Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae

Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft

Band: 75 (1982)

Heft: 1

Artikel: Die Südostdecke des Rheingrabens : ein kinematisches und dynamisches Problem

Autor: Laubscher, Hans P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-165219

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: 09.12.2025

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

Eclogae geol. Helv.	Vol. 75/1	Seiten 101-116	8 Textfiguren	Basel, März 1982

Die Südostecke des Rheingrabens - ein kinematisches und dynamisches Problem

Von HANS P. LAUBSCHER[1])

ZUSAMMENFASSUNG

In den Sedimenten des Dinkelberg-Tafeljurabereichs geht der östliche Randbruch des Rheingrabens in eine Flexur über. Östlich davon ist das Dinkelberg-Tafeljuraplateau durch zahlreiche enge Gräben zerschnitten, die ungefähr parallel zur Flexur verlaufen und eine Streckung anzeigen, die im wesentlichen auf die Sedimente über der Anhydritgruppe des mittleren Muschelkalks beschränkt ist. Die einfachste kinematische Erklärung besteht in einer Gleitung der Sedimenthaut nach Westen in ein potentielles Loch, das über dem Grundgebirgsbruch entstand und durch die Gleitmassen ständig aufgefüllt wurde (Flexur). Diese Hypothese setzt eine Westneigung des Plateaus im oberen Oligozän voraus, die später durch antithetische Rotation an der Wehratal-Zeiningen-Bruchzone wieder rückgängig gemacht wurde. Ein solches Fortschreiten der tektonischen Aktivität von West nach Ost ist charakteristisch für das Südende des Rheingrabens.

Eine zweite Gruppe von Abscherstrukturen, die Adlerhoffalte und die Überschiebungen von Mettau und Mandach, streicht insgesamt eher ungefähr West-Ost, senkrecht zur Flexur und den Gräben. Sie scheint älter zu sein als diese. Einfachste kinematische Erklärung ist wiederum ein Abgleiten über der Anhydritgruppe vom Südteil des Schwarzwaldes. Dieser müsste durchwegs Südfallen aufgewiesen haben, bevor Rotationen am aufreissenden Kandern-Wehratal-Zeiningen-Bruchsystem die Neigungen veränderten. Dynamisch verlangen diese Hypothesen, dass der Reibungswiderstand in den Evaporiten praktisch verschwand - ein Postulat, das auch für andere Rutschungen über Evaporiten zu gelten scheint (Canyonland, Utah).

ABSTRACT

Within the sediments of the Dinkelberg-Tabular Jura domain the eastern border fault of the Rheingraben degenerates into a drape fold (flexure). The Dinkelberg-Tabular Jura plateau east of it is dissected by numerous narrow grabens that approximately parallel the flexure and seem not generally to affect the basement significantly and thus must be due to stretching of the sediments above the Middle Triassic evaporites. The simplest kinematic explanation is westward gliding of the sediments towards a potential hole developing along the eastern border fault in the basement. The implied upper Oligocene west-dip of the plateau was eliminated subsequently by antithetic rotation on the Wehratal-Zeiningen fault zone. Such progression of tectonic activity from west to east is characteristic for the southern end of the Rheingraben.

Another set of decollement features, the Adlerhof fold and the Mettau and Mandach thrusts strike approximately east, almost at right angles to the flexure and the grabens, and seem to predate them. Simplest explanation is again gravity slide from the emerging Black Forest, which had a south-slope before this was modified by the Kandern-Wehratal-Zeiningen rupture and the associated rotations. Dynamically, this calls for virtual disappearance of frictional resistance in the evaporites - a postulate that seems to hold as well for other slides on evaporites such as that in Canyonland (Utah).

[1]) Geologisches Institut der Universität, Bernoullistrasse 32, CH-4056 Basel.

1. Einleitung

Gewisse Strukturen der Dinkelberg-Tafeljurascholle haben Generationen von Geologen immer wieder zu Überlegungen über ihre Entstehung angeregt, vor allem Rheintalflexur und Keilgräben (Fig. 1, 3), aber auch Adlerhofgewölbe (HERZOG 1956; HAUBER 1971, s. Fig. 4) und Mettauer-Mandacher Überschiebungen (BRÄNDLIN 1911; BUXTORF & NIGGLI 1934; WILDI 1975, s. Fig. 5). Verschiedene Autoren haben sich dabei von verschiedenen Perspektiven leiten lassen (vgl. auch WITTMANN 1949, 1970). Die Flexur ist maximal etwa 1000 m hoch. Sie ist, wenigstens an gewissen Stellen, eine Kompressionsstruktur von bestenfalls wenigen hundert Metern Verkürzung. Die Keilgräben dagegen ergeben eine Streckung von einigen hundert Metern, die im wesentlichen auf die Sedimenthaut beschränkt sein muss: Sogar wo die Brüche offenbar in das Grundgebirge eindringen, können sie dort, nach kartierter Geometrie, nur eine unmerkliche Streckung bewirkt haben. Das Einfachste wäre, die beiden Erscheinungen zu koppeln im Sinne einer Rutschung (TREFZGER 1925, Fig. 3a, 3b). Schon CLOOS (1910) hatte argumentiert, dass eigentlich nur zwei Mechanismen zur Entstehung der Keilgräben geführt haben könnten: Streckung am Aussenbogen einer regionalen Domung, wobei die neutrale Faser ungefähr mit dem mittleren Muschelkalk zusammenfallen müsste, oder Schweregleitung. Die erste Möglichkeit entfällt (obwohl von CLOOS ernsthaft in Betracht gezogen): Keine genügende Domung ist heute feststellbar oder als vorübergehende oligozäne Erscheinung rekonstruierbar; es bleibt also nur die Gleitung. Dafür würde der mittlere Muschelkalk mit seinen Evaporiten, besonders den Salzlagern, einen möglichen Gleithorizont anbieten.

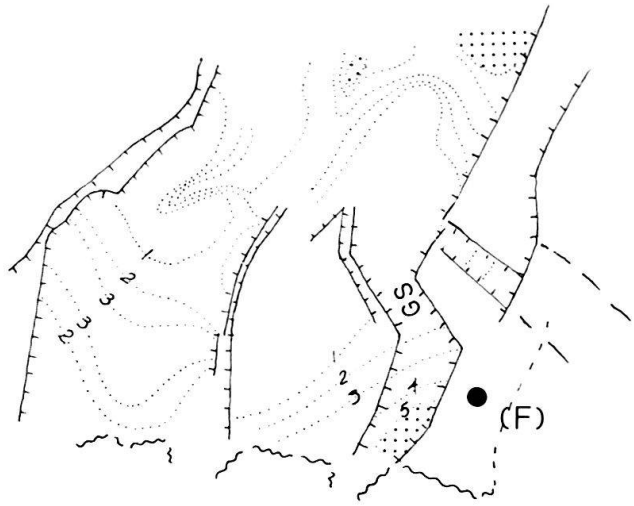
Aber so einfach ist die Sache auch wieder nicht. Erstens gibt es neben Flexur und Keilgräben noch die anderen Strukturen, im besonderen Adlerhoffalte und Mettauer Überschiebung, die nicht so ohne weiteres in dieses Schema passen, und zweitens ist heute kein Hang mehr vorhanden, wie er für die Schweregleitung vorauszusetzen wäre; er müsste als vorübergehendes, später wieder eliminiertes Gebilde rekonstruiert werden. Das Problem ist, ob dies in plausibler Weise durchführbar ist. Und endlich ist zu prüfen, wie ein derart konstruiertes kinematisches Modell quantitativ in die heute bekannten Verhaltensweisen der beteiligten Gesteine passt.

Fig. 1. Die Entwicklung des Rheingraben-Südrandes im Paläogen, Kartenausschnitt vereinfacht nach DOEBL (1970).

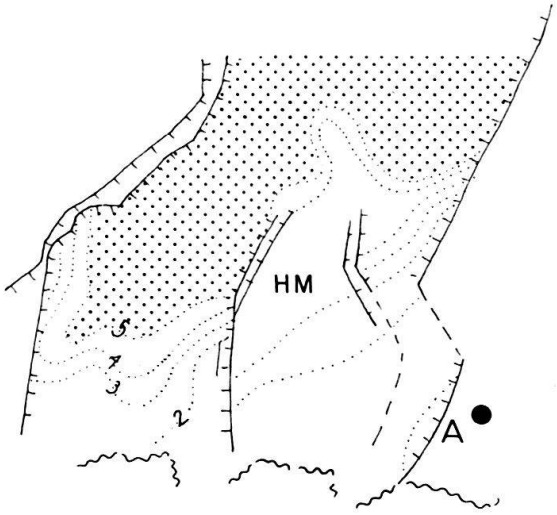
Punktiert: Isopachen in 100 m. Gewellt: Flexurzone von Monbéliard-Aesch.

