η, gemessen in Poise, und ν ($\nu = \eta/\varrho$), gemessen in Stok, nur auf Newtonsche Flüssigkeiten anwendbar sind, aber nicht ohne weiteres auf Suspensionen, da sie ein nicht-Newtonsches Verhalten zeigen können. Es empfiehlt sich also, hier nicht einfach von Zähigkeit zu sprechen, sondern den in der Strömungsphysik eingebürgerten Ausdruck «rechnerische Zähigkeit» zu verwenden. In diesem Zusammenhang ist aber allein entscheidend, dass ganz offensichtlich eine gesetzmässige Beziehung zwischen der Dichte (d.h. Volumenkonzentration) einer Suspension und ihrem Zähigkeitsverhalten besteht (Fig. 20), die sich mit denselben Methoden wie die Zähigkeit Newtonscher Flüssigkeiten messen lässt. Die rechnerische Zähigkeit muss sich auch in analoger Weise auf das hydrodynamische Verhalten der Suspensionen auswirken.

Entsprechend der notgedrungen primitiven Versuchsanordnung darf man keine allzu exakten Messwerte erwarten, aber der Gang der Kurve ist eindeutig: Die rechnerische Zähigkeit der Suspension ist bei geringen Volumenkonzentrationen kaum höher als die Zähigkeit des Wassers, wie das nach der Einsteinschen Formel:

$$\eta_{\text{solu}} = \eta_{\text{solv}} (1 + 2{,}5\, c_v)^{11)}$$

auch zu erwarten ist. Erst etwa um $\varrho = 1{,}5$ g/cm³, was ziemlich genau einem Wert von $\varepsilon = 70\%$ oder $c_v = 30\%$ entspricht, steigt die Kurve steil an.

Bereits KUENEN (1951) liess von der SHELL Zähigkeitsmessungen an Tonsuspensionen durchführen; seine Kurve wurde hier in Fig. 20 übernommen. Sie zeigt im Prinzip den gleichen Gang, es werden aber schneller höhere rechnerische Zähigkeiten als bei den Kalksuspensionen erreicht. Das lässt sich vielleicht durch die wesentlich stärkeren Thixotropie-Eigenschaften von Tonmineralen erklären.

Bisher wurde jedoch in der geologischen Literatur noch nie versucht, den Einfluss der Zähigkeit von Suspensionen auf die Strömungsform (laminar oder turbulent) abzuschätzen.

C. Versuch einer physikalischen Deutung der Resedimentationsvorgänge

Es sind schon zahlreiche Versuche unternommen worden, die Hydrodynamik von turbidity currents wenigstens näherungsweise rechnerisch zu erfassen (BAGNOLD 1962, HINZE 1960, M.A. JOHNSON 1962, 1966, KUENEN in zahlreichen Arbeiten, MENARD und LUDWICK 1951, MIDDLETON 1966, PLAPP und MITCHELL 1960). Obwohl viele wertvolle Ergebnisse gewonnen wurden, bleibt doch die Tatsache bestehen, dass eine exakte mathematische Beschreibung von turbidity currents noch auf lange Sicht unmöglich bleiben wird. Es kann sich hier also nur darum handeln, ein rein qualitatives Anschauungsmodell zu entwerfen, mit dem sich vielleicht die scheinbaren Widersprüche zwischen dem aus geologischen Gründen zu fordernden Transport-

11) Wobei c_v = Volumenkonzentration des suspendierten Materials.

