

Beiträge
zur Geologischen Karte der Schweiz
herausgegeben von der
Schweizerischen Geologischen Kommission
(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

Matériaux
pour la Carte Géologique de la Suisse
publiés par la
Commission Géologique Suisse
(Organe de la Société Helvétique des Sciences Naturelles)

Neue Folge, 147. Lieferung

Werner Heckendorn

Basel

Zur Tektonik der Vellerat-Antiklinale

(Berner Jura)

Mit 14 Textfiguren und 4 Tafelbeilagen

1974

In Kommission bei Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern

Druck Stämpfli+Cie AG, Bern

pour la Carte Géologique de la Suisse
Commission de la Carte Géologique de la Suisse
Bâle, 1904

zur Geologischen Karte der Schweiz
Kommision der Geologischen Karte der Schweiz
Bern, 1904

Neue Folge, 147. Lieferung

Werner Heekendorn

1904

Zur Tektonik der Vollerz-Antiklinale

(Zweiter Teil)

Verlag von Birkhäuser, Basel

1904

Mit Subvention der Stiftung Dr. Joachim de Giacomi der S.N.G. gedruckt

Vorwort der Geologischen Kommission

Anfangs Oktober 1973 reichte Herr Dr. W. Heckendorn der Geologischen Kommission das Manuskript seiner Dissertation «Zur Tektonik der Vellerat-Antiklinale» ein mit dem Ersuchen, seine Arbeit in der Serie der «Beiträge» publizieren zu dürfen.

Herr Heckendorn, der im Juni 1973 seine Studien abgeschlossen hat, führte seine Dissertation unter Leitung von Prof. H. P. Laubscher am Basler Geologischen Institut aus.

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Analyse der tektonischen Verhältnisse einer Jura-Antiklinale. Bekanntlich beschäftigt sich das Basler Institut seit Jahren mit den Problemen der Jurafaltung. Die Modellvorstellungen H. P. Laubschers – hier vom Autor konkret für ein eng begrenztes Gebiet angewendet –, verbunden mit detaillierten Feldaufnahmen, bilden die Grundlagen für die Beurteilung von Geometrie und Entwicklungsgeschichte einer Falte. Basierend auf diesen Informationen, hat Herr Heckendorn eine Serie von geologischen Profilen durch die Vellerat-Antiklinale konstruiert, die den ganzen Bereich einer Abscherfalte bis auf den Sockel umfassen. Dabei ist insbesondere die Abhängigkeit der Tiefenstruktur einer Falte von der Beschaffenheit der Sockeloberfläche von besonderer Bedeutung. Anhand zahlreicher Messungen von Flächenelementen und Bewegungsspuren wird angestrebt, zusätzliche Kriterien zur Abklärung des Faltungsmechanismus beizubringen.

In ihrer Sitzung vom 24. November 1973 hat die Geologische Kommission beschlossen, diese Dissertation ins Druckprogramm aufzunehmen. Herr Heckendorn wird an die Druckkosten einen finanziellen Beitrag leisten, wofür ihm die Kommission den besten Dank ausspricht. Seine bei der Geologischen Kommission deponierten Kartierungsunterlagen werden dereinst für die Erstellung von Blatt Moutier verwendet werden können.

Für den Inhalt des Textes und der Illustrationen ist der Autor allein verantwortlich.

Basel, im Frühjahr 1974

Für die Schweizerische Geologische Kommission

Der Präsident:

Prof. Dr. W. Nabholz

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand unter der Leitung meines Lehrers Prof. H. P. Laubscher.

Zum Programm des Basler Geologischen Instituts gehört die Abklärung der Jurafaltung. Um genauere Daten über die Geometrie einer typischen Jurafalte zu erbringen, kartierte ich das Gebiet der Vellerat-Antiklinale im Berner Jura neu. Als geologische Grundlage dienten Teile der unveröffentlichten Aufnahmen von R. ELBER, M. BIRKHÄUSER sowie des Atlasblattes Delémont, aufgenommen von W. T. KELLER & H. LINIGER. Die topographische Grundlage bestand aus Vergrösserungen 1:10 000 von Teilen der LK 1:25 000, Blätter 1086 (Delémont) und 1106 (Moutier).

Meine Untersuchungen begannen im Herbst 1969, die Feldarbeit wurde hauptsächlich in den Sommermonaten 1970 bis 1972 durchgeführt. Gleichzeitig mit der Kartierung nahm ich Messungen an kleintektonischen Strukturen vor. Diese sollten zusätzlich zur Faltengeometrie auch Hinweise für Kinematik und Dynamik liefern.

Bei der Ausführung meiner Arbeiten wurde mir von vielen Seiten Unterstützung zuteil, wofür ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte. Dieser gilt in erster Linie Herrn Prof. H. P. Laubscher, dessen Rat und Anregung mir stets eine grosse Hilfe waren. Die Geologische Kommission SNG überliess mir für längere Zeit die Originalkartierung der Herren ELBER und BIRKHÄUSER.

Als sich gegen das Ende der Untersuchungen zeigte, dass Information über das flachliegende Mesozoikum der Synklinalen sehr willkommen wäre, anerbote sich Dr. A. Schneider (Bern), zu sehr günstigen Bedingungen refraktionsseismische Untersuchungen durchzuführen. Diese fanden im Januar 1973 statt. Ohne das freundliche Entgegenkommen von Dr. Schneider wäre dies nicht möglich gewesen. Ihm sei hiermit bestens gedankt. Ebenfalls danken möchte ich Prof. Laubscher und der Vereinigung Basler Geologiestudenten für die finanzielle Unterstützung, die sie dem Unternehmen gewährten.

Schliesslich möchte ich jenen meiner Studienkollegen danken, die mir mit wertvollen Anregungen und Hilfeleistungen beigestanden sind, insbesondere den Herren A. Bürgin, G. Strub, P. Bitterli, U. Pfirter, I. Moshfegh, P. Baumgartner und M. Wannier.

Inhaltsverzeichnis

	Seite		Seite
Vorwort der Geologischen Kommission	3	3. Geometrie der Vellerat-Antiklinale	17
Vorwort des Verfassers	4	a) Vorbemerkungen	17
Verzeichnis der Textfiguren und Tafeln	6	b) Abschnitt Frénois – Soulce	17
Einleitung	7	c) Abschnitt Soulce – Les Fouchies	20
Geologische Übersicht	7	d) Abschnitt Les Fouchies – Punkt 1106	23
		e) Abschnitt Punkt 1106 – Entre Douvelie	25
I. Stratigraphie	9	f) Abschnitt Entre Douvelie – Sur Montchemin	27
1. Vorbemerkungen	9	g) Abschnitt Sur Montchemin – Sur Rosé	30
2. Dogger	9	4. Diskussion der Ergebnisse	32
3. Malm	10		
4. Tertiär	12	III. Kleintektonik	36
II. Tektonik	13	1. Einleitung	36
1. Vorbemerkungen	13	2. Messmethode	36
2. Bemerkungen zu den Profilkonstruktionen	13	3. Auswertungsmethoden (funktionelle Gruppen)	37
a) Prinzip der kurvimetrisch-volumetrischen		IV. Refraktionsseismik	42
Konkordanz	13	1. Vorbemerkungen	42
b) Sockelgeometrie	14	2. Auswertung und Ergebnisse	43
c) Disharmonien	16	a) Mulde von Soulce	43
		b) Becken von Delsberg	46
		Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	46
		Literaturverzeichnis	48
		Verzeichnis der verwendeten Karten	49

Verzeichnis der Textfiguren und Tafeln

Textfiguren

		Seite
Fig. 1	Geologische Übersicht	8
Fig. 2	Rekonstruktion der Sockelgeometrie mit Isohypsen des Abscherhorizontes	15
Fig. 3	Geologische Profile Abschnitt Frénois – Soulce	18/19
Fig. 4	Geologische Profile Abschnitt Soulce – Les Fouchies	21
Fig. 5	Geologische Profile Abschnitt Les Fouchies – Punkt 1106	24
Fig. 6	Geologische Profile Abschnitt Punkt 1106 – Entre Douvelie	26
Fig. 7	Geologische Profile Abschnitt Entre Douvelie – Sur Montchemin	28
Fig. 8	Detailprofile L'Ordon Noé	29
Fig. 9	Geologische Profile Abschnitt Sur Montchemin – Sur Rosé	31
Fig.10	Diagramm der Verkürzungsbeträge	34
Fig.11	Kleintektonische Aufnahmen	39
Fig.12	Lage der seismischen Profile	42
Fig.13	Seismisches Laufzeitendiagramm Profil «Les Noies»	44
Fig.14	Geologisches Profil aufgrund der seismischen Daten «Les Noies»	45

Tafeln

Tafel I	Geologische Kartenskizze des Untersuchungsgebietes
Tafel II	Blockdiagramme der Vellerat-Antiklinale
Tafel III	Strukturkarte der Grenzfläche St-Ursanne-Formation/Natica-Schichten
Tafel IV	Kleintektonik, Messergebnisse und Richtungen der grössten Hauptspannung

Einleitung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einem kleinen Ausschnitt des Berner Juras. Diese Gegend ist durch frühere Arbeiten schon gut bekannt. So haben die geologischen Aufnahmen von ELBER (1920), BIRKHÄUSER (1924), LINIGER (1925), KELLER (1922) und GLAUSER (1936) Grundlagen geschaffen. In der Zwischenzeit hat LAUBSCHER (1961, 1965, 1970) versucht, die allgemeinen kinematischen und dynamischen Gesetzmässigkeiten des Juras schärfer zu fassen und in Form von Annäherungsmodellen darzustellen. Dabei ergeben sich zahlreiche neue Probleme, die nur durch sorgfältige Feldaufnahmen bearbeitet werden können. Eines dieser Probleme ist die Entwicklungsgeschichte einer Falte, von der ersten noch keimhaften Instabilität bis zum heute beobachtbaren Zustand.

Meine Arbeit hat zum Ziel, am Beispiel einer einzelnen Antiklinale möglichst detaillierte Information über Geometrie und Kinematik zu erbringen. Für die Festlegung der Geometrie wurden dabei ca. 40 km² der Vellerat-Antiklinale im Massstab 1:10000 geologisch neu aufgenommen. Ausserdem konnten einige refraktionsseismische Messungen ausgeführt werden.

Ins Programm des Basler Geologischen Institutes gehört ferner eine Abklärung der kleintektonischen Prozesse, die bei den einzelnen Stadien der Faltung im Spiele gewesen sind. Als Beitrag zu diesem Programm habe ich an verschiedenen Stellen Klüfte und Bewegungsspuren vermessen.

Ein wesentlicher Teil der Arbeit befasst sich endlich mit dem Problem der Tiefenstruktur der Antiklinale. Dazu musste zunächst der Verlauf der Abscherbasis aufgrund regionaler Daten abgeschätzt werden, und dann der Schichtverlauf zwischen Oberflächenbeobachtungen und dieser Abscherbasis aufgrund allgemeiner Kriterien interpoliert werden. Dabei stellt sich das bereits bekannte Problem, dass die Oberflächenprospektion nicht ausreicht, um die Tiefengeometrie des Gebirgskörpers eindeutig zu bestimmen. Überraschungen bei Tunnelbauten und Bohrungen haben das bis in die jüngste Zeit immer wieder bewiesen. In diesem Zusammenhang sei nur an die Bohrungen im Mont Risoux mit den zusätzlichen reflexionsseismischen Daten erinnert (z. B. BITTERLI 1972).

Geologische Übersicht

Das Untersuchungsgebiet (Fig. 1) gehört zum rheintalischen Jura, zu jenem Teil des Juras also, wo die spät- bis postpontische Faltung in besonderem Masse von den eozänen und oligozänen Strukturen des Rheingrabens beeinflusst worden ist. Die Interferenz dieser Strukturen ist in vielen Arbeiten beschrieben, so z. B. bei LINIGER (1925) und LAUBSCHER (1948, 1966, 1967). Der Vellerat-Antiklinale ist das Becken von Delsberg vorgelagert. LINIGER beschrieb die Unterteilung dieses Beckens durch die «Querfalten» von Develier, Rondez (E von Delsberg) und Vicques. Nach LINIGER sind dies, aufgrund stratigraphischer Indizien, im Oligozän angelegte Strukturen. Schon eine grobe Übersicht zeigt die Beeinflussung der Vellerat-Antiklinale durch die genannten rheintalischen Linien. So sind die mit axialen Depressionen verbundenen Verbiegungen in W bei Soulce und im E bei Rebeuvelier jenen «Querfalten» zuzuschreiben.

Auch die im S anschliessende Raimeux-Antiklinale ist an verschiedenen Stellen axial verbogen, aber wie weit diese Verbiegungen durch die genannten oligozänen Elemente beeinflusst sind, ist ein schwieriges Problem, das zur Zeit ebenfalls von Basel aus bearbeitet wird. Jedenfalls verengt sich die Mulde von Soulce E dieser Ortschaft immer mehr, bis bei La Combe Vellerat- und Raimeux-Antiklinale ganz zusammen stossen. Hier findet sich auch die merkwürdig hoch liegende Synklinale des

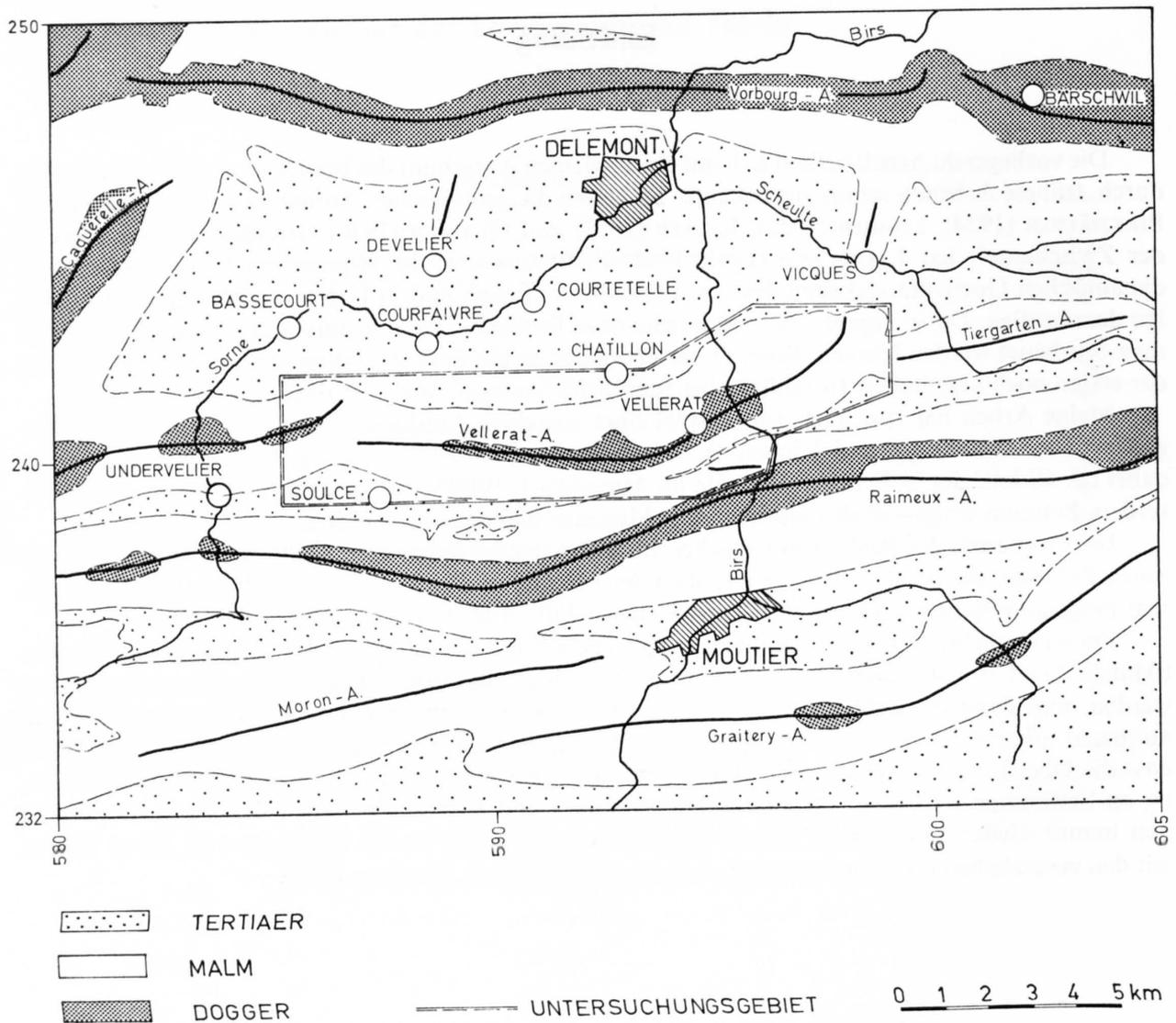


Fig. 1: Geologische Übersicht (mit Umgrenzung des Untersuchungsgebietes).

Trondai. Ähnliche Strukturen, jedoch in grösserem Massstab, sind vor allem weiter im W anzutreffen, wo die Vellerat-Antiklinale ungefähr an der im Oligozän angelegten Caquerelle-Linie in die Hochfläche der Freiberge übergeht. Nach LAUBSCHER (1965, p. 279) kommt diese Hochfläche dadurch zustande, dass die Tertiärsynklinalen von Überschiebungen weitgehend überfahren sind und dadurch vor der Erosion geschützt bleiben. Eine analoge Situation liess sich für La Combe nachweisen.

Auch die N des Delsberger Beckens anschliessende Vorbourg-Antiklinale ist von den genannten Querfalten beeinflusst (vgl. LINIGER 1925, LAUBSCHER 1966, p. 958). So scheint die Überschiebungszone, die vom Rohrberg (KELLER 1922) gegen E immer grössere Ausmasse annimmt, an eine E-W-streichende, paläogene Sockelstörung gebunden zu sein («Landsberg-Linie»), die mit der Vicques-Struktur beginnt.

Das W-Ende des Delsberger Beckens wird von der grossen Querstauchung der Caquerelle-Antiklinale begrenzt, die sicher einer rheintalischen Struktur zugeordnet werden muss (LAUBSCHER 1948).

I. Stratigraphie

1. Vorbemerkungen

Weil das Ziel dieser Arbeit die Abklärung der tektonischen Verhältnisse ist, beschränke ich mich darauf, die kartierten lithostratigraphischen Formationen und Teilformationen kurz zu charakterisieren und die wichtigsten Aufschlüsse zu nennen. Detailliertere Angaben finden sich nur bei lokal wichtigen, speziellen Horizonten. Für die Beschreibung der Karbonate halte ich mich an die Nomenklatur nach FOLK (1962). Neben der älteren Literatur stütze ich mich für die regionale Stratigraphie vor allem auf ZIEGLER (1956) und BOLLIGER & BURRI (1970) für den Malm, LINIGER (1925), SCHNEIDER (1960) und FISCHER (1965) für das Tertiär und auf meine Studienkollegen (P. Bitterli, G. Strub), die zur Zeit mit der Bearbeitung des Doggers beschäftigt sind.

Die Profilkonstruktionen verlangten eine Bestimmung der Mächtigkeit von allen mesozoischen Formationen. Den Angaben aus lokalen und regionalen stratigraphischen Arbeiten wurde dabei weniger Beachtung geschenkt als den Isopachenkarten von BÜCHI et al. (1965).

2. Dogger

a) *Opalinus-Tone* (ca. 100 m)

Diese glimmerreichen Tone und Mergel, die nach der Literatur eine Mächtigkeit von ca. 100 m erreichen, sind in der Halbklus von Châtillon und wahrscheinlich in der Klus von Choindéz angeschnitten. S von Châtillon ist längs eines neuen Weges, der vom Forêt des Vieux Ponts über die Côte de Mai führt, ein neues Profil von den Opalinus-Tonen bis zum oberen Haupttrogenstein aufgeschlossen, das in seinen unteren Teilen leider von Schutt- und Rutschmassen unterbrochen wird. Einige isolierte Aufschlüsse müssen jedoch mit grosser Wahrscheinlichkeit als Opalinus-Tone angesprochen werden.

b) *Unterer Dogger* (ca. 80 m)

Dieser Komplex von Mergelkalken und Mergeln ist im Untersuchungsgebiet schlecht aufgeschlossen. Eine feinere Unterteilung war mir deshalb nicht möglich. Den besten Einblick gibt das schon erwähnte Profil in der Halbklus von Châtillon. Ein weiteres Profil ist im Bach des Mont Dessus aufgeschlossen (591.250/239.900), wo unter oolithischen Mergelkalken sehr limonithaltige Oomikrite anzutreffen sind. In der Klus von Choindéz ist unter dem Haupttrogenstein im östlichen Teil ebenfalls ein kleines Profil von unterem Dogger aufgeschlossen.

c) *Haupttrogenstein* (ca. 110 m)

Korallenschichten des *unteren Haupttrogensteins* (ca. 30 m): In den untersten Schichten des Haupttrogensteins können stellenweise ganze Riffkomplexe festgestellt werden, wobei die Korallen meist silifiziert sind. Seitlich gehen die Riffe in Oosparite über, die charakteristische, nur in diesem Horizont auftretende «Rostlöcher» aufweisen und oft von Kieselschnüren begleitet sind. Die «Rostlöcher» sind ca. 0,5 mm grosse, mit Limonit ausgekleidete Poren. Diese speziellen Merkmale erlauben eine Kartierung der Teilformation. Besonders typische Aufschlüsse sind am Profil der Côte de Mai zu finden. In der Halbklus von Mont Dessus trifft man herausgewitterte, silifizierte Korallen in grosser Menge an.

Hauptmasse des *unteren Hauptrogensteins* (ca. 50 m): Sie besteht im wesentlichen aus kreuzgeschichteten Oospariten, die sich nicht weiter unterteilen lassen. Gute Aufschlüsse sind im Dogger-Nordschenkel der Halbklausen und Klusen zu finden, insbesondere am Weg der Côte de Mai. Die Aufschlüsse in der Klus von Choindez sind leider meist verbaut.

Acuminata-Schichten (8–10 m): Dieses auffällige Mergelband bildet die Grenze zwischen unterem und oberem Hauptrogenstein. Weil es leicht zurückwittert, ist es morphologisch oft leicht zu erkennen. Obwohl selten gut aufgeschlossen, lässt es sich gewöhnlich an den reichlich vorhandenen Fossilien in Maulwurfshaufen und anderen Kleinstaufschlüssen gut identifizieren. Grössere Aufschlüsse finden sich am neuen Weg der Côte de Mai und im Bachanriss des Mont Dessus (Nordschenkel).

Oberer Hauptrogenstein (ca. 30 m): Er ist von wechsellagerter lithologischer Beschaffenheit, die von Oospariten über Oomikrite, Biomikrite zu reinen Mikriten mit verschiedenen mergeligen Einlagerungen reicht. Diese Einlagerungen erreichen indessen nie die Mächtigkeit der *Acuminata-Schichten*, und sie unterscheiden sich von diesen auch in der Fossilführung (*Movelier-Schichten*). Es sind verschiedene angebohrte Verhärtungsflächen anzutreffen, im besonderen die regional verbreitete, die seine Obergrenze bildet. Gute Aufschlüsse sind entlang dem ganzen Doggerkern von Les Fouchies zu finden. Die mergeligen *Movelier-Schichten* können am Weg der Côte de Mai sowie oberhalb Vellerat (594.250/240.120) anstehend beobachtet werden. Der «hardground» der Obergrenze mit seinen Austernpflastern und Bohrlöchern ist über mehrere hundert Quadratmeter bei Haute Joux aufgeschlossen.

d) *Calcaire roux sableux und Callovien-Tone* (ca. 30–40 m)

Der untere Teil des *Calcaire roux sableux* ist vorwiegend tonig-mergelig, während sich nach oben zunehmend kalkige Bänke einschalten. Von der sehr wechselhaften Lithologie seien nur die markanten, oft mehrere Zentimeter grossen Grabspuren in den kalkigen Partien hervorgehoben, die im angewitterten Zustand durch ihren Limonitreichum ein leicht erkennbares, charakteristisches Merkmal sind. Ganz allgemein lässt sich der *Calcaire roux sableux* an den rostroten Verwitterungsböden leicht identifizieren. Der *Callovien-Ton* ist seiner geringen Mächtigkeit wegen (5–10 m) nicht kartiert worden. Nur an drei Stellen kann man ihn im Verband mit dem *Calcaire roux sableux* anstehend beobachten: an einem neuen Weg unmittelbar S vom Hof Les Fouchies, im Südschenkel des Doggerkernes im Bachanriss von Mont Dessus und in der Halbklaus von Châtillon (592.750/240.250), wo im Bach die Basis der Tone ansteht.

e) *Dalle nacrée und Anceps–Athleta-Schichten* (0–15 m)

Dieses kalkige, vor allem als grobe Echinodermenbreccie ausgebildete, morphologisch als Rippe gut erkennbare Schichtglied verliert von W nach E an Mächtigkeit und ist in der Klus von Choindez nicht mehr nachzuweisen. In den östlichsten Aufschlüssen, auf der Höhe von Haute Joux, ist es noch feinkörnig und nur 5 bis 7 m mächtig. Im W (Côte de Frénois) erreicht es bei gröberem Korn 10 bis 15 m. Die *Anceps–Athleta-Eisenooolithe* sind anstehend nirgends zu beobachten. Sie verraten sich jedoch durch häufige Ammonitentrümmer, so z. B. in der Halbklaus von Châtillon im Südschenkel (593.250/239.650).

3. Malm

Zum besseren Verständnis sind die in der Folge verwendeten lithostratigraphischen Formationen und Teilformationen des Malms (vorwiegend nach BOLLIGER & BURRI 1970) nachstehend zusammengestellt:

Kimmeridge-Kalke			
Court-Formation	{	Verena-Oolith Hautes-Roches-Algenkalke	} «Séquanien» } «Rauracien» } Oxfordien
Vellerat-Formation	{	Humeralis-Schichten Hauptmumienbank Natica-Schichten Vorbouurg-Kalke	
St-Ursanne-Formation	{	Tiergarten-Oolith Rauracien-Korallenkalke	
Liesberg-Schichten			
«Oxford-Tone»	{	Terrain à chailles Renggeri-Tone	

a) *Renggeri-Tone und Terrain à chailles* (80–100 m)

(als «Oxford-Tone» zusammengefasst)

Obwohl meist von Schuttmassen bedeckt, sind diese Teilformationen morphologisch immer erfassbar (als gut verfolgbare Comben). Als inkompetentes Schichtglied weisen sie tektonische Anhäufungen und Ausquetschungen auf. Aufschlüsse gibt es nur W von Derrière Château, im Bachanriss von Mont Dessus, bei La Montagne (S von Châtillon) und bei Champs de la Joux (N von Vellerat).

b) *Liesberg-Schichten* (10–15 m)

Ein guter Leithorizont, bestehend aus dunklen Mergeln, Mergelkalken und Korallenkalken, die reich sind an charakteristischen, teilweise verkieselten Fossilien. Sie sind allerdings am Fuss der Felswände, die von den Kalken der St-Ursanne-Formation gebildet werden, oft vom Hangschutt bedeckt. Gute Aufschlüsse sind in den beiden Halbkusen von Châtillon und Mont Dessus zu finden (Nordschenkel). Ebenso hat ein neuer Weg NW von Derrière Château einen ausgedehnten Aufschluss ergeben. Im W des Untersuchungsgebietes ist bei der Bewertung der Verkieselungen eine gewisse Vorsicht geboten: solche treten auch in höheren Lagen der St-Ursanne-Formation auf.

c) *St-Ursanne-Formation* (70–80 m)

Sie besteht an der Basis aus Korallenkalk, der nach oben in den Tiergarten-Oolith übergeht. Die Aufschlüsse sind häufig, oft Flühe bildend, so die grossartige Fluh-Girlande im Nordschenkel.

d) *Natica-Schichten und Vorbouurg-Kalke* (ca. 50 m)

Da die Vorbouurg-Kalke nicht überall typisch entwickelt sind, wurden sie zusammen mit den Natica-Mergeln kartiert. Dank vielen neuen Wegen sind die Aufschlüsse recht häufig, so von Natica-Schichten entlang dem Weg von Mont Dessus nach Soultce (591.000/239.450). Die Vorbouurg-Kalke fehlen an dieser Lokalität beinahe ganz. Im W-Teil des Untersuchungsgebietes ist in den reduzierten Vorbouurg-Kalken eine Mumienbank festzustellen. Besonders gut ist diese entlang dem Weg auf Haut du Droit (587.900/240.120) zu beobachten. Weiter östlich verliert sie sich und ist insbesondere in den Weganschnitten der Halbkusen von Mont Dessus und Châtillon nicht mehr vorhanden.

e) *Hauptmumienbank und Oolithe rousse* (ca. 10 m)

Dieser Komplex tritt meist morphologisch in Erscheinung und lässt sich auch im Handstück leicht identifizieren; er wurde deshalb als ausgezeichneter Leithorizont kartiert. Der untere Teil besteht aus ca. 5 m hellem Mikrit, der vereinzelt Mumien führt. Im östlichen Teil des Untersuchungsge-

bietes ist er zuweilen als Oomikrit ausgebildet. Darüber folgt eine ca. 0,5 m mächtige Bank mit nussgrossen Mumien (Onkoide), die z.T. herauswittern. Nach E verschwinden diese typischen Mumien, nicht jedoch die harten Kalke, so dass der Horizont überall kartiert werden konnte. Die hangende Oolithe rousse (ca. 5 m) mit ihren limonitreichen Ooiden wird nach E mehr und mehr von einem eigentlichen Onkolith ersetzt.

