Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae

Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft

Band: 58 (1965)

Heft: 1

Artikel: Ein kinematisches Modell der Jurafaltung

Autor: Laubscher, Hans P.

Kapitel: A: Allgemeines zur Kinematik geologischer Systeme und die Abgrenzung der speziellen Kinematik der Jurafaltung

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-163266

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

weil die eben erst abgeteufte Bohrung Risoux I ganz neue Einblicke in den Bau jener Gegend gestattet hat, welche eine Neuinterpretierung – wie der Schreibende glaubt, im Sinne seines Modells – nahelegen; drittens, weil auf Grund dieser neuen Erkenntnisse nun versucht werden kann, ein Gesamtprofil durch den ganzen zentralen Jura mit einigem Anspruch auf Genauigkeit zu zeichnen und die dabei festgestellte Gesamtverkürzung mit den Erfordernissen des Modells zu vergleichen, und endlich viertens, weil die genannten grossen Querstörungen durch das kinematische Modell eine besondere Bedeutung für die Jurafaltung erlangen. Schliesslich muss noch vorausgeschickt werden, dass zwar ständig von *einem* Modell die Rede ist, dass aber in diesem einen Modell eine ganze Reihe von Modifikationen eingeschlossen sind, dass also eigentlich eine ganze Familie von allerdings sehr nahe verwandten Modellen gemeint ist.

A. Allgemeines zur Kinematik geologischer Systeme und die Abgrenzung der speziellen Kinematik der Jurafaltung

I. Vorbemerkungen

Fig. 2 erläutert, wie aus dem gesamten Bereich der kinematischen Möglichkeiten durch sukzessive Unterteilung in alternative Unterbereiche, in denen die spezielle Kinematik des Juras im wesentlichen zu finden ist oder nicht, schliesslich ein Gebiet ausserordentlich beschränkten Umfangs abgegrenzt wird. Die darin enthaltenen beschränkten kinematischen Möglichkeiten sind bei der Jurafaltung im wesentlichen verwirklicht. «Im wesentlichen» will dabei heissen, dass nach dem heutigen Wissen des Schreibenden von den andern Möglichkeiten nur in einem Umfang Gebrauch gemacht ist, der in erster Näherung quantitativ vernachlässigt werden darf.

Im folgenden seien zunächst einige allgemeine Vorstellungen aus dem Gebiet der Kinematik eingeführt und dann die auf Fig. 2 skizzierten Alternativen diskutiert.

II. Quellen und Senken

Die tektonische Kinematik befasst sich mit den geometrischen Problemen des Materialtransports, der Umlagerung der Gesteine, welche die heute beobacht- und messbaren tektonischen Gebilde erzeugt haben. Sie ist eine theoretische Wissenschaft, weil die meisten dieser Bewegungsvorgänge nie direkt beobachtet werden können und infolgedessen durch Bearbeitung von feldgeologischen Messungen (gegebenenfalls kombiniert mit solchen an orientierten Handstücken) mit Hilfe allgemeiner Überlegungen gefolgert werden müssen. Sie ist die erste Stufe, die bei der Meisterung tektonischer Probleme erklommen werden muss. Die zweite, höhere und schwerer zu bezwingende Stufe wäre die der Dynamik, also der Fragen des Energiehaushaltes und der Kräftegleichgewichte, welche bei diesen Bewegungsvorgängen im Spiele sind.

Die dynamischen Probleme sind ungleich viel schwieriger – das heisst allerdings leider nicht, dass die kinematischen besonders einfach wären. Denn bekanntlich ist die Geometrie der geologischen Körper und Teilkörper im allgemeinen äusserst kompliziert, und sie erst noch in eine zeitliche Folge von Bewegungen aufzulösen,

heisst Komplikationen noch höherer Ordnung erzeugen. Deshalb drohen auch an sich einfache geometrische Überlegungen im undurchsichtigen Chaos der Gegebenheiten zu ertrinken.

Um die Ordnung einigermassen zu wahren und die Orientierung nicht zu verlieren, muss man versuchen, zuerst die allgemeinsten Gesetzmässigkeiten kinematischer Systeme festzunageln, die jedenfalls, unabhängig von allen Komplikationen im einzelnen, gelten müssen. Die allgemeinsten Bedingungen sind wie immer eher abstrakt.

Bei der Deformation werden Massen transportiert; das heisst, Stoff wird irgendwo weggenommen und an einem andern Orte angehäuft, wobei jeder Massenpunkt seine eigene *Bahnkurve* beschreibt. Man kann die Bezirke, wo Stoffe weggenommen werden, «wegfliessen», als «*Quellen*» bezeichnen, die, wo sie angehäuft werden, als «*Senken*», einem Usus der Potentialtheorie folgend, der der alltäglichen Anschauung eines besonderen Stofftransports – der Wasserbewegung – entnommen ist. Zugleich bahnt man mit dieser Anlehnung an die Potentialtheorie einen Weg von der Kinematik zur Dynamik: der Materialtransport geht im Mittel von Gebieten höheren gegen solche niedrigeren Potentials, wobei dieses ganz allgemeiner Art sein kann, also z. B. aus einer Überlagerung von Schwerepotential, thermodynamischem und elastischem bestehen kann. Aus diesem skalaren Potentialfeld lässt sich bekanntlich das Gradientenfeld, also ein Vektorfeld gewinnen, dessen Pfeile, negativ genommen, in Richtung der steilsten Abnahme des Potentials weisen. Mit diesem Gradientenfeld verwandt ist das kinematische Feld des Materialtransports: seine Vektoren geben Richtung und Betrag der Wanderung eines jeden Materialpunktes für kleine Zeitintervalle eines tektonischen Prozesses an. Die kinematischen Vektoren sind eine Funktion des Potentialgradienten, aber nicht ausschliesslich: sie sind ausserdem wesentlich bedingt durch die Verteilung der die Bewegung hemmenden Widerstände, also der inneren Reibungen, der Materialfestigkeiten, der äusseren Rahmen, nach dem Sprachgebrauch der Physik also der Zwangskräfte, der Randwerte.

Welcher Art sind die *Quellen* und *Senken* im kinematischen Bewegungsfeld? Je nach der Lage in der Erde können sie ganz verschiedener Natur sein, bei einem grossen orogenen Vorgang scheinen sie aber alle mitzuwirken. Um sie kennen zu lernen, dringt man am besten von der Oberfläche aus schrittweise in tiefere Regionen vor. Der auffälligste und alltäglichste Stofftransport ist jener bei Verwitterung und Erosion. Hier wird das Gestein in kleinen Portionen von seinem angestammten Ort im Anstehenden, der Quelle, entfernt, es bleibt entweder einige Zeit am Hang als Gehängeschutt liegen – diese Senke wäre allerdings sehr vorläufig – oder es findet bald den Weg ins Meer und landet dort in einer etwas permanenteren Senke. Auch die chemische Erosion wäre so zu verstehen: Quelle ist das anstehende Gestein, aber der Transport erfolgt hier meist sogar ionenweise. Mit «Quelle» wäre also der Begriff «Erosion», mit «Senke» der Begriff «Ablagerung» assoziiert.