Tektonische Elemente: GD = Graben von Dannemarie, HM = Horst von Mulhouse, GS = Graben von Sierentz-Wollschwiller, A = Bruchzone von Allschwil, F = Flexur von Basel (Rheintalflexur), M-A = Flexurzone von Montbéliard-Aesch, Ad = Adlerhofgewölbe, Me = Überschiebung von Mettau, D = Dinkelbergbruch, G = Tafeljura-Gräben, W = Wehratalbruch, R = Bruch von Rheinfelden, Ma = Bruch von Maulburg. Pfeile geben das Gefälle im betrachteten Zeitintervall an.

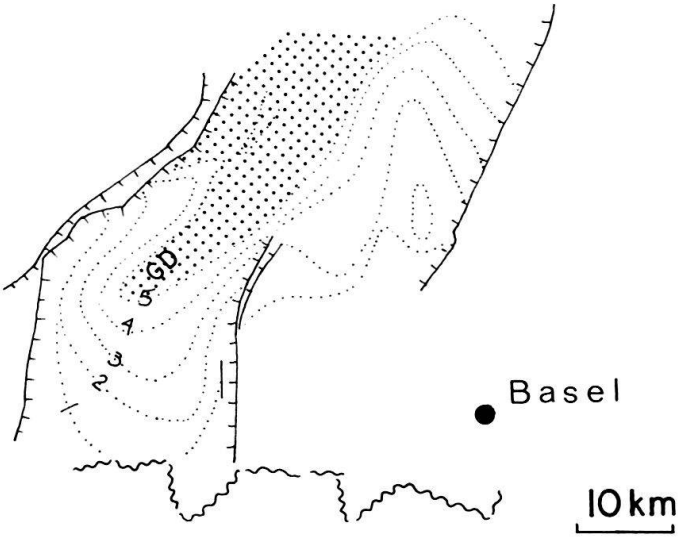
Im Eozän (a) und unteren Oligozän (b) war nach stratigraphischer Evidenz (Isopachen, DOEBL 1970; Konglomerate im «Système de Bourogne», SCHNEIDER 1960) vor allem der Graben von Dannemarie im Westen des Horstes von Mulhouse aktiv. Im unteren Oligozän dehnten sich die Bewegungen gegen Osten aus: Die Mächtigkeiten zeigen den Beginn der Absenkung am Bruch von Allschwil an, wogegen im Osten dieses Bruches die Mächtigkeit des Unteroligozäns allmählich auf Null abnimmt auf einer leicht gegen Westen geneigten Scholle.



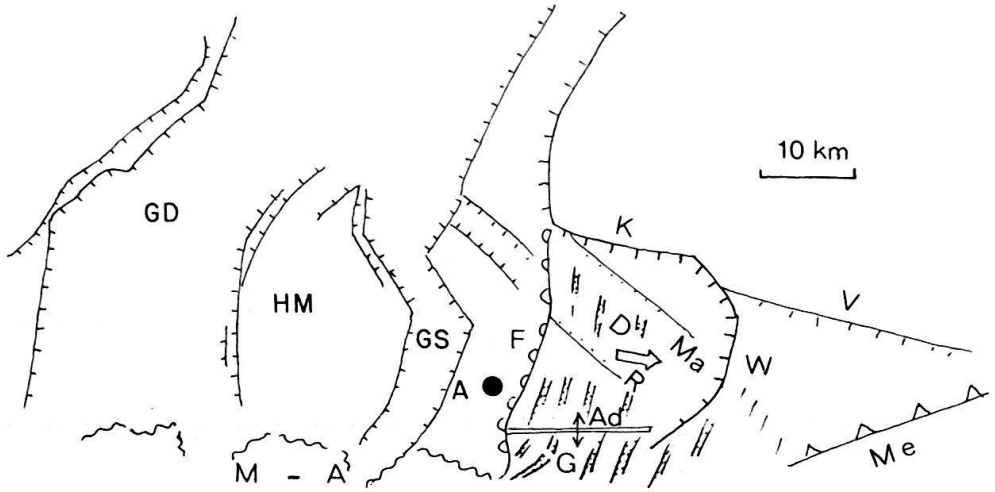
c. Mitteloligocaen



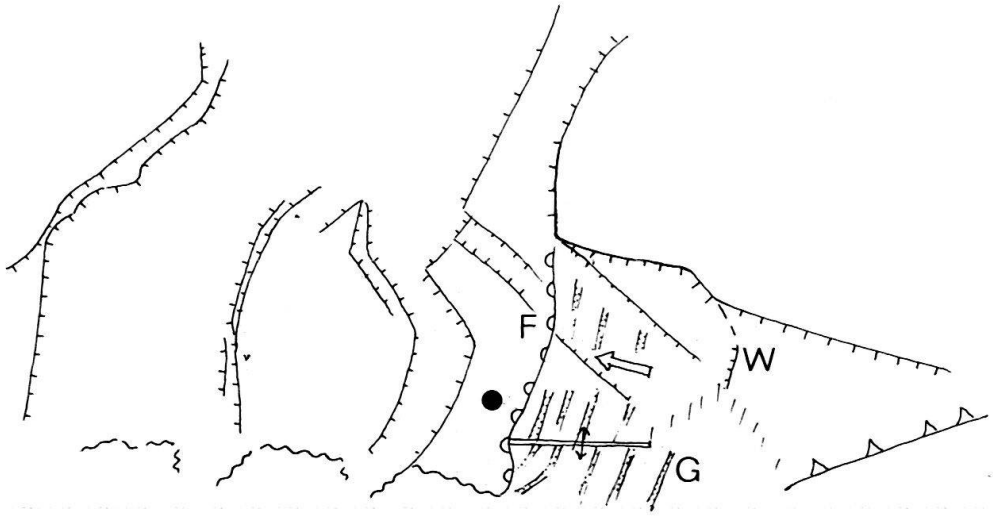
b. . Unteroligocaen



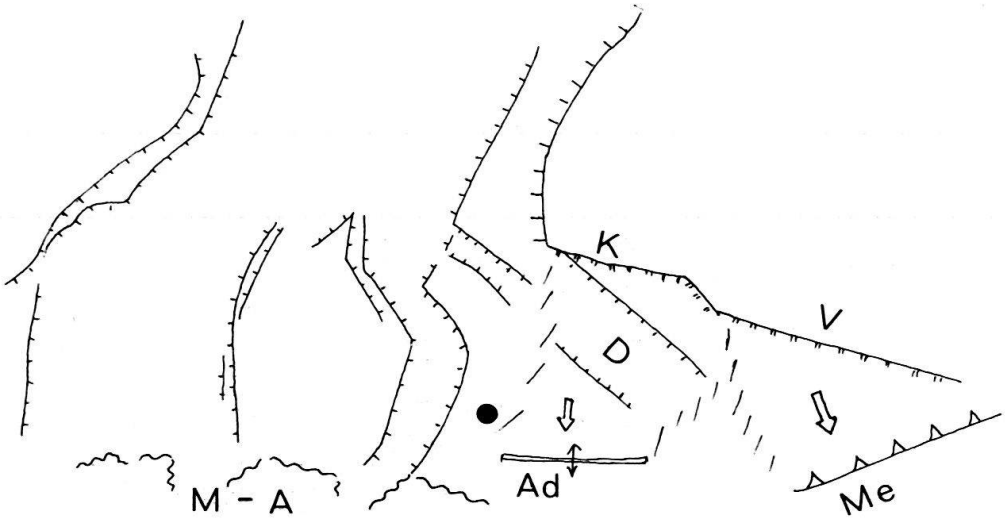
a. Obereocaen



f. Top Oligocaen



e. Oberoligocaen



d. Oberoligocaen

2. Ein Inventar der zu berücksichtigenden Strukturen und ihre von einem Modell zu bewältigenden Entstehungsprobleme

Figur 1f enthält, schematisiert, die wichtigsten, im Modell berücksichtigten Strukturen (F, K, V, Ma, D, W, Me, R, Ad, G; vgl. Legende). Davon sind G, Ad, Me im wesentlichen auf die Sedimenthaut beschränkt. Ad und Me sind Kompressionsstrukturen, die unabhängig vom miozänen Faltenjura sind. Direkt datierbar sind sie nicht, doch lässt sich mindestens für das Adlerhofgewölbe (Ad) zeigen, dass es in seiner Anlage älter ist als die Keilgräben (HERZOG 1956), die ihrerseits prähelvetisch und vermutlich oligozänen Alters sind (BUXTORF 1901). Die einfachste Hypothese für ihre Entstehung ist ein oligozänes Abrutschen der Sedimenthaut vom Schwarzwald, von Norden her (WILDI 1975); für einen Schub von Süden zu jenem Zeitpunkt gibt es keine Anzeichen (LAUBSCHER 1973, Fig. 2). Die Keilgräben anderseits werden am einfachsten als Streckungsphänomene einer von Osten gegen die Rheintalflexur abgeglittenen Sedimentdecke gedeutet. Da sie jünger sind als Ad und damit vermutlich auch Me, so muss ein kinematisches Entwicklungsmodell zuerst eine Nord-Süd-Neigung, dann eine Ost-West-Neigung postulieren. Für die den Abgleitstrukturen subparallel laufenden Grundgebirgsstrukturen K, V (in Zusammenhang mit Ad, Me) und F, W (im Zusammenhang mit G) wäre dann eine ähnliche zeitliche Abfolge zu fordern. Die kleinen Grundgebirgsstrukturen Ma, R, die den breiten und seichten Dinkelberggraben definieren, treten namentlich für Ad, Me störend in Erscheinung: Sie scheinen zwischen diesen Kompressionsstrukturen eine Lücke in den Nord-Süd-Abrutschungen zu bewirken und dürften deshalb noch älterer Anlage sein. Das kinematische Entwicklungsmodell (Fig. 1 und 2, Kartenansicht, und Fig. 3, Profilansicht) versucht, all diese raum-zeitlichen Beziehungen darzustellen.