Neue Wege haben ausgezeichnete Profile freigelegt, und zwar im Forêt de l'Aimery S von Courfaivre (587.250/240.750) und besonders zwischen Mont Dessus und Soulce, wo die Mumienbank viermal angeschnitten und z.T. auf 100 m freigelegt wird.

f) *Humeralis-Schichten und Hautes-Roches-Algenkalke* (25–30 m)

Ich habe diese beiden Teilformationen (vgl. BOLLIGER & BURRI 1970) nicht getrennt, weil sie zwischen den guten Leithorizonten der Mumienbank und des Verena-Oolithes liegen und entweder schlecht aufgeschlossen (mergelige Humeralis-Schichten) oder von banaler Lithologie sind (Hautes-Roches-Algenkalke, gutgebankte, lagunäre Mikrite, Kimmeridge-ähnlich). Aufschlüsse finden sich meist im Zusammenhang mit der Mumienbank.

g) *Verena-Oolith* (30–40 m)

Die schlechtgebankte Schichtenfolge tritt morphologisch meist als Steilstufe in Erscheinung und ist deshalb gut aufgeschlossen. Die grossen, mikritisierten Ooide in ihrer hellen, ebenfalls mikritischen Grundmasse sind besonders im angewitterten Handstück unverkennbar. Es gibt indessen auch feinkörnige Partien, die leicht mit dem Tiergarten-Oolith verwechselt werden können.

h) *Kimmeridge-Kalke* (100–130 m)

Die gutgebankte Folge ist von wechselnder Lithologie. Sie besteht vor allem aus hellen, weissen bis cremefarbenen Mikriten, doch treten auch andere Kalkarten auf, so Oomikrite und Oosparite. Der beste Aufschluss findet sich am neuen Strässchen, das von Hautes Roches zum Hof Le Trondai hinaufführt.

4. Tertiär

a) *Eozän*

Im allgemeinen ist der Boluston nur am Südrand des Delsberger Beckens anzutreffen. Hier kann er eine Mächtigkeit von einigen Metern erreichen. Oberhalb L'Essert (S Courtételle) erbohrten wir bei einem Schussloch für seismische Sprengung zwei Meter Boluston. Etwas weiter östlich (591.300/241.050) ist im Bach eine grosse Bolustasche zu beobachten, die ca. 15 m in die Kimmeridge-Kalke eingesenkt ist. Ein weiteres, wichtiges Vorkommen von Bolus ist auf dem Trondai zu verzeichnen. Hier fand ich in einer Handbohrung in ca. 2 m Tiefe den typischen roten Ton, der hier allerdings verschwemmt sein könnte. Eine weitere Bolustasche im Südschenkel bei La Verrerie hat nach einer freundlichen Mitteilung von Herrn Dr. Engesser (Basel) eine obereozäne Fauna geliefert.

b) *Oligozän*

Die Bildungen des unteren Oligozäns sind selten anzutreffen. Das Vorkommen von Gelberde im Bacheinschnitt S von Châtillon hat bereits LINIGER (1925) beschrieben. Vielleicht dem gleichen Alter gehören die Konglomerate an, die man N von Soulce und S von Chez les Pic findet. Sie bestehen z.T. aus grossen, gutgerundeten Malmgeröllen, z.T. auch aus ganz kleinen Komponenten, mit viel Bohnerkörnern im Bindemittel. Möglicherweise sind sie, ähnlich den nichtmarinen Konglomeraten von

Porrentruy, älter als die marine Gompholithe d'Ajoie (SCHNEIDER 1960). Die Konglomerate könnten aber auch jünger sein. Der schönste Aufschluss befindet sich N von Soulce an der Strasse Soulce – Courfaivre (586.650/239.800).

Die Molasse alsacienne und ihre Mergellagen sind selten aufgeschlossen (z. B. im Forêt des Fosses, S Courtételle), jedoch im allgemeinen gut erkennbar an den feinen Quarzkörnchen und Glimmerblättchen in den Verwitterungsböden. Die Mächtigkeit mag im Becken von Delsberg und in der Mulde von Soulce ca. 150 m betragen (vgl. Seismik). Der Delsberger Süßwasserkalk bildet gegenüber der Molasse alsacienne meist eine Rippe, ist jedoch selten aufgeschlossen. Er lässt sich dank seinem Gehalt an organischem Material und seiner löcherigen Anwitterung im Handstück leicht erkennen. Die Mächtigkeit beträgt nach LINIGER (1925) ca. 15 m. Der einzige frische Aufschluss befindet sich zur Zeit an einem neuen Weg, der von Droit de Folpotat nach Entre les Prés führt (589.650/238.760).

c) Mio-/Pliozän

Hier fehlen jegliche Aufschlüsse. Durch die seismischen Untersuchungen wurden bei Soulce ca. 100 m Miozän wahrscheinlich gemacht. Verwitterungsböden, die aus vermutlichem Miozän hervorgegangen sind, habe ich als Tertiär im allgemeinen kartiert.

II. Tektonik

1. Vorbemerkungen

Die Fernschubhypothese der Jurafaltung, zuerst von BUXTORF (1907) klar ausgesprochen und später von LAUBSCHER (1961) neu formuliert und in einer Reihe von Arbeiten ausgebaut und quantifiziert, lässt sich als Grundlage für Profilkonstruktionen und neue Problemstellungen im Beispiel der Vellerat-Antiklinale verwenden.

Für Profilkonstruktionen ist das kinematische Modell des Fernschubes (LAUBSCHER 1965) nützlich, für die Kleintektonik (vgl. p. 36) ausserdem der regionale dynamische Ansatz (LAUBSCHER 1972). Für beide ist der Einfluss der ererbten, im wesentlichen oligozänen, rheintalischen Sockeltektonik von Bedeutung. Diese besteht im rheintalischen Jura in einer Vergitterung von NNE-SSW streichenden mit \pm E-W streichenden Abschiebungen, Flexuren und «en échelon»-Gürteln von Abschiebungen und Flexuren (LINIGER 1925, LAUBSCHER 1967). An solchen ererbten Unregelmässigkeiten scheinen bei der jungtertiären Jurafaltung die ersten Instabilitäten aufgetreten zu sein (LAUBSCHER 1965, p. 266), oft als Überschiebungen, die im weiteren Verlauf der Bewegungen verfaltet wurden. Ausserdem sind axiale Verbiegungen der Falten, «Kernaustausch» u. ä. auffällig mit ihnen verknüpft.

2. Bemerkungen zu den Profilkonstruktionen

a) Prinzip der kurvimetrisch-volumetrischen Konkordanz

Da es gilt, die Gesamtstruktur der Falte zu erfassen, habe ich im Gegensatz zum üblichen Vorgehen die Profile bis an die Abscherbasis konstruiert. Um die Willkür bei der Extrapolation der Oberflächenbeobachtungen in die Tiefe etwas einzuschränken, habe ich dabei versucht, dem Prinzip der kurvimetrisch-volumetrischen Konkordanz Rechnung zu tragen (LAUBSCHER 1962, p. 4).

Dieses Prinzip besteht darin, dass die kurvimetrischen Verkürzungen mit den volumetrischen verglichen werden. Die kurvimetrische Verkürzung errechnet sich aus der Länge des verbogenen Streckenzuges eines kompetenten Schichtgliedes, vermindert um die entsprechende Horizontalstrecke, die von Synklinale zu Synklinale gemessen wird. Die volumetrische Verkürzung setzt das in der Falte ausgepresste Volumen dem Volumenverlust beim Zusammenschub gleich. Unter der Annahme, dass kein Material seitwärts transportiert worden ist, lässt sich dieses Problem als «eben» angehen. Dividiert man das ausgepresste Volumen durch die bekannte Abschertiefe, so sollte sich der so gewonnene Verkürzungsbetrag mit der kurvimetrischen Verkürzung decken. Ein derartiges Profil ist «kurvimetrisch-volumetrisch konkordant». Allerdings müssen für die Anwendung des Prinzips folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Kompetente Schichtglieder behalten ihre Mächtigkeit bei.
2. Inkompetente Tone und Mergel dürfen zwar an- und abschwellen, doch muss das ursprüngliche stratigraphische Volumen in einer Antiklinale erhalten bleiben.
3. Präexistente Strukturen, im besonderen rheintalische Flexuren, müssen vor der Bestimmung sowohl der Kurvimetrie als auch der Volumetrie abgezogen sein.
4. Die Profilrichtungen müssen in Richtung der Bewegung liegen.

Ich habe in den Profilkonstruktionen die Schichtgrenze Callovien/Oxford-Tone als Bezugshorizont gewählt, weil sie an vielen Stellen gut belegt ist und ziemlich getreu den Verlauf des kompetenten Hauptrogensteins wiedergibt. Weiter konnten die erodierten Teile leicht ergänzt werden (in den Profilen punktiert) und überdies erlaubten die ausgedehnten Aufschlüsse der St-Ursanne-Formation, trotz dem disharmonischen Verhalten des Malms, eine gute Abschätzung dieser Grenze.

Eine gewisse Schwierigkeit bestand in der Festlegung der Basislinie für das ausgequetschte Material. In der Mulde von Soule – Undervelier bot sich die tiefste Stelle der Synklinale an. Im Becken von Delsberg jedoch musste der Einfluss einer alten Flexur berücksichtigt werden (vgl. Fig. 2). Nach reiflichen Überlegungen ist die Basislinie zwar an die Oberkante der Flexur gelegt, das schwache Aufbiegen des Nordschenkels jedoch der Faltung zugeschrieben worden. Die Flexur, vor der Jurafaltung 2,5 km weiter S gelegen, wird die Translation kaum unverändert überstanden haben. Die bei der Faltung zugesetzte Deformation dürfte jedoch klein sein und ist deshalb vernachlässigt worden.

Die gewählten Profilrichtungen genügen den Forderungen des Prinzips. Das allgemeine Streichen der Falte deckt sich recht gut mit der E–W-Richtung. Die Profile sind deshalb alle genau N–S gelegt. Das hat am E-Ende der Antiklinale einen gewissen Fehler zur Folge, weil bereits in der Klus von Choindex eine Abweichung von 20° von der E–W-Richtung festzustellen ist.

Nun vergrößert sich die Fläche eines unter einem abweichenden Winkel α geschnittenen Profils um den Faktor $1/\cos \alpha$, was für 20° einen Fehler von 6% ausmacht. Selbst bei 30° liegt der Fehler mit 15% immer noch in den Genauigkeitsgrenzen des Modelles.

b) Sockelgeometrie

Um das Prinzip der kurvimetrisch-volumetrischen Konkordanz für die ganze Falte anwenden zu können, muss die Abschertiefe und damit der Verlauf der Sockeloberfläche bekannt sein. Es galt also zunächst, dessen Verlauf unter den Synklinalen abzuschätzen und unter die Antiklinale hineinzuprojizieren. Bei diesen Abschätzungen habe ich die Sockeloberfläche mit dem Abscherhorizont im mittleren Muschelkalk gleichgesetzt. Nach der Fernschubhypothese ist die Struktur der Sockeloberfläche im wesentlichen oligozänen Alters («rheintalisch»).

Im Bereich des Untersuchungsgebietes (Fig. 1) sind die von LINIGER (1925) beschriebenen «Querfalten» von Develier, Rondez und Vicques als rheintalische NNE–SSW-Strukturen zu deuten. Sie entsprechen also entweder Flexuren im Sockel oder Abschiebungen, die sich in den Sedimenten lediglich als oligozäne Flexuren zu erkennen geben. Nach den Daten der Bohnerzschächte im Delsberger Becken ergibt sich eine relative Einsenkung des Malms von ca. 200 m zwischen den dominierenden Strukturen von Develier und Vicques. Ich habe hier, wie auch im folgenden, angenommen, dass in den Synklinalen die Sedimenthaut noch ungefähr parallel zum Sockel liegt. Das erlaubt an solchen Stellen eine Projektion in die Tiefe, besonders darum, weil die Mächtigkeit des Mesozoikums in guter Näherung über das ganze Untersuchungsgebiet konstant bleibt (vgl. Isohypsen, BÜCHI et al. 1965). Diese Projektion ergibt nun für das Becken von Delsberg eine NNE streichende Grabenstruktur, die im W (Develier-Linie) eine Sprunghöhe von ca. 200 m aufweist, gegen E jedoch in mehreren Schollen ansteigt (Rondez-Linie, Vicques-Linie, vgl. Fig. 2). Belegt sind diese Tiefen ausschliesslich durch die

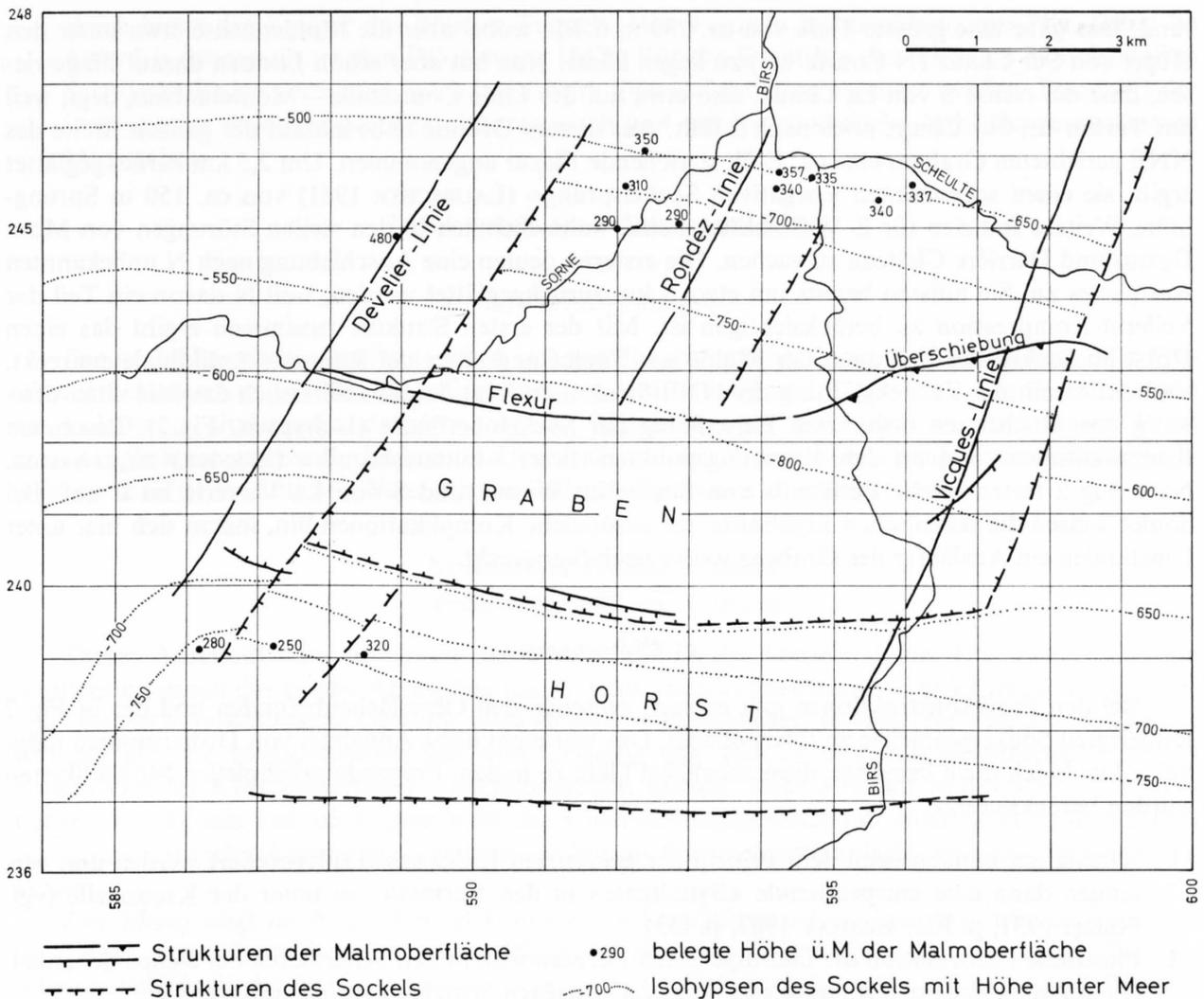


Fig. 2: Rekonstruktion der Sockelgeometrie mit Isohypsen des Abscherhorizontes.

Projektionen der Malmoberfläche. In Fig. 2 sind alle bekannten Tiefenpunkte der Malmoberfläche in den Synklinalen eingetragen. Die Punkte in der Synklinale von Soultz stammen von seismischen Untersuchungen. Da der südliche Teil des Delsberger Beckens von meist schlecht aufgeschlossenem Tertiär, Schutt oder grossen Rutschmassen bedeckt ist, kann seine Struktur – besonders die Tiefenlage – nicht sicher bestimmt werden. Ein Schichtfallen von 10° S, wie das im Schacht von Prés Roses (591.700/244.900) angegeben ist, würde eine Absenkung der Malmoberfläche auf ca. 400 m unter Meer erlauben. Ich halte dies für unwahrscheinlich und nehme an, dass sich der Malm rasch flach legt und dass sich seine Oberfläche unter dem Südrand des Delsberger Beckens höchstens auf 200 m ü. M. senkt (vgl. LINIGER 1925, Profile). Das bedeutet für den Sockel eine Tiefenlage von ca. 800 m unter Meer. Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass N des Delsberger Beckens noch einige Falten gebildet worden sind, die zusammen einen Kompressionsbetrag von ca. 2,5 km aufnehmen. Um diesen Betrag müssen alle oligozänen Strukturen der bewegten Sedimenthaut nach S zurückgeglättet werden, will man ihre heutige Lage im Sockel ermitteln.

Im Gegensatz zu den NNE-Strukturen sind die oligozänen E-W-Linien nicht sehr scharf definiert. LINIGER (1925) hat aufgrund der Tertiäraufschlüsse bei Courrendlin und Châtillon (die unteroligozäne Gelberde keilt dort aus) eine E-W streichende Flexur angenommen, an welcher der Malm gegen den Schenkel der Vellerat-Antiklinale ansteigt. An und für sich wäre auch ein von N und S beidseitiges Abtauchen mit ca. 10° in das Becken denkbar, ohne eine scharf definierte Flexur am Süd-

rand. Das gäbe eine grösste Tiefe von ca. 230 m ü. M., wobei aber die Muldenachse etwa unter den Hügel von Sur Chaux (N Courfaivre) zu liegen käme. Nun hat aber schon LINIGER darauf hingewiesen, dass die Achse S von La Chaux, also etwa auf der Linie Courtételle – Montchaibeux liegt, weil das Tertiär bei Sur Chaux noch nach S fällt. Aus diesem Grunde habe ich auf der ganzen Breite des NNE gerichteten Grabens eine ca. E–W streichende Flexur angenommen. Um 2,5 km zurückgeglättet ergibt sie einen sogenannten «negativen Sockelsprung» (LAUBSCHER 1961) von ca. 150 m Sprunghöhe. Weitere Indizien für E–W-Strukturen sind wahrscheinlich in den steilen Störungen von Mont Dessus und Derrière Château zu suchen. Die ersteren deuten eine Abschiebung nach N unbekanntem Ausmasses an. Sie müssen bereits um etwa 3 km zurückgeglättet werden, weil N davon ein Teil der Vellerat-Kompression zu berücksichtigen ist. Mit der ersten Struktur zusammen ergibt das einen Horst im Sockel, der sich unter der Mulde von Soulce und unter der Raimeux-Antiklinale erstreckt. Verbunden mit der Zurückglättung der NNE-Strukturen folgt daraus schliesslich das Bild einer dreiseitig von Hochzonen begrenzten Einsenkung der Sockeloberfläche (Isohypsen, Fig. 2). Besondere Komplikationen sind an den Kreuzungspunkten dieser «Gittertektonik» (LINIGER) zu erwarten. Nach Fig. 2 treten solche Punkte N von Soulce im Westen und S von La Verrerie im E auf. Bei Soulce weisen die seismischen Ergebnisse auf zusätzliche Komplikationen hin, indem sich hier unter Umständen ein Ausläufer des Grabens weiter nach S erstreckt.

c) Disharmonien

Bei den Profilkonstruktionen galt es nun, zwischen den Oberflächenbefunden und der in Fig. 2 festgelegten Sockelgeometrie zu interpolieren. Das war nicht ohne Annahme von Disharmonien möglich, obwohl ich mich bemühte, diese möglichst klein zu halten. Folgende prinzipiellen Möglichkeiten wurden berücksichtigt:

1. Kleinfalten können nach dem Prinzip der gekreuzten Knickzonen interpretiert werden und verlangen dann eine entsprechende «Synklinale» in den Formationen unter der Kreuzstelle (vgl. NADAI 1931, p. 302; RAMSAY 1967, p. 453).
2. Plastische Deformation der inkompetenten Formationen in den Scharnieren der steilen Schenkel, die auf verschiedene Krümmungszentren der einzelnen Schichten zurückzuführen ist.
3. Kleinfalten, die auf höheren inkompetenten Horizonten (z. B. Opalinus-Tone, Oxford-Tone) abgesichert sind, verlangen eine Kompensation von entsprechenden Kompressionsbeträgen an verschiedenen Orten in verschiedenen Stockwerken des Sedimentstapels. 1–3 sind vermutlich häufig kombiniert.
4. Spezielle Disharmonien sind bei Unregelmässigkeiten im Sockel zu erwarten (vgl. LAUBSCHER 1961, Fig. 16, 17). Die Abscherkinematik verlangt, dass die präexistenten Abschiebungen des Sockels irgendwie überwunden werden. Positive Sockelsprünge, d. h. Stellen, wo die Sedimenthaut auf ein höheres Niveau gleiten muss, werden vermutlich durch Begradigung überwunden, sei es durch Abscherung eines Grundgebirgskeiles (was weniger wahrscheinlich ist), sei es durch Anhäufung von plastischem Material im «bewegungstoten Winkel». Weit kompliziertere Verhältnisse müssen bei einem negativen Sockelsprung vorliegen. LAUBSCHER postuliert hier, allerdings für grosse Sprunghöhen, wie sie z. B. an der Salins-Linie auftreten, «chaotische Strukturen», hervorgerufen durch Vordringen des Sedimentstapels und mehr oder weniger gleichzeitiges Einsinken des Materials hinter dem Sockelsprung. Bei jedem weiteren Vorrücken würde das vorherige Segment überfahren und in übelster Weise deformiert. Es ist indessen anzunehmen, dass sich diese Vorgänge im Falle der Vellerat-Antiklinale, der kleinen Sprunghöhe wegen, nur auf die untersten Horizonte (Keuper und Muschelkalk) beschränken. Natürlich ist es unmöglich, solche Strukturen präzise vorauszusagen. In den Profilen wurden sie deshalb nur ganz schematisch behandelt.
5. Ganz allgemein sind die Verhältnisse in der Nähe des Abscherhorizontes unsicher. Auch fehlen gute Aufschlüsse, die wenigstens Einblick in den Stil vermitteln könnten. Den wohl besten Ver-

gleich bietet der Keuper des Bölchen-Tunnels. Hier konnten insbesondere enge Fließfalten im Anhydrit festgestellt werden (WOHLICH 1967). Für die Evaporite des mittleren Muschelkalkes darf deshalb eine vermutlich noch intensivere Fließdeformation erwartet werden. Diese Art der Deformation ist ausgesprochen disharmonisch und erlaubt tektonische Anhäufungen grösseren Massstabes.

3. Geometrie der Vellerat-Antiklinale

a) Vorbemerkungen

Die nachfolgende Beschreibung stützt sich auf die geologische Karte, die Strukturkarte, die Profilkonstruktionen und auf das Blockdiagramm (vgl. Tafeln I–III und Fig. 3–7, 9). Alle Bezeichnungen von Lokalitäten sind der Landeskarte 1:25000, Blätter Moutier und Delémont, entnommen. Es ist unumgänglich, in gewissen Abschnitten Übergriffe auf die Raimeux-Antiklinale vorzunehmen, obwohl sie zur Zeit in ähnlicher Weise wie die Vellerat-Antiklinale bearbeitet wird.