Von der partikelweisen Erosion und Ablagerung gelangt man unmerklich zu den erosiven Massenbewegungen, den grossen Bergrutschen und Hanggleitungen, von ihnen zu den Begriffen der «tektonischen Denudation» und «tektonischen Ablagerung», wie sie für die gravitative Tektonik grundlegend sind. Quellen wären also hier die Abrissnischen bzw. die Lücken im Gesteinsmantel, aus denen die

«Schweregleitdecken» hergeleitet werden müssten. Falls, wie dies etwa für die helvetischen Decken angenommen wird, nur die letzten Phasen der Mise-en-place der Schweregleitung zugeschrieben werden können, muss man einen Schritt tiefer dringen, um die Quellen zu definieren. Decken entstammen Wurzelzonen, in denen Material ausgequetscht worden ist, so dass heute nur noch eine «Narbe» bleibt: die Wurzel wäre die Quelle für die Decke. Eine solche Wurzel muss aber auch einer intensiven Einengung der tieferen, nicht nach oben ausgequetschten Gesteine entsprechen. Man sagt, diese tieferen Gesteine seien abgesaugt worden: die Wurzel wäre also Quelle nicht nur für die Deckenbewegungen nach aussen, sie wäre auch Quelle für einen Materialstrom nach innen, aber während die Senken des nach aussen gerichteten Stromes, die Decken, der Beobachtung zugänglich und weitgehend bekannt sind, so weiss kein Mensch so recht, wo der nach innen führende Strom schliesslich mündet. Und geht man noch einen Schritt tiefer, z.B. in das Lepontin der Alpen, so hat man das umgekehrte Problem: man findet eine Senke, in die Material eingeströmt ist, Aufquellungen und Pilzfalten schaffend (WENK 1955). Aber wo entspringt dieser Strom, wo ist seine Quelle? Dieses Problem stellt sich natürlich bei allen magmatischen Vorgängen, beginnend bei regionaler Metasomatose bis zur Bildung von Plutonen, Lakkolithen, Gängen, ja ganz allgemein der Förderung vulkanischer Gesteine. Aber nicht nur diese offensichtlichen Stofftransporte geben Rätsel auf. Vielleicht wichtiger noch sind die epirogenen Bewegungen, die regionalen bis kontinentweiten Hebungen und Senkungen, an denen riesige Volumina beteiligt sind. Sie bequem mit Phasenänderungen an der Mohorovičić-Diskontinuität ohne grössere Stoffwanderung zu erklären, wie dies in den letzten Jahren unter dem Eindruck der Ergebnisse experimenteller Hochdruckphysik wiederholt versucht wurde, geht aus verschiedenen Gründen nicht an (vgl. z.B. BULLARD und GRIGGS, 1961).

Prinzipiell ist allerdings das Problem, ob die am Materialtransport beteiligten Stoffe zu Hochdruckphasen verdichtet werden können, ob sie unter den gegebenen Umständen kompressibel sind, von grundlegender Bedeutung. In grösseren Erdtiefen jedenfalls muss diese Kompressibilität eine hervorragende Rolle spielen. Dort kann dann die z.B. durch Erwärmung hervorgerufene Expansion zu einer weniger dichten Phase als Quelle, die Kontraktion zu einer dichteren Phase als Senke dienen.

Bei den epirogenen Bewegungen müssen im Untergrund der Hebungen *Materialsenken* (wie paradox!), im Untergrund der Senkungen *Materialquellen* angenommen werden. Wie die Ströme von Quellen zu Senken verlaufen, welcher Art sie sind, ist eines der grossen Rätsel und der wichtigsten Probleme der Geologie. Man hat auch für diese Quellen und Senken schon den Wortschatz der subaerischen Quellen und Senken verwendet und von subkrustaler Erosion und Ablagerung (GILLULY 1955) gesprochen.

Wichtig ist, dass hier – wie bei der Metasomatose im Orogen – die Mobilisierung an der Quelle und die Ablagerung in der Senke nicht als Massenstrom, sondern thermodynamisch differentiell zu wirken scheinen.

Bei einem Orogen wie den Alpen sind alle diese Quelle-Transport-Senke-Systeme beteiligt. Die kinematische Analyse eines alpinotypen Gebirges muss deshalb

von vornherein scheitern, wenn man sie nicht alle berücksichtigt und ihre jeweilige Rolle (sie verändert sich bekanntlich im Verlauf der Orogenese) abschätzt.

Wie aber steht es mit dem Jura? Die anhand des Schemas von Fig. 2 nun durchzuführende Diskussion wird zeigen, dass der ihm zugewiesene Bereich aus dem Spektrum kinematischer Möglichkeiten unerwartet eng ist. Das aber heisst, dass das Bewegungsfeld sehr straff organisiert ist, so dass schon wenige Beobachtungen weitgehende deduktive Schlüsse erlauben, dass also für den Jura der Versuch, ein kinematisches Modell aufzubauen, besonders lohnend ist.

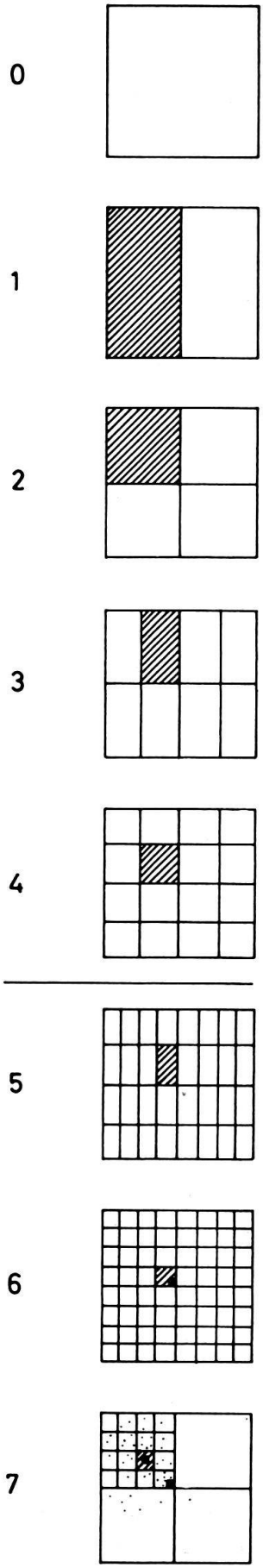

Fig. 2. *Die Lage der Juramodelle im Feld der kinematischen Möglichkeiten*

Das als Quadrat dargestellte uneingeschränkte Feld der kinematischen Möglichkeiten (0) wird durch sukzessive dichotome Einschränkungen in ein immer feineres Netz von Unterbereichen zerteilt. Das jeweils vom Modell besetzte Teilfeld ist schraffiert.

Die Zahlen sind gleich denen der im Text gewählten Einteilung. 6 und 7 entsprechen den beiden Modifikationen Modell I und Modell II.

1 Geschlossene Systeme, 2 Quellen- und Senken in getrennten Bezirken, 3 Zweidimensionales System, 4 Diskrete Bewegungsflächen.

Nur für Modell I:

5 eine einzige Quellenscholle, 6 nur Rotationen. Das kleine schwarze Quadrätchen bedeutet eine weitere Einschränkung des schraffierten Feldes: sogar nur Rotationen um ein einziges Zentrum.

Nur für Modell II:

7: es wird nun, im Gegensatz zu 5, die linke Hälfte von Feld 4 besetzt (mehrere Quellenschollen), und von diesem Teilfeld im Gegensatz zu 6 die obere Hälfte (auch Translationen). Das schwarze Quadrätchen im schraffierten Feld will eine weitere Einschränkung andeuten: im wesentlichen werden nur Translationen nach NW vorgenommen. Das andere schwarze Quadrätchen zeigt nochmals die Lage von Modell I. Die zerstreuten Punkte sollen schematisch darauf hinweisen, dass im wirklichen Jura auch alle andern Felder besetzt sind, aber nicht intensiv. Die Intensität der Besetzung konzentriert sich um die für das Modell gewählten Punkte.