Fig. 1 (Forts.)

Vom mittleren Oligozän (Rupélien, c) sind vor allem die Transgressionen über eine noch sehr schwach ausgebildete Flexur (wenige Grad bis max. 15°, HERZOG 1956, FISCHER et al. 1971) bei der Ruine Dorneck und am Röttler Schloss bekannt; die Hauptausbildung der Flexur ist post-Mitteloligozän und sogar post-oberoligozäne Süsswasserschichten: Diese sind mit dem Mitteloligozän ± konform deformiert (bei St. Jakob, BUXTORF & NIGGLI 1934).

Eine gegen Osten fortschreitende Ausbreitung der Bruchtätigkeit ist somit angezeigt. Dabei ist weiter bemerkenswert, dass bei der Ausbreitung der Brüche sowohl Flexurschleppungen wie auch antithetische Verkippungen vorkommen (Bruch von Allschwil, vom Unteroligozän an; Westschenkel der Mulde von St. Jakob post-Tüllinger-Kalke), wie sie von andern Bruchschollenfeldern bekannt sind (z. B. ostvenezolanisches Molassebecken, LAUBSCHER 1956). Stratigraphische Daten erlauben zurzeit keine weitere Aufgliederung der Entwicklung im Bereich der Rheingrabenflexur, ausser, dass sie prä-Juranagelfluh-(prä-Mittelmiozän-)inaktiv wurde (FISCHER et al. 1971; vgl. auch KOCH 1925 für den Abschnitt östlich des Laufenbeckens). Für die Tafeljurabrüche ist ein prä-Obere-Meeresmolasse-(wohl prä-Untermiozän-)Stadium der Inaktivierung und Einebnung nachgewiesen (BUXTORF 1901). Es ist aber trotzdem möglich,

- die Tendenzen aus den weiter westlich gelegenen Grabengebieten in den Flexur-Tafeljurakomplex zu extrapolieren und
- in diesem Komplex tektonische Information für die kinematische Entwicklung zu gewinnen:

Die Adlerhof-Antiklinale im Tafeljura (Fig. 4), eine fast Ost-West gerichtete Falte (HERZOG 1956; HAUBER 1971), ist entweder älter als die Tafeljurabrüche oder hat sich mindestens in einem Frühstadium der Tafeljura-Bruchbildung entwickelt; denn das Bruchmuster ändert sich radikal beim Durchqueren

3. Ein Plausibilitäts-Modell der raum-zeitlichen Entwicklung des Südostendes des Rheintalgrabens (Kinematik)

Figur 1 gibt die Kartenansicht der oligozänen Entwicklung am Südende (namentlich Südostende) des Rheingrabens wieder; Figuren 1a bis c sind etwas vereinfacht nach DOEBL (1970, Fig. 2–4) umgezeichnet. Um den Text nicht durch zu viele Einzelheiten zu belasten, werden diese in der ausführlichen Legende zu Figur 1 erläutert. Hier beschränken wir uns auf ein paar wesentliche Züge. Eine bedeutungsvolle Entwicklungstendenz fällt auf: Die Bewegungen greifen im Verlaufe der Zeit vom Westrand, nahe den Vogesen, gegen den Ostrand über. Man kann sich dazu vorstellen, dass die Verbindung mit dem Bressegraben (LAUBSCHER 1971, 1973a) Priorität gehabt habe und nur zögernd eine Ausgestaltung der abseits liegenden Südostecke nachgefolgt sei. Im besonderen zeigt der Bruch von Allschwil

---

Fig. 1 (Forts.)

der Adlerhof-Antiklinale. Diese isolierte Falte ist somit prä-Miozän und nicht Teil der Jurafaltung. Sie ist abgeschert auf den Evaporiten der Trias (Keuper, mittlerer Muschelkalk, Fig. 4), doch kommt ein Fernschub aus dem Süden für diese Zeit nicht in Frage; am einfachsten ist ihre Entstehung (Richtung, Abscherung) einem geringfügigen Abgleiten des Sedimentmantels vom sich hebenden Südwestende des Schwarzwaldes (später Dinkelbergscholle) zuzuschreiben. Mögliche Zerrungen bei diesem Abgleiten entstanden an den Südost streichenden Brüchen von Kandern, Maulburg und Rheinfelden.

Eine dem Adlerhofgewölbe analoge Kompressionsstruktur, die ebenfalls ausserhalb des Faltenjuras liegt, ist die Überschiebung von Mettau (Fig. 5; BRÄNDLIN 1911, BUXTORF & NIGGLI 1934, WILDI 1975). Obwohl nicht mit der Adlerhoffalte in direkter Verbindung, liegt sie doch ungefähr in deren östlicher Fortsetzung; weiter ist sie der Vorwald-Störung vorgelagert, der Südostfortsetzung der Störung von Kandern, am Südfuss des Schwarzwaldes; sie ist im wesentlichen eine Abscherstruktur über der Anhydritgruppe und ist von WILDI (1975) dem Abgleiten der Sedimentdecke vom oligozänen Schwarzwald zugeschrieben worden. Eine zu dieser Zeit sich ausprägende Heraushebung der östlichen Grabenlippe (vgl. Fig. 2a) mag der Anlass gewesen sein. So gesehen sind Adlerhof- und Mettauer Struktur Teilstrukturen eines Stauungswalles am Fuss des Südhanges des oligozänen Schwarzwalds; getrennt sind sie durch die Südostprojektion des Dinkelberggrabens und eine eben erst sich abzeichnende Wehratal-Verwerfung.

Die jüngeren, NNE streichenden Tafeljurabrüche sind auf das Gebiet westlich der Mettauer Überschiebung beschränkt. Sie zeigen überwiegend eine gegen Westen gerichtete Zerrung über der Anhydritgruppe an und somit offenbar ein Abgleiten der Sedimenthaut gegen Westen, gegen die Flexur. Der Gradient der Schwarzwaldabdachung muss sich demnach eher abrupt gedreht haben; das konnte er tun, wenn die Kandern-Wehratal-Verwerfung von Westen gegen Osten aufzureissen begann, und zwar so, dass der Verwerfungsbetrag am grössten im Westen bei Kandern war, während die Wehratalstörung zunächst als gegen Westen geneigte Flexur in Erscheinung trat (d, vgl. Fig. 2b). Der zu dieser Abgleitbewegung gehörende Stauwall ist die Flexur von Basel, wenigstens teilweise; für die südlichen Bereiche des Tafeljura-Bruchfeldes müssten die Flexuren am Ostrand des Laufen- und des Delsberger Beckens eine ähnliche Rolle gespielt haben: Sie scheinen zwar nur schwach ausgebildet, doch steht eine genaue Rekonstruktion der oligozänen Situation noch aus.

Im Gegensatz zu den älteren Staustrukturen von Adlerhof und Mettau, bei denen die gestauten Massen nach oben auswichen (Falte; Überschiebung), mussten für die nach Westen abgleitenden Tafeljuramassen andere Ausweichmöglichkeiten bestehen (vgl. Fig. 3, 6, 7). Man sollte jedenfalls für das Grundgebirge unter der Abgleitdecke auch im Bereich der Flexur Abschiebungen wie weiter nördlich erwarten. Die gesamte Sprunghöhe im Raume Basel-Chrischona beträgt etwas über 1000 m, was bei 60°-fallenden Abschiebungen (wie sie etwa einmal an der Oberfläche gemessen werden können) einem horizontalen Zerrbetrag von etwa 600 m entsprechen würde. Dieser Zerrbetrag würde anderseits auch erreicht durch fünf schmale Tafeljuragräben von je 100 m Einsenkung, was grosso modo der kartierten Tektonik entspricht.