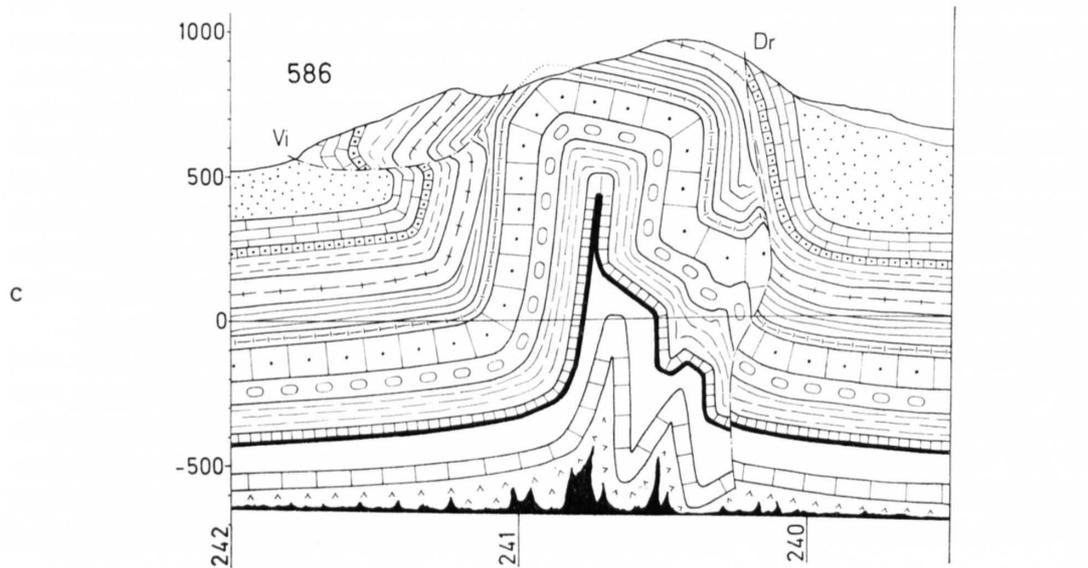
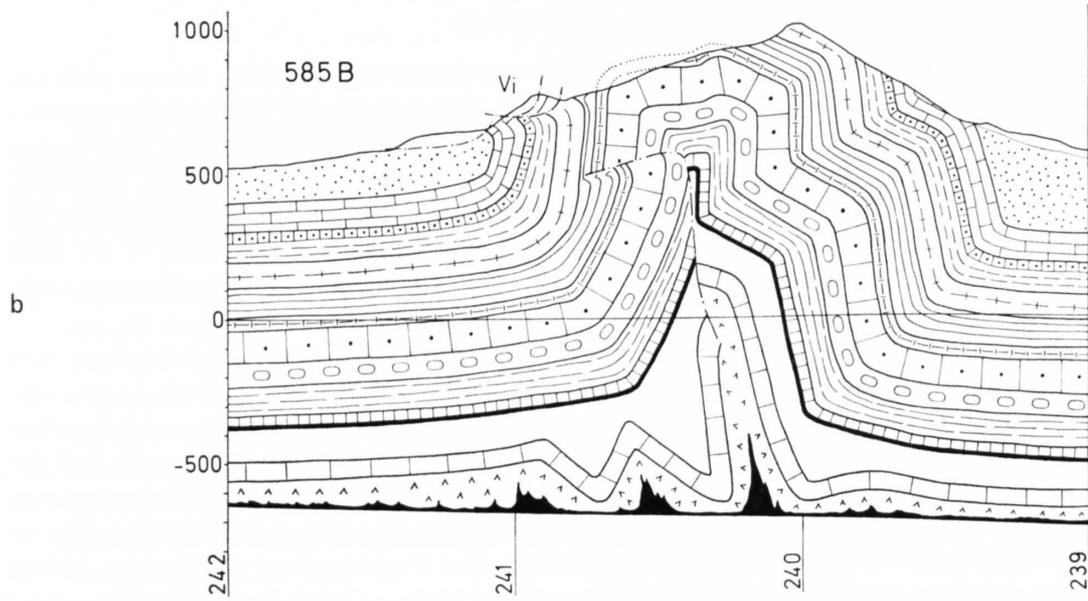
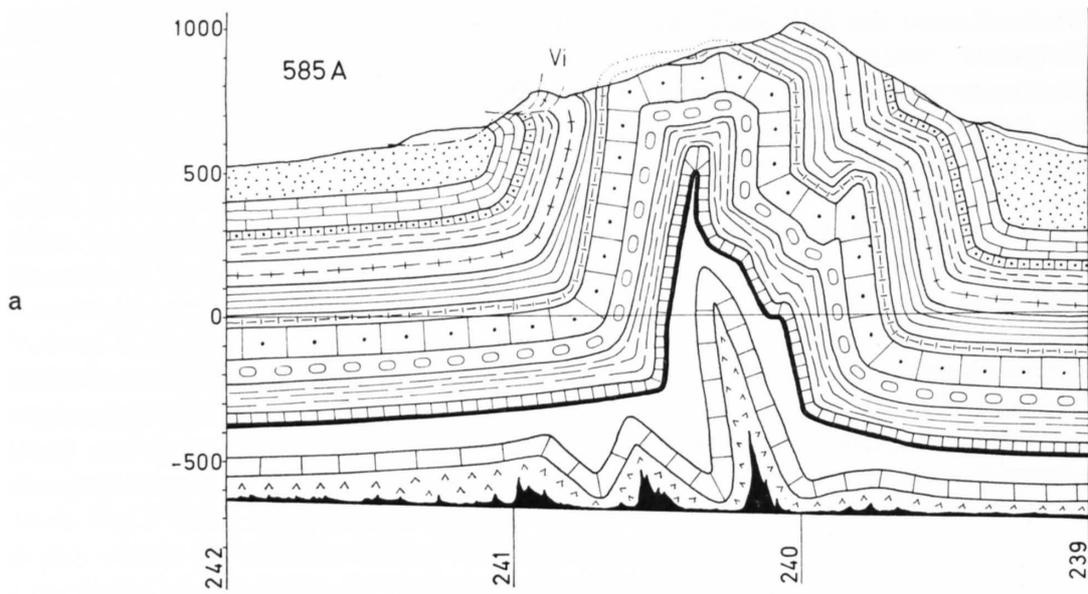
b) Abschnitt Frénois – Soulce

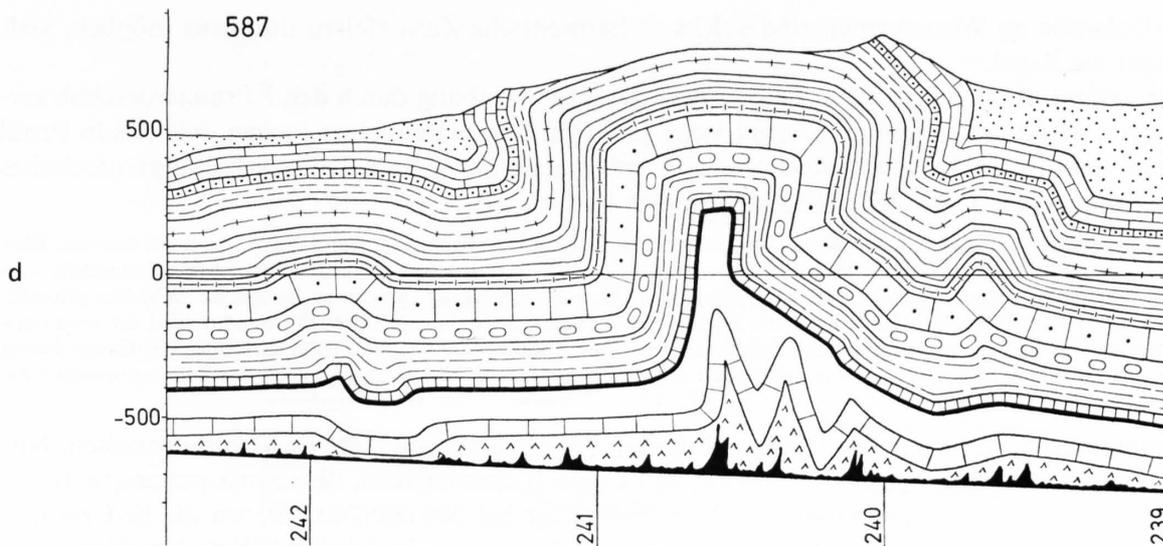
Profile 585 A, 585 B, 586, 587 (Fig. 3)

Dieser Abschnitt wird dominiert durch den Einfluss der Develier-Linie. Das äussert sich am deutlichsten durch das rasche Abtauchen (ca. 12°) des anomal streichenden (70°) Frénois-Doggerkernes. Das gut aufgeschlossene Gewölbe weist in seinem Südschenkel, W vom Hof Frénois, eine leichte Wellung auf, die möglicherweise mit dem Gewölbe von Ste-Colombe zusammenhängt. Letzteres streicht von der Klus Undervelier – Berlincourt mit spitzem Winkel in den Malm-Südschenkel der Vellerat-Antiklinale und sticht gerade W des Untersuchungsgebietes mit einer Störung in die Luft aus. Keine der vielen Unregelmässigkeiten des Malmes lässt sich erstaunlicherweise im Dogger nachweisen.

Der Malm zeigt im Nordschenkel komplizierte Überschiebungsstrukturen (Überschiebung von Le Vialon), was sich am deutlichsten im Halbfenster der Côte de Frénois äussert. Hier sind alle kompetenten Schichtglieder über den Oxford-Tonen sehr deutlich nach N zurückgebogen und fallen deshalb stark gegen S. Überlagert wird die liegende Serie von Überschiebungsmassen, die im W-Teil des Halbfensters aus St-Ursanne-Formation bestehen. Es ist sogar eine Verdoppelung der Überschiebung festzustellen, indem die Liesberg-Schichten ein zweites Mal auftreten. Eine ähnliche Situation liegt im östlichen Teil des Halbfensters vor. Hier lässt sich ebenfalls eine Verdoppelung nachweisen, indem auf die überschobene Masse von St-Ursanne-Formation direkt Verena-Oolith folgt. Die Überschiebungen lassen sich nicht gut nach E verfolgen. Indessen darf an der Basis des steilen Abhanges von Le Vialon durchaus der morphologische Ausdruck des Frontausbisses dieser Überschiebungen gesehen werden. Das nächste Indiz dafür ist südlich von La Tuilerie zu suchen, wo der Nordschenkel in einem Trockental recht gut aufgeschlossen ist. Hier scheint die Stelle zu sein, wo der Nordschenkel sich aus senkrechter bis überkippter Lagerung zur Überschiebung entwickelt. Allerdings ist es auch möglich, dass die Überschiebung hier durch den Bruch von Côte du Droit begrenzt ist. Das stützt sich auf die Tatsache, dass S von La Tuilerie die höheren Malmabschnitte (Mumienbank bis Kimmeridge-Kalke) W des Baches deutlich nach N versetzt sind. Die grosse Kalksintermasse, die BARSCH (1969, p. 85) beschrieben hat, mag auf besonders günstige hydrologische Verhältnisse zurückgeführt werden (z. B. axiale Depression).

Ein grosses Rätsel stellt in diesem Zusammenhang die Combe des Forêt de Chenal dar. Hier sind die Aufschlussverhältnisse derart schlecht, dass nicht entschieden werden konnte, ob sie lediglich eine durch die Erosion geschaffene Bresche in der St-Ursanne-Formation darstellt oder ob eine wirkliche Störung vorliegt. In Frage käme der Bruch von Côte du Droit, der im Südschenkel eindeutig festgestellt, nach Grösse und Richtung sehr gut in diese Combe passen würde. Dieser Verlauf des Bruches erklärt auch die bereits erwähnte Versetzung der Malm-Formationen S von La Tuilerie. Die andere





LEGENDE zu den Figuren 3-7 und 9

(Abkürzungen vergl. Tf. I)

---	Überschiebungen		Calcaire roux sabl., Dalle nacree
- - -	Brüche		Hauptrogenstein
	Tertiär i. a.		Unterer Dogger
	Kimmeridge - Kalke		Opalinus - Tone
	Verena - Oolith		Lias
	Humeralis - Schichten, Hauptmumienbank und Natica - Schichten		Keuper
	St. Ursanne - Formation		Hauptmuschelkalk
	Oxford - Tone		Anhydritgruppe mit Steinsalz

Fig. 3: Geologische Profile Abschnitt Frénois - Soulce, Ordinaten 585 A, 585 B, 586, 587 (a-d).

Möglichkeit, die ganze Überschiebungsmasse von Le Vialon als nachgesackt zu betrachten, halte ich nicht für sehr wahrscheinlich, obwohl eine derartige Bewegung eine entsprechende Combe in der St-Ursanne-Formation hinterlassen würde.

Der Malm-Südschenkel bietet womöglich noch grössere Probleme. Leider verhüllen die Bergsturzmassen von La Boiraderie nicht nur den Fuss des Schenkels, sondern auch die höheren Partien der Südflanke. Von Westen herkommend, weist das Kimmeridge, das aus der Mulde senkrecht auftaucht, eine Art Plattform von ca. 50° S-Fallen auf. Die Vellerat-Formation und die St-Ursanne-Formation stehen bereits wieder sehr steil und biegen dann auf einer Höhe von ca. 900 m knickartig nach N um. Nun muss nach dem Modell für die festgestellten Überschiebungen des Malm-Nordschenkels (Vi) irgendwo im Dogger eine Fortsetzung bestehen. Da eine solche in den kompetenten Schichten des Dogger-Südschenkels nicht zu finden war, habe ich angenommen, dass die Überschiebungsfläche in den Oxford-Tonen etwa schichtparallel läuft und dass der Überschiebungsbetrag durch die kleine Zusatzfalte unter eben dieser Malm-Plattform aufgenommen wird (Profil 585 A). Wie das Gewölbe

von Ste-Colombe im Westen zeigt, sind solche disharmonische Zusatzfalten durchaus möglich, vielleicht sogar die Regel.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass die Überschiebung durch den Faltungsvorschub zerrissen wurde. Die Fortsetzung im Dogger wäre somit im Nordschenkel zu suchen, wie das in Profil 585B dargestellt ist. Dabei muss angenommen werden, dass der grösste Teil des Faltungsvorschubes in den inkompetenten Oxford-Tonen stattgefunden hat.

Ähnliche Verhältnisse sind aus dem Nordschenkel der Clos-du-Doubs-Antiklinale bekannt (Geol. Atlas der Schweiz, Blatt St-Ursanne; vgl. auch BUXTORF 1909, DIEBOLD 1960), wo eine grosse, disharmonische Überschiebung im Malm festgestellt worden ist. Ihre kinematische Fortsetzung ist wahrscheinlich in den Überschiebungen des Doggers zu suchen, die an Stellen gefunden wurden, wo die Erosion besonders tiefe Einschnitte geschaffen hat (z.B. Combe Foulat). Der Höhenunterschied der etwa horizontal liegenden Überschiebungsflächen beträgt zwischen Côte à Bion (Malm) und Combe Foulat ca. 150 m. Um diesen Betrag müsste die Überschiebungsfläche vom Faltungsvorschub versetzt sein. Ähnliche Versetzungen durch den Faltungsvorschub beschreibt LAUBSCHER (1948, p.27).

Als direktester Ausdruck der Develier-Linie sind die Brüche von Côte du Droit anzusehen. Nur zwei lassen sich mit einiger Sicherheit fassen, es ist jedoch anzunehmen, dass noch weitere, untergeordnete Brüche existieren. Die eindrücklichste Stelle liegt bei 586.000/240.250, wo die St-Ursanne-Formation gegen Kimmeridge-Kalke versetzt ist. Sie können als alte (rheintalische) Abschiebungen interpretiert werden, die durch die Faltung reaktiviert und verbogen wurden, wie das im Profil 586 dargestellt ist. Der mutmassliche Verlauf des grössten Bruches nach N ist bereits erwähnt worden.

Östlich schliesst sich die Kimmeridge-Einbuchtung von Sormont an, die die grösste axiale Depression markiert. Im Profil 587 kommt die damit verbundene geringe Kompression drastisch zum Ausdruck, indem der neu auftauchende Doggerkern noch sehr tief liegt. Zwar wurde versucht, durch eine zusätzliche disharmonische Falte im S und eine ähnliche Struktur im N (abtauchender Frénois-Kern) eine Vergrösserung der Kompression zu erreichen. Trotzdem liegt der Betrag mit 1,15 km wesentlich unter denjenigen der benachbarten Profile. Nach den Regeln der Kinematik dürfte ein derartiges Minimum an Kompression nur dann auftreten, wenn entsprechende Querstrukturen das Zurückbleiben von Volumen erlauben. Solche Linien kann man in den Brüchen von Côte du Droit und Peute Côte sehen (vgl. p.42). Erwähnenswert ist schliesslich noch die Tatsache, dass auch am Fusse des Südschenkels grosse Kalksintermassen anzutreffen sind (586.500/239.600), deren Entstehung ähnlich derjenigen von La Tuilerie sein dürfte.

Die Profile 585A/B und 586 weisen in der Tiefe keine speziellen Komplikationen auf. Da das Doggergewölbe sehr enggepresst erscheint, müssen unter dem Lias wesentliche Disharmonien auftreten. Eine eigene disharmonische Verfältelung wird deshalb dem oberen Muschelkalk zugestanden, wobei lediglich dem Prinzip der gleichen Schichtlänge Rechnung getragen wurde. Der Abscherhorizont ist durch die tektonische Anhäufung von Evaporiten gekennzeichnet, die als «Stopfmassen» auftreten müssen.

In Profil 587 liegen ähnliche Verhältnisse vor. Wie die Karte der Sockelstrukturen zeigt (Fig.2), liegt die Abscherbasis noch auf der gleichen Höhe wie in den Profilen 585 und 586. Die disharmonischen Fältchen sind nach dem Prinzip von gekreuzten Knickzonen auf höheren Tonhorizonten konstruiert und entwickeln nach unten Synklinalen.

c) Abschnitt Soulce – Les Fouchies

Profile 588, 589, 590 (Fig.4)

Dieses regelmässige Segment der Falte ist durch das allmähliche Auftauchen des Doggerkernes charakterisiert. Trotz den schlechten Aufschlüssen lässt sich die Dalle nacrée fast lückenlos verfolgen. Der Bacheinschnitt östlich Derrière Château schneidet den Hauptrogenstein an und gibt einen Hinweis auf die Gewölbeform. Erst bei Les Fouchies taucht der Hauptrogenstein endgültig auf. Gleichzeitig keilt hier die Dalle nacrée allmählich aus.

Der Malm-Nordschenkel ist in diesem Segment lückenlos von grossen Rutschmassen begleitet. Diese stehen teilweise noch im Verband, so dass man an eine Überschiebung grösseren Ausmasses denken könnte. Dies gilt besonders für die Masse von Chambion. An der Front liegen überkippte

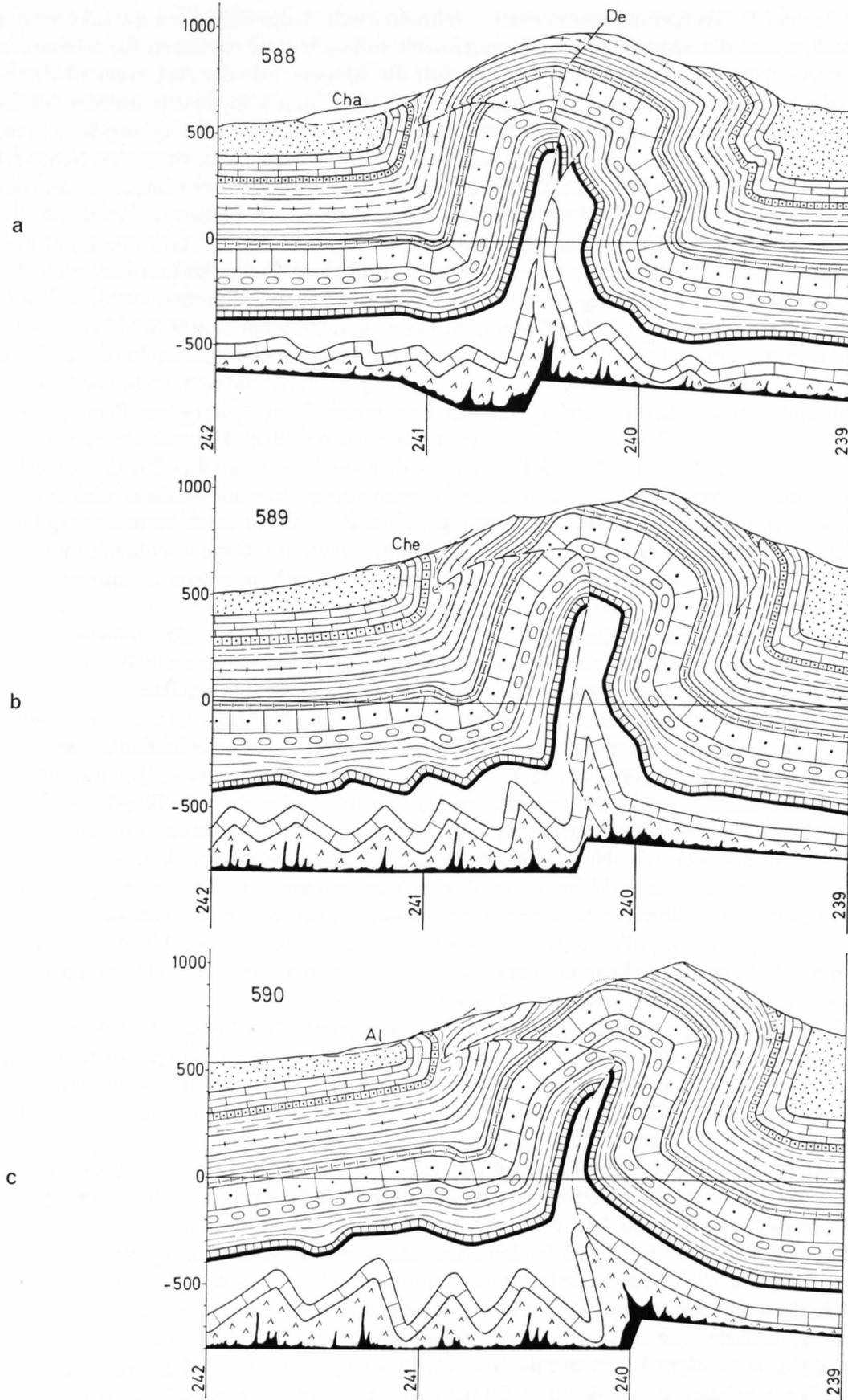


Fig. 4: Geologische Profile Abschnitt Soulice – Les Fouchies, Ordinaten 588, 589 und 590 (a–c). Legende vgl. Fig. 3.

Kimmeridge-Kalke auf Delsberger Süsswasserkalk, während nach S die Schichten zu schwachem N-Fallen umbiegen, wobei die Sequenz bis zur Mumienbank auftaucht. Die restlichen Rutschmassen zeigen keinen derart schönen Zusammenhang, jedoch fällt die Abwesenheit der St-Ursanne-Formation auf. Diese tritt als Rutschmasse erst auf einer Höhe von ca. 750 m klippenartig auf der Nordflanke auf, so z. B. in der Forêt de la Fâde auf den Natica-Schichten, zusammen mit Liesberg-Schichten.

Glücklicherweise geben drei tiefe Bacheinschnitte jeweils den Blick auf den liegenden Schenkel frei: es sind dies von W nach E der Bach von Derrière Château, der Bach von Les Limaces und Mont Dessous. Alle drei zeigen das gleiche: während die St-Ursanne-Formation ungestört mit ca. 20° bis 40° nach N einfällt, sind alle höheren Schichtglieder über den Natica-Schichten stark überkippt und fallen bis 30° gegen S. Die Überkipfung geschieht abrupt. In allen Bacheinschnitten lässt sich das Umbiegen von ca. 10° Nordfallen der Schichten genau verfolgen. Dieses Phänomen wurde als Ausdruck einer Überschiebung gedeutet, die durch den Faltungsvorschub an den Natica-Schichten zerrissen ist, so dass ihre Fortsetzung, in der St-Ursanne-Formation nicht aufgeschlossen, in der Tiefe zu suchen ist. Zwar lassen die Feldbeobachtungen auch die Deutung zu, es handle sich um blosse Rutschmassen ohne Überschiebung; aber die Befolgung des kurvimetrisch-volumetrischen Prinzips fordert hier eine Vergrösserung der Kurvimetrie, was am leichtesten mit einer Überschiebung erreicht werden kann. Da St-Ursanne- und Liesberg-Schichten auf dem nach W abtauchenden Gewölbe bei Derrière Château lückenlos verfolgbar sind und keine Überschiebung aufweisen, müsste eine solche, wie auf den Profilen angegeben, in die Tiefe verstellt sein. Über den Betrag der Überschiebung lässt sich von den Feldbeobachtungen her nichts aussagen. In den Profilkonstruktionen ist sie mit maximal 100 m eingezeichnet, was eher eine untere Grenze darstellt, weil die volumetrische Kompression an dieser Stelle immer noch grösser als die kurvimetrische ist.

Der abtauchende Gewölbescheitel birgt einige kleine Störungen, die jedoch alle steil stehen und deshalb nicht als Überschiebung interpretiert werden können (vgl. Malm-Nordschenkel). Sie müssen vielmehr als alte (rheintalische) Abschiebungen gedeutet werden. Der Bruch von Derrière Château stellt dabei eine ca. E-W streichende Abschiebung dar, bei der sich der Nordteil um ca. 50 m gesenkt hat. Dies erklärt die Lamelle von Natica-Schichten im Westteil der verkarsteten Hochfläche von Haut du Droit. Ein kleiner Bruch, der bei Punkt 918 die Mumienbank abschneidet, ist vielleicht die Fortsetzung dieser Störung. Eine weitere Störung vermute ich in der Combe, die von Punkt 918 gegen NNE die Forêt de l'Aimery quert. Sie äussert sich dadurch, dass auf die St-Ursanne-Formation fast sofort Verena-Oolith folgt, so dass die Natica-Schichten und die Hauptmumienbank versetzt erscheinen. Es könnte sich ebenfalls um eine kleine rheintalische Abschiebung handeln, deren Fortsetzung im S eventuell im Bruch von Peute Côte zu suchen wäre. Der kleine Bruch von Haut du Droit scheint auch rheintalischer Anlage zu sein, allerdings mit abgesenktem Ostteil (ca. 20 m). Alle diese Störungen sind während der Faltung wahrscheinlich reaktiviert und verbogen worden, wie ich dies auf Profil 588 für den Bruch von Derrière Château darzustellen versucht habe.

Der Malm-Südschenkel dieses Abschnittes ist im W sehr regelmässig gebaut. Das dokumentiert insbesondere die gut verfolgbare Mumienbank mit einem fast gleichbleibenden Südfallen von ca. 35°. Schwierigkeiten bereitet hier der anomal breite Ausbiss des Verena-Oolithes bei Dos les Ordons. Die Zone ist zwar zu schlecht aufgeschlossen, um genaue Aussagen zu machen, doch vermute ich eine disharmonische Fältelung, wie sie weiter im E nachweisbar ist. Als lokales Anzeichen dafür kann gewertet werden, dass sich im Trockental N Punkt 686 in den Kimmeridge-Kalken ein ganz flaches Südfallen von ca. 20° nachweisen lässt, bereits 50 m tiefer jedoch eine steile Lagerung angetroffen wird. Ein ähnlich steiles Segment tritt weiter östlich, N Punkt 719, auf einer Höhe von 850 m zutage. Etwas westlich davon findet sich im Kimmeridge eine kleine Lamelle von Verena-Oolith, die als enger Antiklinalkern einer disharmonischen Falte gedeutet werden kann. Im übrigen ist man auf eher schwache morphologische Argumente angewiesen, indem die Abflachung der Pâturage sur les Rangs in den kompetenten Formationen des oberen Malms einer Erklärung bedarf. Möglicherweise besteht ein Zusammenhang der disharmonischen Fältchen mit dem scharfen Umbiegen des Südschenkels. Der allmähliche Anstieg dieses Scharniers von W nach E mag dafür verantwortlich sein. Er lässt sich auch im E anschliessenden Abschnitt verfolgen.

Der ganze Hangfuss des Südschenkels ist gekennzeichnet durch starkes Hangkriechen und Hakenwerfen, wodurch die Kimmeridge-Kalke bis 20° N überkippt sind. Weiter ist der Kontakt zum Tertiär durchwegs verhüllt. Dieses lässt sich auch im Innern der Mulde von Soultz nur lokal durch die entsprechende Morphologie feststellen.

Alle drei Profile weisen in der Tiefe des Nordschenkels im Scharnier eine Disharmonie auf, die dem Dogger gegenüber dem Malm eine zusätzliche Kompression verschafft. Dafür waren vor allem Bedürfnisse der volumetrisch-kurvimetrischen Konkordanz massgebend. Im Südschenkel sind die an der Oberfläche festgestellten disharmonischen Fältchen nur in Profil 588 auch im Dogger angenommen worden, während sie sich in Profil 589 und 590 auf den Malm beschränken. Dies soll den Zusammenhang zu der grösseren disharmonischen Falte in Profil 587 erbringen. Der Abscherhorizont weist durchgehend einen negativen Sockelsprung auf (vgl. Fig. 2). Als Folge davon treten im Lias und oberen Muschelkalk vermutlich «chaotische» Strukturen auf, wie sie von LAUBSCHER (1962) postuliert worden sind (vgl. Abschnitt d).

d) *Abschnitt Les Fouchies – Punkt 1106 (Halbklus von Mont Dessus)*

Profile 591, 592 (Fig. 5)

Dominiert wird dieser Abschnitt durch das ca. 10° bis 15° betragende, axiale Ansteigen des Doggerkernes. Das äussert sich im Zutagetreten immer tieferer Schichten gegen E, so der Acuminata-Schichten bei Grande Côte und von unterem Dogger im Bachtobel von Mont Dessus. Ausserdem tritt eine grössere Störung auf, nämlich der bereits von ELBER (1920) beschriebene Bruch von Mont Dessus. Die Bruchfläche steht an der Oberfläche senkrecht und versetzt im Bach Acuminata-Schichten im S gegen unteren Dogger im N. Nach W lässt sich die Störung nicht mehr weiter verfolgen, wohl aber nach E, wo bei Punkt 1106 Acuminata-Schichten im N an Oxford-Tone im S stossen. Weiter im E verläuft sie wahrscheinlich nur in den Oxford-Tonen und bleibt unsichtbar. Kompliziert wird die Situation bei Punkt 1106 dadurch, dass die Nordseite der Störung gerade noch ein kleines Gewölbe bildet. Dieses wird von der Erosion fast parallel zu den Acuminata-Schichten geschnitten, so dass sie infolge leichter Wellungen und kleiner Querbrüche mehrfach auftreten. Die grosse Störung wird «en échelon» von weiteren, ähnlich streichenden Brüchen begleitet, die aber nur schlecht zu fassen sind. So werden die Callovien-Schichten der Südflanke W des Bachanschnittes abgeschnitten. Eine zusätzliche, parallel laufende Störung ist hinter dem Neubau des Mont Dessus aufgeschlossen (591.000/239.875), eine weitere scheint noch weiter westlich die Callovien-Schichten gegen den oberen Hauptrogenstein schief abzusetzen. Jedoch ist die ganze Wiesenzone des Mont Dessus zu schlecht aufgeschlossen, um die genaue Lage abzuklären.

Die Deutung dieser steilen Störung hat grosse Mühe bereitet. Da das Streichen recht gut mit dem der Falte übereinstimmt, habe ich versucht, sie als frühe Rücküberschiebung zu interpretieren, die nachträglich verfaltet wurde. Das liess sich jedoch mit der an der Oberfläche beobachteten Lage der Bruchfläche und auch mit der Forderung nach volumetrisch-kurvimetrischer Konkordanz nicht vereinbaren. Deshalb wurde sie als rheintalische Abschiebung interpretiert, die bei der Faltung etwas reaktiviert wurde. Der Nordschenkel des Doggerkernes wird mit grosser Wahrscheinlichkeit unter den Oxford-Tonen von einer Überschiebung betroffen, welche weiter im E in der Halbklus von Châtillon zutage tritt. Der Überschiebungsbetrag ist hier vermutlich noch sehr klein.