III. Die Stellung der Jurafaltung in einem System der kinematischen Möglichkeiten und die Eigenschaften eines Modells erster Näherung (vgl. Fig. 2)

1. Das System ist geschlossen

Wenn ein Teilvolumen des Erdkörpers derart von einer geschlossenen Fläche umgrenzt werden kann, dass kein Stofftransport durch sie hindurch stattfindet, so sind alle Quellen und Senken für die Deformation dieses Volumens in seinem Innern und es liegt ein *geschlossenes kinematisches System* vor. Streng genommen gibt es natürlich solche geschlossene Systeme nicht. Eine gewisse Diffusion findet durch jede Fläche hindurch statt, ein gewisses, unter Umständen sehr langsames Fliessen von Porenflüssigkeit ist charakteristisch für sozusagen alle Gesteine. Die Porenflüssigkeit enthält gelöste Teile des Festgerüstes, auch dieses wird also bis zu einem gewissen Grade transportiert. Und doch gibt es viele Fälle, wo diese Art des Materialtransportes nur einen winzigen Bruchteil von grossen tektonischen Massentransporten darstellt und deshalb mit gutem Gewissen vernachlässigt werden kann. Diese Vernachlässigung sei im folgenden für den Jura ausdrücklich vorausgesetzt. Man ist dazu berechtigt, weil die bisherigen Ausmessungen von Jurafalten ergeben haben, dass im wesentlichen das ursprüngliche stratigraphische Gesteinsvolumen gesamthaft ausgepresst worden ist; es lassen sich keine Volumendefizite nachweisen, die auf einen nennenswerten Lösungstransport schliessen liessen. Dies wird sich auch bei der Analyse des rheintalischen Juras immer wieder zeigen (s. S. 266 ff.).

Schneidet die Umgrenzungsfläche die Erdoberfläche, so wirkt immer auch die Erosion als weiterer Materialtransport, der sich dem tektonischen überlagert und dessen Quellen, vor allem aber Senken, meist nicht genau und sicher nicht im vollen Umfang zu ermitteln sind. Die den Überschiebungsbewegungen vorausgehende wie auch die synkinematische erosive Zerfressung einer Landschaft mag für die Kinematik, für das tektonische Verständnis von grundlegender Wichtigkeit sein. Man denkt dabei zuerst an das Phänomen der Reliefüberschiebungen, die bekanntlich bei den Hypothesen für die Mise-en-place vieler alpiner Decken eine grosse Rolle spielen (z.B. die Préalpes nach LUGEON und GAGNEBIN 1941). Die heutigen Senken, die heutigen Ablagerungsräume für die entsprechenden Erosionsprodukte sind nur zu einem kleinen Teil bekannt, etwa in den Gesteinen der Molasse. Auch wenn man die Quellen für die Decken sicher kennte und Diffusion und Wanderung von Porenflüssigkeit vernachlässigte, so könnte man also trotzdem ein solches System nicht als streng abgeschlossen ansehen.

Auch für viele Überschiebungen des Juras hat man vorhergehende intensive Erosion verantwortlich gemacht. So sollen die Überschiebungen der Dt. de Vaulion nach AUBERT (1945) durch gravitatives Hinausgleiten in ein Erosionsloch entstanden sein. GLANGEAUD und DREYFUSS (z.B. 1951, 1949) messen dieser «Morphotectonique» für den Faisceau Bisontin grosse Bedeutung zu.

Es lässt sich aber nachweisen, dass diese «Morphotectonique» nur eine nebensächliche Rolle spielen kann, und zwar wiederum, indem man die Falten einfach ausmisst. Lokale Schweregleitung müsste eine lokale Lücke, eine Quelle hinterlassen, deren Stärke gerade der «morphotektonischen» Ablagerung zu entsprechen hätte. Solche Quellen wären im Jura leicht zu finden, sie existieren aber nicht, je-

denfalls nicht für ganze Falten, sondern nur für grössere Rutschpakete an Antiklinalflanken oder Überschiebungsfronten. Gewiss hat Erosion auch im Faltenjura stattgefunden, vor und während der tektonischen Bewegungen. Sie hat sicher auch eine gewisse kinematische Rolle gespielt, bestimmt eine grössere als der Massentransport des Porenwassers. Es ist vorauszusehen, dass Erosionseffekte zur Erklärung bestimmter Besonderheiten im Jura einmal in ein sehr verfeinertes kinematisches Modell eingebaut werden müssen. Bis heute ist aber weder die Geländeaufnahme noch die Analyse ihrer Resultate so weit gediehen, dass man der Erosion eine bestimmte grössere Rolle zuweisen könnte, geschweige denn müsste. Für die ersten Stufen eines kinematischen Modells wird man besser auf solche Effekte verzichten und versuchen, wie weit man ohne sie gelangt im Verständnis der Juratektonik. Auch die Erosion sei also im folgenden vernachlässigt.

Von einem empirisch belegten, geschlossenen System müssten Quellen und Senken bekannt sein. Vom Jura aber kennt man nur die Senken, nur sie sind quantitativ messbar. Die zugehörigen Quellen muss man durch sorgfältige Analyse und Integration aller Indizien ergänzen. Das kann nicht ohne Hypothese geschehen, deren Berechtigung erst der Erfolg beweist. Der Schreibende hat einen Versuch in dieser Richtung in der «Fernschubhypothese» unternommen und dabei dargelegt, dass diese Hypothese zurzeit die einzige den Tatsachen gerecht werdende Lösung des Quellenproblems bietet. Nach ihr liegen die Quellen im Süden des Molassebeckens; nach der speziellen Ausgestaltung der Hypothese in der genannten Arbeit lässt sich vermuten, dass sie sich im Westen im Bereich der alpinen Zentralmassive befinden, während sich ihre Zone weiter östlich davon ablöst und unter dem helvetischen Deckenstapel durch das Molassebecken schliesslich das Ostende der Lägern erreicht. Lücken im Sedimentmantel und Zerrbrüche, die als Quellen in Frage kommen, sind aus diesen Gebieten bekannt, doch ist eine genaue quantitative Zuordnung und geographische Fixierung der dem Jura entsprechenden Quellen wie gesagt nicht möglich.

Seit Erscheinen der zitierten Arbeit sind übrigens weitere Hypothesen für die Jurafaltung aufgestellt worden, welche andere als die von der Fernschubhypothese vorgeschlagenen Quellen ausfindig machen wollen. So möchte Beloussov (1961) die Quellen in einer plastischen Streckung der Schichten im Bereich des Juras selbst erkennen, eine Ansicht, die sich kaum verfechten lässt, wenn man den Jura einmal mit eigenen Augen gesehen hat. Im übrigen ist auch sie durch Ausmessung der Falten leicht zu widerlegen.

Eine weitere Hypothese ist die von Pavoni (1962), die anhand eines Modelles aus Sperrholz (= Sockel), «Mehlpäppchen» (= Schmierschicht) und Seidenpapier (= Sedimenthaut) demonstriert wird. Das Sperrholzbrett wird in Kreisscheiben geschnitten und nach Norden unter dem Seidenpapier wegrotiert. Dieses wird randlich zurückgehalten und legt sich in Falten, die entsprechenden Quellen liegen z.T. nördlich der Falten im Vorland, wo man durch Seidenpapier nicht bedecktes Mehlpäppchen gewahren kann, z.T. im gefalteten Bereich, wo nämlich das Seidenpapier gestreckt ist. Dieses Modell, so anschaulich es ist, hat leider mit dem Jura nicht viel zu tun; von allem anderen abgesehen, findet man an der äussern Berandung des Juras nicht eine grosse Lücke von vielen Kilometern, sondern eine Überschiebung; nicht eine Quelle, sondern eine Senke.

Die einzig akzeptablen Quellen bleiben im Süden, wo sie die Fernschubhypothese verlangt. Die Fernschubhypothese ist, soweit der Schreibende ermessen kann, noch immer die einzige rationale und objektive Grundlage für eine Diskussion der Juratektonik. Übrigens ergibt sich in dieser Arbeit noch mancherlei Gelegenheit, weitere kritische Evidenz dafür aufzudecken, auch wenn sie das kaum mehr nötig hat. Sie wird deshalb in das kinematische Modell eingebaut; für eine detailliertere Rechtfertigung vgl. LAUBSCHER 1961.