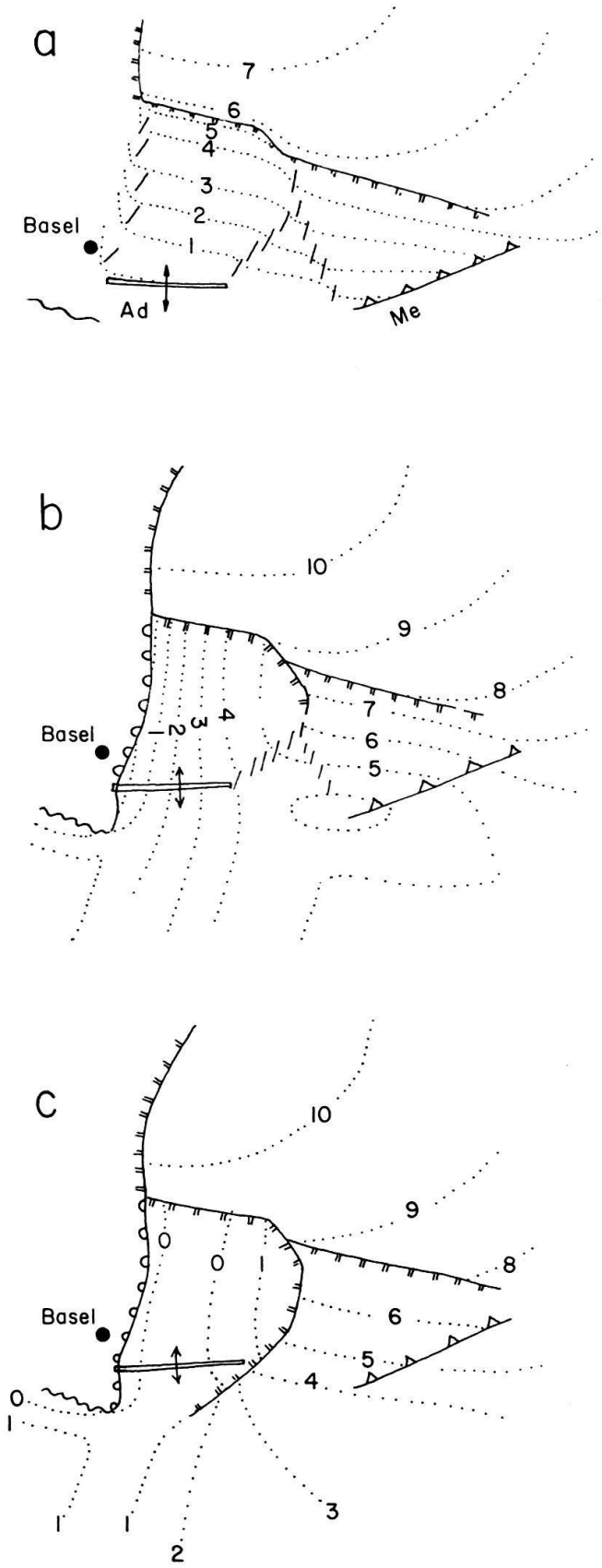
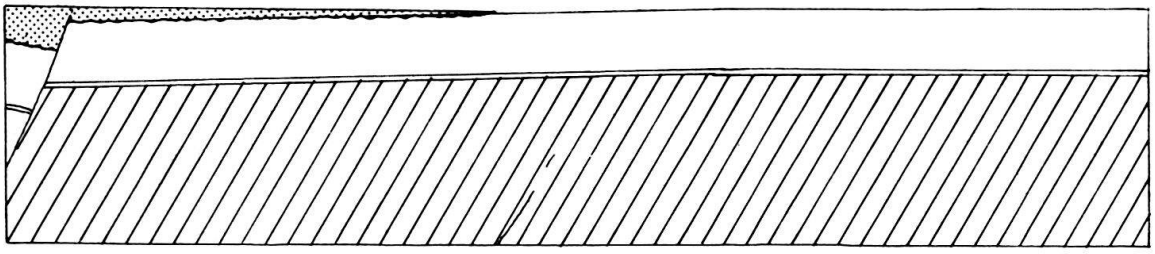


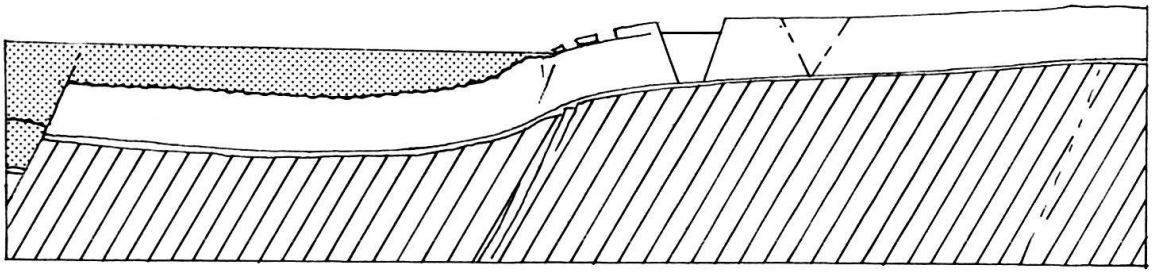
Fig. 2. Die Entwicklung der Schichtneigungen im Bereich des Tafeljuras.
a, b, c entsprechen den Figuren 1d, 1e, 1f. Isohypsen (punktiert) in 100 m, grob geschätzt, schematisch.

W E

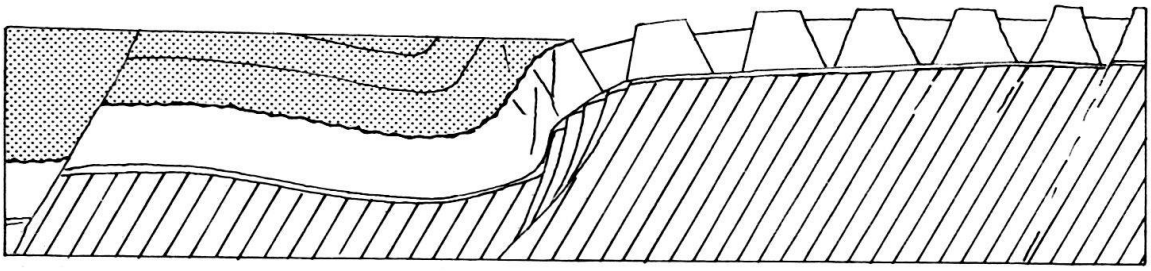
a. Unteroligocaen



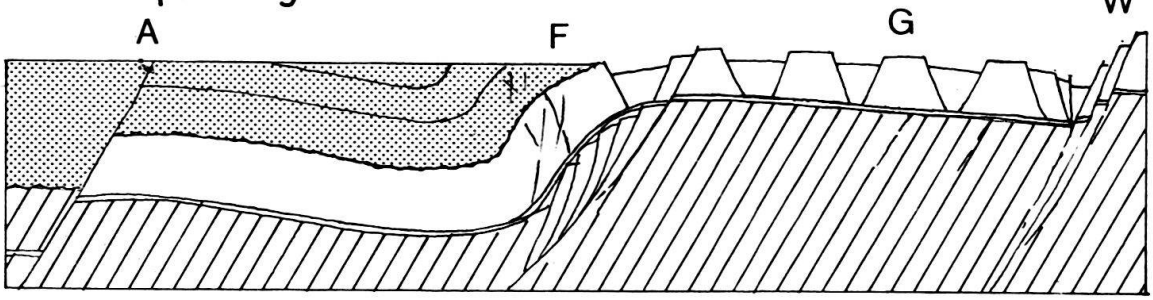
b. Mitteloligocaen



c. Oberoligocaen



d. Top Oligocaen



kein eozänes, wohl aber ein unteroligozänes Bewegungsstadium (Fig. 1b), während die Flexur bis zum Mitteloligozän nur eine schwache Westkippung aufweist (Fig. 1c) und erst im Oberoligozän richtig ausgestaltet wird (vgl. FISCHER et al. 1971). Im einzelnen ist noch anzumerken, dass die dargestellte Ausgestaltung von der anfänglichen, weit ausgedehnten, leichten Nordwestkippung gegen eine antithetische Südostkippung der abgesunkenen Scholle zu verläuft. Davon wird nach den Isopachen von DOEBL (1970) - vgl. Figuren 1b und 1c - sogar der ganze Horst von Mülhausen erfasst. Den Grund dafür möchte ich zu einem Teil in dem von der experimentellen Tektonik her bekannten Werdegang von Scherzonen suchen; bevor wohl definierte, diskrete Scherbrüche auftreten, lassen sich diffuse Wolken von Kleinbrüchen feststellen, an welchen die Absenkung, über ein grosses Volumen verteilt, beginnt (LOCKNER & BYERLEE 1977a, 1977b; PATERSON 1978, S. 124). Zu einem andern Teil mag bei zunehmender Dehnung eine Abscherung auf tiefen intrakrustalen Schwächezonen dazu beitragen, in welche die oberflächlichen Abschiebungen als nach oben konkave («listrische») Störungen einmünden. Ein schematisches Modell dieses Vorganges ist auf Figur 3 skizziert. Im unteren Oligozän (Fig. 3a) weist der Bruch von Allschwil schon eine antithetische Rotation der abgesunkenen Scholle auf (Fig. 1b), während die Flexur in einer leichten synthetischen Kippung besteht, wobei eine Bruchzone in der Tiefe Gestalt anzunehmen und nach oben zu wachsen beginnt. Im mittleren Oligozän erreicht diese Bruchzone die Evaporite des mittleren Muschelkalks; statt sie einfach zu durchsetzen, folgt sie dieser Schwächezone hangauf (Fig. 3, 5).