Der Fuss des Malm-Nordschenkels dieses Abschnittes ist im Gegensatz zu den westlichen Abschnitten frei von grossen Malm-Rutschmassen. Das Aufbiegen der Kimmeridge-Kalke von ca. 10° N zu ca. senkrechter Stellung lässt sich ausgezeichnet verfolgen. Die Formationen des Malms weisen keine Divergenz mehr auf zwischen der St-Ursanne-Formation und dem oberen Malm. Deshalb und wegen des Fehlens von Rutschmassen glaube ich, dass die weiter im W beschriebene Überschiebung hier bereits ganz ausgeklungen ist und sich die weiter E folgende Überschiebung von Choindez noch nicht genügend entwickelt hat. Diese ist auf Profil 591 mit kleinem Betrag gerade noch angedeutet. Das Tertiär des Delsberger Beckens ist fast durchgehend tiefgründig verwittert, nur die Molassekante von L'Essert lässt sich mit einiger Sicherheit verfolgen.

Im aufsteigenden Malm-schenkel entwickelt sich nun eine neue Struktur, indem die St-Ursanne-Formation des Forêt de Vainé und des Montenol auf einer Höhe von 800 bis 900 m eine sich nach E ständig verbreiternde Plattform bildet, die mit ca. 25° gegen N fällt. Im Profil 592 knickt sie auf einer Höhe von 750 m steil nach Norden ab, während auf 950 m gerade noch ein neues Aufbiegen von zu ca. 60° festzustellen ist. In Verbindung mit der Überschiebung im Dogger beginnt sich darunter ein neuer Doggerkern zu entwickeln, der weiter im E als «Vellerat-Kern» den «Fouchies-Kern» (BUXTORF 1909) ablöst.

Der Malm-Südschenkel ist bei weitem komplizierter gebaut. Besonders auffällig ist eine ganze Reihe von Querstörungen, im Gebiet SE von Mont Dessus, die vor allem in der Versetzung der

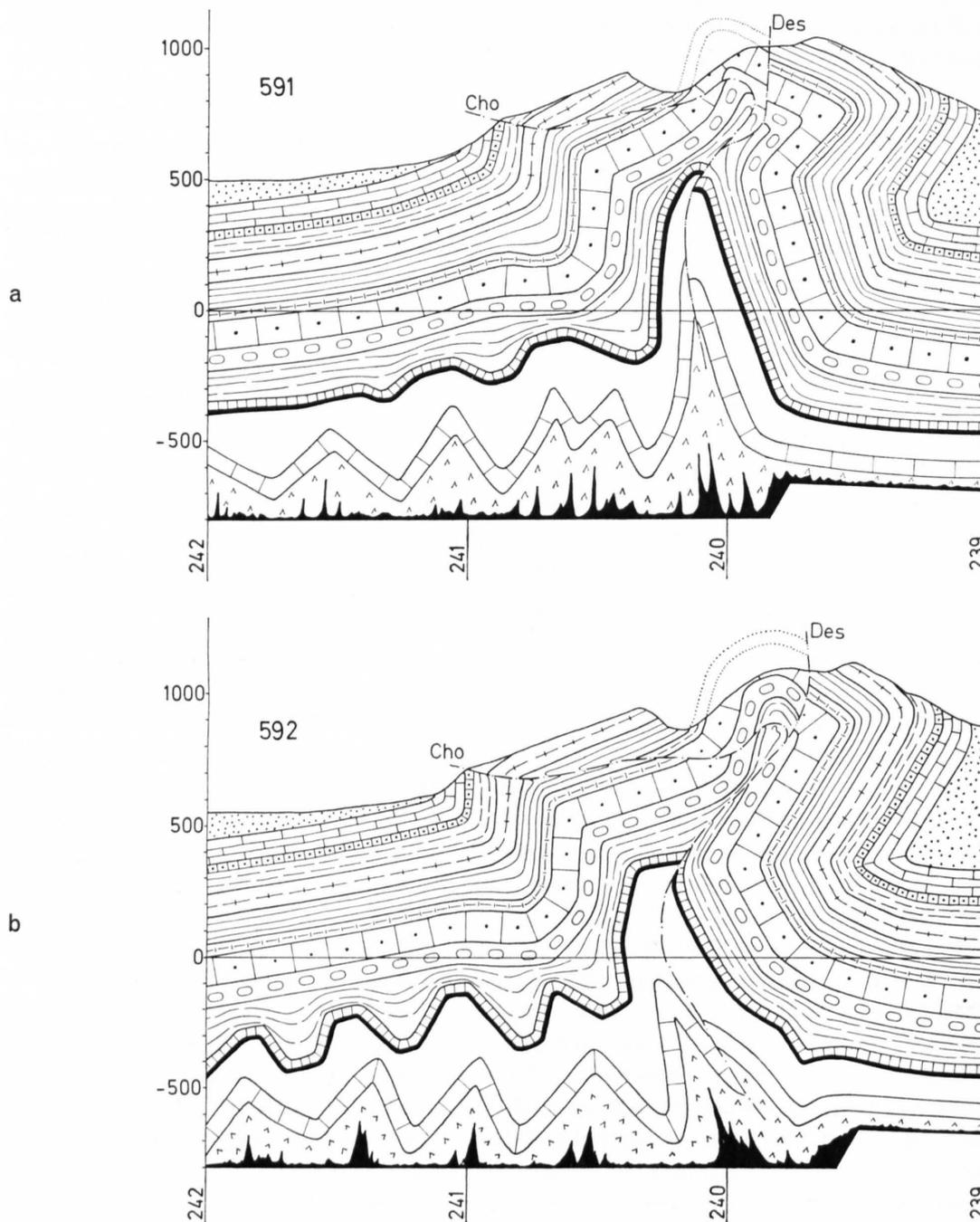


Fig. 5: Geologische Profile Abschnitt Les Fouchies – Punkt 1106, Ordinaten 591 und 592 (a, b). Legende vgl. Fig. 3.

Mumienbank festgestellt werden konnten (Brüche von Folpotat). Die westliche Begrenzung dieses Bruchbündels bildet eine Störung, die ihren morphologischen Ausdruck in der grossen Combe findet, die den Südschenkel S von Mont Dessus quert. W dieser Combe vermute ich eine disharmonische Falte im Verena-Oolith, die durch ein Nordfallen belegt ist. Wie schon in Abschnitt c) beschrieben, steigt der scharfe Knick im Südschenkel in axialer Richtung rasch an. Er erreicht in diesem Abschnitt S von Punkt 1106 eine Höhe von ca. 1050 m. Es war nicht zu entscheiden, ob dieser rasche Anstieg mit dem erwähnten Bruchbündel im Zusammenhang steht, in dem Sinne, dass sich die Höhenlage des Knickes an den Brüchen sprunghaft änderte. Die Brüche liessen sich nur schlecht weiterverfolgen. Auf dem aus Kalken der St-Ursanne-Formation gebildeten Kamm konnten einige Störungen festgestellt werden, und ich vermute darin die Fortsetzung einiger Brüche des Bündels.

Die Aufschlussverhältnisse der Südflanke erlaubten keine genauere Lokalisierung der Störungen, insbesondere waren sie der kleintektonischen Analyse nicht zugänglich. Ich vermute aber, dass sie in Wirklichkeit dichter aufeinander folgen als dargestellt. Die Brüche lassen sich als sinistrale Blattverschiebungen deuten, mit grösserer Kompression auf der Ostseite. Eine solche Zunahme der Kompression nach E ist auf Karte und Profilen durchaus ersichtlich: sie äussert sich im axialen Anstieg des Doggergewölbes. Die auf den Profilen messbaren Kompressionsbeträge steigen von 1,5 km (590) auf 1,6 km (591) und 1,8 km (592) an.

Auch in diesem Abschnitt ist der Hangfuss des Südschenkels durchwegs von Gehängeschutt verhüllt. Es liess sich deshalb nicht feststellen, ob der Schenkel tatsächlich überkippt ist, wie in den Profilen eingezeichnet. Diese Überkipfung war jedoch notwendig, um die volumetrisch-kurvimetrische Konkordanz zu erreichen; sie ist sicher möglich, in Anbetracht der senkrecht stehenden Kimmeridge-Kalke. Andererseits sind dagegen die Nordfallen an dieser Flanke auf Hakenwerfen zurückzuführen.

Die Tertiärzone der Synklinale von Soule ist hier weitgehend von Schuttmassen bedeckt, verrät sich jedoch oft morphologisch durch typische Solifluktionböden. Sie verengt sich sehr rasch gegen E, da die Überschiebungen der Raimeux-Antiklinale zunehmend weiter nach N vorstossen. Diese Überschiebungen sind weiter im W, bei Les Prés Dessus, gut zu beobachten. Im Südhang des Tales sticht dort eine markante Kimmeridge-Platte hervor, die mit ca. 20° S einfällt und ihrerseits von Tertiär bedeckt ist (vgl. Blockdiagramme). Es herrschen nur geringe Zweifel, dass diese auf das Tertiär der Mulde aufgeschobene Platte eine Art «Chaluet»-Situation darstellt, also als grosse, verbogene Überschiebung der Raimeux-Antiklinale zu deuten ist. Zusätzlich wird die Platte von einer zweiten, höheren Überschiebung überfahren, wie dies bei Sur le Plain gut zu beobachten ist (Überschiebung von La Combe). Diese überfährt bei Punkt 795 wahrscheinlich diejenige von Prés Dessus, so dass auf einige Kilometer nach E nur noch eine Überschiebung festgestellt werden kann.

Was die Tiefenstruktur des Nordschenkels betrifft, so ist vor allem auf das nach den seismischen Befunden zu fordernde, relativ steile Einfallen von 10° N hinzuweisen (vgl. p. 42). Die Profilkonstruktion legt eine Fortsetzung des disharmonischen Verhaltens des Doggers sowie des negativen Sockel-sprunges nahe. Im Scheitel ist die steile und als präexistent gedeutete Störung von Mont Dessus nur bis zur Überschiebung von Choindez gezeichnet, weil ihre im Süden gebliebene, tiefere Fortsetzung im Bereich des inkompetenten Intervalls Opalinus-Tone – Muschelkalk kaum voraussagbar ist. Dies besonders deshalb, weil die Kompression des engen Doggergewölbes derart gross ist, dass Lias und Muschelkalk eine eigene Stockwerktektonik aufweisen sollten: die intensive disharmonische Verfäلتung, insbesondere unter der schwach rotierten Platte des N Vorlandes ergibt sich aus dem Prinzip der gleichen Schichtlänge.

e) *Abschnitt Punkt 1106 – Entre Douvelie (Halbklus von Châtillon)*

Profile 592, 593, 594 (Fig. 5, 6)

Im Bereich der Halbklus erreicht die Falte die grösste axiale Erhebung. Der Doggerkern ist in der Forêt des Vieux Ponts bis auf die Opalinus-Tone aufgerissen. Im Dogger-Nordschenkel kann man die bereits erwähnte Überschiebung von Forêt des Vieux Ponts gut feststellen. Im Dach steht auf einer Höhe von 780 m 15° nordfallender oberer Haupttrogenstein an. Ca. 80 m weiter im N findet sich

bachabwärts ein Aufschluss von Callovien-Tonen auf einer Höhe von 750 m. Sie liegen zu tief und sind wahrscheinlich von Hauptrogenstein überschoben. Diese Überschiebung lässt sich nach E und W nur einige hundert Meter weit verfolgen und verschwindet dann unter Schuttmassen. Eine neue Störung unterbricht dann den scharf aufgebogenen Dogger-Nordschenkel auf einer Höhe von 890 m. Sie lässt sich am einfachsten als die gegen S aufgefaltete Fortsetzung der tieferen Überschiebung denken. Der Südteil der steilstehenden Dogger-Serie im Bach wäre nach dieser Interpretation ein tektonisches Fenster mit allerdings nicht exakt fassbarer Begrenzung. Die Existenz der Überschiebung ist zu folgern aus der Versetzung der Korallen- und Acuminata-Schichten auf der Ostseite des Baches. Diese Versetzung tritt an einer deutlichen Verflachung auf einer Höhe von 890 m, beidseitig des Baches, auf.

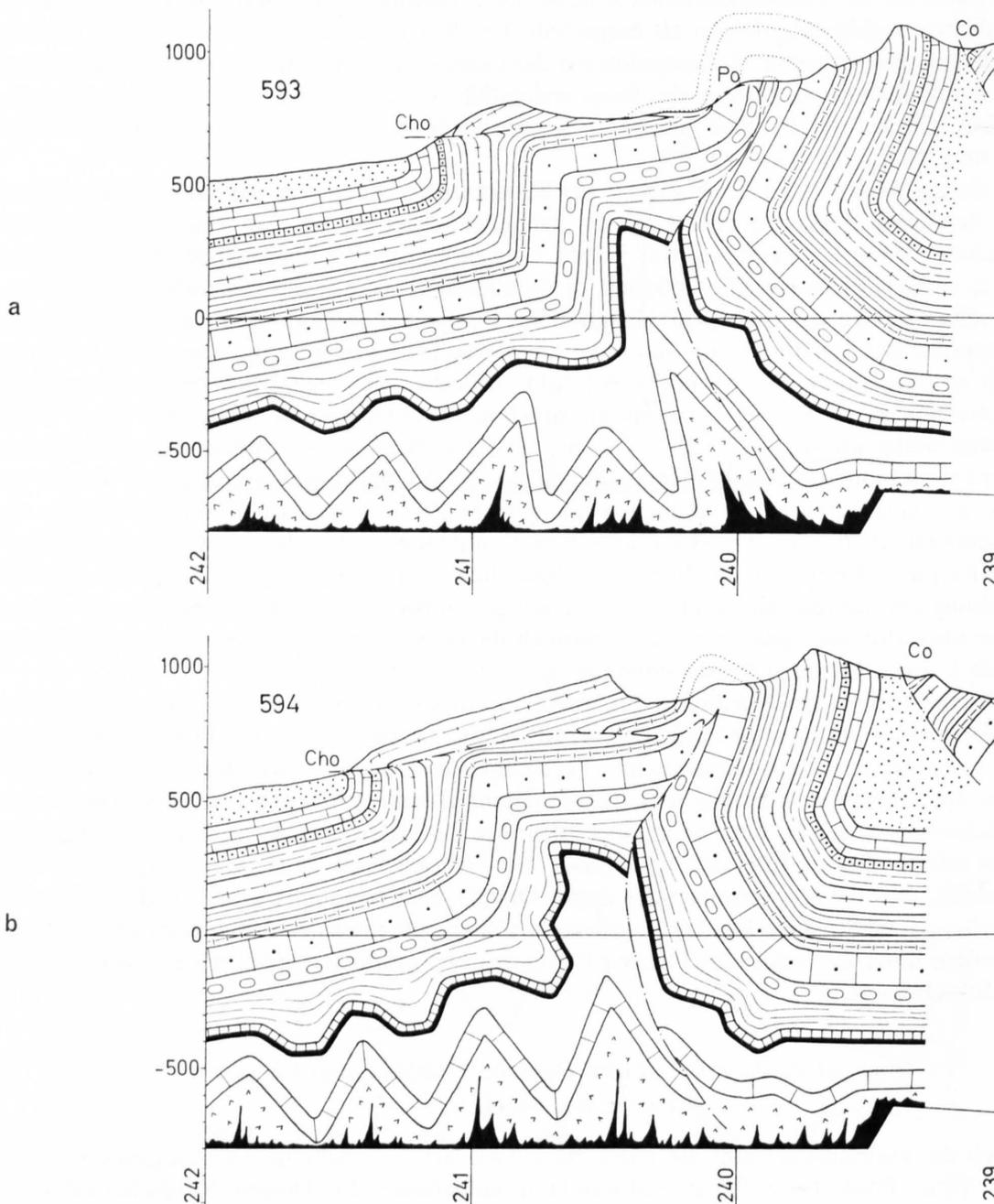


Fig. 6: Geologische Profile Abschnitt Punkt 1106 – Entre Douvelie, Ordinaten 593 und 594 (a, b). Legende vgl. Fig. 3.

Der Dogger-Südschenkel ist an der tiefsten Stelle unterbrochen, vermutlich wegen einer grossen Sackung, deren Hauptrogenstein-Anteil noch teilweise in der Rutschmasse von Punkt 895 zu suchen sein dürfte. Westlich der Lücke lässt sich seine Lage am Verlauf der Acuminata-Schichten gut verfolgen. Alle tieferen Formationen sind schlecht aufgeschlossen, dürften aber von einer WNW streichenden Störung schief abgeschnitten sein. Jedenfalls kann auf einer Höhe von 900 m in der Forêt des Vieux Ponts nur noch oberer Hauptrogenstein festgestellt werden, und nach Morphologie und Verlehmung zu urteilen, folgt alsbald unterer Dogger. Ich habe diese Störung den weiter im Westen liegenden, steilen Scheitelstörungen von Mont Dessus zugeordnet, zumal sie sich, zwar mit kleinem Versetzungsbetrag, über die Kante des sich schliessenden Doggergewölbes im Westen verfolgen lässt und sich dann im Abhang der Haute Joux verliert.

Der Ostteil des Dogger-Südschenkels wird von einem namentlich morphologisch hervortretenden Bruch begrenzt, der sich auch im Malmschenkel gut feststellen lässt. Da er im Dogger-Nordschenkel nicht zu finden ist, vermute ich darin eine Struktur, längs der zusätzliche Massen nach N in den Kern transportiert worden sind (vgl. Malm-Südschenkel). Im übrigen ist das mit ca. 15° nach E abtauchende Doggergewölbe (Fouchies-Kern) ungestört, die Acuminata-Schichten lassen sich über den ganzen Scheitel gut verfolgen.

Der Malm-Nordschenkel biegt aus dem Becken von Delsberg ähnlich wie weiter im W knickartig auf. Er kippt dann auf einer Höhe von 730 m in der Schlucht S von Châtillon scharf nach S über, und aus dieser scharfen Knickzone entwickelt sich weiter nach E sehr rasch die Überschiebung von Choindez. Diese ist in der Forêt de la Cendre am sukzessiven Verschwinden aller höheren Malm-Formationen unter die St-Ursanne-Formation gut erkennbar. Die südlich anschliessende, flacher geneigte Platte (St-Ursanne-Formation) verbreitert sich bei dieser Lokalität enorm, was auf einen bereits gut entwickelten Vellerat-Doggerkern darunter deutet.

Der Malm-Südschenkel ist auch hier noch, wie weiter im W, von vielen Querstörungen betroffen, die sich aber der schlechten Aufschlüsse wegen oft nur vermuten lassen. Zwei davon setzen sich vermutlich bis in den Dogger-Südschenkel fort (E Punkt 1106). Die kinematische Rolle dieser Brüche ist nicht ganz klar. Da alle bis auf den östlichsten (vgl. Kartenskizze, Tafel I) einen sinistralen Sinn haben, könnte es sich um Linien handeln, längs denen auf der Ostseite zusätzliche Massen nach N verschoben wurden. Der östlichste Bruch zeigt im Kartenbild einen dextralen Verschiebungssinn. Es besteht die Möglichkeit, dass dieser Bruch im umgekehrten Sinne gewirkt hat: östlich des Bruches sind Massen im S zurückgeblieben. Das würde bedeuten, dass die axiale Kulmination zwischen 592 und 593 liegt. Das recht breite Doggergewölbe des Le Blanc Rocher lässt aber auch die Möglichkeit zu, dass die axiale Kulmination, und damit die grösste Kompression, E von 593 zu suchen ist. In diesem Falle wäre der grosse Bruch nur scheinbar dextral und hätte in Wirklichkeit in sinistralen Sinne gewirkt. Durch die Auffaltung kann dabei ohne weiteres ein derartiges Kartenbild entstehen.

Das Tertiär der Mulde von Soulce verschwindet nun bis auf eine ganz schmale, aus seismischen Befunden zu folgernde Zone von 40 m Breite, unter der Überschiebung von La Combe (vgl. Abschnitt d). Dadurch wurde der schmale Rest der «Synklinale» von La Combe vor Erosion geschützt, und so erklärt sich ihre Hochlage. Der überschobene Nordschenkel der Raimeux-Antiklinale muss in der Tiefe immer noch die zweite, wahrscheinlich grössere Überschiebung von Les Prés Dessus bergen. Es besteht jedenfalls kein Grund, die Tiefenlage der Mulde von Soulce wesentlich zu ändern, und so ergibt sich der in den Profilen eingezeichnete Tertiärsack.

f) *Abschnitt Entre Douvelie – Sur Montchemin (Klus von Choindez)*

Profile 594, 595, 596, (Fig. 6–8)

Im Dogger dieses Abschnittes vollzieht sich die endgültige Ablösung des bereits voll entwickelten Vellerat-Kernes vom Fouchies-Kern. Die dabei auftretenden tektonischen Komplikationen liessen sich der mangelnden Aufschlussverhältnisse wegen nicht ganz abklären, doch halte ich die auf der Serie von Detailprofilen (Fig. 8) dargestellte Lösung für die einfachste mit den Befunden zu vereinbarende. Das noch bei Entre Douvelie vollständige, wenn auch enge Fouchies-Gewölbe verschwindet

bei L'Ordon Noé, NE Punkt 725. Hundert Meter NW dieses Punktes ist am Weg nach Vellerat eine Störung aufgeschlossen, an der südfallender Haupttrogenstein, vermutlich des Fouchies-Kernes, auf ebenfalls südfallenden Calcaire roux sableux eines kleinen, zerdrückten Zwischengewölbes aufgeschoben ist. Dieses weist bei Punkt 689 noch Calcaire roux sableux in seinem Nordschenkel auf, ist aber weiter E, im Bacheinschnitt von Sous le Rochet, mit südfallendem Haupttrogenstein auf steil südfallenden Calcaire roux sableux des Vellerat-Gewölbes aufgeschoben. Diese Überschiebung lässt sich als stark verbogene, in den Südschenkel eingefaltete Fortsetzung der Überschiebung von Choindez denken. Ebenso kann sie mit der Überschiebung der Forêt des Vieux Ponts in Zusammenhang gebracht werden, wie das in den Profilen dargestellt ist. Östlich der Klus ist nur noch das rasch abtauchende Ende des Zwischengewölbes vorhanden (Profil 596). Der Dogger des Vellerat-Gewölbes selbst ist im übrigen sehr regelmässig. Allerdings sind die abtauchenden Schenkel leider entweder verbaut, oder von Schutt verhüllt.

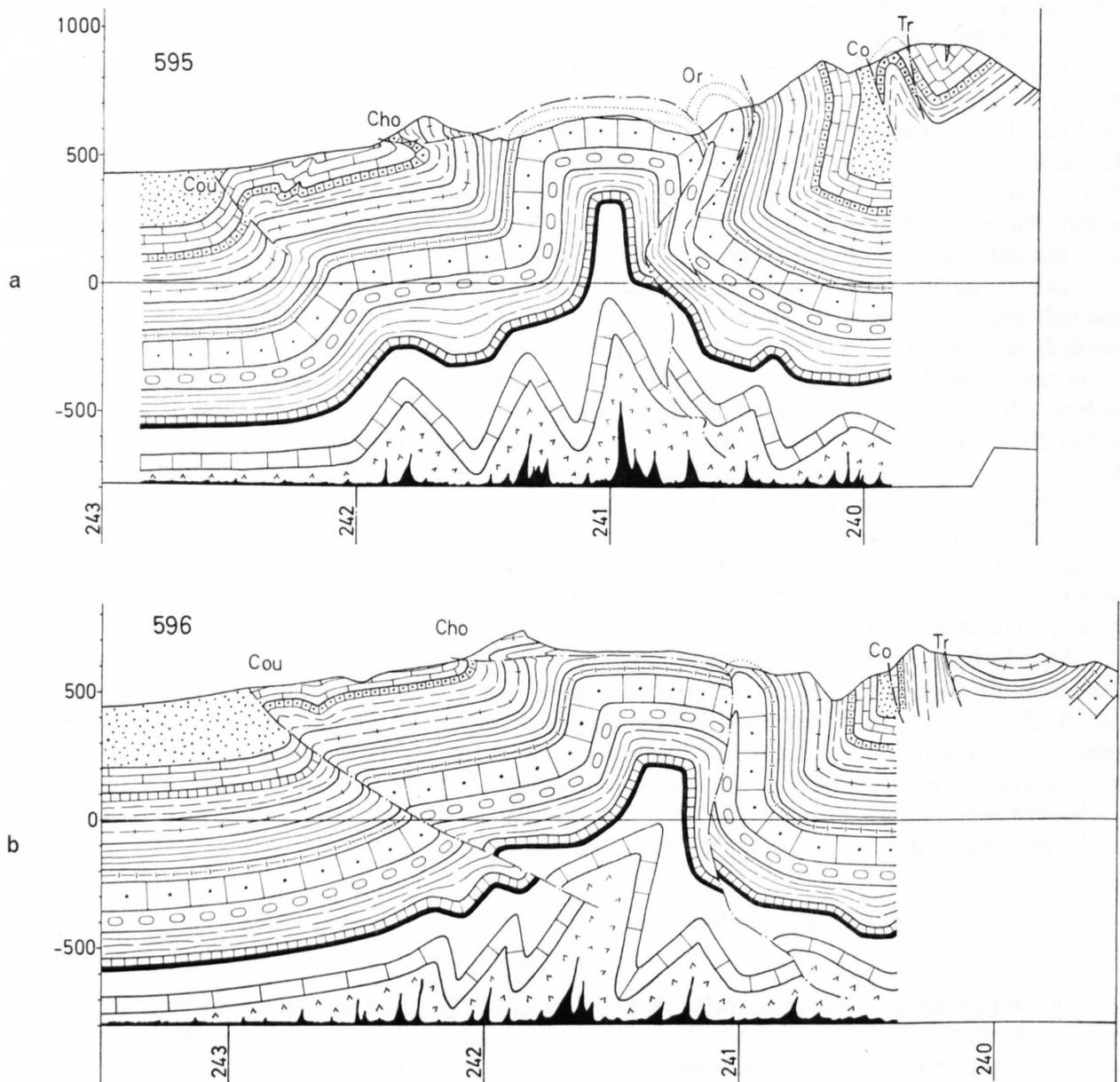


Fig. 7: Geologische Profile Abschnitt Entre Douvelie – Sur Montchemin, Ordinaten 595 und 596 (a, b). Legende vgl. Fig. 3.

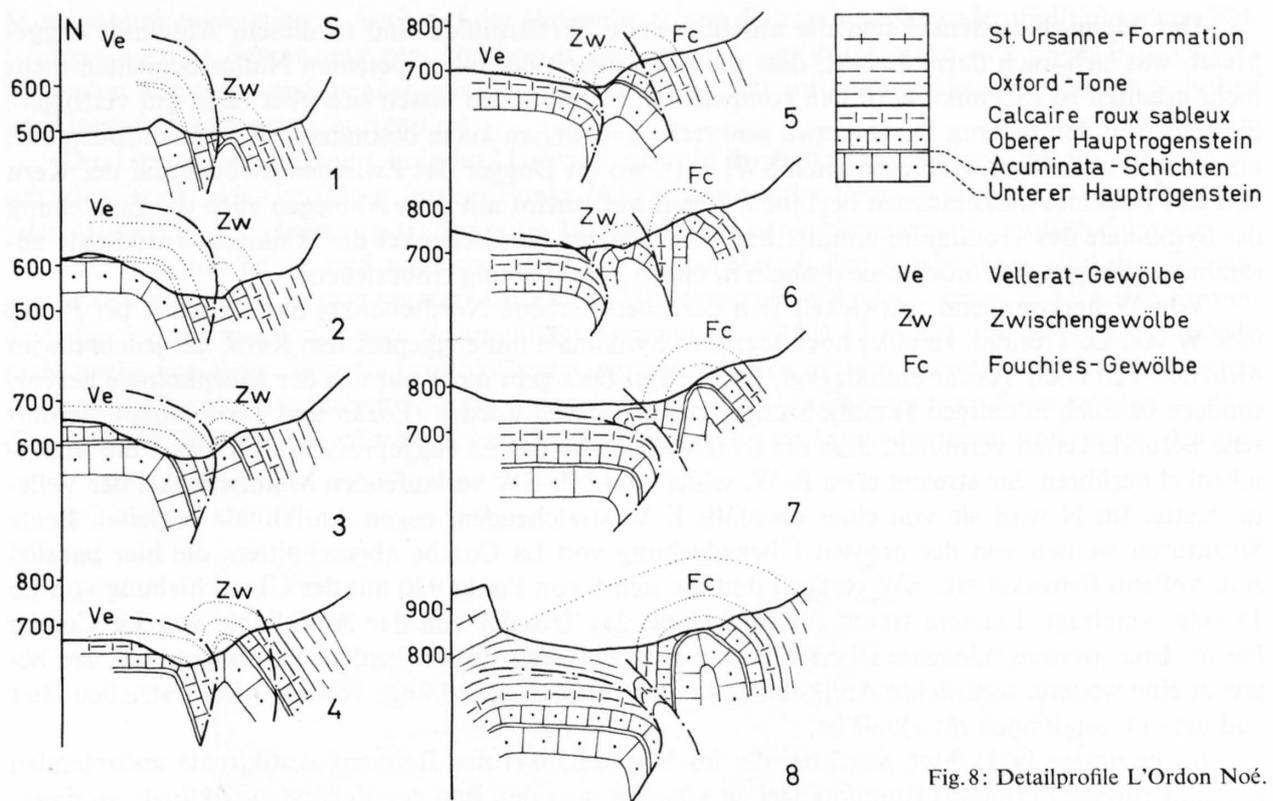


Fig. 8: Detailprofil L'Ordon Noé.