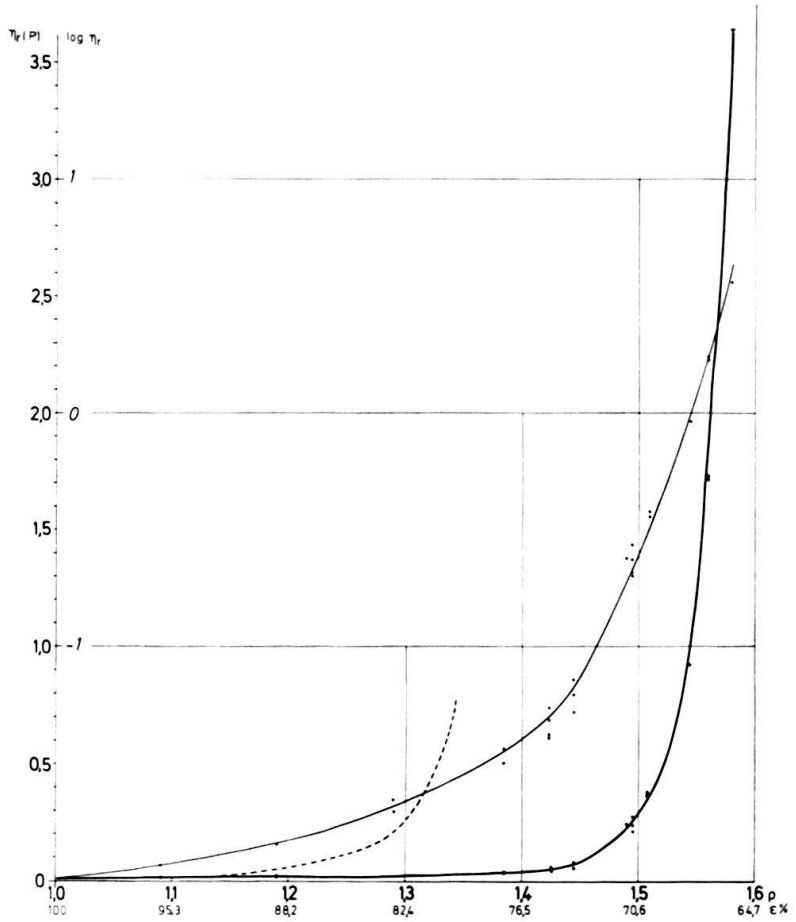

Fig. 20. Rechnerische Zähigkeit von pelitischen Kalksuspensionen (Schlämmkreide) in Abhängigkeit von der Dichte, d.h. der Volumenkonzentration. Dünne Kurve oben: Zähigkeit im logarithmischem Maßstab. – Gestrichelte Kurve: Zähigkeit von Tonsuspensionen in Abhängigkeit von der Dichte nach KUENEN (1951), Maßstab linear.

mechanismus und den aus den Sedimentstrukturen resultierenden Ablagerungsmechanismen erklären lassen.

In erster Annäherung liefert die Betrachtung des Strömungsverhaltens Newtonscher Flüssigkeiten einen brauchbaren Ausgangspunkt. Es lässt sich durch eine dimensionslose Verhältniszahl (die Reynolds'sche Zahl) charakterisieren, die als das Verhältnis von Trägheitskraft zu Zähigkeitskraft definiert ist. Diese Zahl, abgekürzt *Re*, wurde zuerst für die Strömung in Rohren entwickelt und lautet mathematisch formuliert:

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot r}{\nu} = \frac{\bar{u} \cdot r \cdot \varrho}{\eta} \text{ [12]}$$

Re lässt sich aber auch auf andere Querschnitte als Rohre anwenden, anstelle von *r* tritt dann der hydraulische Radius (r_h = F/U = Querschnittfläche durch den benetz-

[12]) $\bar{u}$ = mittlere Stromgeschwindigkeit; r = Radius des Rohrs; ν = kinematische Viskosität; ϱ = Dichte der Flüssigkeit; η = dynamische Viskosität. Ableitung aus der Definition:

$$\mathrm{Re} = (\varrho \cdot u^2)/l : (\eta \cdot u)/l^2 = (\varrho \cdot u \cdot l)/\eta$$

ten Querschnittumfang). Am wichtigsten ist hierbei nun die sogenannte kritische Reynolds'sche Zahl (Re_{krit}), die den Bereich kennzeichnet, in dem eine laminare Strömung in eine turbulente übergeht. Der Zahlwert von Re_{krit} hängt von den jeweiligen äusseren Bedingungen ab (z.B. Rauhigkeit der Grenzfläche), ist also nicht konstant.

Das durch *Re* gegebene Verhältnis gilt in seinem grundsätzlichen Inhalt auch für Suspensionen, denn auch ihr Turbulenzverhalten wird vom Quotienten Trägheitskraft zu Zähigkeitskraft bestimmt. Dabei muss natürlich die rechnerische Zähigkeit zugrunde gelegt werden, die – im Gegensatz zur Zähigkeit Newtonscher Flüssigkeiten – anscheinend noch von der mittleren Schergeschwindigkeit c beeinflusst wird: KUENEN (1951) referiert eine Mitteilung von KNAPP, nach der beim Pumpen von Zementsuspensionen durch Röhren die rechnerische Zähigkeit mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (also mit c) abnimmt. Die «Zähigkeitskraft» von Suspensionen ist also von sehr komplexer Natur und lässt sich nicht mehr rechnerisch fassen.