Die dargestellte Westneigung der Dinkelbergscholle kann man postulieren aufgrund einer Extrapolation der im Rheingraben erkennbaren Entwicklungstendenz nach Osten: Im Mitteloligozän hätte demnach die Wehratalstörung eben erst ein Stadium erreicht, das vor ihr die Flexur im Unteroligozän eingenommen hat, entsprechend dem Fortschreiten der tektonischen Aktivität von West nach Ost. Über Figuren 3c und 3d durchläuft dann verzögert, weil weiter östlich gelegen, die Wehratalstörung ähnliche Entwicklungsstadien wie die Rheintalflexur; antithetische Rotation und Flexurbildung, zusammen ein synklinaler Trog in der Tiefscholle, sind besonders am Sonnenberg bei Maisprach ausgebildet (SUTER 1915, Profile 1-4; vgl. auch LUTZ 1964, Tafel). Die Regionalität der Kippung auf Figur 3d ist übertrieben dargestellt, um ihre kinematische Bedeutung besser in Erscheinung treten zu lassen.

Solange die Westneigung des Dinkelberges bestehen bleibt, kann die die Flexur unterlagernde Bruchzone dem mittleren Muschelkalk folgen und die Ost-West-Streckung des Grundgebirges auf die weiter östlich gelegenen Keilgräben übertragen; nach der endgültigen Ausgestaltung des Wehratalbruches und der antitheti-

---

Fig. 3. Die Entwicklung des Systems Flexur-Tafeljura im Oligozän (Profilansicht), schematisch und nicht maßstabgetreu. A = Bruchzone von Allschwil, F = Flexur, G = Gräben des Tafeljuras (Dinkelberg), W = Wehratal-Bruchzone. Man beachte, dass im Gegensatz zu FISCHER et al. (1971) die Grabenbrüche nicht bis zum Schnittpunkt durchgezogen sind: Diese statisch vertretbare Konstruktion berücksichtigt nicht das Auseinanderdriften der Randbrüche bei nicht zu vernachlässigender Einsenkung des Grabens; vgl. dazu die schönen Experimente von HORSFIELD (1980, Fig. 3). Nicht berücksichtigt in unsern schematischen Darstellungen ist die dabei zu fordernde und in Natur und Experiment auch beobachtete Deformation des Grabeninhalts (vgl. auch Fig. 7). Man beachte weiter, dass im Stadium d auch grössere Sockelstörungen innerhalb der Tafeljurascholle entstehen können.

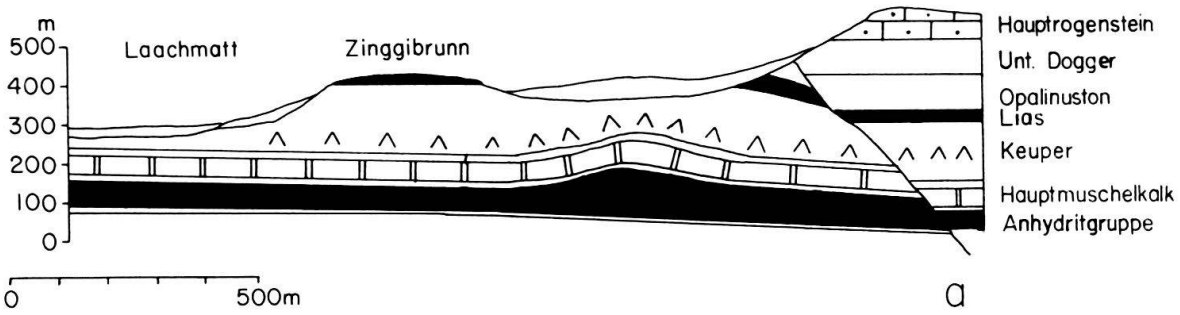


Fig. 4. Das Adlerhofgewölbe (nach HAUBER 1971).
Abscherungen in den Evaporiten des mittleren Muschelkalks und des Keupers mit Anhäufungen im Gewölbekern sind ersichtlich. Die Kompression des Muschelkalks scheint gering.

schen Rückrotation der Dinkelbergscholle verschwindet dieser ehemalige Hang und mit ihm die Keilgrabenbildung. Die beobachteten Verhältnisse legen dabei den Schluss nahe (vgl. BUBNOFF 1912), dass die Keimbildung der Keilgräben wenigstens zum Teil von kleinen, zerstreuten Grundgebirgsbrüchen ausging. Das Modell skizziert also einen oligozänen Paläohang mit einer Schweregleitung über den Evaporiten der mittleren Trias und den damit verknüpften Streckungsphänomenen. Im Gegensatz zu normalen Hanggleitungen bestehen aber die frontalen Stauchungen nicht in einer Überschiebung in den freien Raum hinaus, sondern in der Füllung (als Flexur) eines potentiellen freien Raumes: Dieser entsteht über der Bruchzone des Grundgebirges, durch deren Streckung, verknüpft mit dem Absinken der Tiefscholle (vgl. Fig. 6, 7).

Quantitativ sollte modellgemäss folgende Beziehung zwischen Flexur und Tafeljuragräben bestehen: Streckung in den Tafeljuragräben plus Streckung in der Flexur (sie enthält zahlreiche kleinere Brüche) minus Stauchung in der Flexur gleich Streckung im Grundgebirge. Diese letztere dürfte im Maximum 600 m

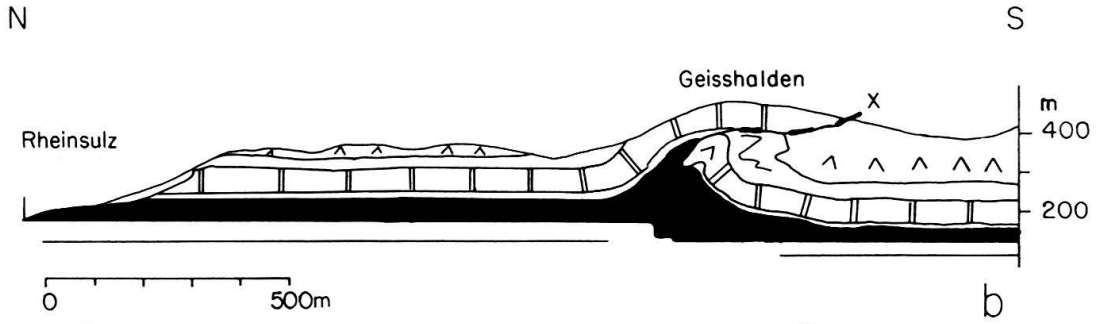


Fig. 5. Die Überschiebung von Mettau (nach WILDI 1975); vgl. auch die Überschiebung von Mandach (BUXTORF 1934).
Die durch Überschiebungen getrennten Tafeln haben ähnliche Höhenlage, leicht modifiziert durch das regionale Südgefälle. Diese Situation ruft nach einer Abscherung im mittleren Muschelkalk. Kleine Sockelstörungen (vgl. WILDI 1975, Fig. 2) sind als Auslöser denkbar, aber der Zusammenschub von 600 m an der Mettauer Überschiebung (WILDI 1975) ist auf die Sedimenthaut beschränkt. Um die Druckfestigkeit bei dem leichten Gefälle zu überwinden, waren breitere Schollen nötig als für die Überwindung der Zugfestigkeit in den Tafeljuragräben. Allzuviele Unbekannte erlauben nur unsichere Schätzungen.

