

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
KLEINERE MITTEILUNGEN

Nr. 41

**Untersuchungen über radioaktive Mineralien
und Gesteine in der Schweiz**

**Mehrphasige alpine Tektonik am Nordrand
des Aarmassivs**

**Beobachtungen im Druckstollen Trift-Speicherberg
(Gadmental) der Kraftwerke Oberhasli AG**

von

TONI P. LABHART

**Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission und des
Arbeitsausschusses für die Untersuchung schweizerischer
Mineralien und Gesteine auf Atombrennstoffe und seltene
Elemente**

Die vorliegende Arbeit resultiert aus Beobachtungen, die Herr Dr. T. Labhart bei der radiometrischen und geologischen Aufnahme des Druckstollens Trift-Speicherberg (Gadmental) der Kraftwerke Oberhasli AG im Auftrag des Arbeitsausschusses für die Untersuchung schweizerischer Mineralien und Gesteine auf Atombrennstoffe und seltene Elemente durchgeführt hatte. Die Untersuchung ergab bedeutsame Beobachtungen zur Deutung des Gebirgsbaues des nördlichen Aarmassivs, die zu einer kleineren Mitteilung „Mehrphasige alpine Tektonik am Nordrand des Aarmassivs“ zusammengestellt wurden. Dem Verfasser sei für seine interessante Studie bestens gedankt.

Die Finanzierung der Stollenaufnahmen durch den Arbeitsausschuss erfolgte seitens des Schweizerischen Nationalfonds, dem dafür der beste Dank ausgesprochen sei.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist der Autor allein verantwortlich.

Zürich, April 1967

Der Präsident der
Schweiz. Geotechnischen Kommission
und des Arbeitsausschusses

Prof. F. DE QUERVAIN

Mehrphasige alpine Tektonik am Nordrand des Aarmassivs

Beobachtungen im Druckstollen Trift-Speicherberg (Gadmental) der Kraftwerke Oberhasli AG

von Toni P. Labhart (Bern)¹⁾

mit 19 Figuren und 2 Tabellen im Text

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird über eine detaillierte, kleintektonische Untersuchung eines Kraftwerkstollens am Nordrand des Aarmassivs berichtet (Situation Fig. 1, 2 und 3). Der Stollen durchfährt neben aarmassivischem Kristallin (Schieferhülle und Innertkirchner-Granit) auch einen Zug eingeschuppter mesozoischer Sedimente. Dieser gehört zum Pfaffenkopfkeil, eine jener altbekannten, keilförmigen Sedimenteintragerungen im Kristallin des nördlichen Aarmassivs.

Neben Relikten voralpinen Gebirgsbaues (z. B. geregelten Schollen im Innertkirchner-Granit) wurde im Stollen eine stets gleichbleibende Abfolge von Deformationen beobachtet, welche Sedimente und Kristallin in gleicher Art und Weise erfasst hat, also alpinen Alters ist. Besonders charakteristisch ist ein System flacher Überschiebungsbahnen, welches bei konstantem Relativsinn der Bewegung (Höheres nach Nordwesten) alle Gesteine teilweise sehr engständig durchsetzt.

Das Problem des Bildungsmechanismus der «Keile» wird anhand früherer Darstellungen und Untersuchungen dargelegt. Anlehnend an die Stollenbeobachtungen werden die Keile als das *Produkt einer mehrphasigen alpinen Tektonik* interpretiert.

In einer ersten Phase scheint im Kristallin eine steil südostfallende Schieferung angelegt worden zu sein unter gleichzeitiger Einmuldung bzw. Einspiessung von Teilen der darüberliegenden helvetischen Sedimentdecke. In einer zweiten Phase, die zeitlich wahrscheinlich mit der Überschiebung der helvetischen Decken zusammenfällt, glitten Teile des Kristallins mitsamt eingemuldeten und darüberliegenden Sedimenten nach Norden. Dieses Gleiten erfolgte entlang flachen Bewegungsbahnen, wobei sich in den Sedimenten flach nordwestvergente Scherfalten ausbildeten. Das derart dislozierte Kristallin muss als *parautochthon* bezeichnet werden. Mehrere jüngere Deformationen, vorab ein Nordost-Südwest streichendes Bruchsystem, haben das tektonische Bild weiter kompliziert.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	804
2. Problemstellung und Arbeitsmethode	804
3. Kurze Charakterisierung der durchfahrenen Gesteinszonen	807
4. Kleintektonische Beobachtungen im Stollen	808
4.1. Rückschlüsse auf voralpinen Gebirgsbau	808
4.2. Die Altersabfolge der alpinen Deformationen	809
4.2.1. Schieferung	810
4.2.2. Überschiebung	812
4.2.3. Längsbrüche	816
4.2.4. Knitterung	818
4.2.5. Querbrüche	820
5. Zusammenstellung der wichtigsten Beobachtungen	820
6. Über den Bildungsmechanismus des Pfaffenkopfkeils	821
Literatur	830

¹⁾ Mineralogisch-petrographisches Institut der Universität Bern, Sahlistrasse 6, 3000 Bern.

1. EINLEITUNG

Seit dem Weiterausbau der Anlagen der Kraftwerke Oberhasli AG im Aaretal ist es nicht mehr möglich, die gesamte Wassermenge der Fassung Trift im Kraftwerk Innertkirchen I auszunützen. Das in der Fassung Trift anfallende Wasser wird in Zukunft durch einen Druckstollen nach Speicherberg geleitet und von dort durch einen Druckschacht der neuerstellten Zentrale Hopflauen an der Sustenstrasse zugeführt (siehe Fig. 1–3).

Im März 1964 hatte der Verfasser Gelegenheit, im Auftrag des «Arbeitsausschuss für die Untersuchung schweizerischer Mineralien und Gesteine auf Atom-Brennstoffe und seltene Elemente» gemeinsam mit L. KAJEL und H. SCHWARZ diese beiden Stollen radiometrisch und geologisch aufzunehmen. Ich bin Herrn Prof. TH. HÜGI zu grösstem Dank verpflichtet, dass er, die Bedeutung dieser einzigartigen, leider temporären Aufschlüsse für die Tektonik des nördlichen Aarmassivs erkennend, mir die Gelegenheit gab, mich bei den Stollenaufnahmen speziell dem Studium der Tektonik zu widmen.

Den Kraftwerken Oberhasli AG und all ihrem Personal sei für die stete Hilfsbereitschaft und Gastfreundschaft bestens gedankt. Speziellen Dank gebührt Herrn BYSÄTH für seine mit viel Können und Interesse angefertigten Stollenfotografien (Fotos Fig. 6 und 9–12 dieser Arbeit).

2. PROBLEMSTELLUNG UND ARBEITSMETHODE

Das heutige Aarmassiv ist sicher das Produkt mehrerer Gebirgsbildungen. Man weiss, dass die jüngste dieser Gebirgsbildungen, die alpine, das hercynische Massiv sehr stark tektonisch beansprucht hat. Jedem im Aarmassiv Arbeitenden stellt sich die Frage nach der Art und dem Ausmass der alpinen tektonischen Überprägung seines Gebietes. Er muss sie kennen, nicht zuletzt um den voralpinen Zustand seiner Gneise und Granite rekonstruieren zu können.

Auch der Grosstektoniker ist interessiert an den alpinen Veränderungen im Aarmassiv: Was für eine Rolle spielte dieser gewaltige Störkörper während der alpinen Gebirgsbildung? Erkennt man Spuren seitlichen Zusammenschubs? Hat die Bezeichnung «autochthones Zentralmassiv» uneingeschränkt Gültigkeit? Was hatte die junge Hebung des Aarmassivs für tektonische Konsequenzen und wie ist sie vor sich gegangen?

Eindeutig ist der alpine Anteil der Deformationen nur am Kontakt des Kristallins mit Sedimenten postpermischen Alters auszuscheiden. Der Autor (T. LABHART, 1965) hat versucht, am Südrand des Massivs die alpinen Verformungen des aarmassivischen Altkristallins zu erfassen, indem er zeigte, dass die Art und vor allem auch die Abfolge der darin beobachteten jüngsten Deformationen identisch ist mit derjenigen im Perm der Urseren-Zone. Im Norden des Massivs liegen die Verhältnisse wesentlich günstiger. Man kennt seit langem die alpinen Verkeilungen von mesozoischen Sedimenten und aarmassivischem Kristallin. Hier nahm die geologische Erforschung des Aarmassivs ihren Anfang: FRANZ JOSEPH HUGI, ARNOLD ESCHER VON DER LINTH, ARMIN BALTZER und ALBERT HEIM haben sich

intensiv mit diesen «Keilen» befasst. Sie haben früh erkannt, dass hier Schlüsselstellen alpiner Tektonik vorliegen.