Aus dem durch $Re = (\bar{u} \cdot r_h)/\nu$ gegebenen Verhältnis lässt sich aber auch für Suspensionen noch so viel entnehmen, dass bei einer hohen rechnerischen Zähigkeit entsprechend hohe Strömungsgeschwindigkeit und/oder hydraulische Radien nötig sind, um den Übergang vom laminaren zum turbulenten Fliessen zu ermöglichen. Und zweifellos besteht dabei auch ein gesetzmässiger Zusammenhang (nach Art der in Fig. 20 dargestellten Kurve) zwischen rechnerischer Zähigkeit und Volumenkonzentration einer Suspension.

Ein durch thixotrope Mobilisation entstandener Schlammstrom braucht bei einer hohen Ausgangskonzentration also höhere Strömungsgeschwindigkeiten, um turbulent fliessen zu können. Bei zu geringem Gefälle und infolgedessen zu niedriger Endgeschwindigkeit bleibt *Re* unterhalb des kritischen Bereichs. SAMES (1965) bringt ein Beispiel für einen solchen, in geringer Wassertiefe zum Stehen gekommenen konglomeratischen mudflow, der nie das turbulente Stadium erreicht hat. Für das Untersuchungsgebiet scheiden solche Fälle aber schon wegen der paläogeographischen Lage aus, ganz abgesehen von den zahlreichen Hinweisen auf einen turbulenten Transport (s.S. 725). Hier war wahrscheinlich auch der Kanalisierungseffekt beim Eintritt in ein submarines Canyon wichtig, weil dadurch r_h und damit *Re* erhöht wurden, so dass schon bei niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten Turbulenz auftrat. JOHNSON (1962) nimmt für turbidity currents *Re*-Zahlen von 10^7–10^{10} an, und damit wäre auch bei sehr hohen rechnerischen Zähigkeiten ein turbulentes Fliessen möglich.

Für die sedimentologische Fragestellung ist aber das Problem der Umkehrung dieses Prozesses viel interessanter. Ganz allgemein ergibt sich dabei folgender energetischer Aspekt: Die Turbulenz muss eine Arbeit gegen die innere Reibung der Flüssigkeit oder der Suspension leisten. Solange ein Gefälle vorhanden ist und durch die Schwerebeschleunigung Energie nachgeliefert wird, kann sich die Turbulenz erhalten. Hört das Gefälle auf, so muss die nötige Arbeitsleistung aus der kinetischen Energie des Stroms bei Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit bezogen werden. Dabei kann nur ein geringer Teil der kinetischen Energie entnommen werden, die Turbulenz kommt also vor dem Stehenbleiben des Stroms zum Erliegen, und die Strömung geht schliesslich in laminares Fliessen über, wobei zunächst noch lokale Restturbulenzen

bestehen bleiben können. Natürlich findet dieser Übergang bei einem Wert von *Re* statt, der weit unter der kritischen Reynoldsschen Zahl für das Zustandekommen der Turbulenz liegt.

Betrachtet man zwei turbulente Ströme gleicher Geschwindigkeit und von gleichem hydraulischem Radius, aber verschiedener Zähigkeit, so wird bei höherer Zähigkeit die Turbulenz eher zum Erliegen kommen, weil eine grössere Reibungsarbeit geleistet werden muss. Rechnerisch drückt sich das darin aus, dass von den beiden Strömen derjenige mit der höheren Zähigkeit eine kleinere *Re*-Zahl hat. Das gilt entsprechend für Suspensionen, wenn man die rechnerische Zähigkeit einsetzt.

Bei turbulent fliessenden Suspensionen kommt aber vielleicht noch eine weitere Komplikation hinzu: KUENEN (1951) untersuchte bei experimentellen turbidity currents den Zusammenhang zwischen Dichte (und damit der rechnerischen Zähigkeit) von turbulent fliessenden Tonsuspensionen und der Strömungsgeschwindigkeit, die die Suspensionen auf einem vorgegebenen konstanten Gefälle erreichten. Dabei ergab sich eine lineare Beziehung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Quadratwurzel der effektiven Dichte[13]) bis zu Suspensionsdichten von etwas über 1,5 g/cm³. Demnach schiene die rechnerische Zähigkeit keinen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit zu haben. KUENEN erklärt dies durch die Annahme, dass sich Turbulenzwalzen mit dünnen Wasserfilmen dazwischen ausbildeten[14]), die die innere Reibung stark herabsetzten. Fraglich bleibt dabei aber, ob dieser Prozess bei natürlichen turbidity currents mit Stromdicken, die um Zehnerpotenzen höher liegen, in demselben Masse wirksam wird. Dazu kommt, dass das Charakteristische an der Turbulenz gerade die völlige Regellosigkeit der Bewegung ist. Man kann sich also kaum vorstellen, dass sich über einen langen Strömungsweg hinweg stabile «Turbulenzwalzen» ausbilden.