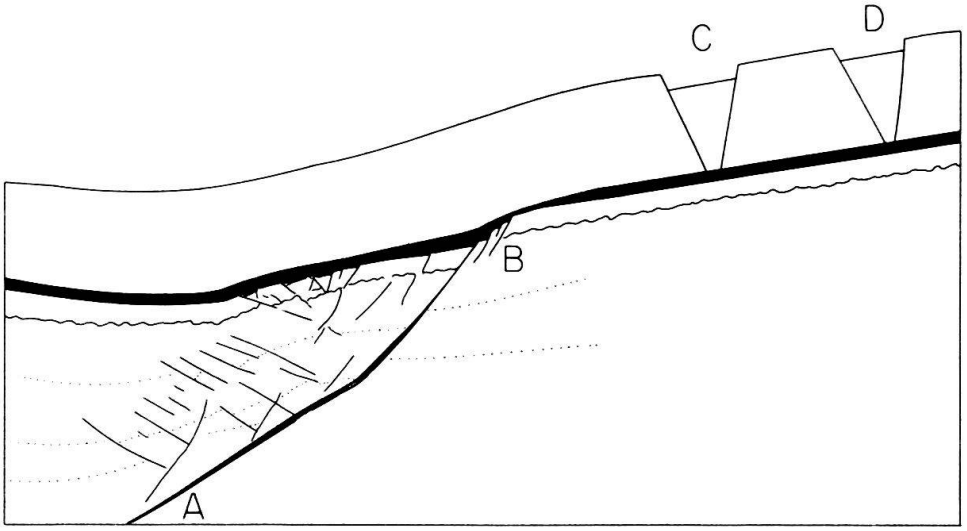


Fig. 6. Rheintalflexur und Gräben des Tafeljuras. Schwarz: Evaporitlage des mittleren Muschelkalks. Grundgebirgstektonik nach dem bekannten Tonexperiment von CLOOS (1936), um einen Eindruck vom möglichen Ausmass der Disharmonie in den verschiedenen Stockwerken zu vermitteln; aus dem gleichen Grunde sind die Störungen in der Sedimenthaut absichtlich schematisch und einfach gehalten. A–B zeigt den Verlauf der Hauptstörung im Sockel, B–C, B–D sind Äste, die via Abscherung im mittleren Muschelkalk zu den Gräben des Tafeljuras führen.

Man beachte, dass im Bereich A–B eine Streckung des Grundgebirges vorliegt, die in den Sedimenten nicht unmittelbar darüber, sondern erst in den Gräben C–D vollzogen wird. Man kann diesen Sachverhalt auf zweierlei Art deuten: einmal als extensives Gegenstück zum kompressiven Fernschub wie im Jura, wo die Sedimentkompression gegenüber der Grundgebirgskompression an einem Abscherhorizont versetzt ist, oder aber als Schweregleitung der Sedimentplatte in ein Loch, das im Gegensatz zu den gewöhnlichen Hanggleitungen nicht exogen eingeschnitten wird, sondern durch endogene Zerrung und Absenkung des Grundgebirges entsteht und fortlaufend durch Nachrutschen der Sedimentplatte aufgefüllt wird (Flexur).

betragen (1000 m Versetzung bei 60° Bruchneigung). Nun würde eine ungebrochene Flexur von 60° Neigung eine Stauchung von ebenfalls 600 m ergeben. Die Keilgräben sollten in diesem (nicht verwirklichten) Extremfall eine Gesamtstreckung von 1200 m bewirken; das ist bedeutend mehr, als nach groben Schätzungen in natura verwirklicht scheint. Dabei ist zu bedenken, dass für eine verbesserte Bilanz sowohl die Streckungen in der Flexur als auch jene in den Keilgräben besser messbar sein sollten; das aber wird bei den schlechten Aufschlussverhältnissen noch lange nicht möglich sein.

Figur 3 gibt eine Extrapolation der Rheingrabenentwicklung nur in Ost-West-Richtung. Das Adlerhofgewölbe und die Mettau-Mandach-Störungen verlangen aber entsprechende Betrachtungen im Nord-Süd-Profil. Figur 3 kann auch so gelesen werden (Nord rechts), mit dem Unterschied, dass rechts statt der Wehratalstörung die Kandern-Raitbach- bzw. die Vorwald-Störungen stehen und links die Flexur entfällt. Entsprechend 3b würde man einen gegen Süden gerichteten Paläohang mit beginnender Abriss-(Streckungs-)Bewegungen annehmen, während links statt der Flexur eine gegen den freien Raum gerichtete Überschiebung (bzw. Unterschiebung: Mandacher Störung) sich entwickeln würde, entsprechend einer normalen Hangrutschung.

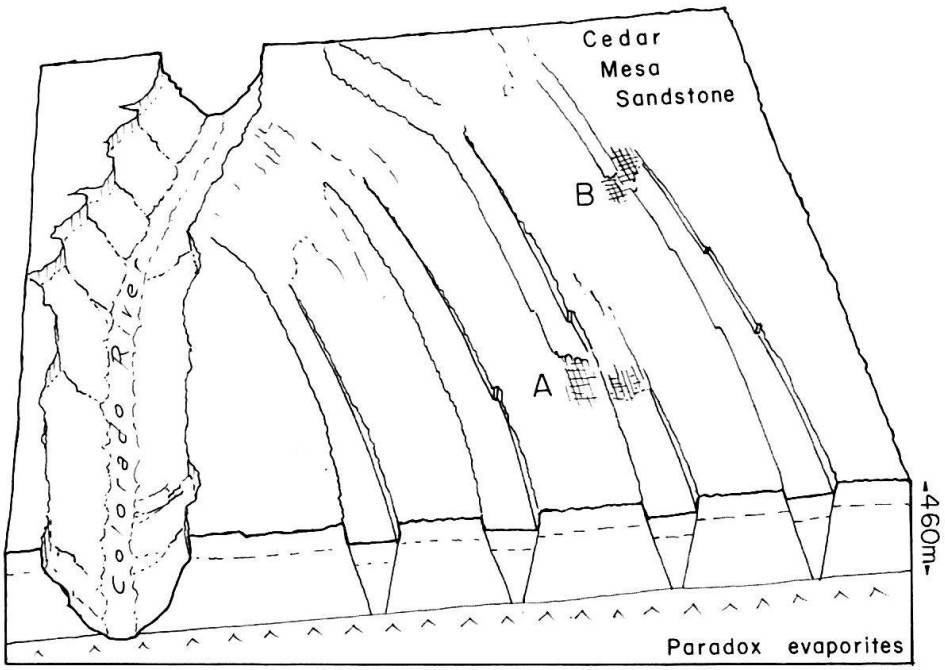


Fig. 7. Das Abscher-Grabensystem von Canyonland (Utah), vereinfacht nach McGill & Stromquist (1979, Fig. 6). Das System hat grosse Ähnlichkeit mit der Tafeljurascholle, doch ist der freie Raum durch das Einschneiden des Colorado River geschaffen (exogen) statt durch eine Streckung unter den Evaporiten (endogen) wie im hier vorgeschlagenen Modell (vgl. Fig. 5). Die die oberste Steilstufe bildende Platte des Cedar-Mesa-Sandsteins ist durch ein fast orthogonales Kluftnetz engständig durchschnitten (nur an den Punkten A und B angegeben, wo Gräben bajonettartig versetzt werden). Man beachte, wie die Strukturen gegen den oberen Rand hin diffus werden (diffuse dextrale Scherzone): Ähnlich diffus sind die Randgebiete der hier postulierten Tafeljuragleitungen (s. Fig. 1d, e).

Nehmen wir weiter an, dass die Entwicklung im Rheingraben nicht nur von Westen gegen Osten, sondern auch von Norden gegen Süden fortgeschritten ist, so ergibt sich eine Vorzeitigkeit des Südhangs (Kippung über Kandern-Vorwald-Störung vor Kippung über Wehratal-Zeiningen-Störung) gegenüber dem Westhang und damit eine Vorzeitigkeit der frontalen Stauchstrukturen im Süden (Adlerhof-Mettau-Mandach, Fig. 1d, 2a) gegenüber den Keilgräben des Tafeljuras (Fig. 1e, 2b). Übrigens: Die Südgleitung in Figur 1d verlangt nach einer Dextralverschiebungszone im Bereich der Flexur, plausiblerweise (vor allem in den Anfangsstadien) ein dextrales System von Fiederspalten. Solche sind wenigstens stellenweise von Wittmann (1957, 1978; vgl. auch Fischer et al. 1971, S. 32) beobachtet worden. Ihre Entstehung ist sicher in verschiedener Weise deutbar; im Rahmen unseres Modells erlangen sie eine besonders einfache Deutung.

Noch eine Bemerkung zur Nukleation von Adlerhofgewölbe und Mettauer Störung. Nach Laubscher (1971, s. auch Fig. 1) liegen diese in der östlichen Fortsetzung der Flexurzone von Montbéliard-Aesch, welche eine Grundgebirgsstruktur ist. Ich möchte die Beziehungen zwischen den beiden ganz verschiedenen Strukturgruppen wie folgt sehen. Die Grundgebirgsstrukturen lieferten erstens Spannungskonzentratoren für die Keimbildung der Abgleitstrukturen und zweitens tektonische Zerrüttung und erosive Schwächung für eine Herabsetzung der Druckfestigkeit an der Front der Gleitplatte.

4. Dynamik

Wir haben auf den Figuren 1 und 3 ein kinematisches Modell entwickelt, welches den heute bekannten Beobachtungen Rechnung trägt und ausserdem versucht, die Folge der Bewegungen dort, wo sie nicht direkt datiert werden können, durch Extrapolation von datierten Gebieten zu bestimmen. Dieses Vorgehen ist sicher nicht zwingend, aber doch plausibel. Es sollen nun noch ein paar Überlegungen über die dynamische Lebensfähigkeit des Modells angestellt werden.