Im Druckstollen Trift-Speicherberg bot sich die einzigartige Gelegenheit, ein Profil durch einen solchen Keil (den Pfaffenkopfkeil) vom liegenden ins hangende Kristallin zu studieren. Wir versuchten hier durch das Studium der Kleintektonik die alpinen Deformationen möglichst genau zu erfassen, mit dem Endzweck, Näheres über Mechanismus und relatives Alter der Keilbildung zu erfahren. Der entscheidende Schritt der Arbeit war die Aufnahme eines Gefüge-Inventars. Bei dieser Aufnahme wurde vor allem auf folgende Punkte geachtet:

a) Möglichst vollständige Erfassung der einzelnen Deformationen

Im Falle der im untersuchten Profil so wichtigen Verschiebungs-Flächenscharen hiess das:

- Festlegen der Verschiebungs-Ebene durch Einmessen der Scherfläche;
- Festlegen der Verschiebungsrichtung durch Einmessen der Gleitstriemung;
- Festlegen des Relativsinnes der Verschiebung. Dieser konnte erkannt werden an der Versetzung von Vorzeichnungen (z. B. Schichtung, ältere Scherflächen, aplitische Lagen), an Schleppungen (s-förmige Verbiegungen älterer Flächen irgendwelcher Art) sowie an Abrissnischen. Häufig konnten zwei oder drei Kriterien kombiniert werden;
- Festlegen des Absolutbetrages der Verschiebung. Im selteneren Fall konnte dieser Betrag parallel zu den Gleitstriemungen direkt gemessen werden, im Normalfall, bei schiefen Anschnitten, musste er berechnet werden.

Ferner wurde bei Verschiebungsflächenscharen versucht, annähernd auszurechnen, zu welchen Beträgen sich die Teilbewegungen summieren.

b) Erfassung der Altersabfolge der Deformationen

Die Altersabfolge konnte anhand von Versetzungen und Schleppungen meist eindeutig erkannt werden. Bei der Unzahl sich schneidender Verschiebungsflächen²⁾ ergab sich eine recht mühsame Beobachtungsarbeit. Es zeigte sich aber bald, dass man mehrere Verschiebungsflächenscharen vor sich hatte. Innerhalb der einzelnen Scharen war eine erstaunliche Konstanz der Raumlage, der Ausbildung der Flächen sowie der Gleitstriemungen und der Relativverschiebungen festzustellen. Über diese äusserliche Gleichartigkeit hinaus konnte man eine stets gleichbleibende Altersabfolge der Flächenscharen konstatieren. Wir gelangten so zur Rekonstruktion einer mehraktigen alpinen Deformation, die in Abschnitt 4 beschrieben ist.

²⁾ ALBERT HEIM (1921, Bd. 2/I, p. 128) stellte bereits fest: «Gegen den Sedimentmantel hin kommen komplizierte und sehr schwierig auseinander zu lesende Kombinationen von in verschiedener Richtung verlaufenden Schichtungen, Schieferungen, Glimmerlagen, Klüftungen vor. Die Erscheinungen sind verwickelt und noch keineswegs allseitig beobachtet oder gar verstanden.»

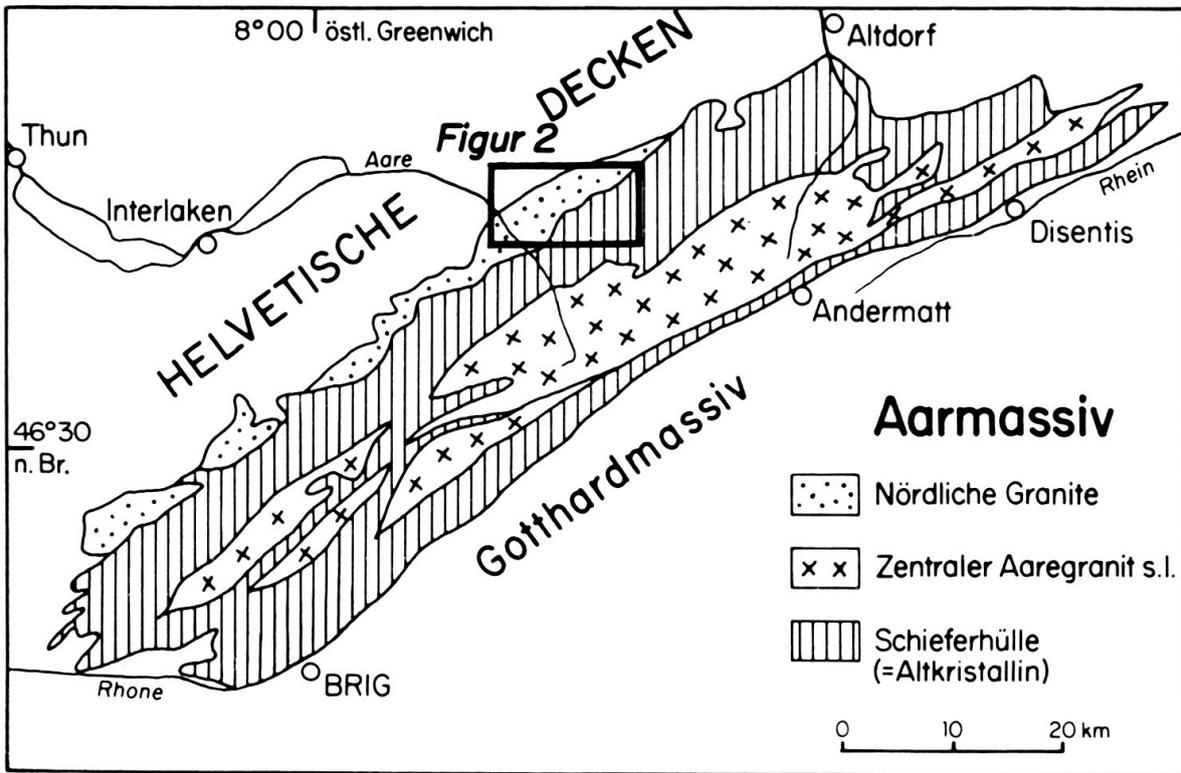


Fig. 1. Tektonische Übersichtsskizze.

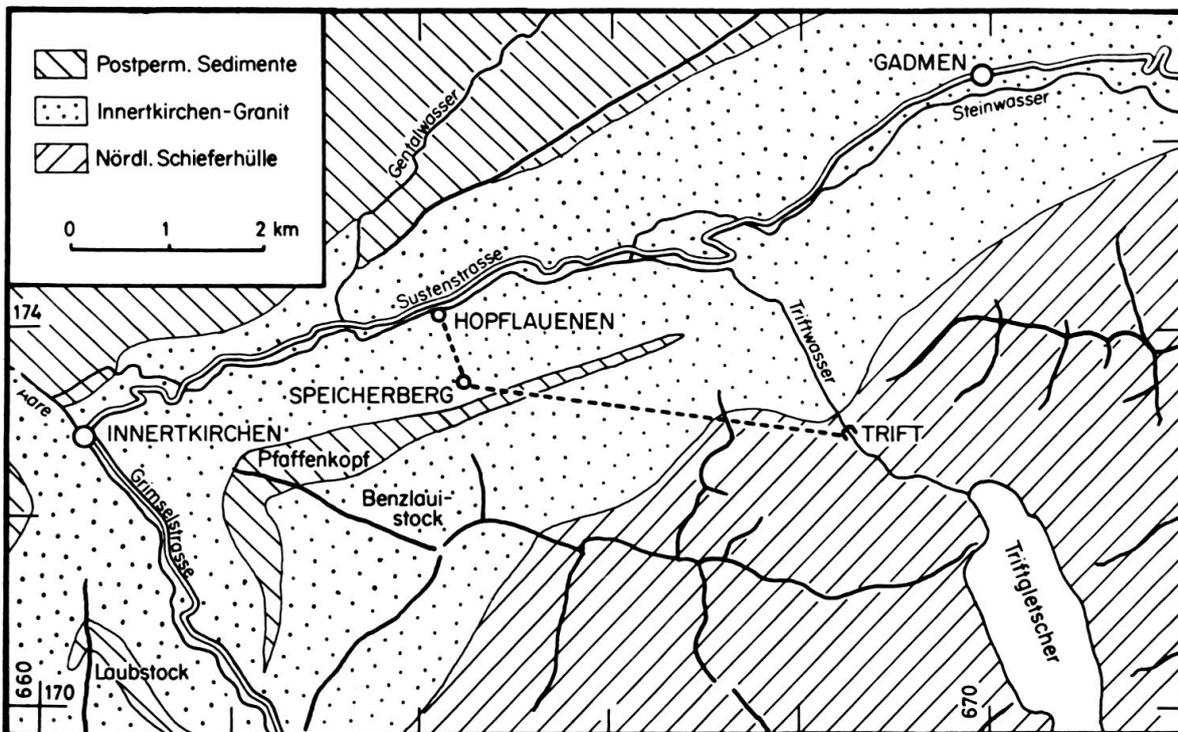


Fig. 2. Geologische Kartenskizze 1:50 000.