Der Malm-Nordschenkel dieses Abschnittes wird von der schon lange bekannten Überschiebung von Choindéz betroffen. Sie ist auf beiden Seiten der Klus ausgezeichnet erkennbar, im W auf einer Höhe von ca. 570 m, im E auf ca. 630 m. Dieser Anstieg gegen E setzt sich weiter fort, bis auf eine Höhe von 690 m an der Kante der Trockenklus von Rebeuvelier. Die Überschiebung ist etwas verbogen: über dem Steinbruch NW des Bahnhofs Choindéz fallen auf einer Höhe von 570 m schöne Scherflächen mit 10° N. Die Basis der überschobenen St-Ursanne-Kalke liegt noch tiefer, auf 550 m. In den höheren Malm-Formationen, über den Natica-Schichten, sind keine derart glatten Scherflächen zu beobachten, vielmehr scheint der Verena-Oolith durch eine Schleppung deformiert zu sein. Vielleicht sind untergeordnete Scherflächen auch durch den Faltungsvorschub zerrissen, wie das in Profil 595 angedeutet ist. Jedenfalls ist anzunehmen, dass die Überschiebung als ganzes durch Schichtgleiten in die heutige Lage geraten ist. Sie muss aber auch während oder nach der Faltung noch betätigt worden sein, da sie die Schichtköpfe über dem Steinbruch glatt durchschneidet. Wie bereits erwähnt, bildet sie vermutlich die kinematische Fortsetzung der Doggerüberschiebung. Das würde bedeuten, dass die Oxford-Tone unter einem sehr kleinen Winkel geschnitten werden, ja eigentlich als Abscherhorizont auf höherer Ebene gedient haben (vgl. Profil 596).

Der liegende Schenkel taucht zunächst mit einem scharfen Knick in das Becken von Delsberg ab, verbleibt dann aber bis zu den Häusern von Courrendlin in einer seltsamen Hochlage und bildet ein morphologisches Plateau, das vorwiegend aus Kimmeridge-Kalken besteht. Dieses taucht seitlich nach W rasch unter das Tertiär und ist bereits bei Les Essertlats von Molasse bedeckt. Mindestens ein Teil dieses morphologischen Plateaus ist in Kleinfalten von geringer Abschertiefe gelegt, wie in einem Steinbruch längs der Hauptstrasse und längs der Bahnlinie gut zu beobachten ist. Auch weiter im Osten, auf dem Plateau von Le Bambois lassen sich derartige Fältelungen nachweisen. Die NW-Begrenzung des Kimmeridge-Plateaus gegen das Becken von Delsberg ist vermutlich eine Überschiebung, angedeutet durch das flexurartige Abtauchen des Malms in Courrendlin (Überschiebung von Courrendlin).

Der Malm-Südschenkel und die anschliessende Tertiärmulde sind in diesem Abschnitt enggepresst, was sich auch darin äussert, dass die Mächtigkeit der inkompetenten Natica-Schichten nicht mehr erhalten ist (S Punkt 475). Die kompetenten Formationen lassen sich aber recht gut verfolgen. Sie stehen in den tieferen Partien etwa senkrecht und weisen keine besonderen Komplikationen auf, ausser dem auffälligen Abbiegen nach SW, dort, wo im Dogger das Zwischengewölbe und der Kern von Les Fouchies aufzutauchen beginnen. Irgendwie scheint mit dem Abbiegen auch die Entstehung der Synklinale des Trondai im unmittelbar benachbarten Nordschenkel der Raimeux-Antiklinale zusammenzuhängen; ich möchte sie deshalb in meine Beschreibung einbeziehen.

Von W herkommend, entwickelt sich der überschobene Nordschenkel des Raimeux bei Punkt 936, W von Le Trondai, zu einer hochliegenden Synklinale mit enggepresstem Kern, der jedenfalls im östlichen Teil noch Tertiär enthält (vgl. Profil 595). Dies geht nicht nur aus der Morphologie hervor, sondern ist auch in einigen Handbohrungen nachgewiesen worden (Eozän und Terre jaune). Seismische Befunde lassen vermuten, dass die Synklinale im E-Teil so enggepresst ist, dass sich die Malm-schenkel berühren. Sie streicht etwa E-W, schief zum NE-SW verlaufenden Malmschenkel der Vellerat-Kette. Im N wird sie von einer ebenfalls E-W streichenden, engen Antiklinale begleitet. Beide Strukturen werden von der grossen Überschiebung von La Combe abgeschnitten, die hier parallel zum Vellerat-Schenkel NE-SW verläuft und die sich S von Punkt 920 mit der Überschiebung von Le Trondai vereinigt. Letztere trennt die Synklinale des Trondai von der Antiklinale von La Combe Pierre. Eine weitere, kleinere Überschiebung tritt zwischen diesen beiden Strukturen auf; sie begrenzt eine weitere, zerdrückte Antiklinale, die sich nur auf einer Länge von ca. 1 km feststellen lässt und deren Gestalt noch rätselhaft ist.

Im gesamten betrachtet, scheinen die im Nordschenkel der Raimeux-Antiklinale auftretenden Komplikationen (Trondai) Raumangel zu schaffen, was den Bau der Vellerat-Antiklinale an dieser Stelle stark beeinflusst: die Umbiegung nach NE, die Ablösung der Doggerkerne, ja sogar die Kleinfalten im nördlichen Vorland mögen damit zusammenhängen. Wahrscheinlich verdankt der ganze «en échelon»-Kleinfaltengürtel seine Entstehung der Linie von Vicques.

Die Tiefenstruktur ist in diesem Abschnitt dadurch gekennzeichnet, dass nach Fig. 2 der negative Sockelsprung ganz im S unter der Tertiärsynklinale und unter dem Trondai liegt. Das ist bedingt durch die Divergenz des Streichens zwischen angenommener Sockelstruktur (E-W) und Vellerat-Kette (NE-SW). Die Antiklinale biegt hier so weit nach NE aus, dass an der NW Grenze des Kimmeridge-Plateaus von Courrendlin die vermutete alttertiäre Malmflexur an die Oberfläche gehoben wird. An ihr entwickelt sich gegen E die Überschiebung von Courrendlin. Im Profil 595 ist sie erst angedeutet, während sie im Profil 596 bereits mit einem Betrag von ca. 150 bis 200 m eingezeichnet ist. Im übrigen mussten auch in diesen Profilen grosse Disharmonien in Lias und Muschelkalk angenommen werden, um dem Prinzip der gleichen Schichtlänge gerecht zu werden.

g) Abschnitt *Sur Montchemin – Sur Rosé (Trockenklus von Rebeuvelier)*

Profile 597, 598 (Fig. 9)

Der Doggerkern tritt hier nirgends mehr an die Oberfläche. Die Kompression nimmt rasch ab, zudem biegt das Streichen der Falte immer mehr nach N ab. Parallel dazu entwickeln sich zwei grosse Überschiebungen, die schliesslich das Ende der Falte markieren. Ohne Zweifel wird ein Teil der Kompression auf die Tiergarten-Antiklinale übertragen, die ja nur durch eine seichte Querwelle von der Vellerat-Antiklinale getrennt ist (vgl. Fig. 1). Dies zeigt sich NE von Rebeuvelier, wo im Tälchen noch die Basis der Natica-Schichten auf einer Höhe von 570 m aufgeschlossen ist. Die Kompressionsübertragung scheint ohne kartierbare Blattverschiebung vor sich zu gehen, sie muss sich also eines diffusen Netzes von Kleinverschiebungen bedienen, längs denen sich die Bewegung summiert. Zudem vermute ich, dass die grosse Frontüberschiebung (Überschiebung von Courrendlin) mit ihrer bedeutenden Kompression in der Tiergarten-Antiklinale ihre direkte Fortsetzung findet.

Im Querschnitt der Trockenklus trifft man im Nordschenkel auf ähnliche disharmonische Fäلتungen wie weiter westlich. Besonders eine lässt sich bei Sous Rosé, auf der Ostseite, dank der

Mumienbank auskartieren. Auch auf der Westseite zeigen die rasch wechselnden Fallrichtungen Faltungen an. Die Begrenzung zum Delsberger Becken wird hier durch einen sich gegen E rasch verstellenden Kimmeridge-Schenkel gebildet, der bei Punkt 500 auf vermutliches Miozän überschoben ist (Überschiebung von Courrendlin).

Die Überschiebung von Choindez lässt sich, obwohl ihr Betrag rasch abnimmt, bis auf die Ostseite der Trockenklus verfolgen, wo bei Punkt 743.7 steilstehender Verena-Oolith unter etwa horizontalen Humeralis-Schichten angetroffen wird. Im Trockental ist sie allerdings nicht aufgeschlossen.

Im Gewölbescheitel, und zwar vor allem am West-Abbruch der Trockenklus, sind drei Störungen festzustellen. Die grösste versetzt bei Punkt 758 Humeralis-Schichten gegen St-Ursanne-Formation. Die beiden anderen weisen Sprunghöhen von nur ca. 10 bis 15 m auf und lassen sich deshalb nicht weiter verfolgen. Wie das Profil 597 zeigt, versuchte ich sie als alte, rheintalische Abschiebungen zu deuten. Obwohl ihre Streichrichtung wahrscheinlich durch die Faltung beeinflusst worden ist, fällt die Übereinstimmung mit dem Streichen der Vicques-Linie auf. Möglicherweise sind sie ein direkter

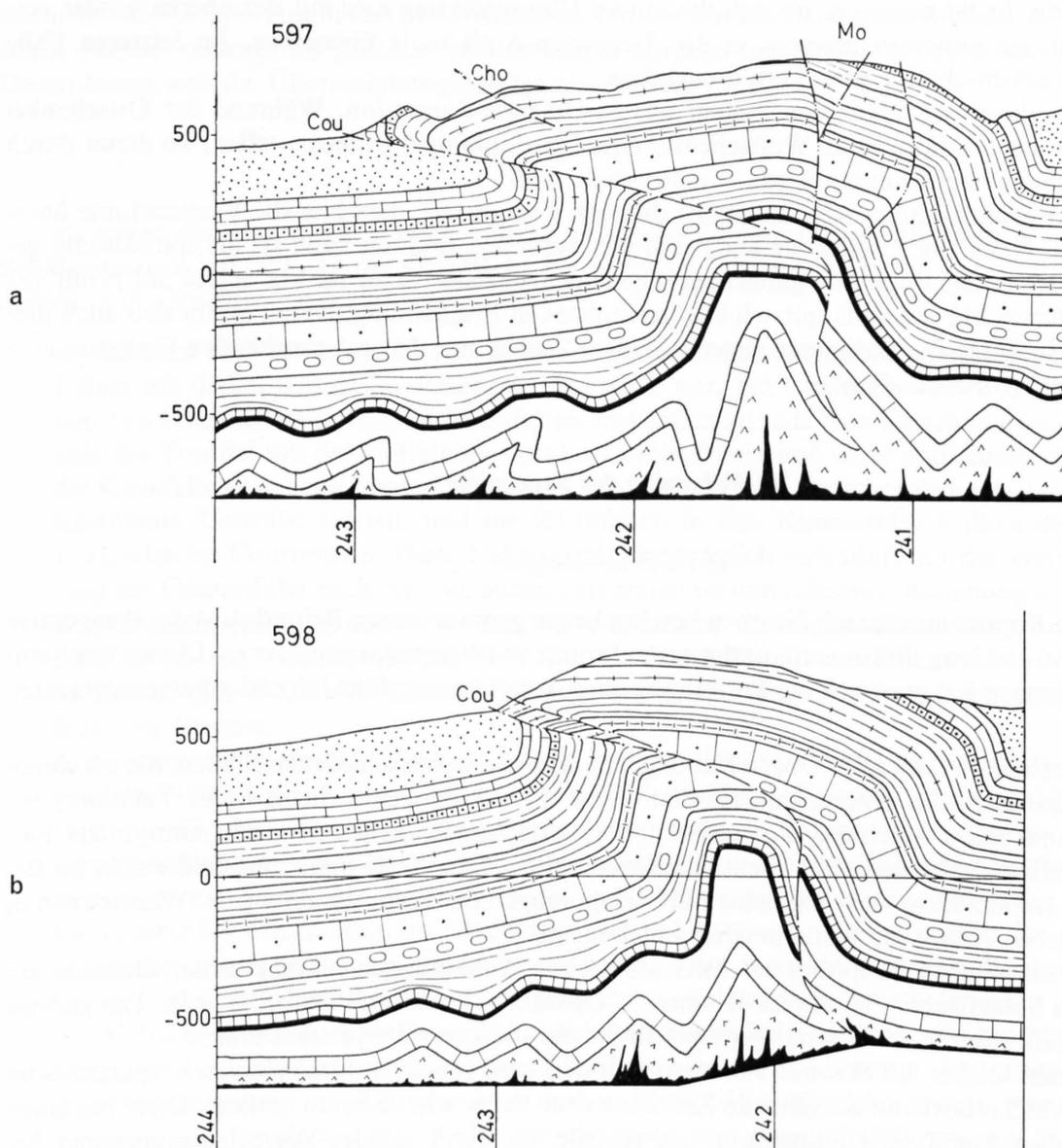


Fig. 9: Geologische Profile Abschnitt Sur Montchemin – Sur Rosé, Ordinaten 597 und 598 (a, b). Legende vgl. Fig. 3.

Ausdruck dieser alten Störungslinie. Nach E lässt sich keine Fortsetzung des grössten Bruches finden, dagegen könnte die Mumienbank bei Punkt 833.5 davon unterbrochen sein.

Der Südschenkel ändert längs der Côte de Chaux sein Südfallen von ca. 70° bei La Verrerie bis 40° bei Rebeuvelier. Gleichzeitig verbreitert sich die Tertiärsynklinale beträchtlich. Leider sind die Aufschlussverhältnisse zu schlecht, um in der Bucht von Rebeuvelier den Kontakt zum Tertiär zu sehen. Auch ist die Mächtigkeit der Kimmeridge-Kalke unsicher.

Die auffälligste und rätselhafteste Struktur dieses Abschnittes ist jedoch die etwa N-S streichende «Antiklinale» der Forêt de Rosé, die mit zwei E-W streichenden Überschiebungen an das Delsberger Becken grenzt. Diese schliessen am Fusse der Forêt de Rosé ein Zwischenelement ein, bestehend aus sehr tektonisiertem Kimmeridge-Kalk und Verena-Oolith. Der Verlauf der unteren Überschiebung (Ü. von Courrendlin) lässt sich nicht genau festlegen, weil die Bergsturzmassen südlich von Vicques den Kontakt zum Tertiär verhüllen. Um so besser kann man die obere fassen. Sie scheint sich S von Les Voites von der unteren abzuspalten und quert dann gegen E langsam ansteigend den Hang, bis auf eine Höhe von 660 m, wo sie die Mumienbank des Ostschenkels schneidet. Darauf muss sie nach E rasch abtauchen. Bei Punkt 598.800/242.940 trifft man steilstehendes Kimmeridge auf Molasse überschoben an. Es ist ungewiss, ob sich die untere Überschiebung hier mit der oberen wieder vereinigt oder ob sie weiterhin getrennt in die Tiergarten-Antiklinale übergehen. Im letzteren Falle müsste die Zwischenschuppe auch Tertiär enthalten.

Der Kern dieser «Antiklinale» besteht aus St-Ursanne-Formation. Während der Ostschenkel nur mit ca. 30° nach E fällt, ist im Westschenkel eine Überkipfung dort festzustellen, wo dieser durch die Überschiebung abgeschnitten wird.

Die Tiefenstruktur dieses Abschnittes ist dadurch kompliziert, dass hier die Vicques-Linie überschritten wird. Nach Fig. 2 sollte sie auf Profil 598 auftreten, und ich habe sie als spitzwinklig geschnittene Abschiebung im Sockel gezeichnet. Die entsprechende Flexur im Malm tritt auf Profil 597 ca. bei Koordinate 242 ebenfalls spitzwinklig geschnitten in Erscheinung. Damit ergibt sich auch hier eine relative Hochlage der Sedimente gegenüber dem Sockel, mit den entsprechenden Disharmonien des Lias und des Muschelkalkes.

4. Diskussion der Ergebnisse

a) Vorbemerkungen

In diesem Kapitel möchte ich die oben beschriebenen geometrischen Befunde aus der Perspektive der Faltungsentwicklung diskutieren, und zwar aufgrund von Vorstellungen, wie sie LAUBSCHER¹ entwickelt hat. Danach hat man sich die Entstehung einer Jurafalte ungefähr folgendermassen vorzustellen.

1. Erste Instabilitäten, im allg. Überschiebungen, entstehen an verschiedenen Stellen, die oft durch ererbte geometrische Unregelmässigkeiten (besonders paläogene, rheintalische Tektonik) bestimmt sind. Diese «Keime», die auch schon rotierte Anteile haben können (embryonale Falten mit geringer Abschertiefe), wachsen aufeinander zu. Das lokale Spannungsfeld weicht im Bereich der Keimbildung vom regionalen ab. Umpolungen der Hauptspannungen (Wechsel von σ_2 und σ_3) geben Anlass zu Transversalverschiebungen.
2. Knickzonen nehmen Ursprung an disharmonischen Anhäufungen inkompetenter Gesteine am Ende von Scherflächen, häufig im Keuper, in Opalinus-Tonen oder Oxford-Tonen. Die geringe Abschertiefe erkennt man an der geringen Breite der meisten embryonalen Falten.
3. Eine Anzahl solcher Knickzonen summiert sich und wird verstärkt durch eine meist spätere, vom basalen Abscherhorizont ausgehende Knickzone zur Falte, wie sie heute vorliegt. Diese hat einen zylindrischen Anteil der Kompression und Anteile, die durch lokales Vorspringen einzelner Be-

¹ Publikation in Vorbereitung; erscheint voraussichtlich 1975.

wegungsfronten segmentweise in die Falte eingebaut wurden. Die nichtzylindrischen Anteile geben Anlass zu Schwankungen des Kompressionsbetrages und damit einhergehenden axialen Schwankungen. Die seitliche Begrenzung solcher Bewegungsfronten ist meist diffus (vgl. LAUBSCHER 1965). Quere Sockelstörungen geben Anlass zu oft fast unvermittelten Änderungen der Faltengeometrie. Auch diese Stellen müssen mit seitlich begrenzten Vor- und Rückverlagerungen von Massen verbunden sein.

b) *Verbogene Überschiebungen*

Solche begleiten die Antiklinale auf ihrer ganzen Länge. An einer Stelle (Nordschenkel, Forêt des Pic) sprechen gewisse Gründe dafür, dass die Überschiebung durch den Faltungsvorschub in den Natica-Schichten zusätzlich zerrissen sein könnte. Diese Lösung kommt auch bei der Überschiebung von Le Vialon in Frage. Im E der Falte scheint der Kompressionsbetrag zu einem guten Teil von der Überschiebung von Courrendlin aufgenommen zu werden. Die Hochlage der Synklinale des Trondai und der Gegend von La Combe hängt wahrscheinlich mit grossen, verfalteten Überschiebungen der Raimeux-Antiklinale zusammen. Die Konstruktion der Profile nach dem volumetrisch-kurvimetrischen Prinzip verlangt an gewissen Stellen eine Vergrößerung der kurvimetrischen Kompression. Damit lassen sich die Überschiebungsbeträge abschätzen.

c) *Disharmonien*

Es treten disharmonische Falten von verschiedener Grösse in verschiedenen Stockwerken des Sedimentstapels auf, z.T. an der Oberfläche beobachtbar, z.T. nur aufgrund konstruktiver Notwendigkeit in den Profilen eingezeichnet.

- *Beobachtete Disharmonien:* N von Soulce liegen im Malm-Südschenkel einige disharmonische Falten mit diskordantem Streichen zur Grossfalte vor. Bei Choindez scheint ein ganzer Gürtel von «en échelon» angeordneten Kleinfalten vorhanden zu sein. Von S nach N ist dies die Synklinale des Trondai mit der Antiklinale von La Combe Pierre und einer antiklinalartigen Schuppe, die Kleinfalte des abtauchenden Fouchies-Gewölbes mit dem Zwischenelement, das als schief geschnittenes Gewölbe auftritt, und die Kleinfalten in den Kimmeridge-Kalken des nördlichen Vorlandes bei Courrendlin. Diese Falten sind offensichtlich verknüpft mit der axialen Ausbuchtung der Gesamtfalte nach NE. Sie haben eine sinistrale «en échelon»-Beziehung und können als ursprüngliche Keime gedeutet werden, die aneinander vorbeigewachsen sind. Am E-Ende der Falte tritt S von Vicques die etwa N-S streichende Antiklinale der Forêt de Rosé auf. Auffällig ist hier die gute Übereinstimmung des Streichens dieser «Antiklinale» mit demjenigen der Querfalte von Vicques.
- *Konstruierte Disharmonien:* Ganz allgemein verlangt die Anwendung des volumetrisch-kurvimetrischen Prinzips den Einbau von grösseren Disharmonien. So muss im Dogger-Nordschenkel von km 588 bis 592 eine disharmonische Verkürzung im Dogger angenommen werden; ihre Kompensation im Malm könnte sich entsprechend im erodierten Teil der Falte befinden. Eine weitere, grosse Komplikation ist der negative Sockelsprung, der mit ca. 150 m Sprunghöhe von La Tuilerie bis Courrendlin im nördlichen Vorland zu grossen Disharmonien im Lias, Keuper und Muschelkalk Anlass gibt. Diese Schichtpakete müssen eine intensive Verfältelung aufweisen, wenn die gleiche Schichtlänge über die ganze Antiklinale eingehalten werden soll. Im W (bei Frénois) muss im Dogger eine disharmonische Falte als Kompensation der Überschiebung von Le Vialon vermutet werden. Im Sinne einer Minimisierung der axialen Depression (hier Vergrößerung der Kompression) sind in Profil 587 zusätzliche Falten unter dem Tertiär eingezeichnet. Stopfmassen im Faltenkern in Form von plastisch deformierten Evaporiten des mittleren Muschelkalkes und anderen inkompetenten Schichten waren auf der ganzen Länge der Antiklinale nötig.

d) Axiale Verbiegungen

Die Kompressionsbeträge sind in Fig. 10 zusammengestellt. Wie bereits erwähnt, sind die Kompressionen bezüglich der Grenzfläche Calcaire roux sableux – Oxford-Tone gemessen. Alle Profile sind im Rahmen der Messgenauigkeit konkordant. Die Schwankungen der Kompressionsbeträge geben nun vor allem die axialen Verbiegungen (vertikale Komponente) wieder. Drei grössere Unregelmässigkeiten lassen sich feststellen:

- Eine minimale Kompression bei Profil 587. Hier taucht das Frénois-Gewölbe nach NE, das Gewölbe von Chenal nach W ab.
- Eine axiale Kulmination bei km 591, 592 und 593. Das äussert sich durch ein enges Doggergewölbe, das in seinem Kern nur noch Opalinus-Tone enthält.
- Die rasch abnehmende Kompression bei 594 bis 598. Die Falte biegt hier deutlich nach NE aus.

Auffällig ist, dass die beiden vertikalen axialen Depressionen auch von horizontalen Abweichungen begleitet sind (Kernaustausch) und zudem an die beiden grossen Sockelstrukturen von Develier und Vicques gebunden scheinen.

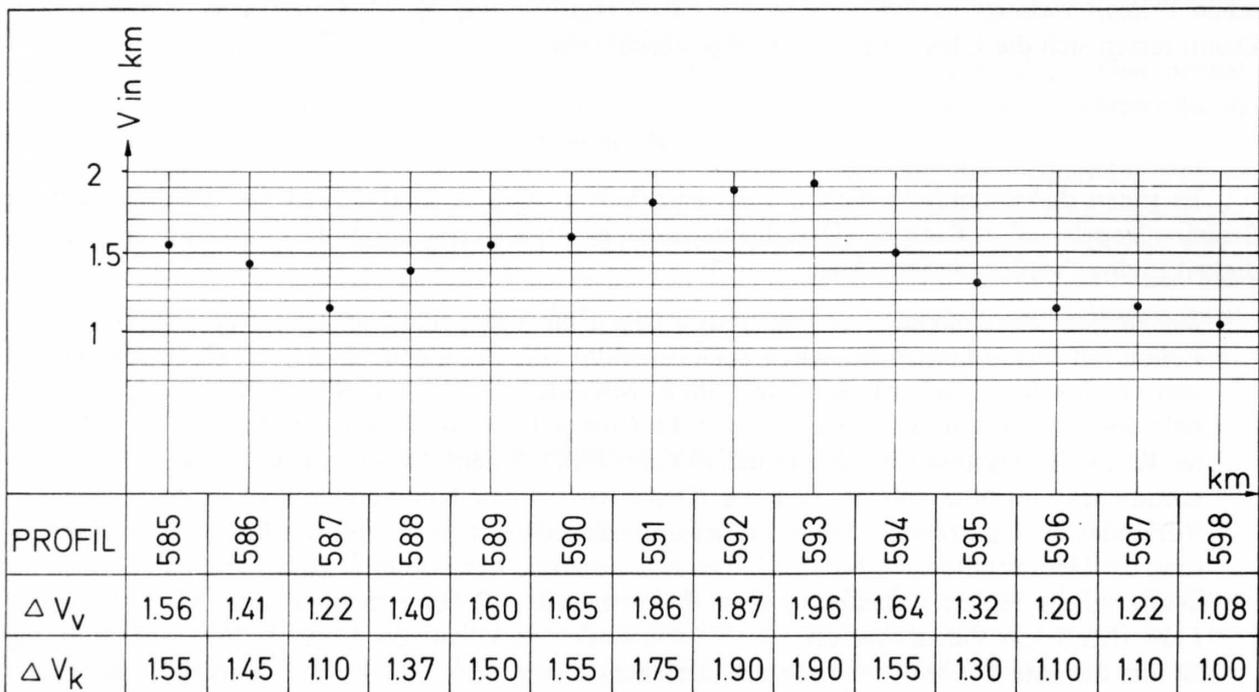


Fig. 10: Diagramm der Verkürzungsbeträge (V_v = volumetrische Verkürzung, V_k = kurvimetrische Verkürzung).

e) Verbleibende Probleme

Die in den Vorbemerkungen skizzierten gegenwärtigen Vorstellungen über den Faltungsverlauf stellen gleichzeitig eine Liste von Fragen dar, die auch für die Vellerat-Antiklinale zu beantworten wären. Offensichtlich erlauben die Aufschlüsse oft nur Vermutungen, insbesondere für die Tiefenstruktur. Hier könnten nur Bohrungen und seismische Untersuchungen zu besseren Ergebnissen führen.

Es gibt jedoch auch Probleme, die prinzipiell von der Oberfläche her zugänglich sind. So z. B. die Kinematik des Faltungsablaufes von der Keimbildung bis zur heute vorliegenden Falte, im besonderen der Zeitpunkt und die Art und Weise, wie die einzelnen Kleinfalten zusammengefasst wurden und dabei die axialen Unregelmässigkeiten der Grossfalte erzeugt haben. Nach den elementaren Regeln der Kinematik sind Änderungen des Kompressionsbetrages (vgl. Fig. 10) an Blattverschiebungen ge-

bunden, die einen differentiellen Massentransport erlauben. Derartige Verschiebungen sollten seitlich alle axialen Depressionen und Kulminationen begleiten. Sie sind aber in den seltensten Fällen kartierbar, und es muss angenommen werden, dass sie im allg. aus einem ausgedehnten System kleinster Verschiebungen bestehen.