Die Dynamik der Hangrutschungen besteht im wesentlichen darin, dass die in die Rutschbasis fallenden Komponenten des Gewichtes der hangenden Massen die eine Bewegung hemmenden Reibungs- und Kohäsionskräfte überwinden können. Die in das Modell (Fig. 1 und 3) eingehenden Schätzungen und Extrapolationen rechtfertigen keine detaillierten Berechnungen, nur grobe Abschätzungen. Nehmen wir als extreme Möglichkeit an, es habe bei der gleichmässigen Westneigung in Figur 2c schon ein Gefälle von 500 m (etwas weniger als die heutige Sprunghöhe der Wehratalstörung) auf eine Distanz von 20 km bestanden (s. Fig. 2), so ergibt sich bei einer Rutschplattendicke von 700 m (damals bis in den Malm) eine Scherspannung von nur etwa 4,5 bar im Gleithorizont. Das ist sehr wenig und verlangt - soll die Rutschung wirklich in Bewegung geraten - eine extrem wirksame Schmierschicht.

Salz und in noch höherem Masse ein Salz-Ton-Wasser-Gemisch (vgl. GOGUEL 1948, S. 202) sind bekannt für extreme Beweglichkeit, doch sind mir quantitative Kriechgesetze nicht bekannt. Der mittlere Muschelkalk auf dem Dinkelbergplateau ist sehr reduziert und offenbar weitgehend ausgelaugt, aber man darf annehmen, dass er zur fraglichen Zeit im Oligozän noch voll vorhanden war.

Auch Anhydrit-Wasser-Ton-Systeme verhalten sich nach den Erfahrungen im Belchentunnel extrem inkompetent (WOHNLICH 1967; LAUBSCHER 1975). Dem entspricht die Beobachtung, dass im Kern der Adlerhoffalte die Sulfatzonen (mittlerer Muschelkalk und Keuper) disharmonisch angehäuft sind (Fig. 5).

Extrem niedrige Reibungswerte in Sulfaten werden auch von MCGILL & STROMQUIST (1979) für Gleitungen über den Paradox-Evaporiten in Utah postuliert (vgl. Fig. 7 und Erläuterungen dazu): Die regelmässigen Abstände der Keilgräben in der darüber abgeglittenen kompetenten Platte werden den Zugkräften zugeschrieben, welche durch das Gewicht der Platte über praktisch reibungsfreier Unterlage parallel zur Schichtung erzeugt werden. Die Grundidee ist dabei, dass die Breite der Horstplatten gerade jener Gewichtkomponente entspricht, welche die Zugfestigkeit der Platte erreicht hat. Diese Zugfestigkeit ist dabei dadurch reduziert, dass die obersten 100 m durch recht engständige Klüfte zerteilt und kohäsionslos sind. Die spezifische Zugfestigkeit der darunterliegenden Sequenz kam auch so noch über Erwarten tief heraus.

Die Dynamik der Südrutschungen führt zu ähnlichen Werten; die heutige Neigung des Schwarzwald-Südhanges ist posthelvetisch modifiziert (Juranagelfluh, vgl. auch LEMCKE 1973 und LAUBSCHER 1974). Für die Überschiebungen von Mettau und Mandach musste die Druckfestigkeit überwunden werden, was trotz Mithilfe der Zone von Montbéliard-Aesch (S. 112) bei dem jedenfalls geringen Gefälle nach einer breiten Gleitplatte verlangt. Auf der Höhe von Laufenburg ist

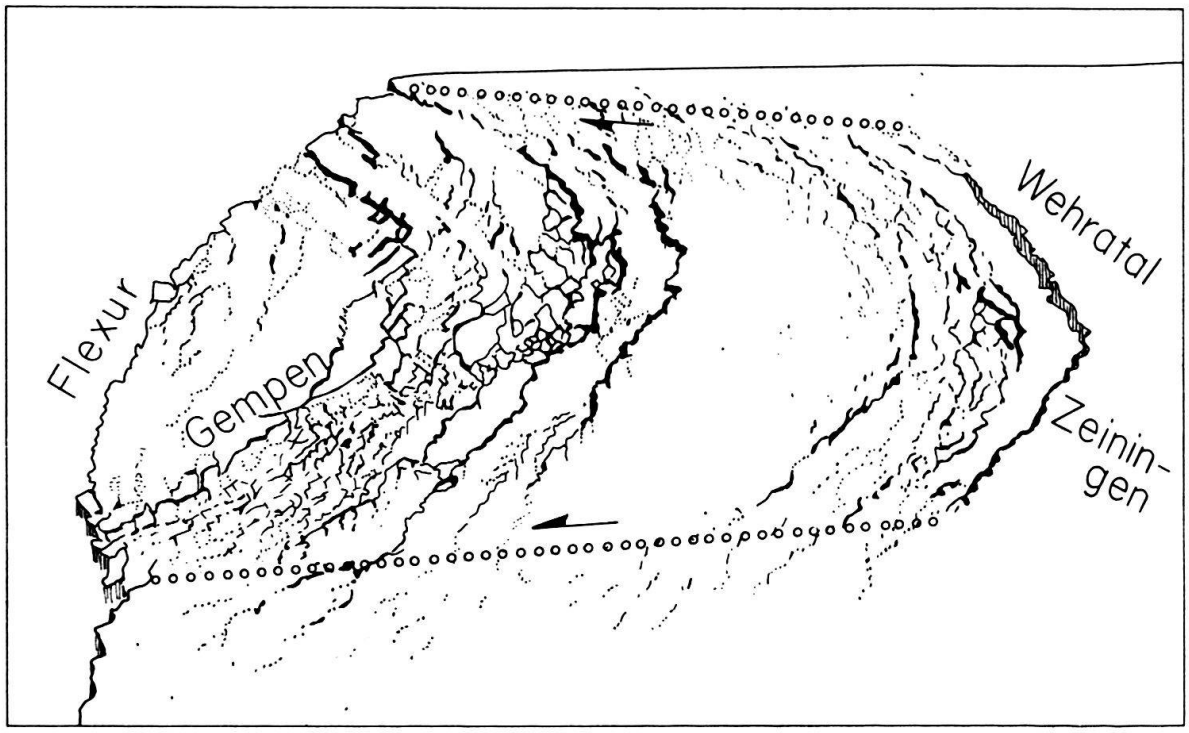


Fig. 8. Die Elemente einer experimentellen Hanggleitung im Sand (nach McGill & Stromquist 1979). Dieses sehr einfach nachzuvollziehende Experiment regt zu folgendem Vergleich an (Vergleichsstrukturen des Flexur-Tafeljurakomplexes sind angeschrieben): Die dextralen und sinistralen Begrenzungen der Rutschung sind diffuse Zonen, in denen eine dem Bewegungssinn entsprechende En-échelon-Anordnung von Bruchsegmenten unverkennbar, wenn auch im einzelnen vage ist. Damit hängt zusammen eine gegen links konkave Krümmung der Bruchzonen (Hauptspannungen nicht orthogonal zu Scherzonen). Wenn auch nicht ideal verwirklicht, so sind doch einzelne gegen Westen konkave Bruchstrukturen im Tafeljura auffällig: Im kleinen jene von Gempen-Schauenburg; im grossen die von Wehratal-Zeiningen, wobei in diesem letzteren Falle eine dickere, jedenfalls auch das Grundgebirge mit einbeziehende Scholle sich bewegt hat (Fig. 3d). Wie im Experiment ist dabei die Krümmung i. allg. nicht kontinuierlich, sondern unregelmässig segmentweise verwirklicht; z. T. ist das Einfallen gegensinnig (Gempen). Man beachte ferner, dass bei Schweregleitungen die Fieder-Anordnung in den seitlichen Grenzzonen nicht durch aktive Verschiebung starrer Sockelplatten unter inkompetenter Sedimenthaut entsteht wie im Riedelexperiment, sondern durch differentielles Gleiten der Sedimenthaut, analog den Randspalten eines Gletschers.

der Abstand zwischen dem Vorwaldbruch und der Mettauer Überschiebung rund 10 km. Bei einer wohl maximalen Plattendicke von 700 m ergibt sich daraus eine Gewichtskomponente (längs einer Profilscheibe von 1 cm Dicke) von $2{,}5 \times 7 \times 10^4 \times 10^6 \times 10^3 \times 1/20$ dyn $\sim 10^{13}$ dyn. Wenn diese Kraft gleichmässig auf die ganze Plattendicke von 7×10^4 cm verteilt wird, so erreicht der Druck gute 10^8 dyn/cm^2 oder 100 bar, was zu niedrig ist für kompetente Gesteine. Nun können aber die Evaporite wiederum vernachlässigt werden, und auch die Tone dürften relativ geringen Widerstand geleistet haben; es sind die Kalke, vor allem des Hauptrogensteins und des mittleren Muschelkalks, die zu berücksichtigen sind, insgesamt vielleicht 150 m. Konzentriert man die ganze Kraft auf sie, so erreichen die Drücke immerhin etwa 500 bar, und das könnte gereicht haben. Dabei ist zu bedenken, dass eine viel breitere Platte z. B. von der Kulmination des Schwarzwaldes abgerutscht sein könnte, die Evidenz ist wegerodiert.