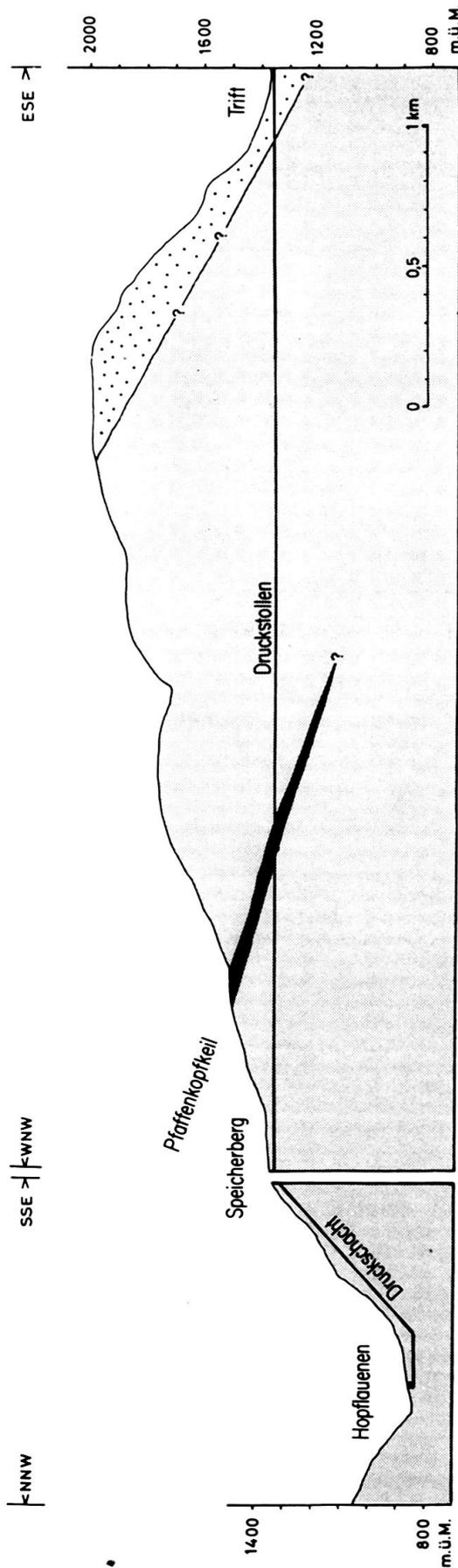


Fig. 3. Schematisches Stollenprofil. Punktiert: Altkristallin (Erstfelder-Gneis). Grau: Innertkirchner-Granit.

3. KURZE CHARAKTERISIERUNG DER DURCHFahrenEN GESTEINSZONEN

Ohne auf petrographische Details einzugehen, sollen im folgenden die im Stollen angefahrenen Gesteinszonen kurz charakterisiert werden (vgl. Fig. 1 und 2 und Stollenprofil, Fig. 3).

Von Südosten nach Nordwesten wurden angetroffen (Distanzen ab Einmündung Fenster Trift):

- Altkristallin des Aarmassivs (Erstfelder-Gneis) von m 0 bis 235.
- Innertkirchner-Granit von m 235 bis 2685 und m 2777 bis Hopflauenen.
- Sedimente des Pfaffenkopffeils von m 2685 bis 2777.

3.1. Das Altkristallin des Aarmassivs liegt im Stollen vor als Erstfelder-Gneis. E. HUGI (1934) hatte im Geologischen Führer eine «Erstfelder-Gneiszone» ausgeschieden, die sich von Lauterbrunnen bis Erstfeld erstreckte. TH. HÜGI (1955, p. 304) machte hingegen darauf aufmerksam, dass der Erstfelder-Gneis nicht in einer geschlossenen Zone auftritt. Erstfelder-Gneisartige Gesteine sind in der ganzen Schieferhülle des Zentralen Aaregranits lokal anzutreffen.

Erstfelder-Gneise sind helle Biotit-Gneise von sehr variabler Textur. Typisch ist oft eine Fluidalfältelung im Kleinbereich; siehe die gute Beschreibung in ALBERT und ARNOLD HEIM (1917, p. 425–429). Daneben gibt es plattige, paralleltexturierte Typen. Auch Übergänge zu mehr oder weniger massigen Granitgneisen sind bekannt.

Das im Druckstollen anstehende Gestein ist ein plattiger Erstfelder-Gneis; er ist sekundär(alpin) stark verschiefert worden.

3.2. Der Innertkirchner-Granit gehört zu den nördlichen Graniten des

Aarmassivs (siehe TH. HÜGI, 1956, Tafel I). Innerhalb dieser Gruppe ist er dem Lauterbrunner-Granit eng verwandt. Beide Gesteine sind schollenreiche, im Gegensatz zum homogeneren Gastern-Granit stellenweise stark kontaminierte Pinit-Granite. Von gut erhaltenen Nebengesteinseinschlüssen (Kalksilikatfelse, Marmore, Amphibolite, Biotit-Gneise) über feinstkörnige Biotit-Gneise (?Kontakt-Hornfelse) zu diffusen Flecken fast resorbierter Schollen sind alle Übergänge vorhanden. Die Assimilation von Sedimenten äussert sich in chemischen Analysen im charakteristischen Al-Überschuss.

Die im Stollen durchfahrenen Innertkirchner-Granit-Partien sind sehr instruktiv. Prachtvoll massige, alpin praktisch nicht verschieferte Granite mit schönen Schollen sind im mittleren Stollenteil (von m 1380 bis 1640) aufgeschlossen (Fig. 10). Alle Übergänge verbinden diesen klassischen Innertkirchner-Granit mit einem sehr stark verschieferten Gestein, von dem man im Feld kaum feststellen kann, ob es sich um einen alpin extrem mitgenommenen Granit oder aber um eingeschlossene Teile seiner Schieferhülle handelt.

3.3. Eingelagert in den Innertkirchner-Granit findet man eine rund 90 m mächtige Abfolge von Sedimenten. Dabei handelt es sich um den südlichsten Teil des Pfaffenkopfkails (vergleiche F. MÜLLER, 1938, Tafel V). Nach den Angaben von H. SCHWARZ folgt im Liegenden (Nordwesten) auf einer rot und grün verfärbten Zone des Innertkirchner-Granits (permische Oberflächenverwitterung) eine normale, aber tektonisch reduzierte Abfolge Trias- Siderolithikum; darauf liegen Schubfetzen in stratigraphisch ungeordneter Abfolge, in denen Triasdolomit und Malmkalk dominieren. Der Hangendkontakt mit dem Innertkirchner-Granit ist tektonisch; er wird gebildet durch eine flach südostfallende Überschiebungsfläche.

4. KLEINTEKTONISCHE BEOBACHTUNGEN IM STOLLEN

4.1 Rückschlüsse auf voralpinen Gebirgsbau

Altkristallin (Erstfelder-Gneis)

Die kurze Aufschlußstrecke und die starke junge Verschieferung verunmöglichen das Sammeln eines reichen Beobachtungsmaterials. Wo die (präalpine) Bänderung des Erstfelder-Gneises erkennbar ist, fällt sie mittelsteil nach Norden ein. Einige einmessbare Faltenachsen im Dezimeterbereich fallen flach nach Südwesten.

Innertkirchner-Granit

Es ist schwierig zu erkennen, ob dieser Granit ein primäres Parallelgefüge besitzt, das uns Hinweise auf seine primäre, präalpine Struktur geben könnte. Im Stollen ist er an mehreren Stellen völlig massig entwickelt, an anderen zeigt er eine Art Bänderung, deren Deutung aber immer durch Konvergenzen mit den alpinen Verschieferungen erschwert ist. Hier gilt es noch weitere Feldbeobachtungen zu sammeln. Gut festzulegen ist hingegen in vielen Fällen die Lage der im Granit eingeschlossenen Schollen.

In Fig. 4 ist die Orientierung von 103 eingemessenen Schollen dargestellt. Bei den Schollen im dm^3 -Bereich, unter denen die feinkörnigen Biotitgneise mengenmässig dominieren, ist die äussere Form praktisch in allen Fällen durch das alte Parallelgefüge bestimmt. Die Schollen sind gesetzmässig angeordnet; sie zeigen bevorzugt Südostfallen von 50 bis 80° . Es scheint durchaus möglich, dass diese kleinen Nebengesteinsschollen bei der Entstehung des Innertkirchner-Granits eingeregelt worden sind. Das Südostfallen wäre gut verständlich; wir befinden uns hier am Südostrand der Innertkirchner-Granitmasse. Untersuchungen über die Lage der Schollen in diesem Granit in einem grösseren Gebiet wären sicher sehr aufschlussreich.

Das Parallelgefüge der grösseren Schollen, die im Stollenanschnitt bis zehn Meter lang sind, stimmt, soweit man das beurteilen kann, nicht mit der äusseren Form überein. Die Lage dieses Parallelgefüges weicht von der Orientierung der kleinen Schollen ab und zeigt eine deutliche, wenn auch statistisch nicht gesicherte Übereinstimmung mit dem Gefüge im Altkristallin. Möglicherweise handelt es sich hier um Altkristallinpakete, die infolge ihrer Grösse bei der Granitintrusion ihre ursprüngliche Lage beibehalten haben.

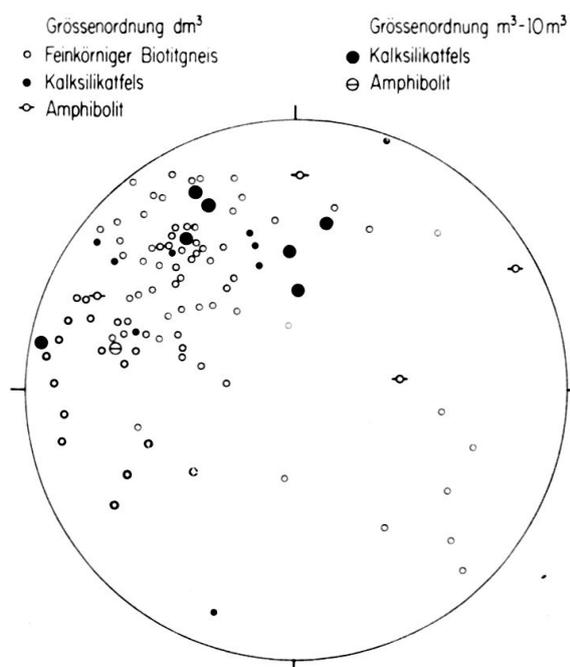


Fig. 4. Planargefüge von Schollen im Innertkirchner-Granit; bei den Schollen im Dezimeterbereich ist es identisch mit der äusseren Form der Scholle, bei den grösseren in der Regel nicht.