In diesem Zusammenhang seien zwei Abschnitte herausgegriffen: die axiale Depression von Chenal und die axiale Kulmination von Forêt des Vieux Ponts. Für die Situation bei Chenal bestehen zur Erklärung der geringen Kompression von nur ca. 1,2 km in Profil 587 – gegen 1,4 km in 586 und 588 – folgende Möglichkeiten:

- Die gemessene Verkürzung ist in dem Sinne unrichtig, dass falsche Annahmen getroffen wurden. So würde eine spezielle Tiefenlage des Sockels auch eine tiefere Basislinie für die Messung zur Folge haben und so die Kompression vergrössern. Damit wäre die Depression lediglich der Ausdruck eines lokalen Tiefs im Sockel, und in Fig. 2 müsste z. B. der «Graben» an dieser Stelle weiter nach S reichen. Das wäre mit den seismischen Daten vereinbar (vgl. p. 42). Die Brüche von Côte du Droit, Peute Côte und Forêt de l’Aimery könnten dabei die durch den lokalen, tiefen Graben entstandenen Abschiebungen im Mesozoikum darstellen. Ihr heutiger Versetzungssinn passt für eine solche Bewegung.
- Obwohl in Profil 587 der Versuch unternommen wurde, unter dem Tertiär zusätzliche Falten zur Vergrösserung der Kompression zu konstruieren (Minimisierung der Depression), ist eine noch grössere Verbreiterung der Falte, insbesondere im N (Becken von Delsberg) denkbar.
- Die erwähnten Brüche (Dr, Ch, Ai) begrenzen die Bucht von Sormont im E und W. Das Kartenbild lässt die Vermutung aufkommen, dass dieses Segment keilförmig in die Falte hineingepresst wurde und dass damit Massentransport in den inkompetenten Formationen in axialer Richtung verbunden war.
- Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Falte an dieser Stelle eine Streckung in axialer Richtung erfahren hat. Dies ist jedoch unwahrscheinlich.

Die axiale Kulmination der Forêt des Vieux Ponts mit über 1,8 km Kompression (Profile 592, 593) besteht aus einem engen Doggergewölbe, das in seinem Kern nur noch Opalinus-Tone enthält. Es handelt sich also um eine auf den Opalinus-Tonen abgescherte Kleinfalte, für die folgende Interpretationen in Frage kommen:

- Entsprechend der Tiefenlage des Sockels bei Chenal ist hier möglicherweise eine spezielle Hochlage des Sockels verantwortlich. Die Störungen des Mont Dessus, um 3 km zurückgeglättet, ergeben in Fig. 2 einen Horst, dessen E–W-Ausdehnung vielleicht nur so gross ist, als es die heutigen Brüche anzeigen. Die Kleinfalte hätte am südlichen Abbruch des Horstes ihren Ursprung genommen und stellt somit möglicherweise eine embryonale Falte dar.
- Es ist möglich, dass die grossen Überschiebungen der Raimeux-Antiklinale, die an dieser Stelle nach N vorspringen, zusätzliche Kompression auf die Vellerat-Antiklinale übertragen. Das müsste mit seitlichen Begrenzungen verbunden sein, die eine derartige Bewegung erlauben. Wie bereits in Abschnitt d) beschrieben, könnten die Brüche von Droit de Folpotat in diesem Sinne betätigt worden sein. Alle kartierten Brüche bis auf einen zeigen einen sinistralen Sinn (W-Begrenzung); der einzige anscheinend dextrale könnte der grösste einer Unzahl von dextralen Kleinverschiebungen der E-Begrenzung sein. Die allmähliche Abnahme der Kompression nach E verlangt sicher ein ausgedehntes diffuses dextrales Klufnetz. Auch in diesem Falle müsste es sich um eine embryonale Bewegungsfront handeln.
- Es wäre auch hier ein Materialtransport in axialer Richtung denkbar. In unmittelbarer Nähe finden sich jedoch weder östlich noch westlich geeignete Strukturen, die im Sinne einer starken Kompression Massen inkompetenter Schichten in diesen Teil der Falte hätten drängen können.

Die Dynamik des Faltungsverlaufes kann aufgrund der bisher beschriebenen Feldaufnahmen in keiner Weise abgeklärt werden. Dazu sind genaue Aufnahmen der Kleintektonik nötig, und es ist zu hoffen, dass derartige Aufnahmen von neu entstehenden, günstigen Aufschlüssen die nötige Information liefern werden.

III. Kleintektonik

1. Einleitung

Wie bereits erwähnt, gehören kleintektonische Untersuchungen zum Programm des Geologischen Institutes Basel. In diesem Rahmen sollten in der vorliegenden Arbeit vor allem Daten zur Abklärung des Mechanismus des Faltungsvorgangs beigebracht werden. Parallel zu den Messungen entwickelte sich eine kinematische Modellvorstellung der Entstehung einer Jurafalte, wie sie bereits kurz dargelegt worden ist (vgl. p. 32). Diese hat wiederum die Messmethoden und Bewertungskriterien beeinflusst.

Aufnahme und Darstellung der ganzen Fülle der beobachtbaren Deformationsspuren sowie ihre funktionelle Zuordnung zum Faltungsprozess stellen zahlreiche Probleme, für deren Bewältigung noch jahrelange Arbeit nötig sein wird. Wie bereits WOHLICH (1967) erwähnt hat, bestehen z. B. für die nichtebenen Klüftflächen und ihre Bewegungsspuren noch keine geeigneten Mess- und Darstellungsmethoden. Aus diesen Gründen habe ich mich auf die Aufnahme von ebenen Strukturen und linearen Bewegungsspuren beschränkt, wie sie in der Literatur schon oft beschrieben worden ist (SALOMON 1925, WAGNER 1964, MÜLLER 1963).

Die Beschränkung auf einen kleinen Ausschnitt aus dem Spektrum der beobachtbaren Deformationserscheinungen bedeutet selbstverständlich, dass auf eine eingehende Interpretation verzichtet werden muss. Deshalb habe ich nur die graphischen Darstellungen der Messungen (Tafel IV) kurz kommentiert. Bei den bisherigen kleintektonischen Untersuchungen in meinem Arbeitsgebiet geschah die Auswertung der Messungen mit Hilfe der Statistik (NABHOLZ 1956, WOHLICH 1967). Für gewisse Zwecke ist diese Methode ohne Zweifel geeignet, z. B. um über längere Zeiträume wirksame regionale Durchschnittsbewegungen zu ermitteln. Die mir gestellte Aufgabe bestand hingegen darin, Information zur Abklärung der lokalen und zeitlichen Änderungen des regionalen Spannungs- und Bewegungssystems zu sammeln. Unter diesen Umständen dürfen statistische Mittelungen nur mit grosser Vorsicht durchgeführt werden; idealerweise muss jeder einzelnen Klüftfläche eine individuelle Behandlung zugestanden werden – dies in der Hoffnung, dass wenigstens in den günstigsten Fällen Auskunft über ihre Entstehung, Betätigung und Reaktivierung erhältlich ist.

2. Messmethode

Das Ziel war, möglichst über die ganze Falte ein dichtes Netz von Messstellen zu legen. Natürliche Aufschlüsse sind jedoch in der Regel zu schlecht, um die interessierenden Strukturen erkennen zu lassen. Deshalb war ich auf künstliche Aufschlüsse angewiesen, die sich vor allem längs neuer Waldwege fanden. Zusätzlich hat es sich gezeigt, dass Felspartien mit hohem Durchtrennungsgrad für eine erste Untersuchung nicht geeignet sind. Ich habe mich daher vorwiegend auf «geklüftete» bis «zerklüftete» Aufschlüsse gestützt (WAGNER 1964). Innerhalb dieser Aufschlüsse beschränkte ich mich pro Messstelle (Längsausdehnung 10 bis 50 m) ausschliesslich auf die «ebenen» Strukturen mit Bewegungsspuren. Nach diesen Kriterien wurden an 30 Messstellen ca. 500 Messungen vorgenommen. Dabei wurde folgendes berücksichtigt:

a) *Klüftflächen*: Gemessen wurde, wie üblich, eine idealisierte Ebene, wobei bei grossen Flächen ein Mittel von drei bis vier Messungen notiert wurde. Bei den Bewegungsspuren habe ich folgende Unterscheidung getroffen:

- *Stufen*, meist als dicke Calcitstufen ausgebildet, die sowohl Richtung als auch Sinn der Relativbewegung ausgezeichnet bestimmen lassen (SALOMON 1925, WAGNER 1964).
- *Strömungen*, die eine gute Bewegungsrichtung bestimmen, jedoch den Bewegungssinn nicht erkennen lassen.
- *Stossmarken*, die als eine Art «Schrägstylolithe» bezeichnet werden müssen (WAGNER 1964). Ähnlich den Stufen zeigen sie sowohl Richtung als auch Sinn der Relativbewegung an.

b) *Stylolithenflächen*: Die Idealisierung zur Ebene bereitet hier meist erhebliche Schwierigkeiten, weil diese Strukturen fast durchwegs sehr unregelmässig ausgebildet sind. Dagegen ist die Richtung der Stylolithen oft ausgezeichnet zu erfassen. Mit Hilfe von Holzstäbchen, die mit Kitt befestigt wurden, konnte die Richtung der Stylolithen verlängert werden. Das Mittel aus drei bis vier derartigen Messungen ist jeweils notiert worden. Es treten zwischen Stylolithenflächen und Klüften alle möglichen Übergänge auf, wie das WAGNER (1964) beschrieben hat.

c) *Schichtflächen*: Sie wurden als präexistente Inhomogenitäten meist als Bewegungsflächen benutzt und lassen sehr oft Bewegungsspuren erkennen. Diese wurden in dieselben Kategorien wie bei den Klufflächen unterteilt.

Über die Beträge der Bewegungen liess sich nur in ganz wenigen Fällen etwas aussagen, nämlich dort, wo eindeutig präexistente Strukturen von der Bewegung versetzt erschienen.

3. Auswertungsmethoden (funktionelle Gruppen)

Methodisch wäre zu postulieren, dass alle Strukturen als «ererbte Geometrie» oder «Randbedingungen» den weiteren Aufbau des Spannungs- und Bewegungssystems bestimmen sollten (vgl. LAUBSCHER 1967, Tabelle). Man müsste also versuchen, durch genaue Feldbeobachtung und geeignete Bearbeitung der Messungen zuerst die schon vor der Faltung vorhandenen Strukturen zu ermitteln (z. B. die rheintalischen), sodann die ersten, bei embryonalen Stadien ausgebildeten. Den letzteren galt meine besondere Aufmerksamkeit. Diese Spuren sollten im allg. bei \pm horizontaler Schichtlage aufgeprägt worden sein, und um sie zu erkennen, müssen alle Messungen derart rotiert werden, dass die Schichten wieder horizontal liegen.

In Betracht für solche erste Instabilitäten kommen vor allem Klüfte, die

- Mohrsche Winkelbeziehungen (CLARK 1966) zu schichtparallelen Hauptspannungsrichtungen aufweisen. Das sind solche Klüfte, die 90° oder 30° gegenüber den Schichten geneigt sind;
- schichtparallele Bewegungsspuren aufweisen (Striemungen, Stylolithen u. ä.).

Zusätzlich habe ich noch Bewegungsspuren auf Schichtflächen eingemessen und als σ_1 -Richtungen gedeutet. Da sie meist erst mit der Schichtrotation ausgebildet worden sind («Faltungsvorschub»), gehören sie eigentlich schon einer anderen, vermutlich meist späteren Phase an. Trotzdem habe ich sie zum Vergleich auf Tafel IV dargestellt, wobei es allerdings fraglich ist, ob die Rotation in die Horizontale für die Bewegungsspuren auf Schichtflächen wirklich angezeigt ist.

Alle Messungen wurden auf einem Wulffschen Netz (untere Halbkugel) aufgetragen – die flächenhaften Elemente als Pole. Danach wurden alle Messungen derart rotiert, dass die Schichtflächen in die Horizontale zu liegen kamen. Anschliessend versuchte ich, die Messungen den im folgenden angeführten funktionellen Gruppen zuzuordnen. Diese Zuordnung ist in gewissen Grenzfällen nicht eindeutig, insbesondere dort, wo die Bewegungsspuren den Bewegungssinn nicht, oder nicht sicher bestimmen lassen.

a) *Mohrsche Brüche*

In den stereographischen Diagrammen liessen sich sowohl die Unter- und Überschiebungsflächen als auch die sinistralen und dextralen Horizontalverschiebungsflächen schon ihrer Richtung nach meist gut ausscheiden. Der unterschiedlichen Qualität der Bewegungsspuren wurde dadurch Rechnung getragen, dass die unsicheren Fälle mit kleiner Signatur (vgl. Fig. 11) versehen wurden. Es wurden zwei Kategorien von Mohrschen Brüchen unterschieden:

- Unter- und Überschiebungsflächen, die ein senkrechtes σ_3 voraussetzen. Die recht seltenen Messungen wiesen oft eine erhebliche Abweichung der Bewegungsspuren von der Fallrichtung der Fläche auf. Da diese an sich schon als eine σ_1 -Richtung angesehen werden kann, zeichnete ich auf Tafel IV jeweils beide Richtungen ein.

- Sinistrale und dextrale Horizontalverschiebungen. Für ein komplementäres System von derartigen Klüften müsste ein Bruchwinkel 2α von ca. 60° angenommen werden (CLARK 1966, Tab. 11-3). Beinahe an jeder Messstelle ergaben sich für gewisse Kluftscharen deutliche Häufungen. Für die weitere Behandlung bildete ich das arithmetische Mittel für jede Kluftchar. Es zeigte sich nun, dass nur in seltenen Fällen ein wirklich komplementäres System von Horizontalverschiebungsflächen vorlag. Der eingeschlossene Winkel 2α wich meist bedeutend von dem zu erwartenden Wert von ca. 60° ab. Deshalb sind die sinistralen und dextralen Klüfte gesondert zur Bestimmung der Hauptspannungsrichtungen behandelt worden, indem für beide ein Winkel von 30° als Standard angenommen wurde. Die beiden so gewonnenen σ_1 -Richtungen sind auf Tafel IV gesondert dargestellt. Dort, wo sie sich einigermaßen decken, dürfte ein komplementäres System vorliegen. Im allgemeinen treten die sinistralen Klüfte weit häufiger auf als die dextralen. Das stimmt mit dem regionalen Befund gut überein, indem im Raume des rheintalischen Juras vor allem die sinistrale Richtung im grösseren Massstab betätigt worden ist (LAUBSCHER 1972).

b) *Styololithenflächen*

Styololithen sind offenbar durch Drucklösung entstanden, so dass sich die Richtung der Styololithenzapfen als σ_1 -Richtung deuten lässt (z. B. WAGNER 1964). Nach bisherigen Beobachtungen (LAUBSCHER, mündl. Mitt.; PLESSMANN 1972) ist anzunehmen, dass die Styololithenbildung im Vergleich zu den Bewegungen an den Horizontalverschiebungen und Schichtflächen langsam gewesen ist. Damit stellen sie Stadien relativer Ruhe dar, verbunden mit einem recht konstanten Spannungssystem, wie das bereits WAGNER (1964) vermutet hat. Die gemessenen Styololithenflächen zeigen nun sehr oft ein ursprüngliches Einfallen von 80° bis 90° . Damit scheinen sie ihre Entstehung ebenfalls den frühen Phasen der Auffaltung zu verdanken. An gewissen Messstellen treten zwar auch einzelne derartige Flächen mit andern Einfallen auf, die in schon rotierten Schichten bei immer noch horizontaler Beanspruchung entstanden sein könnten. Mit einer derartigen Interpretation stimmt jedoch die im wesentlichen schichtparallele Richtung der Styololithen nicht überein.

c) *Faltungsvorschub an Schichten*

Die Schichtflächen weisen sehr oft Bewegungsspuren auf, die wahrscheinlich auf Faltungsvorschub infolge Biegefaltung zurückzuführen sind. Solche Spuren lassen sich an allen Jurafalten beobachten (vgl. z. B. NABHOLZ 1956). Gewisse Stellen zeigen nun merkwürdigerweise einen Bewegungssinn, der dem zu erwartenden, der tektonischen Position in der Falte entsprechenden, entgegengesetzt ist. Das kann damit zusammenhängen, dass die Vellerat-Falte, wie andere Grossfalten des Juras, eine Anzahl kleinerer Falten eingebaut hat. Dabei wären die beiden entgegengesetzten Faltungsvorschübe der Kleinfalte erhalten geblieben.

Die Richtungen für σ_1 , die aus diesen Messungen resultieren, müssen nach dem provisorischen Modell späteren kinematischen Phasen zugeordnet werden. Diese dürften die «Keime» der ersten Instabilitäten zu grossen Falten zusammengeschweisst haben, wobei Rotationen und Biegefaltung auftraten (vgl. p. 32). Nach diesen Überlegungen sind die rotierten σ_1 -Richtungen mit einem gewissen Fehler behaftet, weil die Bewegungsspuren der Schichtflächen nur teilweise passiv in die heutige Lage rotiert worden sind.

d) *Vermutlich ererbte Klüfte*

Gewisse Messstellen erlaubten zusätzlich die Ausscheidung von Klüften, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den oligozänen Strukturen zugeordnet werden dürfen. Sie passen meist gut in ein System von Abschiebungen rheintalischer Richtung. Die entsprechenden Bewegungsspuren, verbunden mit Bolusfüllungen, sind gute Indizien für eine derartige Zuordnung.

e) Klüfte mit Bewegungsspuren unsicherer Zuordnung

Jede Messstelle wies darüber hinaus eine Anzahl Klüfte mit Bewegungsspuren auf, die keiner der beschriebenen Funktionen zugeschrieben werden konnten. Ihre Deutung kann erst im Rahmen eines wesentlich dichteren Beobachtungsnetzes und mit Hilfe eines detaillierteren kinematischen Modelles angegangen werden. Dabei wird die individuelle Geschichte der Vellerat-Antiklinale von wesentlicher Bedeutung sein.

Die Messergebnisse sind auf Tafel IV dargestellt. Um die Kriterien für die Zuordnung zu funktionellen Gruppen zu präzisieren, sei am Beispiel einiger Messstellen das Vorgehen näher beschrieben.

Fig. 11 a zeigt die Messergebnisse von Messpunkt Nr. 24. Dieser befindet sich im Nordschenkel der Antiklinale (590.050/240.630), im Übergang der St-Ursanne-Formation zu den unteren Natica-

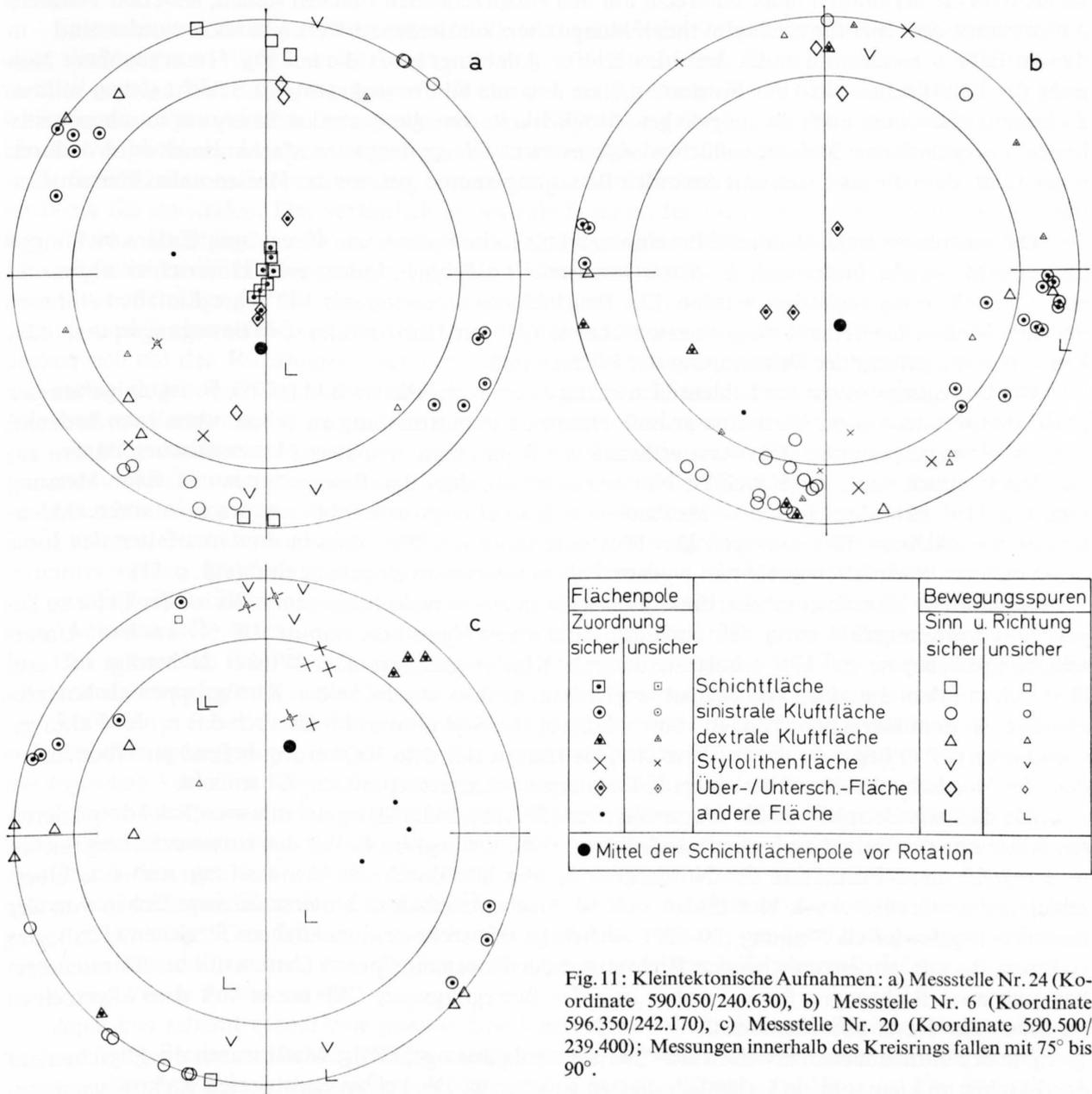


Fig. 11: Kleintektonische Aufnahmen: a) Messstelle Nr. 24 (Koordinate 590.050/240.630), b) Messstelle Nr. 6 (Koordinate 596.350/242.170), c) Messstelle Nr. 20 (Koordinate 590.500/239.400); Messungen innerhalb des Kreisrings fallen mit 75° bis 90°.

Schichten. Die Messwerte sind, wie schon erwähnt, alle rotiert, derart, dass das Mittel der Schichtflächenpole vertikal steht. Alle Richtungsangaben werden in der Folge als Azimut angegeben.

Die auffälligste Gruppe ist die der elf sinistralen Kluftflächen (im Mittel $29^\circ/90^\circ$). Die Richtung der Bewegungsspuren ist ebenfalls 29° , bei einer Neigung von 3° S. Im Rahmen der Messgenauigkeit kann dieser Abweichung von der Horizontalen keine Bedeutung beigemessen werden. Wesentlich schlechter belegt sind die dextralen Klüfte. Sie streuen viel mehr als die sinistralen (Streichen 142°), zudem weicht ihr Fallen sehr vom theoretisch geforderten Wert (90°) ab (Mittel 78° N). Ausserdem fehlen eindeutige Bewegungsspuren in den meisten Fällen. Nur in zwei Messungen wurden sicher dextrale Spuren registriert. In drei weiteren erlaubte die Feldbeobachtung zwar einen Verdacht, aber keine sichere Aussage. Zusätzlich scheint hier eine Interferenz der Kluftflächen mit den Styloolithenflächen vorzuliegen. So wies eine der gemessenen Klüfte neben dextralen Bewegungsspuren auch Styloolithen auf (vgl. GLAUSER 1959; LAUBSCHER 1965). Die drei registrierten Styloolithenflächen streichen mit 130° , wobei, wie bereits erwähnt, die Streuung hier ausserordentlich gross ist. Die Richtung der Styloolithen dagegen darf als verlässlicher für die Bestimmung von σ_1 betrachtet werden ($1^\circ/5^\circ$ S). Die Tatsache, dass die Styloolithen nicht senkrecht auf den entsprechenden Flächen stehen, lässt den Verdacht aufkommen, dass hier für die Styloolithenbildung schon vorhandene Flächen benützt worden sind – in diesem Falle u. a. vermutlich die dextralen Klüfte. Allerdings passt die auf Fig. 11 a erkennbare Neigung der Kluftflächen nicht zur Forderung, dass dextrale Klüfte senkrecht zur Schicht stehen sollten. Es besteht also sicher auch die umgekehrte Möglichkeit, dass die dextralen Bewegungen schon bestehende, unregelmässige Styloolithenflächen reaktivierten. Dieser denkbare Mechanismus wird dadurch unterstützt, dass die zwei sicheren dextralen Bewegungsspuren gut mit der Horizontalen übereinstimmen.

Die postulierte erste Mohrsche Bruchinstabilität sollte Spuren von Über- bzw. Unterschiebungen hinterlassen. Solche finden sich an dieser Messstelle tatsächlich, indem zwei Unterschiebungen und eine Überschiebung registriert wurden. Die Bruchflächen streichen mit 102° , ihre Einfallen stimmen mit dem Mohrschen Winkel einigermaßen überein (21° zur Horizontale). Die Bewegungsspuren decken sich recht gut mit der Orientierung der Flächen (8°).

Die Bewegungsspuren der Schichtflächen zeigen ein einheitliches Bild (179°). Es ist einigermaßen problematisch, in diesem Wert eine grösste Hauptspannungsrichtung zu sehen, wenn man bedenkt, dass die Bewegungsspuren sicher erst während der Rotationen in späteren kinematischen Phasen zustande gekommen sind. Zusätzlich ist hier anzumerken, dass der Bewegungssinn in einer Messung (vgl. Fig. 11 a) nicht dem normalen Mechanismus des Faltungsvorschubes entsprach, sondern eindeutig den umgekehrten Sinn anzeigte. Das lässt sich damit erklären, dass in die Grossfalten des Juras meist mehrere Kleinfalten mit ihrem eigenen Faltungsvorschub eingebaut sind (vgl. p.32).

Gesamthaft betrachtet scheint diese Messstelle in einem recht homogenen Bezirk der Falte zu liegen. Das Spannungsfeld hätte sich nach der vorläufigen Hypothese von ca. 10° (Über- bzw. Unterschiebungsfläche) zu ca. 175° (sinistrale/dextrale Klüfte) geändert. Der Winkel 2α beträgt 66° und lässt sich mit dem Standard von 60° gut vergleichen, so dass wir die beiden Kluftgruppen als komplementäres System betrachten können. Sowohl das σ_1 der Styloolithen (1°) als auch das σ_1 des Faltungsvorschubes (179°) liegen in diesem Bereich. Das stimmt mit dem Kartierungsbefund gut überein, indem der Nordschenkel hier über einen Kilometer recht ungestört mit ca. 90° streicht.

Als nächstes Beispiel soll die *Messstelle Nr. 6* (596.350/242.170) in einem wesentlich komplizierteren Abschnitt der Falte besprochen werden (Fig. 11 b). Sie liegt im E-Teil des Untersuchungsgebietes, in der St-Ursanne-Formation des Nordschenkels, der hier durch die Vicques-Linie und eine Überschiebung gestört ist. Auch hier finden sich Mohrsche Über- und Unterschiebungsflächen von der theoretisch geforderten Neigung (20 – 32°), allerdings mit recht uneinheitlichem Streichen (126°), das zudem nicht mit den entsprechenden Richtungen der Bewegungsspuren übereinstimmt. Daraus ergeben sich zwei Richtungen für σ_1 , wobei jene der Bewegungsspur (2°) besser mit dem allgemeinen Streichen der Kette übereinstimmt.

Die Styloolithenflächen erweisen sich hier als wenig aussagekräftig. Meist waren die Zäpfchen auf den Flächen zu klein, um sie verlässlich messen zu können. Die beiden registrierten Richtungen diver-

gieren zu sehr, als dass man sie eindeutig ein und demselben Spannungszustand zuordnen könnte. Wie schon auf Fig. 11a sind auch hier die Messungen der Flächen über einen allzu grossen Sektor verteilt, um eine sichere Angabe über die Richtung des grössten Druckes zu erhalten. Offenbar hat an dieser Stelle das Spannungsfeld oft geändert, möglicherweise derart, dass nie genügend Zeit zur Ausbildung von guten Stylolithen zur Verfügung stand. Es überrascht dabei, dass trotzdem das Mittel der Fallrichtungen der Flächen von 170° mit der Richtung der beiden Stylolithenmessungen (169°) übereinstimmt.