Auf Grund der Fernschubhypothese darf der Jura jedenfalls als geschlossenes System behandelt werden. Denn lässt man die umgrenzende Fläche mit der Basis des Abscherhorizontes zusammenfallen und vor den nördlichen Grenzen des Faltenjuras und hinter den Lücken im autochthonen Sedimentmantel an die Oberfläche ausbeissen, so sind Quellen und Senken der Massenbewegung von der Fläche umschlossen. Im Südwesten allerdings geht der Jura bekanntlich ohne scharfe Grenzen in die subalpinen Ketten Savoyens über. Wenn man ihn trotzdem von diesen gesondert als eigenes System behandelt – und dies ist fürs erste aus rein methodischen Gründen zu empfehlen –, so muss man hier eine künstliche Grenze ziehen. Soll der Jura dabei ein geschlossenes System bleiben, so dürfen über diese Grenzen keine grösseren Materialströme fliessen. Dieser Forderung ist dann Genüge getan, wenn die künstliche Grenze parallel zur Bewegungsrichtung verläuft, also etwa NW–SE, und die Senke mit der hypothetischen Lücke im Hinterland verbindet.

Die Gestalt (im Gegensatz zur Grösse!) dieser Lücke ist übrigens irrelevant für die Kinematik des Senkenfeldes, also des Faltenjuras selbst. Man darf über sie beim Bau des Modells mit grosser Freiheit verfügen. Die nötigen Beschränkungen ergeben sich im Verlauf der Konstruktionen ohne weiteres.

2. Quellen- und Senkenbereich sind getrennt

Wenn in einem geschlossenen System Quellen und Senken willkürlich verteilt sind, so lassen sich keine allgemeinen kinematischen Gesetzmässigkeiten angeben. Für den Jura aber wurde eben geltend gemacht, dass sich im Senkenbereich keine namhaften Quellen in der Form von Abrisslücken, Lösungslücken oder plastischer Streckung erkennen lassen. Auch normale Zerrbrüche, die während der Jurafaltung entstanden sind, spielen sicher keine auffällige Rolle. Im Jura sind also Quellen- und Senkenbereich im wesentlichen getrennt, für das Modell setzen wir eine vollkommene Trennung voraus.

3. Das Bewegungsfeld ist zweidimensional

Nach der Fernschubhypothese, die laut unserer Festsetzung dem Modell zugrunde liegen soll, ist die Jurakinematik auf die Sedimenthaut beschränkt. Sie ist an eine starre, nur wenig verbogene untere Grenzfläche gebunden. Im Vergleich zu deren Ausdehnung ist die darüber bewegte Sedimenthaut dünn. Die Bahnkurven der einzelnen Massenpunkte liegen zum überwiegenden Teil in annähernd ein und derselben Ebene. Nur in dem sehr beschränkten Unterbereich, der durch die Antiklinalschenkel eingenommen wird, treten dazu senkrechte Komponenten auf. Das Bewegungsfeld ist also weitgehend zweidimensional, und es erscheint verlockend, es zuhanden des Modells ganz auf zwei Dimensionen zu beschränken, weil dadurch

die zeichnerische Darstellung und die quantitative Bewältigung ausserordentlich vereinfacht werden. Einen Ansatz zu dieser Beschränkung hat der Schreibende in seiner «Fernschubhypothese» gemacht, wo er «profilmässige» und «flächenmässige» Kinematik unterschied.

Wenn man nun konsequent die durch profilmässige kinematische Analyse der einzelnen Antiklinalen ermittelten Zusammenschübe quantitativ als flache Überschiebungen umzeichnet, so erhält man ein rein zweidimensionales Bewegungsfeld. Die Bahnkurven für den überwiegenden Teil der an der Jurafaltung beteiligten Massen werden dadurch nur unwesentlich verändert. Die spezielle Form der Massenausquetschung in den Antiklinalen wird zwar ignoriert, ihre Quantität wird jedoch voll beibehalten, und diese ist offensichtlich für die Beurteilung des Juras als kinematisches Gesamtsystem ausschlaggebend. Natürlich verdient die von Ort zu Ort wechselnde Gestalt eines Faltenprofils auch unser Interesse. Ihre Untersuchung soll aber einer besonderen Arbeit vorbehalten sein. Der Schreibende ist überzeugt, dass eine Trennung der Kinematik in einen profilmässigen und einen flächenmässigen Anteil methodisch vorteilhaft ist.

In unserem Modell soll also die Kinematik zweidimensional, flächenmässig behandelt werden. Die Entwicklung einer solchen Kinematik ist übrigens nicht nur für den Jura von Interesse. Die Schichtung der Erde legt die Vermutung nahe, dass im wesentlichen flächenmässige Bewegungssysteme innerhalb der einzelnen Schichten eine grosse Rolle spielen dürften – über grössere Distanzen hin allerdings nicht auf Ebenen, sondern auf Kugelflächen. Das Puzzlespiel der Rekonstruktion von Gondwana nach der Kontinentalverschiebungslehre gehört in die Kategorie, überhaupt alle geotektonischen Theorien und Spekulationen, bei denen nicht vertikale, sondern tangentiale Bewegungen die Hauptrolle spielen.

Die zweidimensionale Behandlung der Jurafaltung setzt noch voraus, dass nur eine einzige, basale Abscherfläche betätigt wurde, dass die Sedimenthaut als ganzes bewegt wurde und nicht durch weitere als Gleithorizonte dienende inkompetente Lagen in einen Stapel individuell beweglicher Blätter aufgeteilt war. Sonst müsste man für jedes einzelne Blatt seine besondere Kinematik entwerfen und die Gesamtbewegung durch Superposition der für die einzelnen Blätter geltenden Bewegungen darstellen. Wiederum kann nur die Ausmessung der Antiklinalen Klärung bringen, ob diese einfache Annahme wirklich zulässig sei. Der Vergleich von kurvimetrischer Verkürzung und Volumauspressung in den einzelnen Antiklinalen (vgl. S. 258) beweist, dass immer die ganze Sedimenthaut in gleichem Masse zusammengestaucht worden ist, wenigstens im wesentlichen. Lokal beschränkte Ausnahmen scheint es zu geben, besonders bei benachbarten Falten, unter denen dann und wann ein disharmonischer Materialtransport in Erscheinung treten kann. Doch ist offenbar die disharmonische Abscherung bestimmter Schichtglieder im allgemeinen auf einzelne Falten beschränkt und beeinflusst nur deren spezielle Gestalt, nicht aber die Quantität der in ihnen ausgeführten Zusammenstauchung.

4. Das Bewegungsfeld ist ein Mosaik starrer Schollen (vgl. Fig. 3)

Die Verteilung der Bewegung in einem sich deformierenden Körper liegt zwischen zwei Extremen. Das eine besteht in der Betätigung weniger Diskontinuitätsflächen, die den Körper in starre, im Innern undeformierte Schollen zerlegen,

die sich gegeneinander verschieben, sich übereinanderstapeln, voneinander wegtreiben, ähnlich den Treibeisschollen auf einem Fluss. Das andere Extrem entspricht der Ausbildung eines diffusen Bewegungsnetzes über den ganzen Körper hin, mit infinitesimaler Maschenweite und nur infinitesimalen Bewegungen längs einer einzelnen Fläche. Dieses zweite Extrem ist verwirklicht in der Deformation von Flüssigkeiten und von plastischen Festkörpern – hier allerdings nur in gewissen Teilbereichen, in den plastischen Zonen, in denen die Plastizitätsschwelle überschritten ist. In lockeren Aggregaten, in Sanden z.B., die zwar von vornherein ein diffuses Netzwerk von Diskontinuitätsflächen aufweisen, wird dagegen im allgemeinen nur eine begrenzte Anzahl recht scharf definierter Bewegungszonen betätigt; erst wenn der Porendruck einen gewissen Betrag überschreitet, wird die Verteilung der Bewegung diffus (vgl. LAUBSCHER 1961, p. 317).

Der Geologe kennt diese beiden Extrema, er unterscheidet zwischen kompetenten Gesteinen, deren Deformationsmodus unter den vorherrschenden Bedingungen mehr der diskreten Schollendeformation entspricht, und inkompetenten Gesteinen, bei denen ein mehr oder weniger diffuses Bewegungsnetz ausgebildet ist.