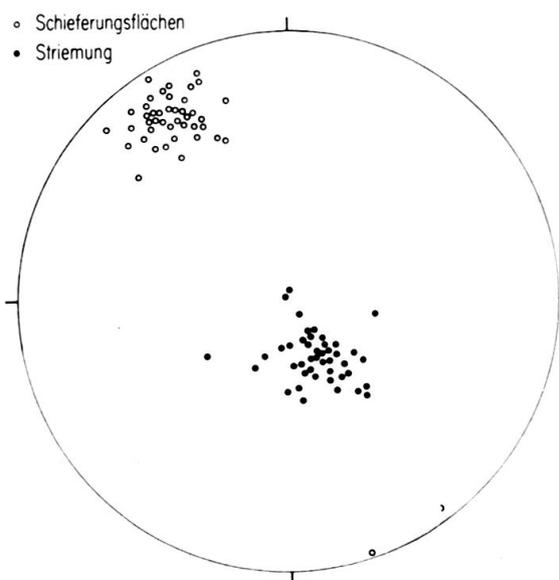


Fig. 5. Schieferung im Kristallin (Flächen als Pole, Lineare als Durchstoss-punkte; untere Halbkugel).

4.2 Die alpinen Deformationen

Alle jüngeren Deformationen fanden sich nun sowohl im Sedimentkeil als auch im Kristallin, und sie dürften deshalb alpines Alter haben. Der Übersicht halber sei der eingehenden Beschreibung eine tabellarische Zusammenfassung vorangestellt.

Vom Älteren zum Jüngeren fortschreitend finden wir die in Tab. 1 aufgeführte Abfolge (nicht gesicherte Altersbeziehungen sind durch eine unterbrochene Linie angedeutet).

Tabelle 1. Altersabfolge der alpinen Deformationen

Kristallin des Aarmassivs	Sedimente des Pfaffenkopfkeils
Steil südostfallende Schieferung mit feiner Striemung in der Fallrichtung.	<ul style="list-style-type: none"> – Erste Schieferung, wahrscheinlich parallel zur Schichtung; starke lineare Streckung; 40–70° Südostfallen. – Zweite, steiler südostfallende Schieferung; Falten mit subhorizontalen Achsen.
Flach südostfallende Überschiebungsflächen mit ausgeprägter Gleitstriemung; Hangendes immer nach Nordwesten bewegt.	
Vertikales Nordost–Südwest (Längs-)Bruchsystem mit ausgeprägter steiler Gleitstriemung und stets relativ abgesenktem Südostflügel.	
Knitterung.	—
Nord–Süd-Brüche mit flach nordfallender Gleitstriemung.	

4.2.1. Schieferung

Im untersuchten Kristallin ist eine steil südostfallende Schieferung von grosser Bedeutung. Sie trägt eine charakteristische feine Striemung bis Mikrowellung, welche durch geregeltes Wachstum von Serizit und Chlorit hervorgerufen wird; diese Striemung liegt annähernd im Fallen der Schieferungsflächen. Eine Anzahl Messungen sind in Fig. 5 dargestellt.

Die Überarbeitung der Gesteine ist sehr verschieden intensiv. An vielen Stellen tritt die Schieferung als engständige, durchgreifende Deformation auf (Fig. 6). Sie kann aber auch, wie zum Beispiel im mittleren Stollenteil im Innertkirchner-Granit, weitständig entwickelt sein und nur etwa alle zehn Centimeter auftreten.

Typisch ist, dass an den Schieferungsflächen nie Bewegungen beobachtet werden konnten. Die Glimmer- und Chloritwellung hat nicht den Charakter einer Gleitstriemung, ganz im Gegensatz zu den deutlichen Bewegungsspuren der jüngeren Deformationen.

NW



SE

Fig. 6. In intensiv verschiefertem Innertkirchner-Granit erkennt man die steil südostfallende Schieferung und die jüngeren, flachliegenden Überschiebungsflächen. Druckstollen Trift-Speicherberg, m 2783 ab Trift.

Es handelt sich bei dieser Schieferung um die verbreitetste alpine Deformation im Aarmassiv, um die «erste alpine Schieferung». Viele Bearbeiter des Aarmassivs haben darauf hingewiesen, dass eine steil südostfallende Schieferung fast überall von Bedeutung ist. Wir konnten früher zeigen, dass die für diese Schieferung charakteristische Striemung in der Längsrichtung des Aarmassivs einen nach oben geöffneten Fächer bildet. Hier, im mittleren Aarmassiv, liegt die Striemung in der Fallinie.

In den Sedimenten des Pfaffenkopfkeils sind als älteste Deformationen (älter als die Überschiebungsflächen) zwei Scherflächensysteme ausgebildet. Eine erste Schieferung, welche wahrscheinlich ungefähr parallel zur Schichtung liegt, fällt mit 40 bis 70° nach Südosten. Die feine Wellung auf der Schieferung liegt generell im Fallen, scheint aber recht grossen Schwankungen unterworfen zu sein; sie zu erfassen genügen die kurzen Stollenaufschlüsse nicht.

Eine zweite gleichstreichende, aber steilere Schieferung schneidet die erste; es bilden sich Falten mit subhorizontalen Achsen (Fig. 7).

Eine Alters-Parallelisation der Schieferungen im Massiv und im Keil kann auf Grund der Stollenbeobachtungen nicht vorgenommen werden.

NW

SE



Fig. 7. Im Malmkalk des Pfaffenkopfkeils wird eine erste Schieferung (mit parallelen Calcitlagen) durch eine zweite, steilere gefaltet. Druckstollen Trift-Speicherberg, m 2720 ab Trift.

4.2.2. Überschiebung

Eine auffällige Schar von Verschiebungsflächen, welche jünger ist als die oben beschriebenen Schieferungen, fällt mit durchschnittlich 20° nach Südosten. Die Flächen tragen häufig einen Belag von Quarz und Chlorit, der bis zehn Zentimeter dick werden kann (Fig. 11); dazu kommt oft ein dünner Film einer graphitgrauen, abfärbenden Substanz. Die auffällige Rillung auf den Verschiebungsflächen ist eindeutig eine Gleitstriemung; ihre Raumlage ist sehr konstant. Fig. 8 gibt eine Reihe Messwerte von Überschiebungsflächen und Gleitstriemungen.

- Verschiebungsflächen im Massiv ● Gleitstriemung im Massiv
- " " im Keil ● " " im Keil

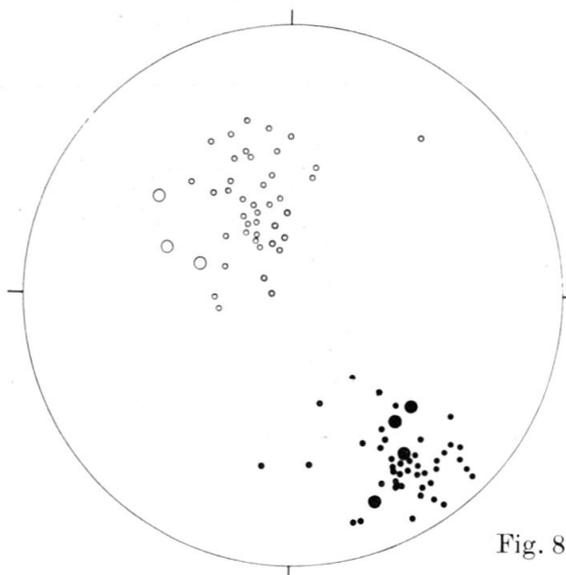


Fig. 8. Überschiebungsflächen.

Ausserordentlich konstant ist der Relativsinn der Verschiebung zweier benachbarter Pakete: immer wurde das Hangende relativ nach Nordwesten bewegt (Fig. 6, 9, 10 und 12). Man erkennt die Verschiebung meist an der Versetzung und Schlepung der Schieferung (Fig. 6) und an der Versetzung von Gesteinsgrenzen, immer aber an den Abriss-Stufen auf den Scherflächen. Die Überschiebungsflächen treten sehr verschieden dicht geschart auf. Es scheint ein Zusammenhang zu bestehen mit der Dichte der älteren Schieferung; wo diese sehr engständig entwickelt ist, haben die Überschiebungsflächen ein bis zwei Centimeter Abstand. Je massiger das Gestein vorher war, desto weiter treten die einzelnen Flächen auseinander: in Fig. 6 beträgt der Abstand drei bis acht, in Fig. 10 ca. 80 Centimeter. Im massigen Innertkirchner-Granit des mittleren Stollenabschnittes schliesslich wächst der Abstand auf zehn Meter an; hier sind die Beläge dick und die Gleitstriemungen tiefgefurcht (Fig. 11). Während sonst der Versetzungsbetrag an den einzelnen Flächen zwischen wenigen Millimetern und fünfzig Centimetern liegt, muss er hier, nach der Ausbildung der Überschiebungsfläche zu schliessen, wesentlich mehr betragen.

Die aarmassivischen Gesteine sind auf grosse Erstreckung durch die Dominanz der Schieferung einerseits und der Überschiebungsflächen anderseits in Stengel mit horizontaler Längsachse und Parallelogramm-Querschnitten zerteilt (Fig. 9).