Damit kommen wir für das Ausklingen der Turbulenz in Suspensionen zu einem qualitativ analogen Bild wie für Newtonsche Flüssigkeiten: Betrachtet man zwei Suspensionsströme von gleicher Geschwindigkeit und gleichem hydraulischen Radius, aber verschiedener Konzentration im Bereich der oben erwähnten kritischen Dichte (um $\varrho = 1{,}5$ g/cm³), so muss der Strom mit der höheren Konzentration trotz aller vielleicht einschränkenden Faktoren immer noch eine sehr viel höhere Zähigkeitskraft besitzen. Das bedeutet, dass die Turbulenz hier wesentlich früher zum Erliegen kommt.

In diesen Überlegungen wurde bisher ein wichtiger Punkt ausgeklammert: Bei Suspensionen muss die Turbulenz, im Gegensatz zu Newtonschen Flüssigkeiten, eine Hebearbeit an den suspendierten Teilchen leisten. Solange wir es mit rein pelitischen Suspensionen zu tun haben, kann dieser Faktor vernachlässigt werden, weil die Sinkgeschwindigkeiten der Partikel sehr klein sind. Bei echten turbidity currents, die ausserdem eine gröbere klastische Fracht mit sich führen, kommt hierdurch aber

---

[13]) Ziel dieser Untersuchungen war, festzustellen, ob die Formel für die Strömungsgeschwindigkeit von Flüssen $u = C \cdot \sqrt{r_h \cdot s \cdot \varrho}$, ($r_h$ = hydraulischer Radius, s = Gefälle) auch auf turbidity currents mit einer veränderten Konstante C anwendbar ist wenn ϱ durch die effektive Dichte der Suspension ersetzt wird.

[14]) KUENEN, 1951, p. 27: 'The current is seen to split up into dense rolls of suspension divided by thin films of almost clear water drawn in between the vortices from above'.

ein zusätzlicher turbulenzhemmender Effekt herein (s. auch BAGNOLD 1956). Sinkt der Austauschkoeffizient unter einen gewissen Wert, so konzentrieren sich die gröberen Fraktionen immer mehr im unteren Teil des Stroms, wodurch sich dort der turbulenzhemmende Effekt fortlaufend verstärkt. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang noch eine Bemerkung bei TILLMANN (1955): Von einer gewissen Konzentration an beeinflussen sich anscheinend die suspendierten Partikel gegenseitig derart, dass die Sinkgeschwindigkeit zunimmt. Damit deutet sich zumindest eine Möglichkeit an, das bisher so schwer verständliche «schlagartige» Ausfallen des Materials zu erklären, das bei vielen Turbiditen aus den Sedimentstrukturen zu entnehmen ist. Unter geeigneten Bedingungen können solche Ablagerungen auch gradiert sein, denn für einen gegebenen Austauschkoeffizienten ist die Konzentration der Partikel über der Strombasis stets von der Korngrösse abhängig.

In diesem Zusammenhang sind die sehr detaillierten Untersuchungen von SANDERS (1965) über die Sedimentstrukturen von Turbiditen ausserordentlich wichtig. SANDERS (1965) entnahm aus dem Fehlen aller Spuren eines rollenden Transports in den gröberen gradierten Partien der Turbidite, dass hier keine Ablagerung aus einer turbulenten Suspension stattgefunden haben kann. Er schloss deshalb alle diese Bildungen aus den Turbiditen aus. Mit dem hier entwickelten Ablagerungsmodell lassen sich aber die Schwierigkeiten, die aus dieser extrem scharfen genetischen Trennung resultieren, umgehen. Haben wir es mit einem turbidity current hoher Konzentration und infolgedessen sehr hoher rechnerischer Zähigkeit zu tun, so nimmt auch die Turbulenz schneller ab (s.o.). Dazu kommt der starke Geschwindigkeitsabfall, wenn sich der Strom beim Austritt aus einem submarinen Canyon am Meeresgrund ausbreitet. Bei ausreichender Fracht an grobklastischem Material kommt ein solcher turbidity current offensichtlich zwangsläufig in einen kritischen Bereich. Wenn nämlich der Austauschkoeffizient schnell genug einen bestimmten Wert unterschreitet, entsteht eine starke Konzentration der Partikel in den unteren Schichten, die dort zu einer «Übersättigung» des Stroms und damit zum quasi schlagartigen Zusammenbruch der Turbulenz führt. Es ist gleichgültig, ob danach noch ein wesentlicher Transport in Form einer «moving-grain layer» (BAGNOLD 1956) stattfindet oder nicht, die Schüttung war auf jeden Fall so schnell, dass die am Grund abgelagerten Körner nicht mehr vom rollenden Transport erfasst werden konnten.