Bei all diesen unsicheren Schätzungen ergibt sich jedenfalls der Eindruck, dass das sich aufdrängende kinematische Modell dynamisch möglich ist, wenn der Fliesswiderstand der Evaporite bzw. Evaporit-Wasser-Ton-Systeme vernachlässigt werden kann.

Zur Dynamik der Mettauer und der Mandacher Überschiebung ist noch zu bemerken, dass beide nach Profilkonstruktionen (BRÄNDLIN 1911; BUXTORF & NIGGLI 1934) wohl Abscherstrukturen über dem mittleren Muschelkalk sind. Wegen der Nordvergenz hat man die Mandacher Störung dem Faltenjura zugerechnet, im Gegensatz zur Mettauer Störung mit ihrer Südvergenz und weiteren Entfernung zum Jura (WILDI 1975). Es ist aber zu betonen, dass Vergenzen kein Kriterium für die Relativbewegung von Abschermassen sind. Frontale Unterschiebungen sind häufig (z. B. HABICHT 1945, Fig. 1, 2; PRICE 1981, Fig. 6). Die Mandacher und die Mettauer Störung hängen geographisch zusammen, beide sind getrennt vom Faltenjura, und beide sind undatiert. Es ist plausibler, beide zusammen mit dem Adlerhofgewölbe Südrutschungen vom Bereich der Kandern-Raitbach-Vorwald-Bruchzone zuzuordnen.

5. Schlussbemerkungen

Das vorgeschlagene Modell stellt Beziehungen her zwischen allen beobachteten grösseren tektonischen Elementen. Es ist grob, doch verfeiner- und ausbaubar. Für den Moment allerdings möchten wir es in seiner groben Form belassen. Die direkte historische Information - stratigraphische Evidenz - ist ungenügend. Die Aufschlussverhältnisse lassen eine geometrisch-kinematische Quantifizierung nur in Umrissen zu. Jedenfalls aber fordert das Modell extrem inkompetentes Verhalten der Evaporite, wie es auch an andern Orten postuliert worden ist.

Ich habe mich auf die untertertiären Ereignisse beschränkt. Selbstverständlich spielen aber auch prätertiäre Elemente eine Rolle, vor allem variszische Anisotropien und Brüche (vgl. STELLRECHT 1958, LUTZ 1964) sowie die Ausgestaltung der Evaporite des mittleren Muschelkalks (vgl. HAUBER 1980).

Ich danke L. Hauber für vielerlei Hinweise.

LITERATURVERZEICHNIS

BRÄNDLIN, E. (1911): *Zur Geologie des nördlichen Aargauer Tafeljura zwischen Aare und Fricktal.* - Verh. natf. Ges. Basel *22/1*, 1-94.

BUBNOFF, S. VON (1912): *Die Tektonik der Dinkelberge bei Basel.* - Mitt. bad. geol. Landesanst. *6/2*, 523-634.

BUXTORF, A. (1901): *Geologie der Umgebung von Gelterkinden im Basler Tafeljura.* - Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] *11.*

BUXTORF, A., & NIGGLI, P. (1934): *Exkursion Nr. 34B. Laufenburg-Etzgen (Schwarzwaldkristallin) und Aargauer Tafeljura.* - Geol. Führer Schweiz *8*, Centralschweiz Exkursionen 33-44, 534-539.

CLOOS, H. (1910): *Tafel- und Kettenland im Basler Jura und ihre tektonischen Beziehungen nebst Beiträgen zur Kenntnis des Tertiärs* (S. 97-232). - Stuttgart.

— (1936): *Einführung in die Geologie. Ein Lehrbuch der inneren Dynamik.* - Gebr. Bornträger, Berlin.

DOEBL, F. (1970): *Die tertiären und quartären Sedimente des südlichen Rheingrabens.* In: International Upper Mantle Project, Scientific Rep. *27*, 55-66. - Stuttgart.

FISCHER, H., HAUBER, L., & WITTMANN, O. (1971): *Geologischer Atlas der Schweiz 1:25000, 1047 Basel (Atlasblatt 59);* Erläuterungen (S. 1-55). - Schweiz. geol. Komm.

GOGUEL, J. (1948): *Introduction à l'étude mécanique des déformations de l'écorce terrestre.* - Mém. serv. expl. carte géol. dét. France, 2e éd. Impr. Natl., Paris.

HABICHT, K. (1945): *Geologische Untersuchungen im südlichen sanktgallisch-appenzellischen Molassegebiet.* - Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] *83.*

HAUBER, L. (1971): *Zur Geologie des Salzfeldes Schweizerhalle-Zinggibrunn (Kt. Baselland).* - Eclogae geol. Helv. *64/*1, 163-183.

— (1980): *Geology of the Salt Field Rheinfelden-Riburg, Switzerland.* - 5th Symp. Salt Proc. *1,* 83-90, North. Ohio geol. Soc. Cleveland.

HERZOG, P. (1956): *Die Tektonik des Tafeljura und der Rheintalflexur südöstlich von Basel.* - Eclogae geol. Helv. *49/*2, 317-362.

HORSFIELD, W.T. (1980): *Contemporaneous movements along crossing conjugate normal faults.* - J. struct. Geol. *2/*3, 305-310.

KOCH, R. (1923): *Geologische Beschreibung des Beckens von Laufen im Berner Jura.* - Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] *48.*

LAUBSCHER, H.P. (1956): *Deformations along faults in E Venezuela.* - Geophysics *21/*2, 368-387.

— (1971): *Das Problem von Rheintalflexur und Tafeljura.* - Eclogae geol. Helv. *64/*1, 157-162.

— (1973a): *Jura Mountains.* In: DE JONG, K.A., & SCHOLTEN, R. (Ed.): *Gravity and Tectonics* (S.217-227). - John Wiley & Sons, New York.

— (1973b): *Faltenjura und Rheingraben: zwei Großstrukturen stossen zusammen.* - Jber. Mitt. oberrh. geol. Ver. [N.F.] *55,* 145-158.

— (1974): *Basement uplift and decollement in the Molasse basin.* - Eclogae geol. Helv. *67/*3, 531-537.

— (1975): *Viscous components in Jura folding.* - Tectonophysics *27,* 239-254.

LEMCKE, K. (1973): *Zur nachpermischen Geschichte des nördlichen Alpenvorlandes.* - Geologica bavar. *69,* 5-48.

LOCKNER, D., & BYERLEE, J.D. (1977a): *Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress.* - J. geophys. Res. *82,* 2018-2026.

— (1977b): *Acoustic emission and creep in rock at high confining pressure and differential stress.* - Bull. seismol. Soc. Amer. *67,* 247-258.

LUTZ, M. (1964): *Stratigraphie und tektonische Untersuchungen am südwestlichen Schwarzwaldrand zwischen Wiesental und Hochrhein.* - Oberrh. geol. Abh. *13/*1-2, 75-122.

MCGILL, G.E., & STROMQUIST, A.W. (1979): *The Grabens of Canyonlands National Park, Utah: Geometry, Mechanics, and Kinematics.* - J. geophys. Res. *84/*B9, 4547-4563.

PATERSON, M.S. (1978): *Experimental Rock Deformation, The Brittle Field.* - Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

PRICE, R.A. (1981): *The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky Mountains.* In: MCCLAY, K.R., & PRICE, N.J. (Ed.): *Thrust and Nappe Tectonics* (S.427-448). - Geol. Soc. London.

SCHNEIDER, A. (1960): *Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt Porrentruy (Berner Jura).* - Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] *109.*

STELLRECHT, R. (1963): *Zur Stratigraphie und Tektonik der Weitenauer Vorberge am Südostende des Oberrheingrabens.* - Oberrh. geol. Abh. *12,* 119-127.

SUTER, R. (1915): *Geologie der Umgebung von Maisprach.* - Verh. natf. Ges. Basel *26,* 9-64.

TREFZGER, E. (1925): *Die Tektonik des westl. Dinkelbergs und des nördl. Tafeljuras bei Basel.* - Ber. natf. Ges. Freiburg i.Br. *24,* 1-63.

WILDI, W. (1975): *Die Mettauer Überschiebung im Aargauischen Tafeljura (Nordschweiz).* - Eclogae geol. Helv. *68/*3, 483-489.

WITTMANN, O. (1949): *Das südöstliche Ende des Oberrheingrabens.* - Geol. Rdsch. *37,* 1-42.

— (1957): *Geologie der Lörracher Flexurschollen.* - Jh. geol. Landesamt Bad.-Württemb. *2,* 219-289.

— (1970): *Tektonik des südlichen Oberrheingrabens und seines Rahmens.* - Z. dtsch. geol. Ges. *121* (1969), 61-65.

— (1978): *Neue Beobachtungen in den Lörracher Flexurschollen.* - Jh. geol. Landesamt Bad.-Württemb. *20,* 101-124.