Fig. 9. An aplitischen Lagen im Innertkirchner-Granit sind die Überschiebungsflächen oft sehr viel besser zu sehen als im Nebengestein. Druckstollen Trift-Speicherberg, m 1501 ab Trift.

Die Überschiebungsflächen treten in gleicher Lage und gleichem Versetzungssinn auch im Pfaffenkopfkeil auf (Fig. 12). Der Hangendkontakt (Südostkontakt) Sedimentkeil/Kristallin wird durch eine Fläche dieser Art gebildet.

Bereits A. BALTZER (1888, p. 134) ist diese Zerteilung aarmassivischer Gesteine aufgefallen. Er gibt als Figur 24 eine kleine, unscheinbare Skizze und schreibt dazu: «Die grobe Flaserung ist stellenweise so regelmässig, dass neben der steil stehenden Schichtung noch eine zweite flachfallende, scheinbare Schichtung hervortritt. Diese Erscheinung scheint schwer verständlich zu sein, wenn man annimmt, die Flaserung sei eine ursprüngliche gewesen.»

A. KVALE (1957, p. 404) hat in der Umgebung von Innertkirchen als Erster erkannt, dass die flachen Überschiebungen jünger sind als die Schieferung: «Neben den steilen Schieferungs- und Verschiebungsflächen ist noch ein zweites System von Verschiebungsflächen vorhanden. Diese Flächen fallen 20° bis 40° gegen SE, und deren Abstand kann in Zentimetern bis Dezimetern und zum Teil in Metern gemessen werden. An diesen Flächen ist die steile Schieferung verbogen worden, und zwar überall in demselben Sinn: Die obere Seite ist immer gegen Norden bewegt. Auch auf diesen Flächen ist eine deutliche Striemung zu sehen. Sie wird teils durch Serizit, teils durch Chlorit gebildet und liegt wie die Striemung der steileren Flächen in der Fallinie.»

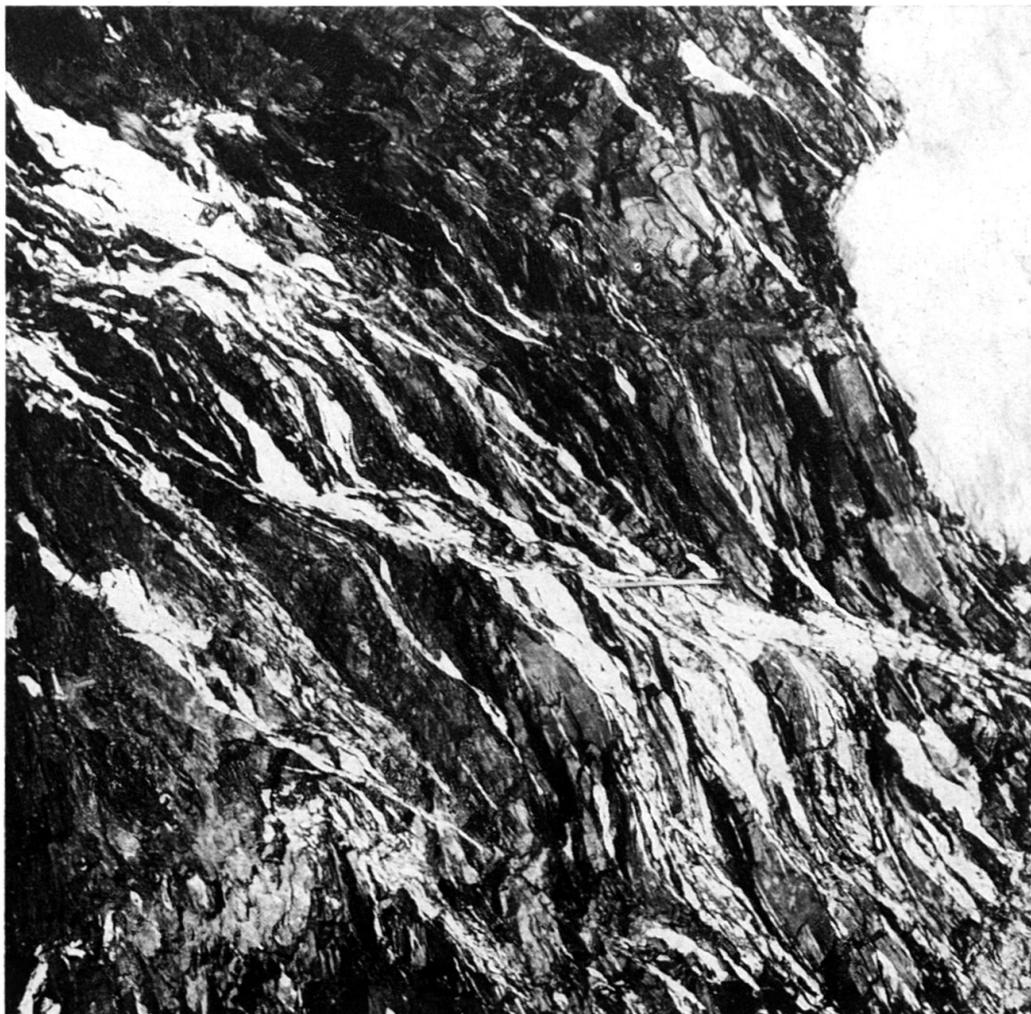


Fig. 10. Massiger Innertkirchner-Granit mit Biotitgneis-Scholle. An zwei Stellen wird die Scholle durch Überschiebungsflächen versetzt. Druckstollen Trift-Speicherberg, m 1729 ab Trift.



Fig. 11. Überschiebungsfläche im massigen Innertkirchner-Granit, mit grauglänzendem Harnisch und tiefgefurchter Gleitstriemung. Druckstollen Trift-Speicherberg, m 1490 ab Trift.

NW



SE

Fig. 12. Verschieferte Malmkalke des Pfaffenkopfkeils werden von einer Überschiebungsfläche durchsetzt; Höheres nach Nordwesten versetzt. Druckstollen Trift-Speicherberg, m 2717 ab Trift.

4.2.3. Längsbrüche

Im Nordteil des Stollens, etwa von m 2500 ab Fassung Trift an nordwärts, tritt ein jüngeres System von Verschiebungsflächen auf. Die einzelnen Flächen sind vertikal bei Nordost–Südwest-Streichen. Sie sind stets mit einem 0,5 bis 2 cm dicken Quarz-Chlorit-Belag bedeckt und weisen eine intensive Gleitstriemung auf, die von der Falllinie durchschnittlich um 25° nach Südwesten abweicht (Fig. 13). An

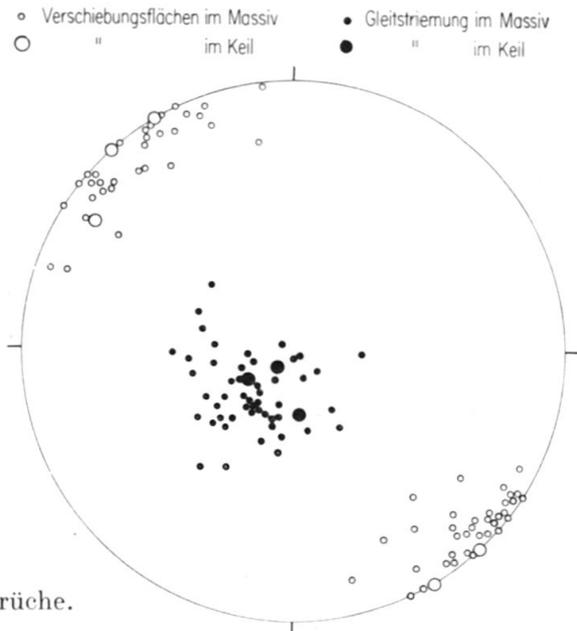


Fig. 13. Längsbrüche.

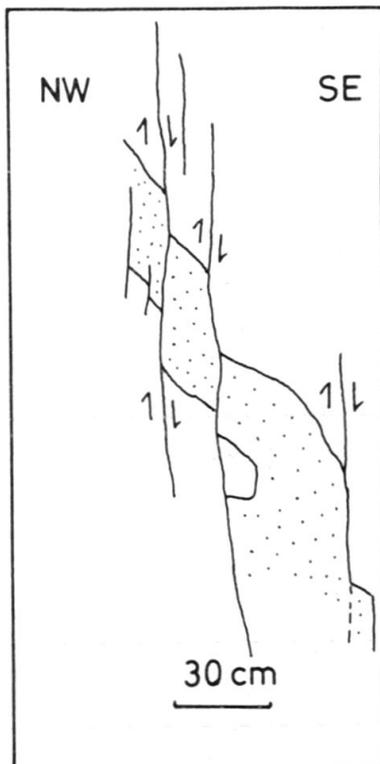


Fig. 14. Eine aplitische Lage im tektonisierten Innertkirchner-Granit wird mehrfach an einem System vertikaler, Nordost – Südwest streichender Verschiebungsflächen versetzt. Die Südostflügel sind relativ abgesenkt. Druckstollen Trift-Speicherberg, m 3897 ab Trift.