Für die Resedimente im Obertithon des Vocontischen Troges ergeben sich aus der Anwendung dieses Modells folgende Konsequenzen: Wir müssen auf jeden Fall das Auftreten von turbulenten Suspensionsströmen verschiedener Konzentration und damit in einem bestimmten Bereich sehr unterschiedlicher rechnerischer Zähigkeit annehmen[15]). Bei genügender Beschleunigung konnten auch sehr dichte Suspensionen voll turbulent fliessen und bis in das Becken gelangen, und gerade diese dichten Ströme führten das gröbste Material mit sich. Wenn nun das Gefälle einen kritischen Wert unterschritt, so dass die Energiezufuhr nicht mehr zur Aufrechterhaltung der Turbulenz ausreichte, setzte ein Differenzierungsprozess nach dem oben geschilderten

---

[15]) Wenn man die Auslösung der Suspensionsströme hauptsächlich durch thixotrope Verflüssigung von wasserreichen Schlämmen erklärt, was den paläogeographischen Gegebenheiten am besten Rechnung trägt, müssen je nach der Stärke des Anstosses verschieden dichte Schlämme mobilisiert worden sein.

Modell ein: Bei dichten Suspensionen mit einer sehr hohen rechnerischen Zähigkeit war die Reibungsarbeit entsprechend höher, und die Turbulenz kam eher zum Erliegen als in Strömen geringerer Dichte. Infolgedessen wurde die Geröllfracht so schnell abgelagert, dass Sedimentstrukturen entstanden, die nicht mehr zum Bild eines typischen Turbidits passen. Auf diese Weise lässt sich die Entstehung grober ungradierter Breccien erklären. Sie sind, wie der Geländebefund gezeigt hat, durch alle Übergänge mit typischen, d.h. ± deutlich gradierten Turbiditen verbunden. Diese Übergänge kommen auf zwei Arten zustande: einerseits dadurch, dass wir es mit Ablagerungen aus Strömen verschiedener Dichte zu tun haben, zum anderen dadurch, dass im Suspensionsstrom selbst ein Dichtegradient besteht. Für den rein pelitischen Anteil der Suspension ist er sicher sehr gering und kommt nur durch Einmischung von Wasser von oben her zustande. Im einzelnen sind die Verhältnisse sehr kompliziert, wie aus den zahlreichen experimentellen Untersuchungen zu diesem Thema hervorgeht (KUENEN 1950, 1951, KUENEN und MENARD 1952, KUENEN und MIGLIORINI 1950, MIDDLETON 1967). In diesem Zusammenhang genügt die Feststellung, dass auch ein Strom sehr hoher Dichte einen stärker verdünnten Randanteil besitzt, der sich anders verhält als die Hauptmasse und zur Ablagerung einer normal gradierten Bank weiter aussen im Becken führt. Dadurch entsteht innerhalb einer Lage ein horizontaler Übergang von einer groben ungradierten Breccie zu einer feinen gradierten Schicht. Abschliessend sei noch einmal darauf hingewiesen, dass – wie die Untersuchungen von SANDERS (1965) zeigen – das oben beschriebene «plötzliche» Ausfallen des klastischen Materials auch im Bereich der typischen Turbidite im klassischen Sinn eine grössere Rolle spielt, als bisher angenommen wurde.

Die Geröllpelite, die gleichfalls auf Suspensionen sehr hoher Dichte zurückgehen, lassen sich als Spezialfall in dieses Schema einordnen. Enthielt der Strom nur einen geringen Anteil an grobklastischen Bestandteilen, so blieb nach dem Ausfallen der meisten Gerölle eine fast rein pelitische Suspension übrig, deren Turbulenz infolge der hohen Zähigkeit schnell zum Erliegen kam. Die Masse wurde im letzten Bewegungsstadium in Gleitlinsen zerschert.