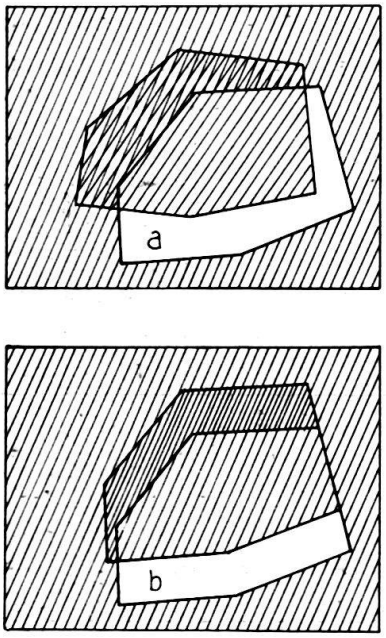

Fig. 3. *Die kinematischen Elemente einer zweidimensionalen Scholle.*

Es sind Rotationen und Translationen in der Zeichenebene möglich (a). Bei der Verrückung der Scholle aus ihrer ursprünglichen Lage entstehen Lücken und Überlappungen von identischer Grösse. Die verschiedenen Segmente der stets geschlossenen Schollengrenze übernehmen verschiedene kinematische Rollen, die besonders bei einfachen Bewegungen, z.B. Translationen (b) recht scharf definiert sein können: Transversalverschiebungen längs der seitlichen Segmente (links mit Überlappungskomponente), im wesentlichen Überschiebungen der frontalen Segmente. Der nicht an die Quellen grenzende Teil der Umrandung = Bewegungsfront. Die Stärke der Front wird gemessen am Translationsbetrag, also an der reinen Überschiebung oder der reinen Transversalverschiebung, die gleich gross sein müssen, oder an der Kombination der beiden Komponenten, wo die kinematische Rolle gemischt ist.

Leider ist diese Unterscheidung nicht immer so einfach und zwar aus zwei verschiedenen Gründen: einmal weil das rheologische Verhalten irgendwo zwischen diesen beiden Extremen liegt und bei ein und demselben geologischen Körper von Ort zu Ort schwanken kann; zweitens aber auch, weil in der Literatur oft künstlich Verwirrung gestiftet wird, indem je nach Bedarf und ohne Evidenz ein und demselben geologischen Komplex extrem verschiedene Verhaltensweisen zugeschrieben werden. Für den Jura sind die divergentesten Ansichten verkündet worden. So wird manchmal dem Sockel Plastizität bei der Faltung zugesprochen (GLANGEAUD, 1947), eine Annahme, gegen die alle indirekte Evidenz im Jura selbst sowie direkte Evidenz im unmittelbaren Vorland spricht (vgl. LIENHARDT 1962, S. 265). Gerade die gegenteilige Meinung vertritt BELOUSSOV (1961), nach dem sich das

Grundgebirge wie ein Mosaik starrer Blöcke verhält, die sich differenziell auf und ab bewegen. PAVONI (1962) endlich nimmt für seinen Sockel beide Potenzen zugleich in Anspruch, einmal ist er in diskrete Kreisscheiben zerschnitten, die sich rundum bewegen, ein andermal wird er plastisch in der Weise zusammengestaucht – es müsste sich um einen Betrag von Zehnern von Kilometern handeln – dass eine regionale Hebung entsteht, ohne dass die Oberfläche durch irgendeine merkliche Störung zerrissen würde! Ähnliche Verwirrung herrscht auch bei der Beurteilung des Sedimentmantels. Immer wieder gibt es namhafte Geologen, die aus irgendwelchen Gründen unter dem Eindruck stehen, die Sedimente hätten sich bei der Jurafaltung plastisch deformiert (vgl. S. 238)[1]).

Welcher Art ist die tatsächliche Evidenz für den Jura? Von einer eigentlich plastischen Deformation kann jedenfalls nicht die Rede sein. Die sedimentären Strukturen sind unverzerrt erhalten, sogar im Bereich intensiver lokaler Verfaltung (vgl. NABHOLZ 1956). Aber hat vielleicht eine Deformation nach so eng gescharten Scherflächen stattgefunden, dass sie zwar nicht im Zentimeterbereich, wohl aber im Hektometer- oder Kilometerbereich als «plastisch» anszuprechen wäre? Darüber kann wiederum nur die Ausmessung der Antiklinalen entscheiden. Es ergibt sich, dass tatsächlich im Innern der Falten solche diffuse Deformation in lokal begrenzten Bezirken stattgefunden hat, besonders in inkompetenten Lagen (Oxfordien!), dass aber die quantitative Auswirkung dieses Deformationstyps für die Gestalt einer einzelnen Antiklinale und somit erst recht für die Kinematik des ganzen Jurasystems unmerklich ist. Dafür spricht in erster Linie die Tatsache, dass in gut aufgeschlossenen Profilen kurvimetrisch und volumetrisch bestimmte Verkürzungen übereinstimmen (vgl. S. 266). Man darf sich also vom Eindruck leiten lassen, den sowohl die direkte Feldbeobachtung wie die Betrachtung von Karten und sorgfältig gezeichneten Profilen vermittelt: überall findet man starre Schollen, die von relativ engen Bewegungssäumen umfasst sind, vorab die Plateaux der Franche Comte und die Tertiärbecken und steifen Synklinaltafeln des östlichen Juras, aber auch die Deckel von Kofferfalten, z.B. des Clos du Doubs, sowie die brettartigen Flanken, etwa des Weissensteins gegen das Dünnerntal zu. Der Deformationsmodus der Jurafaltung, im ganzen gesehen, nähert sich deutlich dem Extrem diskreter Schollenbewegung. Für das Modell sei die Verwirklichung dieses Extrems angenommen. Dadurch wird seine Darstellung und quantitative Durchführung nochmals drastisch erleichtert.

Freilich ist mit dieser Festsetzung erst eine Vorentscheidung getroffen. Nimmt man die tatsächliche Ausgestaltung des Modells für einen konkreten Teil des Juras an die Hand (vgl. S. 294), so sieht man sich fallweise vor die Entscheidung gestellt, wie die starren Schollen zu begrenzen seien. Denn obwohl sich die diffuse Bewegung gewöhnlich in vergleichsweise engen Zonen konzentriert, so fasern diese doch stel-

---

[1]) Ausser den hier erwähnten sind noch zwei jüngst erschienene Arbeiten von CAIRE (1963) und WEGMANN (1964) anzuführen. Es ist hier nicht der Ort, detaillierte Kritik zu üben, aber man stellt allgemein mit Verwunderung fest, dass in allen diesen Arbeiten das Offensichtliche, Nächstliegende, Erkenn- und Messbare zugunsten des Verborgenen und Unkontrollierbaren übergangen wird. Sollte man nicht den Deus ex Machina erst ins Spiel eingreifen lassen, wenn kein anderer Ausweg mehr bleibt?

lenweise aus und verlieren ihre Individualität, oder sie verzweigen sich zu einem Netz von geringer Maschenweite, das wohl in grossem Maßstab noch darstellbar ist, in einem kinematischen Modell erster Näherung jedoch, wie es hier konstruiert werden soll, nur durch komplizierende Nebensächlichkeiten stört.

Im übrigen ist schon auf S. 246 festgesetzt worden, dass die Jurakinematik für das Modell auf zwei Dimensionen reduziert werden soll, und dass zu diesem Zweck die im Bereich je einer Antiklinale messbare Verkürzung zu einer flachen Überschiebung umgezeichnet werden soll. Damit ist zugleich gesagt, dass alle innerhalb einer Antiklinale ausgebildeten Zonen diffuser Deformation zu einer einzigen diskreten Bewegungsfläche zusammengefasst werden sollen.