Versetzungen, Schleppungen und Abrißstufen erkennt man, dass stets der südöstliche Flügel relativ abgesenkt ist (Fig. 14). Der Minimalabstand der Verschiebungsflächen beträgt 5 bis 10 cm. Sie werden nicht selten von einer 1–5 cm mächtigen Kluftlehmzone begleitet (Fig. 15). An die Stelle einer einzigen, scharf abgegrenzten Fläche kann ein ganzes System von sich verästelnden, gebogenen Flächen mit dünnem Lehmbeleg treten (Fig. 15). Auf Grund der ähnlichen Raumlage kann man bei flüchtiger Betrachtung diese Verschiebungsflächen mit der Schieferung verwechseln. Bei genauem Hinsehen sind sie aber durch mehrere Kriterien eindeutig auseinanderzuhalten; das stichhaltigste ist natürlich die Tatsache, dass die Schieferung älter, die Bruchflächen aber jünger sind als die Überschiebungsflächen. In den Sedimenten des Pfaffenkopfkeils treten diese Längsbrüche in gleicher Ausbildung wie im Kristallin auf (vgl. Fig. 13).

Wir haben versucht, annähernd auszurechnen, zu welchem Gesamtbetrag sich die immer gleichsinnige Versetzung an diesen Flächen für eine bestimmte Profil-

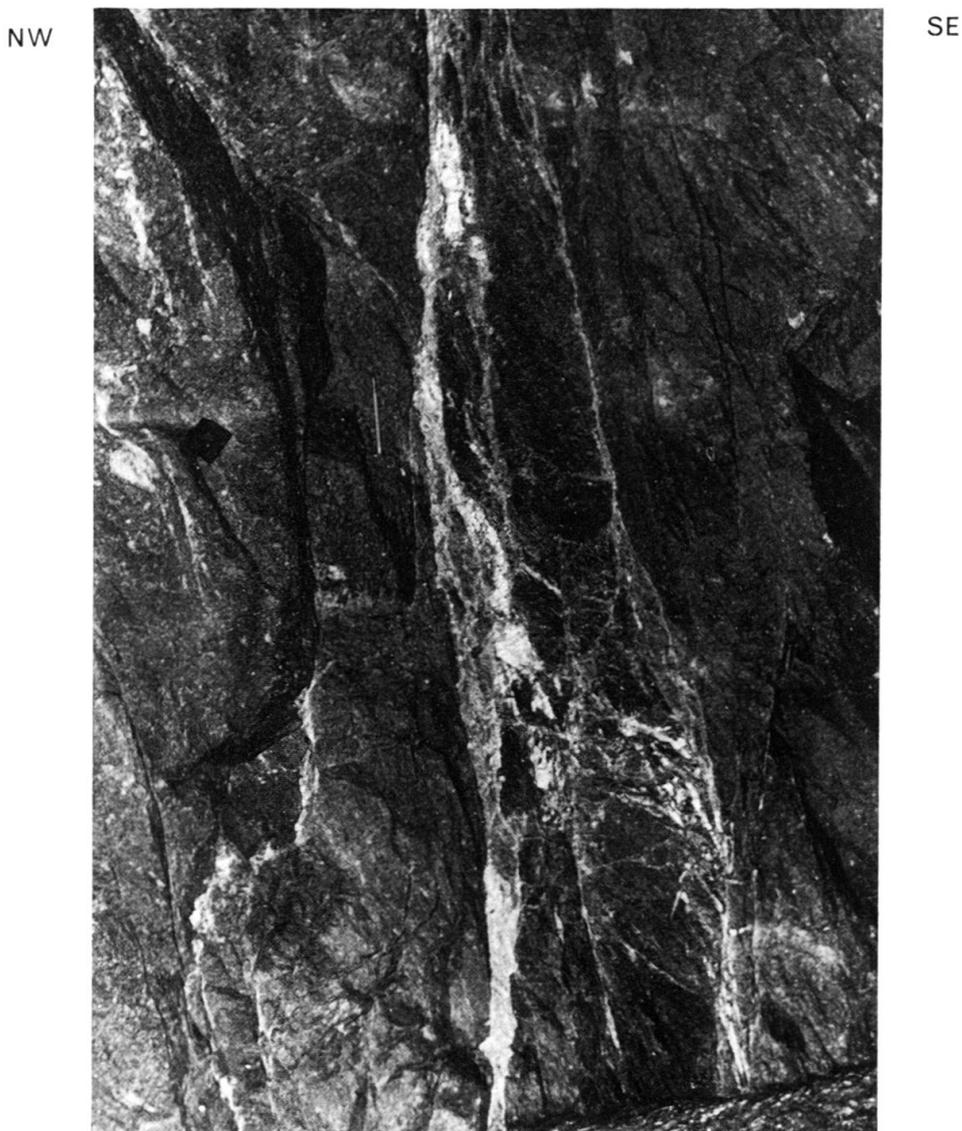


Fig. 15. Typisches Bild der Verästelung von Lettenmyloniten. Druckstollen Trift-Speicherberg, m 3470 ab Trift.

länge summiert. Im Stollenstück zwischen dem Pfaffenkopfkeil und Hopflauenen wurden ca. 500 derartige Bruchflächen gezählt; in Wirklichkeit dürften es bedeutend mehr sein. Die Versetzungsbeträge schwanken zwischen 5 und 10 cm. Auf einem Querprofil von rund anderthalb Kilometer Länge wurde also der nördlichste Punkt gegenüber dem südlichsten um mindestens 25 bis 50 m herausgehoben.

Auch Bruchflächen diesen Typs sind in der Literatur beschrieben. H. MORGENTHALER (1921, p. 191/92) berichtet von einem Bruch, welcher den Erstfeldergneis von den südlich angrenzenden Ferniger-Serizitschiefern trennt. Es gelang ihm, diesen Bruch vom Erstfeldertal bis zur Ebnefluh zu verfolgen. Über die Relativbewegungen schreibt er: «Es fanden sich Reibungsbreccien und Harnische, die immer wieder auf ein Absinken im Süden der Linie und ein Emporrücken im Norden davon deuten.»

4.2.4. Knitterung

An über 20 Stellen wurde eine weitere auffällige Deformation angetroffen: Schieferige Gesteinspartien sind von diskordanten, paarweise auftretenden Flächen durchsetzt, zwischen denen eine Knickung der Schieferung stattgefunden hat. Dieses Phänomen wird in der deutschen Literatur als «Knitterung» oder «Knickung» bezeichnet («kinking» der Amerikaner). Die Lage der Flächen ist wiederum recht konstant (um 30° Nordfallen, s. Fig. 16). Die Knickung zeigt in allen Fällen eine Relativbewegung des hangenden Paketes gegen Nordwesten (Fig. 18).

Hin und wieder ist die zwei bis vier Centimeter dicke Gesteinslage zwischen den Flächen zu Letten zerdrückt worden. In gewissen Fällen ist der Lehm ausgeschwemmt und der Hohlraum mit Quarz gefüllt worden. Man findet in derartigen Spaltenfüllungen gelegentlich Kavernen mit centimetergrossen Quarzkristallen. Es handelt sich nicht um die klassischen alpinen Zerrklüfte; solche wurden im Stollen nicht angetroffen.

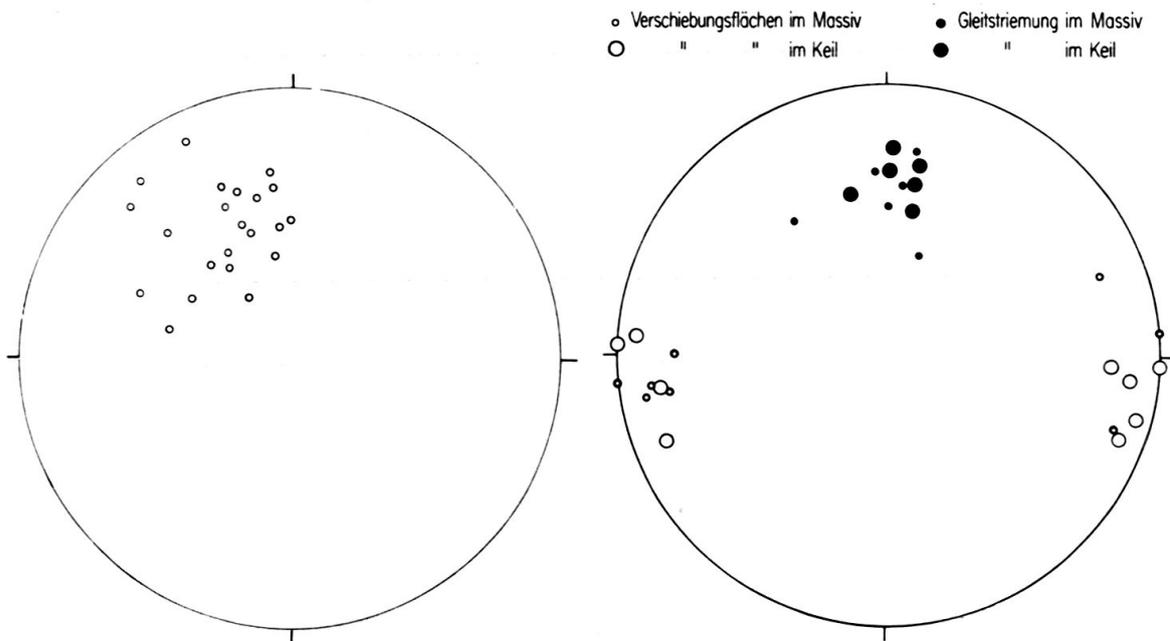


Fig. 16. Knitterung. Ein Kreis symbolisiert ein Scherflächenpaar.