D. Mögliche Verallgemeinerung der Ergebnisse über den Rahmen des Untersuchungsgebietes hinaus

Die oben beschriebenen Resedimentationsvorgänge sind natürlich in mancher Hinsicht von den speziellen Gegebenheiten des Vocontischen Troges geprägt, von denen man abstrahieren muss, wenn man die Ergebnisse über den Rahmen des Untersuchungsgebietes hinaus verallgemeinern will. Einige der wesentlichen Punkte wurden schon in den vorhergehenden Kapiteln herausgestellt:

a) Der Vocontische Trog ist kein Flyschbecken. Soweit eine tektonische Aktivität bestand – und das ist zweifellos anzunehmen -, hat es sich um eine zerrungsbedingte Bruchtektonik gehandelt. Bis jetzt gibt es keine Hinweise auf nennenswerte Bruchstufen im tieferen Teil des Beckens, sie waren also vermutlich auf den Schelfrand beschränkt. Dieser wurde so vielleicht fortlaufend übersteilt, aber eine

Einengung des Beckens hat nicht stattgefunden, die Tektonik war stationär. Auf den Mechanismus der Resedimentationsvorgänge hat das aber keinen Einfluss. Dieser ist allein von den momentanen Gefällebedingungen abhängig.

b) Das Becken war vom Land durch einen breiten lagunären Gürtel mit einer randlichen Riffzone abgeschnitten (MORET 1958, REMANE 1958, Fig. 2). Und wie aus den Verhältnissen in der Chartreuse hervorgeht, herrschte schon wenige Kilometer vor dem Riff eine geringmächtige, stark pelagisch beeinflusste Sedimentation. Ein Materialüberschuss an den Beckenrändern kann also nicht als entscheidende Ursache für das Zustandekommen der turbidity currents angesehen werden. Das zeigen auch die geringen Mengen von neritischem Material, die in das Becken verfrachtet wurden. Wir müssen also für die Entstehung der turbidity currents hauptsächlich mit tektonischen Ursachen (Erdbeben) rechnen.

c) Ein Befund, der sich trotz allem schwer erklären lässt, ist der ausgesprochen niedrige Prozentsatz an neritischen Bestandteilen in den Resedimenten. Es gibt dafür zwei Deutungsmöglichkeiten: Entweder lag der Ausgangspunkt der turbidity currents in einem etwas tieferen Bereich, das neritische Material wäre dann sozusagen erst sekundär mitgerissen worden; oder es ist ein starker Lawineneffekt aufgetreten. Der letzte Faktor hat sicher eine wesentliche Rolle gespielt, wie die Schichtlücken im tiefen Bereich zeigen. Manchmal könnte auch ein besonders starker Anfall von Riffschutt nach schweren Stürmen Rutschungen am Riffhang ausgelöst haben, die dann ihrerseits den weiter hangab lagernden Kalkschlamm mobilisierten. Auch die Tatsache, dass schon im Obertithon (im Berriasien liegen die Verhältnisse in dieser Beziehung grundsätzlich anders) Material aus dem backreef-Bereich in das Becken gelangte, spricht dafür, dass Schuttanhäufungen vor Durchlässen im Riff als direktes oder indirektes Ursprungsgebiet des umgelagerten Materials eine Rolle gespielt haben.

d) Die chemische Natur des Sediments hat sich auf doppelte Weise ausgewirkt. Einerseits haben Kalkpelite eine sehr viel schwächere Thixotropie als Tone; dadurch konnten auch Schlämme geringeren Wassergehalts noch eher mobilisiert werden. Turbidity currents besonders hoher Dichte waren also sicher häufiger als in Gebieten mit toniger Sedimentation; aber andererseits erreichen nach den Angaben von KUENEN (1951) Tonsuspensionen eher eine höhere rechnerische Zähigkeit, so dass sich dieser Faktor wahrscheinlich im Endeffekt nicht sehr ausgewirkt hat. Allerdings ist hierüber noch zu wenig bekannt, und vor allem hängt die ermittelte rechnerische Zähigkeit auch vom angewendeten Messverfahren ab. Der andere Aspekt betrifft die relativ stärkere Verfestigung von Kalkschlicken, die bei der Erosion deshalb häufiger als Schlickgerölle erhalten blieben. Ihre Dichte war geringer als die vollständig verfestigter Gesteine, die Korngrössen sind also nicht direkt vergleichbar. Für den Ablagerungsvorgang spielt das aber keine Rolle.