Wenn also einerseits eine erste Orientierung zeigt, dass der Jura näherungsweise als Feld diskreter starrer Schollen dargestellt werden kann, so ergibt doch anderseits die konkrete Ausgestaltung des Modells, dass wichtige Phänomene vorhanden sind, denen auf diese Weise nicht beizukommen ist. Das bedeutendste davon ist der Faltenaustausch, das axiale Abtauchen und Verschwinden einer Falte und das dazu komplementäre Auftauchen einer andern. Aber glücklicherweise wird durch dieses Phänomen die Brauchbarkeit des Modelles nicht in Frage gestellt, und in einzelnen – genau zu definierenden – Fällen lässt sich die Regel, dass nur diskrete Bewegungsflächen auftreten, unbeschadet durchbrechen. Die Besprechung der Problemfälle wird am besten anhand der jeweiligen konkreten Beispiele durchgeführt (vgl. S. 280).

Halten wir also fest: In erster Näherung ist der Jura ein zweidimensionales Feld diskreter, starrer Schollen, die voneinander durch Bewegungssäume getrennt sind. Für die ersten Stufen eines kinematischen Modells wird man ihn am besten als solches, stark schematisiertes, Schollenfeld auffassen. Man wird die Bewegungssäume als Grenzkurven darstellen, obwohl sie in Wirklichkeit dreidimensionale Räume einnehmen. Man wird die einzelnen Schollen als vollkommen starre, zweidimensionale Körper, als planimetrische Figuren gegeneinander bewegen, obwohl sie ein gewisses Mass interner Deformation aufweisen. Man wird sogar fürs erste, um mit den prinzipiellen Problemen der Schollenkinematik vertraut zu werden, gewisse Schollen, die gegeneinander nur wenig verschoben erscheinen, zu einer einzigen Scholle des Modells zusammenzufassen; man wird also das Netz der Bewegungsflächen vereinfachen, diese zusammenlegen zu einem ausserordentlich reduzierten System erster Ordnung, das dann bei späterer Verfeinerung je nach Notwendigkeit unterteilt werden kann.

Für die Kinematik eines zweidimensionalen Schollenfeldes gelten folgende einfache Regeln:

Die einzelnen Schollen sind Flächenstücke, die sie umgebenden diskreten Bewegungsflächen werden zu den *stets geschlossenen Grenzkurven* dieser Flächenstücke. Verzweigungen der Grenzkurven können nie blind enden, da sie neue Schollen abtrennen, die von einer geschlossenen Kurve umgeben sind. Quellen treten als Lükken zwischen den Flächenstücken, Senken als Überlappungen in Erscheinung, und zwar ist der Flächeninhalt von Lücken und Überlappungen das quantitative Mass der Stärke von Quellen und Senken: man nehme ein Flächenstück und verrücke es etwas; es entstehen an seinem Rande Lücken und Überlappungen, deren Flächen-

inhalte exakt gleich gross sind, wie dies bei einem geschlossenen System sein muss (Fig. 3).

Für die im Senkenfeld gelegenen Teile der Grenzkurve einer bewegten Scholle wird im folgenden oft der Ausdruck «Bewegungsfront» verwendet, entsprechend dem Sprachgebrauch der Meteorologie, wo bewegte Luftmassen ebenfalls von «Fronten» begrenzt sind. Unter der «Stärke» einer Front sei dann der Betrag der Schollenbewegung an dieser Front verstanden.

Jede Scholle kann nur Translationen und Rotationen in einer einzigen Ebene ausführen. Die Bahnkurven sind im allgemeinen Fall komplizierte ebene Kurven, doch lässt sich jede Bewegungsphase für je eine Scholle durch nur eine Rotation und eine Translation darstellen. Hier erkennt man übrigens, dass die Möglichkeit, ein kinematisches System angenähert als Schollenfeld wiederzugeben, davon abhängt, ob sich grössere Bereiche von annähernd konstanter Rotation und Translation zusammenfassen lassen. Bis zu einem gewissen Grade sollte sich dies auch für viel diffusere Systeme als den Jura bewerkstelligen lassen, gleich wie sich etwa Kurven durch Treppen endlicher Stufenzahl wiedergeben lassen, wobei diese Zahl von der Fehlergrenze abhängt, die bei einer bestimmten Anwendung noch toleriert werden kann.

Beim Jura als Gesamtsystem scheinen keine allgemeinen weiteren Beschränkungen möglich zu sein; doch empfiehlt es sich, dieses Gesamtmodell aus einfacheren Untermodellen zu synthetisieren, d.h. versuchsweise Bezirke abzugrenzen, für die weitere Einschränkungen, wenigstens in erster Näherung, vorgenommen werden dürfen.

Ein solcher Unterbezirk ist z.B. der Jura östlich des Querbruchsystems von Vallorbe–Pontarlier, in der Folge als «östlicher Jura» bezeichnet. Für ihn lässt sich – versuchsweise! – ein Untermodell entwickeln (weiterhin einfach als Modell I bezeichnet) , das den folgenden zusätzlichen Beschränkungen unterliegt:

5. Quellen- und Senkenbereich werden durch eine einzige ungeteilte Scholle (Quellenscholle) getrennt (Fig. 4)

Auf diese Möglichkeit hat der Schreibende in seiner «Fernschubhypothese» hingewiesen: Das Molassebecken im Süden des Faltenjuras ist bis in die Gegend südlich des Neuenburgersees hinunter nicht in feststellbarer Weise segmentiert. Allerdings ist ein gewisses Mass interner Deformation auch weiter östlich im Molassebecken sicher vorhanden, sie darf aber vorläufig, nach den bisher im Jura gemessenen quantitativen kinematischen Daten (vgl. S. 252) bei der modellmässigen Wiedergabe vernachlässigt werden.

Es sei also nur eine einzige, ungeteilte Quellenscholle vorhanden, und ihre Bahnkurve lasse sich in eine beschränkte Anzahl von Phasen unterteilen, deren jede sich in eine Translation und eine Rotation zerlegen lässt.

Während jeder Phase teilen sich sowohl Translation wie Rotation der Quellenscholle einer Senkenscholle mit (vgl. Fig. 4; werden verschiedene Senkenschollen gleichzeitig bewegt, so lassen sie sich dennoch für Konstruktionszwecke einzeln nacheinander bewegt denken, mit demselben Endergebnis, so dass immer nur eine Senkenscholle angenommen werden muss). Die Bewegungen im Senkenfeld werden

also durch das Verhalten der einen Quellenscholle diktiert. Die Senkenschollen akkommodieren sich je nach Vermögen, nach Massgabe der örtlichen Widerstände, welche die diktierte Bewegung in unterschiedlichem Masse hemmen.

Diese Widerstände könnten an sich, vom dynamischen Standpunkt aus bewirken, dass trotz dem einheitlichen Diktat der Quellenscholle interne Divergenzen im Senkenfeld erzeugt würden. Es liesse sich z. B. ein mit der Spitze gegen den Quellenbezirk gerichteter steifer Keil denken, an dem die vorgeschobenen Schollen wie am Bug eines Schiffes oder an einem Schneepflug seitwärts abgelenkt würden. Rein empirisch lässt sich aber für den Jura feststellen, dass im Innern des östlichen Juras keine auffälligen Divergenzen existieren, wiewohl sie bei fortgeschrittenen Modellen eine gewisse Rolle spielen dürften. Solche Divergenzen sollen also im Modell I nicht auftreten.