Fig. 17. Nord-Süd-Brüche.

Die Alterseinstufung der Knitterung ist nicht durch genügend Beobachtungen gesichert. Sie ist sicher jünger als die Überschiebungen (Fig. 18); an einer Stelle versetzt sie eine Längsbruchfläche.

Im Sedimentkeil wurde die Knitterung nicht beobachtet.

Über Knitterung im Aarmassiv ist bis jetzt nichts bekannt geworden. Hingegen haben wir im Rhonetal bei Mörel unmittelbar südlich des Aarmassivs in der Urseren-Zone zwei Systeme von Knitterungen als jüngste alpine Deformationen feststellen können (T. LABHART, 1965, p. 14). Eines derselben stimmt übrigens in seiner Raumlage mit dem oben beschriebenen überein.

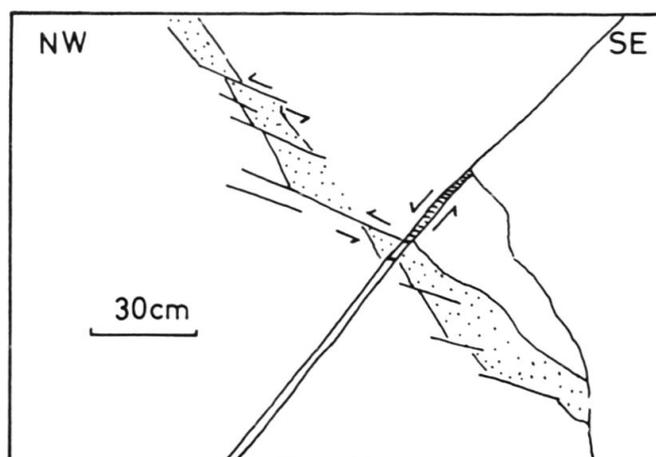


Fig. 18. Innertkirchner-Granit mit steiler Schieferung, Überschiebungsflächen und (als jüngster Deformation) Knitterung.
Druckstollen Trift-Speicherberg, m 2594 ab Trift.

4.2.5. Querbrüche

Als jüngste Deformation kann ein vertikales System von Verschiebungsflächen von Nord-Süd-Richtung festgestellt werden. Die Gleitstriemung darauf fällt mit 20 bis 45° nach Norden ein (Fig. 17). Wo man den Relativsinn der Verschiebung erkennen kann, ist das östliche Paket nach Norden bewegt worden.

Diese Querbrüche treten in gleicher Art und Orientierung auch im Sedimentkeil auf.

Auch Nord-Süd-Brüche sind in der Umgebung des Pfaffenkopfkeils bereits früher beobachtet worden. H. MORGENTHALER (1921, p. 199) hat die von A. BALTZER (1888, Profil V) als «scharf-abgesetzte Bänder» gezeichneten Strukturen am Benzlauistock als Spuren vertikaler Nord-Süd-Brüche gedeutet. Seine Interpretation der Entstehung der Brüche durch eine Meisselwirkung des Keils erschien schon K. ROHR (1926, p. 54) unglaublich.

5. ZUSAMMENSTELLUNG DER WICHTIGSTEN BEOBACHTUNGEN

1. Bei einer detaillierten kleintektonischen Untersuchung eines Stollenprofils am Nordrand des Aarmassivs haben wir eine immer gleichbleibende Abfolge von Deformationen feststellen können.
2. Präalpine Gefüge konnten im Altkristallin (Erstfelder-Gneis) und im Innertkirchner-Granit beobachtet werden. Die Planargefüge streichen West-Ost oder Nordost-Südwest.
3. Aus der Tatsache, dass alle jüngeren Deformationen mesozoische Sedimente des Pfaffenkopfkeils und aarmassivische Gesteine in sehr ähnlicher Art und Weise erfasst haben, schliessen wir, dass sie alpines (oder jüngeres) Alter besitzen müssen.
4. Bei den alpinen Deformationen spielten im Kristallin Schieferungen und Verschiebungsflächen-Systeme eine grosse Rolle. Zu Faltung kam es nur in den Sedimenten.
5. Die Selektivität der alpinen Verformungen ist auffallend. So hat zum Beispiel die Schieferung ein mehrere hundert Meter mächtiges Paket Innertkirchner-Granit praktisch nicht ergriffen, während der Granit nördlich und südlich davon teilweise bis zur Unkenntlichkeit verschiefert wurde.
6. Mit Ausnahme der Nord-Süd-Brüche zeigen diese jungen Deformationen eine erstaunliche Symmetriekonstanz; sie spielen sich in einer generell Nordwest-Südost streichenden vertikalen Ebene ab.
7. Die beiden wichtigsten alpinen Deformationen sind eine steile Schieferung (im Sedimentkeil eine flachere und eine steilere) und ein jüngeres System flachliegender Überschiebungsflächen. Die beiden Flächenscharen bilden im Kristallin einen Winkel von 50-60° (Fig. 6 und 9). Übergänge in Form mittelsteiler oder allmählich «umkippender» Verschiebungsflächen fehlen.
8. Von besonderem Interesse ist das gehäufte Auftreten von flachen Überschiebungsbahnen im Kristallin des Aarmassivs, und zwar auf einen recht grossen

Massiv-Querschnitt. Der Relativsinn der Bewegung ist immer derselbe: das höhere Paket ist nach Nordwesten disloziert. Aarmassivisches Kristallin ist hier in nicht unbedeutendem Masse parautochthon geworden. Der immer gleichbleibende Sinn der Versetzung bringt es mit sich, dass die höchsten Massivteile am weitesten nach Nordwesten disloziert sind (Größenordnung mehrere Kilometer). Der Überschiebungsbetrag nimmt gegen unten sukzessive ab und dürfte in nicht allzugrosser Tiefe Null erreichen. Der Gesamtüberschiebungsbetrag setzt sich vorwiegend aus Teilbeträgen von mm bis dm zusammen. Die Zergleitung kann höchstens in kleinen Bereichen als affin bezeichnet werden, meist wechseln die Versetzungsbeträge sehr stark (vgl. Fig. 9). Die Sedimente des Pfaffenkopffeils haben dieses Zergleiten mitgemacht, es ist verantwortlich für die Keilform dieser vom Kristallin überfahrenen Sedimentzonen.

9. Es finden sich eine ganze Reihe von Deformationen, die jünger sind als die Überschiebungsflächen. Genaueres lässt sich über ihr Alter vorderhand nicht aussagen, zum Teil könnten sie sehr jung sein (?postglazial). Das gehäufte Auftreten von Letten parallel zu diesen jüngsten Verschiebungsflächen scheint diese Aussage zu stützen.

Die morphologische Wirksamkeit dieser jüngsten Deformationen darf nicht unterschätzt werden. Besonders das Längsbruchsystem mit dem relativ gehobenen Nordwestflügel hat sicher bei der jungen komplexen Heraushebung des Aarmassivs eine Rolle gespielt.

10. Ein guter Teil des heutigen, komplizierten Aspekts des Innertkirchner-Granits ist auf die mehrphasige alpine Überprägung zurückzuführen, die zudem in ihrer Intensität von Aufschluss zu Aufschluss stark wechselt. Wir haben hier ein schönes Beispiel für die eingangs erwähnte Tatsache, dass man im Aarmassiv die alpine Tektonik studieren muss, um den voralpinen «Grundgebirgszustand» der Gesteine rekonstruieren zu können.

6. ÜBER DEN BILDUNGSMECHANISMUS DES PFAFFENKOPFFEILS

Eine ganze Reihe der in Abschnitt 5 genannten Punkte wären einer weiteren Untersuchung wert.

Wegen seiner Bedeutung für das Verständnis der alpinen Tektonik am Nordrand des Aarmassivs hat uns Punkt 8 am meisten beschäftigt. Die Tatsache, dass im Kristallin wie in den Sedimenten des Keils steil südostfallende Planargefüge durch flache Überschiebungsbahnen überprägt sind, scheint uns eine Deutungsmöglichkeit des Entstehungsmechanismus der Sedimentkeile zu liefern.

Die merkwürdigen Verkeilungen von Kristallin und Sediment im Pfaffenkopf sind im Felde von zahlreichen Geologen studiert worden. Lassen wir vorerst ihre Auffassungen über die Entstehung dieser Keilbildungen kurz Revue passieren.

FRANZ JOSEF HUGI (1830) hat den Pfaffenkopffeil als Erster erkannt und ihn annähernd in den richtigen Proportionen gezeichnet (Fig. 19a). Die Keilform denkt er sich als primär entstanden durch Hebung des Untergrundes während der Sedimentation des Kalkes. Später «traten dann die gewaltigsten Hebungen und Senkungen ein». Dabei wurde die «innere, kaum teilweise noch erstarrte Masse ... wieder gelöst und ... durch Öffnungen oder Spalten emporgetrieben» (p. 163

bis 165). Das dem Kalk aufgelagerte Kristallin hat also seinen Platz durch magmatische Vorgänge eingenommen.