e) Der geringe Prozentsatz an Hartbestandteilen (bioklastische Komponenten, einzelne Ooide) macht sich ebenfalls nur im Anfangsstadium der turbidity currents bemerkbar. Bei Suspensionen wirkt die Hebearbeit an den suspendierten gröberen Partikeln turbulenzhemmend, auch am Anfang der Entwicklung. Bei den turbidity

currents im Obertithon des Vocontischen Troges war dieser Effekt sicher geringer als bei Suspensionsströmen in einer Grauwackenfazies, die von vornherein einen hohen Anteil an primär verfestigten grobklastischen Komponenten besassen. Für den Ablagerungsprozess spielt dieser Punkt nur insofern eine Rolle, als Überlastungseffekte in den terminalen laminierten Ablagerungen entfallen und als durch die Dichteunterschiede der Partikeln scheinbare Gradierungsanomalien zustandekommen. Das wurde schon von ALLEMANN (1957) am Beispiel von Foraminiferen beobachtet.

Man kommt insgesamt gesehen also zu dem Ergebnis, dass die Entstehungsbedingungen für die turbidity currents des Vocontischen Troges in wichtigen Punkten vom allgemeinen Schema abweichen; soweit kann man von einem spezifisch lokalen Typus sprechen. Die Ablagerungsbedingungen unterscheiden sich aber nirgends prinzipiell von denen anderer turbidity currents, deshalb bedarf es allenfalls geringfügiger Einschränkungen, wenn man das hier gewonnene Modell für die Zusammenhänge zwischen Transport- und Ablagerungsmechanismus auf andere Gebiete übertragen will. Der physikalische Unterschied zwischen tonigen und kalkig-pelitischen Suspensionen spielt in dieser Hinsicht vielleicht eine Rolle. Er äussert sich in dem sehr geringen Thixotropieverhalten der Kalkschlämme, das wahrscheinlich unter anderem für das Fehlen von «convolute lamination» verantwortlich ist, und in dem unterschiedlichen Zähigkeitsverhalten von Kalk- und Tonsuspensionen in Abhängigkeit von der Volumenkonzentration. Davon wird aber der grundsätzliche Ablauf der Sedimentation nicht beeinflusst, sondern nur die zahlenmässige Grösse der einzelnen Faktoren, die für eine schnelle Abnahme der Turbulenz erforderlich sind. Und den Beobachtungen anderer Autoren (vor allem SANDERS 1965) über die Sedimentstrukturen von Turbiditen kann man entnehmen, dass die oben geschilderte «Kettenreaktion», die zum quasi schlagartigen Zusammenbruch der Turbulenz in den unteren Schichten eines turbidity current und damit zum plötzlichen Ausfallen der klastischen Fracht geführt hat, unter den verschiedensten lokalen Bedingungen zustande gekommen ist.

Einige andere Gesichtspunkte sind in diesem Zusammenhang noch wichtig: In rein kalkigen Ablagerungen lassen sich die Transportrichtungen nicht direkt aus den Sohlmarken ablesen, dadurch wird die Deutung der Resedimentationsvorgänge erschwert. Auf der anderen Seite geben vollständig verfestigte Gerölle aus wesentlich älteren Gesteinen und vor allem Sandkörner, wie wir sie in Grauwacken und anderen Resedimenten finden, kaum Auskunft über ihren letzten Ablagerungsort. Es lässt sich aus ihnen also ziemlich wenig über den Ausgangspunkt und den Verlauf der turbidity currents entnehmen. Was den Vocontischen Trog anbetrifft, so beweist das Vorkommen von Geröllen aus noch unvollständig verfestigten Oolithen und Kalkareniten, dass diese Gesteine direkt von ihrem Entstehungsort in Riffnähe durch turbidity currents fortgeführt wurden. Ganz besonders wertvoll ist aber die Tatsache, dass durch die speziellen Eigenschaften der Kalkschlicke die Bildung syngenetischer Schlickgerölle begünstigt wurde. So ist der ganze Weg eines turbidity current in dem Faziesspektrum seiner Gerölle exakt aufgezeichnet; gleichzeitig ergibt sich ein Bild von dem Ausmass der Erosion und von dem Grad der Durchmischung des Materials während des Transports. Es kommt noch hinzu, dass dank der geringen Mächtigkeiten in der

pelagischen Fazies vielfach die durch diese Erosion geschaffenen Schichtlücken paläontologisch direkt nachweisbar waren, so dass sich Anhaltspunkte für Reichweite, Intensität der Erosion und die Überschneidung zwischen Abtragungs- und Ablagerungsgebiet ergaben. Zu diesen Fragen konnte die vorliegende Arbeit nur erste Ergebnisse liefern; es wäre zweifellos lohnend, das Problem mit Hilfe weiterer detaillierter Geländeaufnahmen zu verfolgen.