Grösste Vielfalt weisen die Transversalverschiebungssysteme auf. Es lassen sich nicht weniger als fünf verschiedene Richtungen identifizieren (sinistral 1, 2; dextral 1, 2, 3). Die am besten belegte Richtung wird von einer sinistralen Kluftschar bestimmt (sinistral 1), wo aus 13 Messungen ein Streichen von 10° und ein Fallen von 84° resultiert. Die Abweichung der Einfallen von der Vertikalen kann auch davon herrühren, dass die Rotation in die Horizontale nicht mit einem sehr zuverlässigen Winkel vorgenommen wurde, und zwar wegen der schlechten Ausbildung der Schichtflächen (Tiergarten-Oolith). Die Bewegungsspuren zeigen dasselbe Bild mit einer Richtung von 11° und einem Fallen von 8° E.

Ein weiteres sinistrale System (sinistral 2) ist nur durch drei Messungen belegt, weist jedoch mit einer Richtung von 41° eine deutliche Abweichung zu sinistral 1 auf. Zudem sind diese Klüfte mit 75° nach W geneigt. Die Bewegungsspuren stimmen mit der Richtung überein und liegen zudem im Mittel horizontal. Obwohl keine Bewegungsspuren in Fallrichtung der Klüfte festgestellt wurden, besteht hier die Möglichkeit, dass alte (oligozäne) Abschiebungsflächen zu einem gewissen Zeitpunkt als sinistrale Scherflächen reaktiviert wurden. Die dextralen Kluftflächen sind auch hier weit weniger zahlreich als die sinistralen. Das verlässlichste dextrale System (dextral 1) ist durch fünf Messungen belegt, die eine Richtung von 96° bei vertikalem Fallen aufweisen. Die Bewegungsspuren streichen mit 95° und fallen mit 7° N. Zwei weitere dextrale Richtungen (dextral 2, 3) sind nur mit je 2 Messungen belegt, die allerdings gut übereinstimmen. Die eine (dextral 2) weist eine Richtung von 170° , die andere (dextral 3) eine solche von 148° auf. Alle Klüfte stehen \pm senkrecht; auch die Bewegungsspuren decken sich mit den Richtungen. Der Versuch, ein eindeutig komplementäres System von Transversalverschiebungen festzulegen, führt zwischen sinistral 2 und dextral 2 zu einem Winkel 2α von 50° . Alle anderen Richtungen lassen sich in keiner Weise kombinieren. Die Bestimmung der σ_1 -Richtungen mit Hilfe des Standards von 30° ergibt dementsprechend grosse Abweichungen (vgl. Tafel IV). Am erstaunlichsten ist dabei die Richtung aus dextral 1, die mit 126° völlig aus dem Rahmen fällt.

Die Darstellung dieser Verhältnisse erlaubt gewiss keine genaue Abklärung der Bewegungen. Dazu müssen, wie bereits erwähnt, die Beobachtungsdichte vergrössert und die Modellvorstellungen verfeinert werden. Immerhin fällt an dieser Stelle auf, dass die σ_1 -Richtungen aus den Überschiebungen und Stylolithenflächen einigermaßen mit der regionalen Richtung von σ_1 (ca. N-S) übereinstimmen, während die σ_1 -Richtungen der sinistralen und dextralen Klüfte grosse Abweichungen aufweisen. Das unterstützt die Vorstellung, dass an präexistente Strukturen wie der Vicques-Linie zu gewissen Zeiten lokal grosse Abweichungen des regionalen Spannungsfeldes aufgetreten sein müssen.

Als weiteres Beispiel soll *Messstelle Nr. 20* (Fig. 11c) erörtert werden. Hier wurde in der Hauptmumienbank gemessen, wo wegen der benachbarten Natica-Schichten mit ihrem verschiedenen rheologischen Verhalten Abweichungen vom homogenen Spannungsfeld zu erwarten sind.

Über- bzw. Unterschiebungsflächen wurden keine registriert. Bei den Transversalverschiebungsklüften sind die sinistralen typischerweise deutlicher ausgebildet als die dextralen. Es lassen sich zwei sinistrale Richtungen unterscheiden ($21^\circ/89^\circ$ E und $38^\circ/83^\circ$ E), die beide von horizontalen Bewegungsspuren begleitet sind. Eine dextrale Richtung von $131^\circ/85^\circ$ S wird ebenfalls von horizontalen Bewegungsspuren belegt. Der Winkel 2α zwischen sinistral 1 und dextral beträgt 72° . Er könnte vielleicht darauf zurückzuführen sein, dass die liegenden Natica-Schichten z. T. plastisch deformiert wurden, mit einem Winkel 2α von ca. 90° .

Auch hier scheint wieder eine gewisse Überlagerung von dextralen Scherflächen mit Stylolithenflächen stattgefunden zu haben, indem mindestens drei Stylolithenflächen auch dextrale Bewegung anzeigen. Wiederum konnte nicht entschieden werden, welches System das ältere ist. Die Stylolithen-

flächen stellen hier noch ein anderes Problem: die grosse Streuung der Fallrichtung deutet darauf hin, dass möglicherweise in einer gewissen Ruhepause der Faltung Stylolithe gebildet wurden. Es lassen sich zwei, eventuell sogar drei Gruppen unterscheiden, deren Einfallen von der Vertikalen bis zu 50° S reichen. Die dazugehörigen Stylolithen jedoch streuen um die Horizontale und machen diese Abweichung nicht mit. Es besteht durchaus die Möglichkeit, dass die Neigung der Stylolithenflächen von vorneherein auf Inhomogenitäten der Spannungsverteilung zurückzuführen ist. Sonst müsste man annehmen, dass die nach einer gewissen Rotation entstandenen Flächen auf ein wesentlich von der Horizontalen abweichendes σ_1 zurückzuführen seien.

Auffällig ist im weiteren eine ganze Gruppe von dextralen Bewegungsspuren, die nach der Rotation in die Horizontale ganz ungewöhnliche Neigungen annehmen. Hier könnte es sich um Bewegungsspuren handeln, die der Auffaltung während der späteren kinematischen Phase zuzuweisen sind. Leider liess sich an keiner Stelle das relative Alter der Bewegungen abklären.

Eine weitere Gruppe von drei Messungen weisen gemittelt ein Streichen von 9° und ein Fallen von 53° W auf. Nach diesen Daten könnte es sich hier um rheintalische Abschiebungen handeln. Die Bewegungsrichtungen widersprechen dieser Annahme, indem sie erstens nicht in der Falllinie liegen und zweitens eine Aufwärtsbewegung des W-Blockes anzeigen. Es bleibt noch die Möglichkeit, diese Spuren als Reaktivierungen während der Faltung aufzufassen und die Klüfte trotzdem dem oligozänen System zuzuordnen.

IV. Refraktionsseismik

1. Vorbemerkungen

Dank dem freundlichen Interesse und Entgegenkommen von Dr. A. Schneider (Bern) hatte ich die Möglichkeit, einige Refraktionsprofile zu schiessen. Mit der leichten Apparatur liessen sich nur geringe Durchdringungstiefen erreichen. Immerhin erlaubten diese, in den schlecht aufgeschlossenen Synklinalen an einigen Punkten die Malmoberfläche zu bestimmen und damit sonst nicht erhältliche weitere Anhaltspunkte für eine Abschätzung des Verlaufs der Sockeloberfläche zu erhalten. Selbstver-

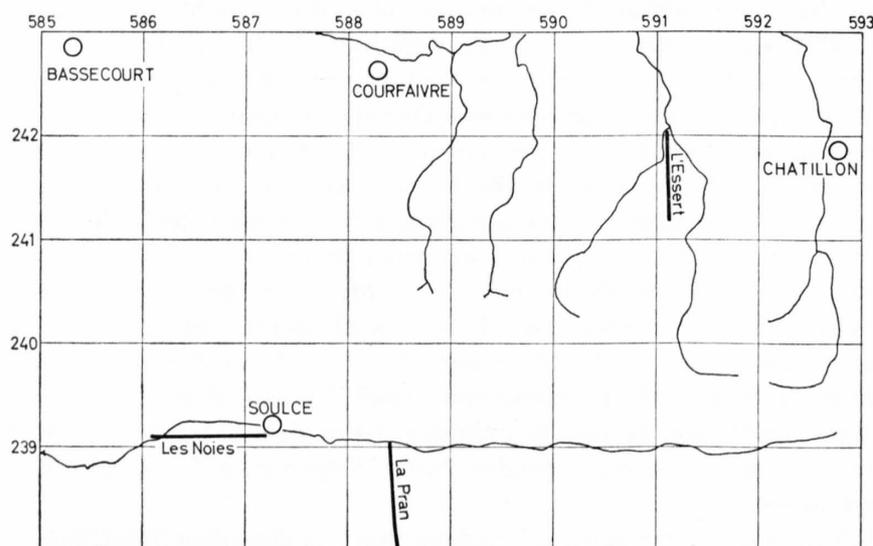


Fig. 12: Lage der seismischen Profile.

ständig liesse sich mit grösseren Mitteln, namentlich mit grosskalibrigen Schusslöchern, noch viel mehr erreichen.

Fig. 12 zeigt die Lage der Profile. Im folgenden werden nur die Ergebnisse von Les Noies, La Pran und L'Essert dargelegt, während sich mein Studienkollege A. Bürgin mit den restlichen befassen wird. Die Lage der Profile stellt einen Kompromiss zwischen folgenden Erfordernissen dar:

1. Günstiger Schnitt mit der zu bestimmenden geologischen Struktur;
2. möglichst gleichmässige, wenn möglich horizontale Topographie;
3. gute Zufahrt für den Registrierwagen;
4. die Bevölkerung darf nicht gefährdet und Leitungen usw. nicht beschädigt werden.

Die Feldarbeit nahm total 12 Tage in Anspruch, wobei zeitweise eine Equipe von 10 Mann im Einsatz stand. Vorausgehend wurden die Profile durch eine einfache Vermessungsmethode (Kleintheodolit der Armee) im Gelände fixiert und die Schusslöcher vorbereitet. Diese konnten mit einem tragbaren Bohrgerät («Kobra») abgeteufelt werden. In nassen Lehmen wurden dabei Tiefen bis zu 4 m erreicht. Die meisten Löcher sind ebenfalls vorgängig mit 3 m langen (Durchmesser 3 cm) PVC-Rohren verrohrt worden. Dieses Vorgehen hat die Arbeit mit der Mess-Apparatur auf ein zeitliches Minimum beschränkt. Die Schusslöcher für die kurzen Auslagen wurden jedoch unmittelbar vor dem Schuss von Hand auf eine Tiefe von ca. 1 m niedergebracht.

Für die Registrierung stand eine 24-Kanal-Vorrichtung zur Verfügung. Die Geophon-Abstände konnten zwischen 10, 15, 30 und 50 m gewählt werden. Die Schusslöcher wurden je nach Lage und Tiefe mit höchstens 500 g Sicherheitssprengstoff (Gammit A) geladen und über ein Zündkabel elektrisch gezündet. Besonders bei den langen Auslagen liessen die Einsätze jedoch oft zu wünschen übrig. Grössere Ladungen hätten jedoch Landschaden verursacht.

Die Auswertung geschah unter den üblichen idealisierenden Annahmen:

1. Der geologische Körper setzt sich aus homogenen Schichten mit konstanten Geschwindigkeiten zusammen;
2. die Geschwindigkeiten ändern an den Grenzflächen sprunghaft («Refraktoren»);
3. das Problem ist in einem vertikalen Schnitt als zweidimensionaler n-Schichtenfall darstellbar.

2. Auswertung und Ergebnisse

a) Mulde von Soulce

Die Synklinale von Soulce wurde mit zwei Profilen belegt, wobei eines in der Längsachse (Les Noies), das andere quer dazu (La Pran) geschossen wurde. Die verlässlichsten Angaben stammen vom Profil Les Noies, dessen Auswertung deshalb genauer beschrieben werden soll.

Wir verwendeten dabei die längste Auslage von 1200 m (Geophonabstände 50 m), weil vorläufige Profilkonstruktionen eine Tertiärmächtigkeit von ca. 200 m erwarten liessen. Insgesamt wurden fünf Schüsse abgetan, deren relative Lage aus dem Laufzeitendiagramm (Fig. 13) ersichtlich ist. Die Schusspunkte 11 und 12 befanden sich in jungen, lockeren Bachalluvionen über dem Grundwasser. Das bedingte trotz maximalen Ladungen schlechte Einsätze, insbesondere bei den weit entfernten Geophonen. Schusspunkt 13 ergab zwar meist gute Einsätze, jedoch keine Tiefeninformation. Die Schusspunkte 14 und 15 lagen im Dorf Soulce (Abstand zu nächsten Haus 50 m), so dass nur kleine Ladungen verwendet werden konnten. Diese Umstände erklären die im allgemeinen schlechten Einsätze.

Obwohl das Profil in der Längsachse des Tales lag, haben topographische Höhenunterschiede störend gewirkt. Ich habe deshalb eine Geländekorrektur vorgenommen, bei der alle Messwerte auf eine Kote von 580 m ü. M. reduziert wurden. Für jedes Geophon ergab sich daraus neben der Laufzeitkorrektur auch eine örtliche Verschiebung in Richtung des entsprechenden Schussloches. Das galt jedoch nur für jene Geophone, die als Ersteinsatz nicht eine direkte Welle registrierten. Das genaue Vorgehen ist bei BENTZ (1961, p. 689) und bei DIX (1952, p. 73 ff.) beschrieben. Die Verwitterungsschicht konnte im Rahmen des Programmes nicht durch Nahaufstellung der Geophone nach Dicke und Geschwindigkeit ermittelt werden. Es wurde daher ein Standard von 4 m und 800 m/sec (HEILAND 1946, p. 468) für die Korrektur benützt. Dies hat am W-Ende des Profiles einen gewissen Fehler

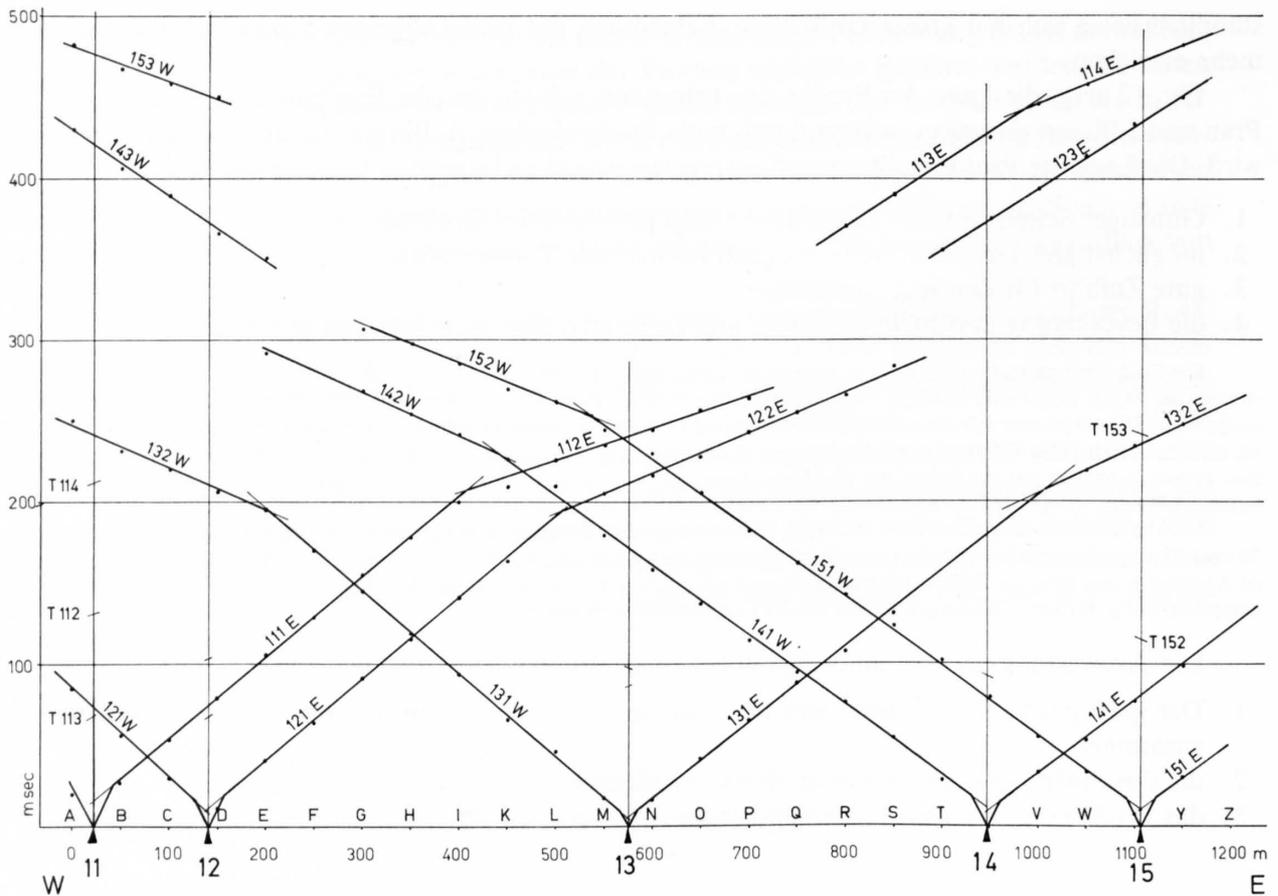


Fig. 13: Seismisches Laufzeitendiagramm Profil «Les Noies»; unkorrigierte Laufzeiten (Nrn. 11 bis 15 = Schusspunkte, T = intercept time, A-Z = Geophone).

Korrigierte Laufzeiten

Laufzeitast	v in km/sec	Laufzeitast	v in km/sec
111 E	1,99	121 W	1,82
112 E	4,12	131 W	2,0
113 E	2,89	132 W	3,74
114 E	4,1	141 W	2,36
121 E	1,99	142 W	3,67
122 E	4,12	143 W	2,5
123 E	2,68	151 W	2,4
131 E	2,22	152 W	4,12
132 E	3,53	—	—
141 E	2,13	153 W	4,86

zur Folge. Fig. 13 zeigt die unkorrigierten Laufzeiten und soll vor allem die benützten Laufzeitäste charakterisieren.

Alle Auswertungen beruhen jedoch auf den korrigierten Laufzeiten (Fig. 13), die auf dem üblichen Weg graphisch ermittelt wurden. Wie RYBACH (1962) gezeigt hat, lassen sich damit Geschwindigkeiten genügend genau bestimmen. Das hat sich auch in unserem Falle bestätigt, indem die graphisch ermittelten Werte mit digital gewonnenen verglichen werden konnten.

Beide Hälften der Auslage erreichen einen ersten Refraktor, der im W durch die Knickpunkte 111E/112E und 132W/131W charakterisiert ist. Da keine Scheingeschwindigkeiten auftreten, kann dieser Refraktor mit der bekannten Knickpunktsformel (z.B. BENTZ, p. 680) für den horizontalen Fall berechnet werden. Für den Schusspunkt 11 ergibt sich damit eine Mächtigkeit h_1 von 103 m, für SP 13 denselben Wert. Dasselbe h_1 kann mit den «intercept times» kontrolliert werden. Diese

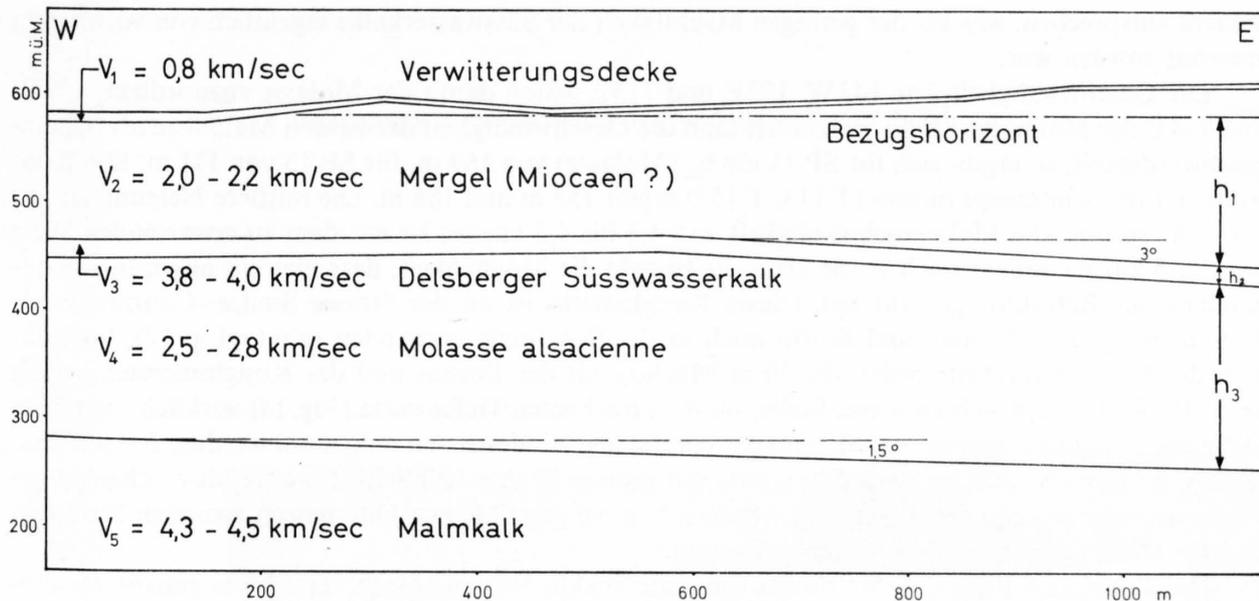


Fig. 14: Geologisches Profil aufgrund der seismischen Daten «Les Noies» (h_1-h_3 = Mächtigkeiten).

Werte differieren um einige Meter: SP 11: 114 m; SP 13: 101 m. Im geologischen Profil (Fig. 14) wurden die arithmetischen Mittel dieser Werte berücksichtigt.

Die Auswertung der östlichen Hälfte führt auf einen geneigten Zweischichtenfall, indem die Geschwindigkeitsäste 152 W und 132 E Scheingeschwindigkeiten darstellen. Die Auswertung (BENTZ 1961, NETTLETON 1940, HEILAND 1946) geschieht nach den üblichen Methoden und ergibt für SP 13 ein h_1 von 83 m, für SP 15 eine solche von 139 m. Das entspricht einer Neigung nach E von ca. 5° . Störend macht sich hier der niedrige Wert von h_1 für SP 13 bemerkbar. Er beruht auf dem Schnittpunkt von 131 E und 132 E, die beide durch Messwerte belegt sind, deren Ablesung mit Schwierigkeiten verbunden blieb. Ich messe daher der Bestimmung dieser Tiefe aus der Auslage-W weit grössere Bedeutung bei, um so mehr, als sich in dieser W-Auslage noch eine zusätzliche Kontrolle dadurch ergeben hat, dass eine weitere Methode angewendet werden konnte. Es ist diejenige nach HAGEDOORN (1959), die auf Addition und Subtraktion der Laufzeiten von Schuss und Gegenschuss für jedes Geophon beruht. Sie erlaubt eine rasche, approximative Bestimmung sowohl der Refraktorgeschwindigkeiten als auch der Refraktortiefen unter den einzelnen Geophonen. Diese Tiefenberechnung kommt allerdings nur für Geophone in Frage, die von beiden Schusspunkten einen refraktierten Impuls als Ersteinsatz registrieren. Für das Profil Les Noies ergab das für die Geophone I, K und L (vgl. Fig. 13) Tiefen von 113, 109 und 113 m. Aus diesem Grunde wurde für SP 13 der Mittelwert von 108 m für den ersten Refraktor angenommen. Die Auswertung der Knickpunkte für SP 12 und 14 (121 E/122 E und 141 W/142 W) liessen sich gut mit dem Refraktorverlauf vereinbaren (SP 12: 106 m; SP 14: 120 m).

Nach den stratigraphischen Verhältnissen stellt dieser Refraktor sicher nicht die Malmoberfläche dar. Dafür wäre auch die Refraktorgeschwindigkeit mit 3,8 bis 4,0 km/sec etwas zu klein. Es handelt sich hier mit grösster Wahrscheinlichkeit um den Delsberger Süswasserkalk, der hier vermutlich wassergefüllt ist und deshalb diese relativ hohe Geschwindigkeit aufweist. Unter diesem ca. 15 m (LINIGER 1925) mächtigen Komplex ist die Molasse alsacienne zu erwarten, die nach früheren Untersuchungen (RYBACH 1962) eine Geschwindigkeit von 2,2 bis 2,8 km/sec erwarten lässt. Damit liegt hier der Fall einer nicht sichtbaren Mittelschicht vor, die im Laufzeitdiagramm nicht in Erscheinung treten sollte. Offenbar geht nun aber die Energie derjenigen Strahlengänge, die für die ersten Knickpunkte verantwortlich sind, in den Süswasserkalken rasch verloren, so dass andere Strahlengänge die Ersteinsätze der weit entfernten Geophone verursachen. Es würde dies der Situation einer «überschossenen»

Schicht entsprechen, was bei der geringen Mächtigkeit der Süsswasserkalke eigentlich von vornherein erwartet worden war.

Die Geschwindigkeitsäste 143 W, 123 E und 113 E wären damit der Molasse zuzuordnen, 153 W und 114 E der Malmoberfläche. Behandelt man die Geschwindigkeit der beiden Malmäste als Scheingeschwindigkeit, so ergibt sich für SP 11 ein h_3 (Molasse) von 169 m, für SP 15 von 171 m. Die Kontrolle mit den «intercept times» (T 114, T 153) ergibt 153 m und 186 m. Die mittlere Neigung ist mit $1,5^\circ$ sehr gering. Die Malmgeschwindigkeit von 4,3 bis 4,5 km/sec ist mit dem zu erwartenden Wert von ca. 5 km/sec immer noch etwas klein. Es besteht die Möglichkeit, dass hier ein oligozänes Konglomerat als Refraktor gewirkt hat. Dieses Konglomerat ist an der Strasse Soule-Courfaivre am Südschenkel aufgeschlossen und dürfte auch in der Synklinale vorhanden sein (vgl. p. 12). Im Rahmen der Messgenauigkeit spielen die 10 m Mächtigkeit des Eozäns und des Konglomerates jedoch keine Rolle. Es fragt sich an dieser Stelle, ob die errechneten Tiefenwerte (Fig. 14) wirklich die tiefste Stelle der Synklinale markieren. Sie müssen vorerst als Mindesttiefen aufgefasst werden. Jedoch deuten die geringen Neigungen darauf hin, dass mit grosser Wahrscheinlichkeit kein steiler Schenkel getroffen worden ist. Ein derartiger Fall würde schon bei ganz kleinen Differenzen zwischen Streichen und Profilrichtung grosse Neigungen aufweisen.

Das Profil «La Pran», E von Soule quer zur Synklinale geschossen, lässt keine genaue Bestimmung der Synklinealgeometrie zu. Der aufgebogene Raimeux-Nordschenkel, der an dieser Stelle von einer grossen Überschiebung überfahren wird, scheint tektonisch derart zerrüttet zu sein, dass sich keine klaren Geschwindigkeitsunterschiede bemerkbar machen. Zudem reicht die Breite der Synklinale vermutlich nicht aus, den tiefsten Punkt zu erreichen. Der in Fig. 2 angegebene Wert beruht auf einer Projektion unter den entsprechenden Schusspunkt.

b) *Becken von Delsberg*

Das Profil L'Essert, S von Courtételle, wurde auf eine vermutete Malm-Flexur unter dem Tertiär angesetzt. Es verläuft ca. N-S und beginnt im S auf ca. 10° N fallendem Kimmeridge, das von ca. 2 m Boluston bedeckt ist. Das N-Ende dürfte bereits in der Molasse alsacienne liegen. Die Ergebnisse sind leider sehr mager. Offenbar ist die abtauchende Kimmeridge-Platte tiefgründig verwittert (wahrscheinlich schon im Eozän), so dass mit zunehmender Schusspunktentfernung immer tiefere Schichtflächen als Refraktoren gewirkt haben. Die Kimmeridge-/Tertiär-Grenze liess sich deshalb nicht eindeutig bestimmen. Immerhin konnte sicher festgestellt werden, dass auf der ganzen Länge des Profils keine wesentliche Verbiegung des Malms vorhanden ist. Die Kimmeridge-Platte setzt sich mit unveränderter Neigung von ca. 10° N unter dem Tertiär fort. Die postulierte Flexur ist in Fig. 2 deshalb weiter nördlich eingezeichnet worden.