Im allgemeinen Fall werden in verschiedenen Phasen immer wieder andere Schollen bewegt. Dies trifft sicher für den Jura zu, wie sich bei der konkreten Ausgestaltung des Modells ergibt. Für jede Phase ist also immer nur eine Scholle in Bewegung zu denken, die *Phasenscholle*, die sich zusammensetzt aus der immer gleichbleibenden *Quellenscholle* (ihre rückwärtige Grenze ist hypothetisch, sie darf als Gerade genommen werden, wodurch die Form der Lücke besonders einfach wird, vgl. Fig. 4 und S. 246) und einem Vorbau von wechselnder Gestalt, der *Senkenscholle*. Wenn nun Translationsrichtung und Rotationszentrum von Phase zu Phase wechseln, wenn also die Quellenscholle eine komplizierte Bahnkurve beschreibt, so wird die Kinematik des Senkenfeldes immer noch recht unübersichtlich. Wenn dagegen die Quellenscholle in allen Phasen nur *eine* Translationsrichtung beibehält, oder nur *ein* Rotationszentrum, so ist die Kinematik ausserordentlich straff organisiert, die Beziehungen der Bewegung einzelner Punkte sind durch strenge Gesetze geregelt, so dass sich aus wenigen Beobachtungen schon weitgehende Schlüsse ziehen lassen. Und diese unerwartet straffe Organisation scheint beim östlichen Jura weitgehend verwirklicht.

6. Die Quellenscholle führt nur Rotationen um ein einziges Zentrum aus

In der «Fernschubhypothese» wurde, noch etwas zaghaft, die Vorstellung vertreten, das Jurasystem sei um das Lägernostende rotiert. Mehrere Indizien schienen darauf hinzudeuten, namentlich auch die regelmässige Zunahme des Verkürzungsbetrages von der Lägern nach Westen. Allerdings mussten dafür frühere Schätzungen des Zusammenschubes zum Teil drastisch revidiert werden. Aus der gemessenen Verkürzung im Querprofil von Grenchen wurde eine Rotation von 7 Grad gefolgert, und mit dieser Rotation lässt sich eine Verkürzung von 26 km für das Querprofil von Nyon extrapolieren. Dieser Betrag schien damals allzu kühn, es wurden auf Fig. 14 der zitierten Arbeit nur 20 km eingesetzt, was zwar weit über die aus erhältlichen Darstellungen abschätzbaren Verkürzungen hinausging, dem Schreibenden aber, der beeindruckt war von den grossen Überschiebungen, die sich vom Reculet nach St-Claude und an den Rand der Plateaux von Champagnole und Nozeroy immer wieder beobachten lassen, vertretbar erschien. In der Folge haben die Ergebnisse der Bohrung Risoux I (vgl. S. 298) die kühnsten Erwartungen übertroffen: für diesen Querschnitt darf nun eine Gesamtverkürzung zwischen 26 und 29 km als

erwiesen gelten. Darum darf die Rotationshypothese heute mit grossem Vertrauen ins Modell eingebaut werden, obwohl weiter unten gezeigt wird (S. 299), dass in diesem Gebiet auch noch Translationen und Rotationen um andere Zentren eine Rolle spielen. Zusätzliche Translationen mögen auch im östlichen Jura vorhanden sein, doch sind sie bestimmt recht klein. Sie würden sich z.B. am Ostende der Lägern dadurch zu erkennen geben, dass die Verkürzung nicht allmählich verschwindet, sondern einem endlichen Wert zustrebt, der dann abrupt auf Null fällt. Ein Blick auf die Karte von MÜHLBERG (1901) verrät aber eine allmähliche Abnahme der Verkürzung. Eine grössere Rolle dürften interne Bewegungen im Molassebecken spielen, doch müssen viel genauere Bestimmungen der Gesamtverkürzung in verschiedenen Juraabschnitten vorgenommen werden, als dies bis jetzt möglich war, um solche offenbar nebensächliche Erscheinungen quantitativ zu fassen.

Die strengen Gesetze, denen unser Modell zu gehorchen hat, sowie die Freiheiten, die ihm noch bleiben, ersieht man am besten aus Fig. 4 und den beigegebenen Erläuterungen. Hier möchten wir nur noch ergänzend folgendes bemerken:

1. *Transversalverschiebungen* sind nichts anderes als Segmente von Bewegungsfronten, welche spitzwinklig zur Transportrichtung liegen. Sie können nicht isoliert werden, da ja eine Bewegungsfront nie blind endet, sie sind immer integrale Bestandteile einer geschlossenen Grenzkurve, längs der auf grosse Strecken hin Normalstauchungen, d.h. Bewegungen senkrecht zum Streichen, vorherrschen dürften. Die Transversalverschiebung ist mit den Bewegungen der restlichen Schollenränder, je nach der kinematischen Organisation des Systems, *quantitativ* verknüpft. Diese grundlegende Regel, die auch für kompliziertere Systeme gilt, wird oft nicht beachtet. So hat sie z.B. Albert HEIM bei seiner Analyse der Transversalverschiebungen im Jura nicht berücksichtigt. Oft werden den Transversalverschiebungen ganz mysteriöse Rollen zugedacht (z.B. MOODY and HILL, 1956; PAVONI, 1962). Anderseits liegen Ansätze zur Formulierung dieser Regel z.B. bei TREVISAN, DE SITTER (1956, p. 166–167), aber auch bei zahlreichen andern Autoren, so in den früheren Arbeiten des Schreibenden. Natürlich gilt auch die umgekehrte Regel, dass keine Horizontalbewegung ohne Transversalverschiebungs-Elemente auftritt.

2. Die zeitliche Folge der Bewegungen lässt sich überall da erkennen, wo sich Bewegungsfronten schneiden: Transversalverschiebungen, die korrelierbare Falten verstellen, oder Falten und Überschiebungen, die Querstrukturen (evtl. spitzwinklig zu ihnen verlaufende, wie im Grenchenberg, vgl. S. 266) überwältigen, sind offenbar jünger. Die Frage nach dem zeitlichen Verlauf der Jurafaltung ist bekanntlich alt und kontroversenreich. BUXTORF und HEIM vertraten entgegengesetzte Ansichten, der eine glaubte, die Faltung sei systematisch von Norden nach Süden zurückgeschritten, der andere, sie sei umgekehrt von Süden nach Norden vorgerückt. Auf Grund der eben genannten Kriterien ergibt sich aber eine ganz andere Lösung des Problems: sie ist weder systematisch von Süden nach Norden noch von Norden nach Süden fortgeschritten, vielmehr wechselt ihr Anlagerungssinn je nach Entwicklungsphase von Querschnitt zu Querschnitt, und häufig halten sich junge Bewegungsfronten nicht an die Ränder des Faltenjuras, sondern benutzen den Innenbereich (vgl. S. 300).