LITERATURVERZEICHNIS

ACKERMANN, E. (1948): *Quickerden und Fliessbewegungen bei Erdrutschen.* Z. Dt. Geol. Ges. *100*, 427–466.

– (1951): *Geröllton!* Geol. Rdsch. *39*, 237–239.

ALLEMANN, F. (1957): *Geologie des Fürstentums Liechtenstein (südwestlicher Teil). Unter besonderer Berücksichtigung des Flyschproblems.* Diss. Bern.

ALLIOT, C., FLANDRIN, J., und MOULLADE, M. (1964): *Les sédiments grossiers du Berriasien de la «fosse vocontienne». Etude particulière du Berriasien de Marignac, au NW de Die (Drôme).* Trav. Lab. Géol. Lyon [n.s.] *11*, 161–181.

ARNAUD, H. (1966): *Contribution à l'étude du Diois nord-oriental.* Trav. Lab. Géol. Grenoble *42*, 17–31.

AUBOUIN, J. (1959): *Grano-classement vertical (graded bedding) et figures de courants (current marks) dans les calcaires purs: les brèches de flanc des sillons géosynclinaux.* Bull. Soc. Géol. Fr. [7] *1*, 578–582.

BAGNOLD, R.A. (1956): *The Flow of Cohesionless Grains in Fluids.* Phil. Trans. Roy. Soc. London *249*, 235–297.

– (1962): *Autosuspension of Transported Sediment, Turbidity Currents.* Proc. Roy. Soc. London [A] *265*, 315–319.

BERNOULLI, D. (1964): *Zur Geologie des Monte Generoso (Lombardische Alpen).* Beitr. Geol. Karte Schweiz [N.F.] *118*.

– (1967): *Probleme der Sedimentation im Jura Westgriechenlands und des zentralen Apennin* Verhand. Naturf. Ges. Basel *78*, 35–54.

BOLLER, K. (1963): *Stratigraphische und mikropaläontologische Untersuchungen im Neocom der Klippendecke (östlich der Rhone).* Eclogae geol. Helv. *56*, 15–102.

CAROZZI, A. (1952a): *Les phénomènes de courants de turbidité dans la sédimentation alpine.* Arch. Sci. Genève *5*, 35–39.

– (1952b): *Microfaune déplacée dans les niveaux «remaniés» du Malm supérieur de la Nappe de Morcles (Haute-Savoie).* Arch. Sci. Genève *5*, 39–42.

– (1955): *Nouvelles observations microscopiques sur les dépôts de courants de turbidité du Malm de la Nappe de Morcles.* Bull. Inst. Nat. Genève *57*, 1–31.

– (1957): *Tracing Turbidity Current Deposits Down the Slope of an Alpine Basin.* J. Sedim. Petrology *27*, 271–281.

CROWELL, J.C. (1957): *Origin of Pebbly Mudstones.* Bull. Geol. Soc. Amer. *68*, 993–1010.

DAVIES, K.D. (1968): *Carbonate Turbidites, Gulf of Mexico.* J. Sedim. Petrology *38*, 1100–1109.

DEBELMAS, J. (1953): *Exemples de glissement sous-marin dans le Dogger et le Malm briançonnais.* Trav. Lab. Géol. Grenoble *30*, 107–111.

DOBEN, K. (1963): *Über Calpionelliden an der Jura/Kreide-Grenze.* Mitt. Bayer. Staatssamml. Paläont. hist. Geol. *3*, 35–50.

DONZE, P. (1958): *Les couches de passage du Jurassique au Crétacé dans le Jura français et sur les pourtours de la «fosse vocontienne» (Massifs subalpins septentrionaux, Ardèche, Grands-Causses, Provence, Alpes-Maritimes).* Trav. Lab. Géol. Lyon [n.s.] *3*.

DOTT Jr., R.H. (1963): *Dynamics of Subaqueous Gravity Depositional Processes.* Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. *47*, 104–129.

DZULYNSKI, S., KSIAZKIEWICZ, M., und KUENEN, PH.H. (1959): *Turbidites in Flysch of the Polish Carpathian Mountains.* Bull. Geol. Soc. Amer. *70*, 1089–1118.