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

1. *Geometrie der Vellerat-Antiklinale*

Neue detaillierte Aufnahmen haben die Information über die Geometrie der Vellerat-Falte vermehrt. Eine Anzahl von früher unbekanntem Störungen sind kartiert worden. Neben den bereits bekannten Überschiebungen sind weitere auf der ganzen Länge der Falte gefunden worden. Sie lassen sich im Malm-Nordschenkel und Doggerkern der Vellerat-Antiklinale nachweisen. Der kompliziert gebaute Nordschenkel der Raimeux-Antiklinale ist auf die Mulde von Soule aufgeschoben, derart,

dass an gewissen Stellen das Tertiär fast ganz überfahren ist. Dies führt zu morphologischen Hochlagen. Die Überschiebungen schliessen an drei Stellen antiklinalartig gebaute Schuppen ein. Im Scheitel der Vellerat-Antiklinale lassen sich an drei Stellen steile Scheitelstörungen nachweisen, von denen eine schon lange bekannt war. Zahlreiche Querbrüche sind im Malm-Südschenkel festgestellt worden. Ebenso lassen die Aufschlüsse einige disharmonische Falten in diesem Schenkel vermuten.

Die am Basler Institut entwickelten Vorstellungen über das Verhältnis der Abscherfalte zur Sockeltektonik wurden für bis auf den Sockel hinabreichende Profilkonstruktionen angewendet und auf ihre Konsequenzen für die Tiefenstruktur der Vellerat-Antiklinale untersucht.

Der mutmassliche Verlauf der Sockeloberfläche, gewonnen durch Projektionen von den Synklinalen her (Bohnerzschächte des Beckens von Delsberg, refraktionsseismische Daten der Mulde von Soule), weist unter dem zentralen Teil der Vellerat-Antiklinale eine \pm E-W streichende, den Nordflügel absenkende Verwerfung oder Flexur von ca. 150 m auf (negativer Sockelsprung). Diese lässt sich mit einer alttertiären Flexur im Malm am Südrand des Delsberger Beckens – im Jungtertiär gegenüber dem Sockel um ca. 3 km nach N verschoben – in Zusammenhang bringen. Im E und W ist dieser Sockelsprung durch NNE-SSW streichende, vermutlich ebenfalls alttertiäre Bruchlinien begrenzt (Develier-Linie, Vicques-Linie). Die Interpolation zwischen der abgeschätzten Sockeloberfläche und den Oberflächenbefunden unter Beachtung des kurvimetrisch-volumetrischen Prinzips fordert Disharmonien verschiedener Art und Grösse. Alle Überschiebungen wurden als verfaltet angenommen. Zudem sind sie an gewissen Stellen vermutlich durch den Faltungsvorschub zerrissen. Kleinfalten verschiedener Grösse haben ihren Abscherhorizont wahrscheinlich auf höheren inkompetenten Horizonten des Sedimentstapels. Ihre Kompensation in die Tiefe wurde in gewissen Fällen nach dem Prinzip von sich kreuzenden Knickzonen konstruiert. Axiale Verbiegungen äussern sich vor allem in Schwankungen der Verkürzungsbeträge. Die seitlichen Begrenzungen von differentiellem Massentransport, die solche Schwankungen begleiten müssen, liessen sich auch durch Profilkonstruktionen nicht eindeutig lokalisieren.

2. Kleintektonik

Mit der konventionellen Messmethode, bei der Flächen als Ebenen idealisiert werden, wurden an 30 Messstellen ca. 500 Bewegungsflächen mit ihren Bewegungsspuren in relativ ungestörten Teilen der Falte aufgenommen. Die Interpretation erfolgte aufgrund der Modellvorstellungen für die Jurafaltung. Danach wurden funktionelle Gruppen von Deformationsstrukturen unterschieden, die sich zeitlich einordnen lassen.

- Ererbte Strukturen (vermutlich alttertiäre Abschiebungen).
- Strukturen der ersten Instabilitäten (Über- bzw. Unterschiebungen, Transversalverschiebungen, Stylolithen).
- Strukturen, die mit der Faltung (Rotation) assoziiert werden müssen (Faltungsvorschub auf Schichtflächen, eventuell Stylolithen, restliche Klüfte)

Jede einzelne Messung wurde auf die Zugehörigkeit zu einer oder mehreren dieser Gruppen untersucht, und es konnten fast alle zugeordnet werden. Aufgrund der Bruchflächen und Stylolithen der ersten Instabilitäten wurden verschiedene σ_1 -Richtungen bestimmt, die bei ungestörtem Spannungsfeld für diese Phase der Faltung übereinstimmen sollten. Es lassen sich zwei Bereiche der Faltung abgrenzen, wo diese Richtungen stark divergieren und deshalb rasche Änderungen des Spannungsfeldes zu Beginn der Auffaltung vermuten lassen.

Literaturverzeichnis

- BARSCH, D. (1969): *Studien zur Geomorphogenese des zentralen Berner Juras*. – Basler Beitr. Geogr. 9.
- BENTZ, A. (1961): *Lehrbuch der angewandten Geologie*. – Enke Verlag, Stuttgart.
- BIRKHÄUSER, M. (1925): *Geologie des Kettenjura der Umgebung von Undervelier (Berner Jura)*. – Verh. natf. Ges. Basel 36.
- BITTERLI, P. (1945): *Geologie der Blauen- und Landskronkette südlich von Basel*. – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 81.
- (1972): *Erdölgeologische Forschungen im Jura*. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 39/95.
- BOCK, H. (1972): *Vielfache Bruchstrukturen bei einfachen Beanspruchungen – Rechnerische Untersuchungen mit Hilfe der Finite-Element-Methode*. – Geol. Rdsch. 61/3.
- BOLLIGER, W. & BURRI, P. (1970): *Sedimentologie von Schelf-Carbonaten und Beckenablagerungen im Oxfordien des zentralen Schweizer Jura*. – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 140.
- BÜCHI, U. P., LEMCKE, K., WIENER, G., ZIMDARS, J. (1965): *Geologische Ergebnisse der Erdölexploration auf das Mesozoikum im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens*. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 32/82.
- BUXTORF, A. (1907): *Geologische Beschreibung des Weissenstein-Tunnels und seiner Umgebung*. Teil A: *Stratigraphie und Tektonik*. – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 21.
- (1909): *Über den Gebirgsbau des Clos du Doubs und der Vellerat-Kette im Berner Jura*. – Ber. Vers. oberrh. geol. Ver. 42.
- (1916): *Prognosen und Befunde beim Hauensteinbasis- und Grenchenbergtunnel und die Bedeutung der letztern für die Geologie des Juragebirges*. – Verh. natf. Ges. Basel 27.
- CLARK, S. P. (1966): *Handbook of Physical Constants*. – Mem. geol. Soc. Amer. 97.
- DIEBOLD, P. (1960): *Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt Ocourt*. – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 111.
- DIX, C. H. (1952): *Seismic Prospecting for Oil*. – Harper & Brothers, New York.
- ELBER, R. (1920): *Geologie der Raimeux- und Velleratkette im Gebiete der Durchbruchtäler von Birs und Gabiare (Berner Jura)*. – Verh. natf. Ges. Basel 32.
- FISCHER, H. (1965): *Geologie des Gebietes zwischen Blauen und Pfirter Jura*. – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 122.
- FOLK, R. L. (1962): *Spectral subdivision of limestone types*. – In: *Classification of Carbonate Rocks, a Symposium*. – Mem. Amer. Assoc. Petroleum Geol. 1.
- GLAUSER, A. (1959): *Kluftsysteme im Malm der Lägern in der Umgebung von Baden*. – Eclogae geol. Helv. 52/2.
- HAFNER, W. (1951): *Stress distributions and faulting*. – Bull. geol. Soc. Amer. 62.
- HAGEDOORN, J. G. (1959): *The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections*. – Geophys. Prospecting 7/2.
- HEILAND, C. A. (1946): *Geophysical Exploration*. – Prentice-Hall Inc., New York.
- HOEPPNER, R. (1953): *Faltung und Klüftung im Nordteil des Rheinischen Schiefergebirges*. – Geol. Rdsch. 41 (Sonderbd.).
- (1955): *Tektonik im Schiefergebirge*. – Geol. Rdsch. 44 (Sonderbd.).
- (1956): *Zum Problem der Bruchbildung, Schieferung und Faltung*. – Geol. Rdsch. 45/1.
- KELLER, W. T. (1922): *Geologische Beschreibung des Kettenjura zwischen Delsbergerbecken und Oberrheinischer Tiefebene*. – Eclogae geol. Helv. 17/1.
- LANGHEINRICH, G. & PLESSMANN, W. (1968): *Zur Entstehungsweise von Schieferungsflächen in Kalksteinen*. – Geol. Mitt. 8.
- LAUBSCHER, H. P. (1948): *Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt St-Ursanne*. – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 92.
- (1961): *Die Fernschubhypothese der Jurafaltung*. – Eclogae geol. Helv. 54/1.
- (1962): *Die Zweiphasenhypothese der Jurafaltung*. – Eclogae geol. Helv. 55/1.
- (1965): *Ein kinematisches Modell der Jurafaltung*. – Eclogae geol. Helv. 58/1.
- (1966): *Zur Kinematik und Dynamik des nördlichen Rheintalischen Juras*. – Eclogae geol. Helv. 59/2.
- (1967): *Geologie und Paläontologie, Teil 1: Tektonik*. – Verh. natf. Ges. Basel 78/1.
- (1970): *Grundsätzliches zur Tektonik des Rheingrabens*. In: «Graben Problems», International Upper Mantle Project (Sci. Rept. 27). – Schweizerbart'sche Verlagsbuchh., Stuttgart.
- (1972): *Some Overall Aspects of Jura Dynamics*. – Amer. J. Sci. 272.
- LAUBSCHER, H. P., THÉOBALD, N., WITTMANN, O. (1967): *Le prolongement S du fossé rhénan*. Dans: International Upper Mantle Project (Sci. Rept. 13). – Abh. geol. Landesamt Baden-Württemberg 6.
- LEMCKE, K., BÜCHI, U. P., WIENER, G. (1968): *Einige Ergebnisse der Erdölexploration auf die mittelländische Molasse der Zentralschweiz*. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 35/87.
- LINIGER, H. (1925): *Geologie des Delsberger Beckens und der Umgebung von Movelier*. – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 55.

- MEIA, J. (1969): *Géologie du Mont Aubert et de l'anticlinal Soliat – Montagne de Boudry au Nord du Lac de Neuchâtel.* – Bull. Soc. neuchât. Géogr. 53/3.
- MÜLLER, L. (1963): *Der Felsbau.* – Enke Verlag, Stuttgart.
- NABHOLZ, W. (1956): *Untersuchungen über Faltung und Klüftung im nordschweizerischen Jura.* – Eclogae geol. Helv. 49/2.
- NADAI, A. (1931): *Plasticity. A Mechanics of the Plastic State of Matter.* – McGraw-Hill, New York.
- NETTLETON, L. L. (1940): *Geophysical Prospecting for Oil.* – McGraw-Hill, New York.
- PHILIPS, F. C. (1954): *The use of stereographic projection in structural geology.* – Edward Arnold, London.
- PLESSMANN, W. (1972): *Horizontal-Stylolithen im französisch-schweizerischen Tafel- und Faltenjura und ihre Einpassung in den regionalen Rahmen.* – Geol. Rdsch. 61/1.
- RAMSAY, J. G. (1967): *Folding and fracturing of rocks.* – McGraw-Hill, New York.
- RYBACH, L. (1962): *Refraktionsseismische Untersuchungen im Raume Aare-, Limmat- und Surbtal.* – Beitr. Geol. Schweiz, Geophys. 5.
- SALOMON, R. (1925): *Beobachtungen über Harnische.* – Sitzber. Heidelb. Akad. Wiss. 4.
- SCHMIDT-THOME, P. (1972): *Lehrbuch der allgemeinen Geologie. Bd. II: Tektonik.* – Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHNEIDER, A. (1960): *Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt Porrentruy.* – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 109.
- SCHUSTER, M. (1954): *Das Geographische und Geologische Blockbild.* – Akademie-Verl., Berlin.
- SLOTNIK, M. M. (1950): *A Graphical Method for the Interpretation of Refraction Profile Data.* – Geophysics 15/2.
- STÄUBLE, A. J. (1959): *Zur Stratigraphie des Callovian im zentralen Schweizer Jura.* – Eclogae geol. Helv. 52/1.
- WAGNER, G. H. (1964): *Kleintektonische Untersuchungen im Gebiet des Nördlinger Rieses.* – Geol. Jb. 81.
- WIENMAYER, C. (1923): *Geologie der Juraketten zwischen Balsthal und Wangen a. A.* – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 48.
- WOHNLICH, M. (1967): *Kleintektonische Bruch- und Fließdeformationen im Faltenjura.* – Diss. Univ. Basel (vollinhaltliche Fassung, unpubl.).
- WYROBEK, S. M. (1956): *Application of Delay and Intercept Times in the Interpretation of Multilayer Refraction Time Distance Curves.* – Geophys. Prospect. 4/2.
- ZIEGLER, P. A. (1956): *Geologische Beschreibung des Blattes Courtelary und Zur Stratigraphie des Séquanien im zentralen Schweizer Jura.* – Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 102.

Verzeichnis der verwendeten Karten

a) Geologische Karten

Geologischer Atlas der Schweiz 1:25000:

- Blatt 92–95: Movelier–Soyhières–Delémont–Courrendlin (1930)
- Blatt 1085: St-Ursanne (1963)

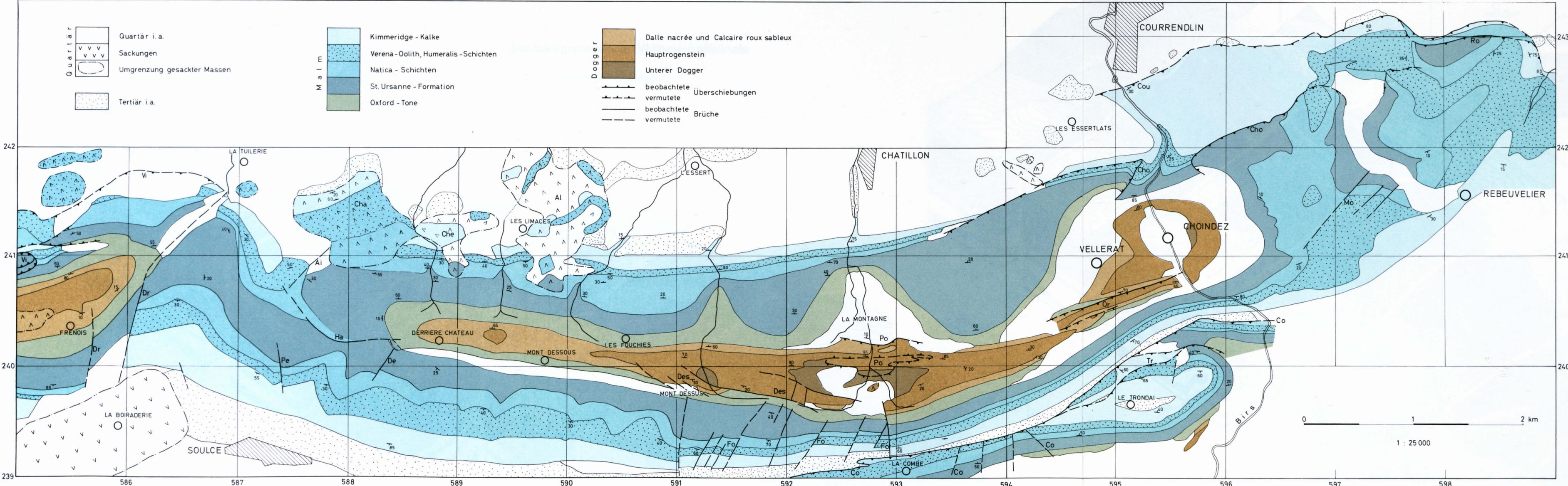
Unveröffentlichte Originalaufnahmen 1:25000:

- M. BIRKHÄUSER: Originalkartierung Umgebung Undervelier, 1925 (dep. bei der Schweiz. Geologischen Kommission)
- R. ELBER: Originalkartierung Raimeux- und Vellerat-Antiklinale, 1920 (dep. bei der Schweiz. Geologischen Kommission)

b) Topographische Karten

Landeskarte der Schweiz:

- 1:25000 Blätter: 1086 Delémont; 1106 Moutier
- 1:50000 Blatt: 223 Delémont



Quartär

- Quartär i. a.
- v Sackungen
- Umgrenzung gesackter Massen
- Tertiär i. a.

M a i n

- Kimmeridge - Kalke
- . Verena - Oolith, Humeralis - Schichten
- / Natica - Schichten
- \ St. Ursanne - Formation
- x Oxford - Tone

Dogger

- Dalle nacrée und Calcaire roux sableux
- Haupttrogenstein
- Unterer Dogger

beobachtete
 vermutete
 beobachtete
 vermutete

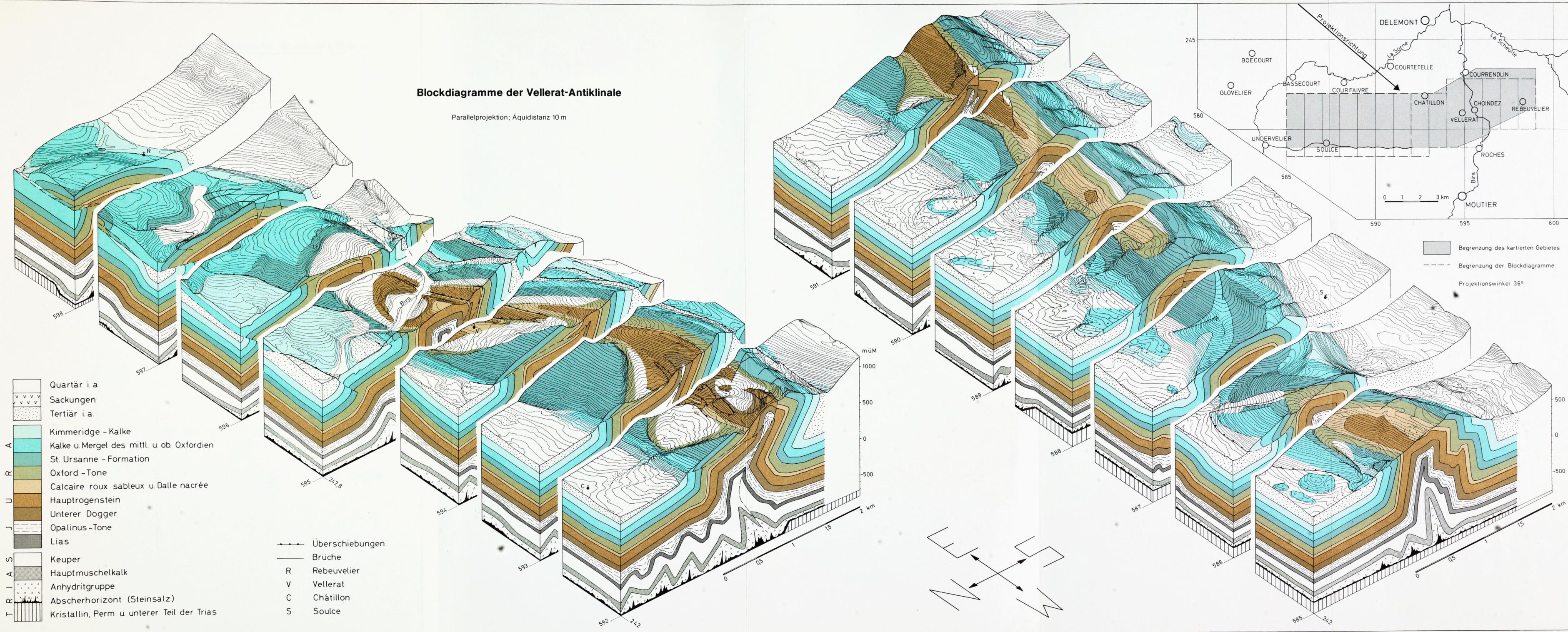
Überschiebungen
Brüche

Brüche von Côte du Droit	Dr	Überschiebungen von Le Vialon	Vi	Sackungsmassen von Chambion	Cha
Peute Côte	Pe	La Combe	Co	Chételay	Che
Forêt de l'Aimery	Ai	Forêt des Vieux Ponts	Po	Combe Alery	Al
Haute du Droit	Ha	L'Ordon Noé	Or		
Derrière Château	De	Choindez	Cho		
Mont Dessus	Des	Courrendlin	Cou		
Droit de Folpotat	Fo	Forêt de Rosé	Ro		
La Combe	Co	Le Trondai	Tr		
Sur Montchemin	Mo				

Geologische Kartenskizze des Untersuchungsgebietes

Blockdiagramme der Vellerat-Antiklinale

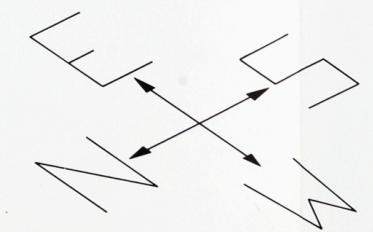
Parallelprojektion; Äquidistanz 10 m

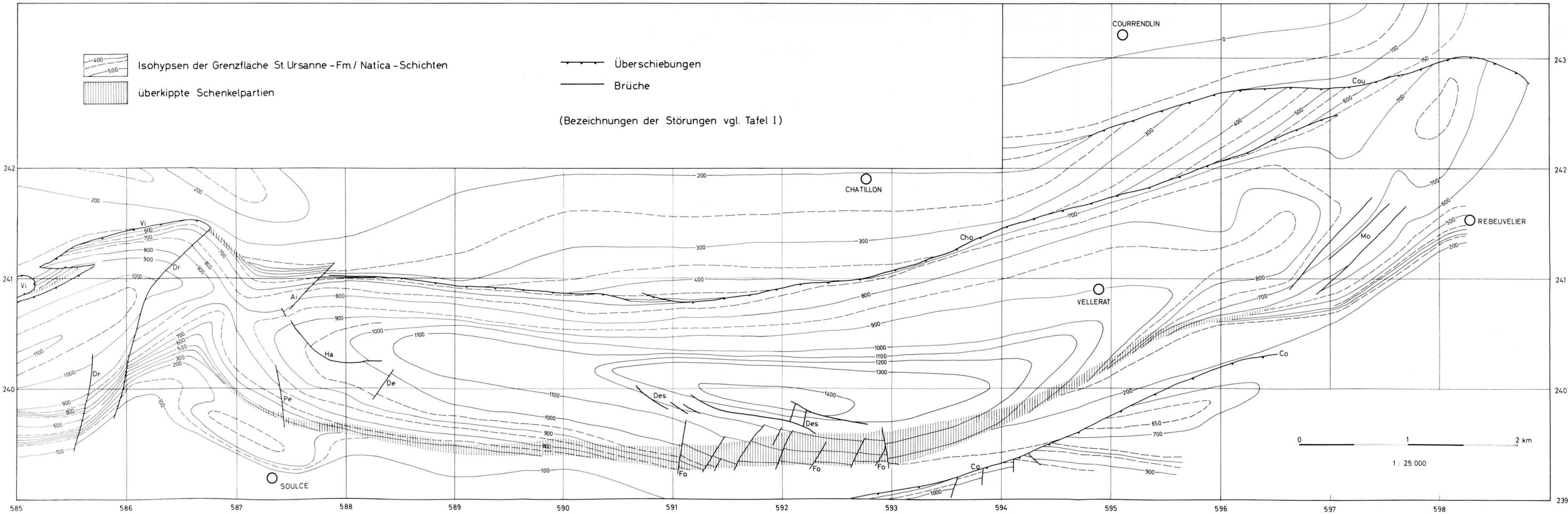


- Quartär i.a.
- Sackungen
- Tertiär i.a.
- Kimmeridge - Kalke
- A Kalke u. Mergel des mittl. u. ob. Oxfordien
- St. Ursanne - Formation
- R Oxford - Tone
- Calcaire roux sableux u. Dalle nacrée
- D Haupttrogenstein
- Unterer Dogger
- T Opalinus - Tone
- Lias
- S Keuper
- A Hauptmuschelkalk
- I Anhydritgruppe
- R Abscherhorizont (Steinsalz)
- T Kristallin, Perm u. unterer Teil der Trias

- Überschiebungen
- Brüche
- R Rebeuvelier
- V Vellerat
- C Châtillon
- S Soulce

Begrenzung des kartierten Gebietes
 Begrenzung der Blockdiagramme
 Projektionswinkel 36°





Strukturkarte der Grenzfläche St. Ursanne-Formation/Natica-Schichten

Richtungen für grösste Hauptspannung σ_1



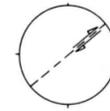
Messungen

- σ_1 von sinistralen Klüften
- - - σ_1 von dextralen Klüften
- - - σ_1 von Faltungsvorschub
- - - σ_1 von Stylolithen
- ⋯ σ_1 von Über- resp. Unterschiebungen

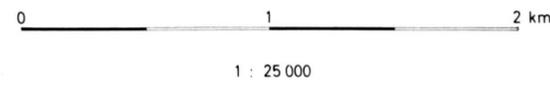
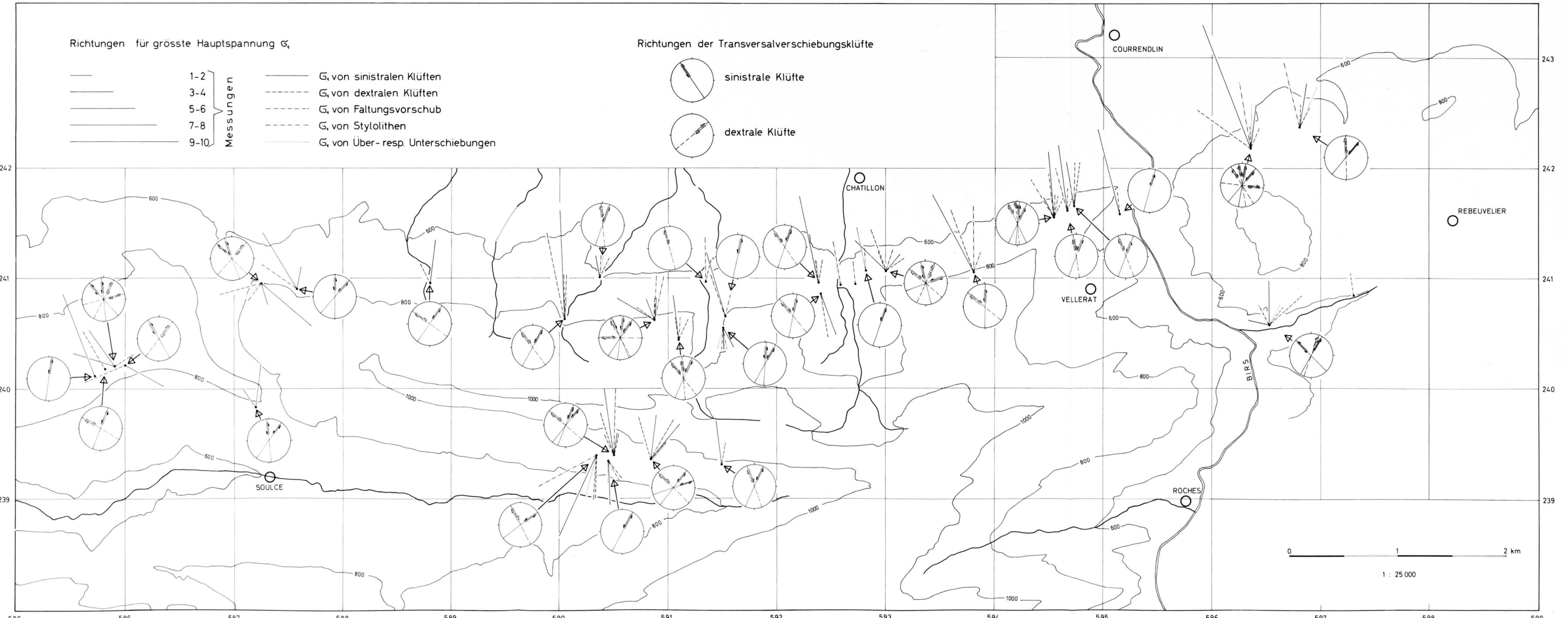
Richtungen der Transversalverschiebungsklüfte



sinistrale Klüfte



dextrale Klüfte



Kleintektonik, Messergebnisse und Richtungen der grössten Hauptspannung