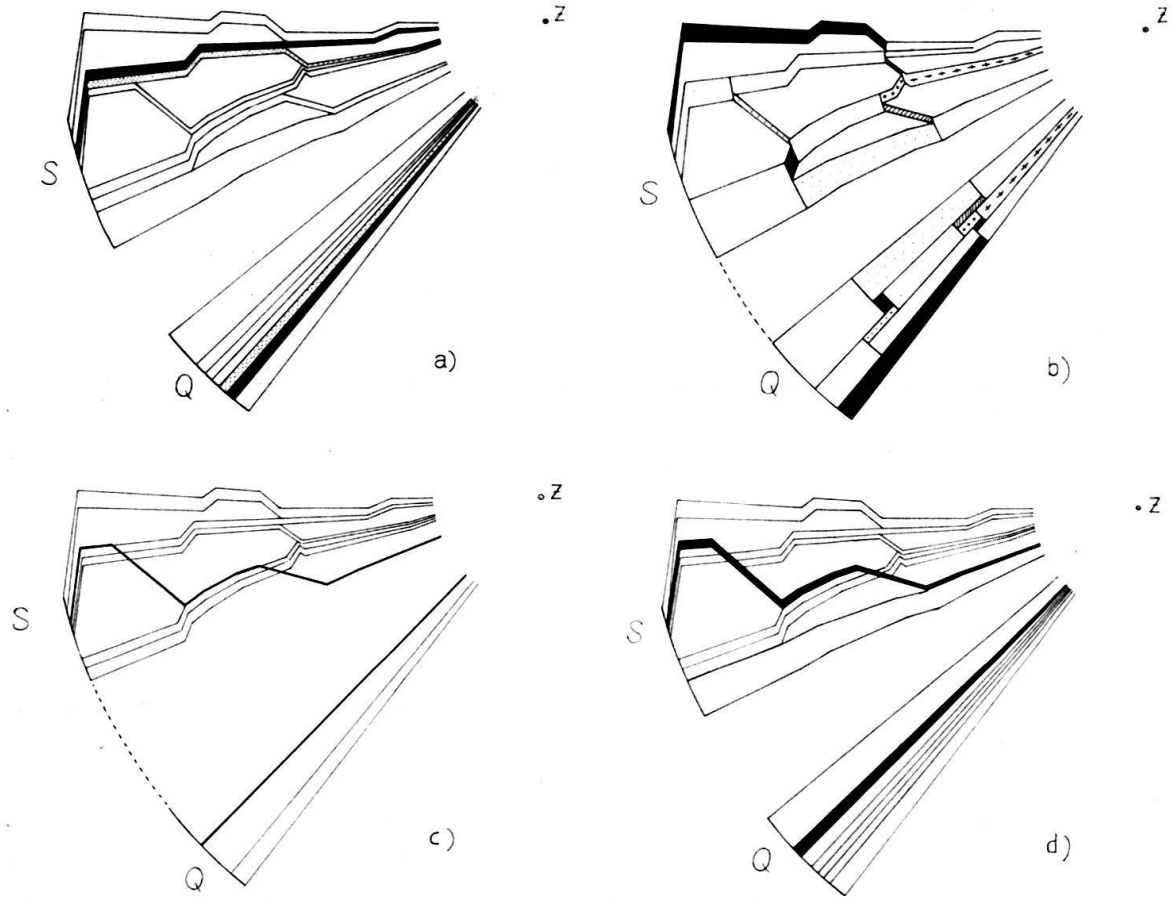

Fig. 4. *Der Typus des durch Figur 2 bestimmten kinematischen Modells*

a) Die polygonale Begrenzung der einzelnen Schollen ist willkürlich festgelegt. Aus Gründen der Darstellung ist das Feld nicht bis zum Rotationspunkt gezeichnet, sondern im E durch einen Kreisbogen begrenzt. Der Quellenbereich (Q) kann dann zu einem Kreisringsektor zusammengefasst werden. Die Faltung schreitet hier von N nach S fort und zwar in 7 Phasen. Bewegungsfront und Quelle der zweiten Phase z.B. sind schwarz ausgefüllt. Die zwischen Bewegungsfront und Quelle gelegene *Phasenscholle* – die zweite Phasenscholle würde also das ganze zwischen den ausgefüllten Streifen gelegene Gebiet umfassen – setzt sich zusammen aus der ausserhalb des Senkengebiets (S) gelegenen *Quellenscholle* und einem im Senkengebiet gelegenen Vorbau, der *Senkenscholle*. Die Quellenscholle bleibt bei allen Phasen gleich, während der Vorbau sich von Phase zu Phase ändert. Jede Phase entspricht einer Teilrotation, deren Betrag im Quellenbereich abzulesen ist. Bei Verzweigungen der Bewegungsfronten wird die Teilrotation der Gesamtfront unter die Zweigfronten verteilt.

b) Wenn man von einem konkreten Objekt ausgeht, wird man im allgemeinen nicht in der Lage sein, von Anfang an eine zeitliche Aufgliederung in Phasen vorzunehmen. Man kann dann die einzelnen unverzweigten Segmente von Bewegungsfronten ausmessen. Im Quellenfeld entsprechen sie untergeordneten Kreisringsektoren, die zusammen gerade lückenlos das Quellenfeld erfüllen müssen. Bei Verzweigungen werden die begrenzenden Kreisbögen der Untersektoren auf die Zweigfronten verteilt. Den Teilfronten entsprechende Quellensektoren sind durch gleiche Signaturen gekennzeichnet. Die Gesamtrotation und die Verteilung auf die einzelnen Fronten ist genau gleich wie bei (a), vgl. auch Fig. 6, wo diese Konstruktion für den konkreten Fall des Rheintalischen Juras durchgeführt ist.

c, d) Wenn eine der Bewegungsfronten, z.B. die sechste, dieskordant zu älteren Bewegungsfronten verläuft (c), so werden diese längs der diskordanten Front zerrissen und um deren Bewegungsbetrag verstellt (d). Das Endresultat bei gleicher Schollenbegrenzung und gleichen Teilrotationen ist sehr ähnlich dem bei (a), doch gibt sich die diskordante Front an ihren Transversalverschiebungssegmenten sofort zu erkennen.

Eine Modifikation dieses Modells (Untermodell II, in der Folge einfach als Modell II bezeichnet, vgl. Fig. 2) welche für den westlichen Jura brauchbar scheint, wird auf S. 294 ff. entwickelt. Zuerst aber möge Modell I an einem konkreten Beispiel etwas ausgestaltet werden.

B. Die Ausführung des Modells für spezielle Abschnitte des Faltenjuras

Damit wären die allgemeinen Voraussetzungen zum Aufbau eines kinematischen Modells gegeben, die geometrischen Beziehungen, welche zwischen den einzelnen Punkten herrschen müssen, festgelegt. Wie aber schlägt man die Brücke zwischen diesen schematischen Gedankengängen und den konkreten, empirischen, messbaren Daten? Dazu bedarf es einer besonderen Technik, deren Entwicklung nun an die Hand genommen werden soll.

I. Analytische Technik

1. Bei der Profilkonstruktion verwendete Interpolationsmethoden

Zunächst erhebt sich die Frage, welcher Art die empirischen Daten sind, die zur Verfügung stehen. Es müssen Verkürzungen gemessen werden, und das lässt sich nur auf Profilen tun. An solchen sind unzählige aus den verschiedensten Gebieten des Juragebirges veröffentlicht worden. Sie sind das Rohmaterial, aus welchem das Modell aufgebaut werden soll. Wie ist die Qualität dieses Rohmaterials? Kann es unbesehen übernommen werden oder muss es zuerst noch verarbeitet, gereinigt, werden um seiner Bestimmung dienlich zu sein?

Vergleicht man die Profile einer Schnittserie durch ein und dieselbe Falte, so beantwortet sich diese Frage alsbald. Ein besonders instruktives Beispiel liefert die Profilserie durch den Grenchenberg von Vogel und Schlaich (1934), vgl. S. 268. Ein Profil dieser Serie, das durch den Grenchenbergtunnel nach Buxtorf, weist einen komplizierten Kernbau auf, vor allem die berühmt gewordene verfaltete Überschiebung. Die weiter westlich davon gelegenen Profile zeigen ein rasches Verschwinden dieser Überschiebung und damit gleichzeitig eine radikale Vereinfachung im inneren Bauplan der Kette. Wir dürfen annehmen, dass diese einfachen, westlichen Profile auf gewissenhafter Feldarbeit und getreulicher Übernahme aller Felddaten in das Profil basieren. Ja, es ist sogar sicher, dass die Autoren eine Fortsetzung der Grenchenbergüberschiebung nach Westen suchten und einfach nicht fanden. Nach landläufiger Auffassung wären also diese einfachen westlichen Profile im Rahmen der Aufschlussverhältnisse korrekt konstruiert, aber hier ist der Haken. «Im Rahmen der Aufschlussverhältnisse» heisst: es sind der genauen Identifikation der Gesteinstypen und Lagerungsverhältnisse nur eine beschränkte Anzahl von Punkten zugänglich; zur Herstellung eines lückenlosen Bildes, eines Profils, muss interpoliert und extrapoliert werden. Eine methodisch saubere Konstruktion verlangt also eine Definition der Interpolationstechniken, welche der Konstruktion zugrunde liegen, denn an sich lassen sich zwei Punkte durch unendlich viele verschiedene Kurven verbinden. Das gilt auch dann noch, wenn die Tangenten an diesen Punkten bekannt sind, wie dies bei der Profilkonstruktion gewöhnlich der Fall ist. Eine einiger-