In der Darstellung von BERNHARD STUDER (1851, p. 178, unsere Fig. 19b) ist der Pfaffenkopfkeil in das Fächerform aufweisende Aarmassiv eingefalzt, «horizontal geschichtet, hinten umgebogen wie ein Paket Spielkarten» (B. STUDER, 1865, p. 10). B. STUDER (1872, p. 555) beobachtete richtig die steile, «sich constant parallel bleibende Stratification des Gneisses über wie unter dem Kalk, unabhängig von der Gestaltung seiner Grenzfläche gegen denselben...» Aus dieser Beobachtung zog er den nicht ganz stichhaltig erscheinenden Schluss (1872, p. 556): «Kaum zu vermeiden scheint aus dieser Tatsache die Folgerung, dass der Gneiss als eine weiche Masse das Kalkgebirge umwickelt und bedeckt habe, dass ferner seine Schieferung, wie die regelmässige Zerklüftung der Basalte und Porphyre und mancher Granite erst mit seiner Erstarrung eingetreten sei.» STUDER gibt anschliessend zu, dass gewisse Beobachtungen gegen diese Folgerungen sprechen: «Sie sind es, die Escher und andere Geologen abgeschreckt haben, ihnen beizupflichten» (p. 557).

Der zitierte A. ESCHER VON DER LINTH hatte bereits früh (1846, p. 437 und 1847, p. 18/19) von einer «Überschiebung ganzer Gebirgsmassen zwischen Oberhasli und Rhein» gesprochen, «in einer Ausdehnung, die alle ähnlichen bekannten Fälle an Grösse weit übertrifft.»

CHARLES LORY (1874, Tafel III) legte dar, dass die Deutung von Studer nicht die einzig mögliche ist. In einer schematischen Darstellung (unsere Fig. 19c) zeigte er, der die Verhältnisse nie im Felde gesehen hatte, dass die Keile auch die Folge einer mehrphasigen Tektonik sein könnten.

Den entscheidenden Schlag gegen die plutonistischen Ideen führten jedoch ALBERT HEIM im «Mechanismus der Gebirgsbildung» (1878) und ARMIN BALTZER mit seinem Hauptwerk «Der mechanische Kontakt von Gneiss und Kalk im Berner Oberland.» Diese letztere Arbeit ist – zusammen mit dem dazugehörigen Atlas – noch heute eine Fundgrube wertvoller Beobachtungen. Baltzers Ansicht des Pfaffenkopfkeils (unsere Fig. 19d) stammt aus der Arbeit von 1888. Seine Idee des

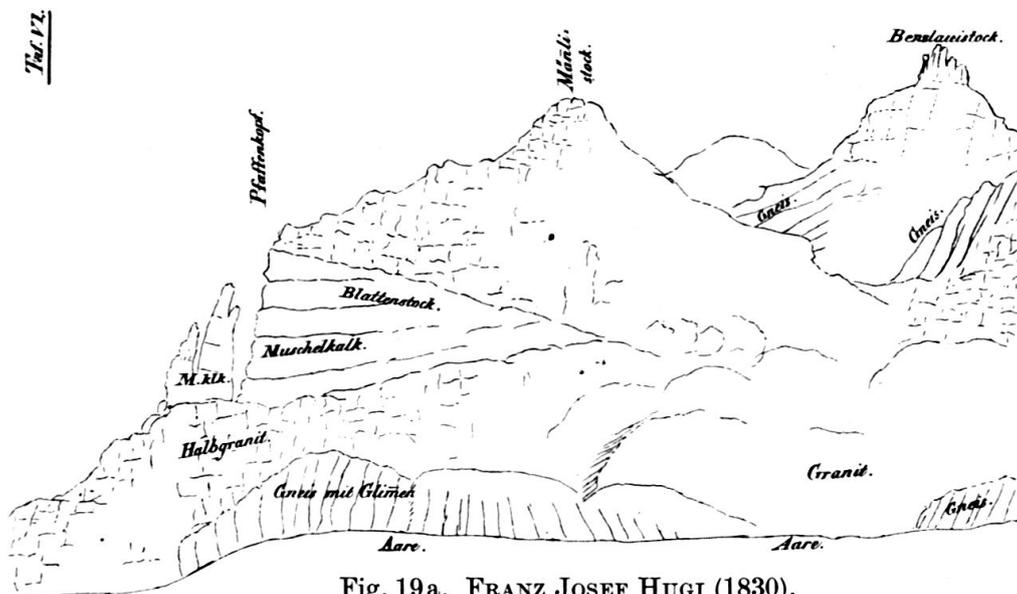
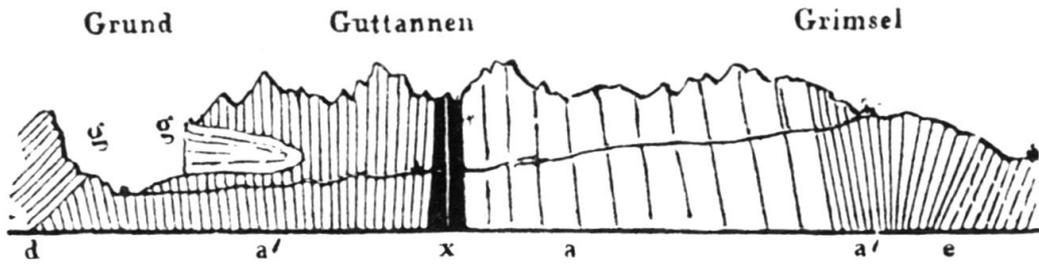


Fig. 19a. FRANZ JOSEF HUGI (1830).



- a Granit.
- a' Gneis und Glimmerschiefer.
- d Dolomitischer Kalk.
- e Schwarzer Kalk und Schiefer.
- g Mittlerer Jurakalk.
- x Lavezstein.

Fig. 19b. BERNHARD STUDER (1851, p. 178).

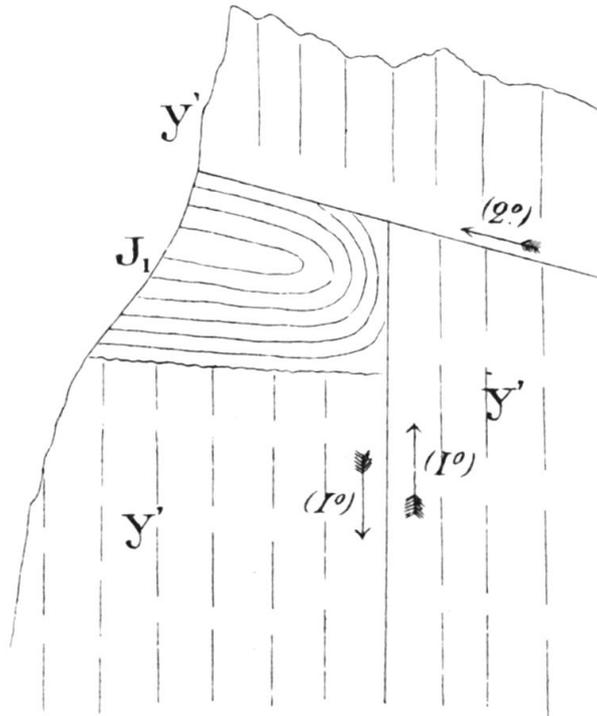


Fig. 19c. CHARLES LORY (1874, Tafel III).

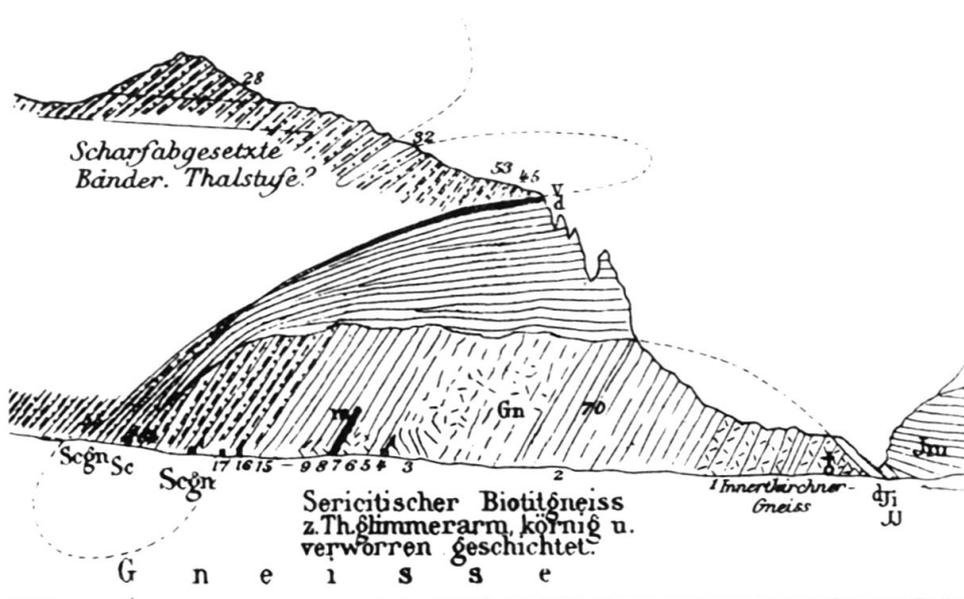


Fig. 19d. ARMIN BALTZER (1888).

Bewegungsablaufs bei der Keilbildung muss man dem Textband von 1880 entnehmen. Er geht von der Voraussetzung aus, dass der Gneis am Nordrand des Massivs «ein altes geschichtetes Gestein ist»³⁾. Die Schichtung ist am stofflichen Lagenbau erkennbar und fällt steil nach Südosten. Die «Aufrichtung» dieser ursprünglich natürlich horizontalen Schichten ist teilweise voralpin, teilweise alpin erfolgt (im Gegensatz zu Lory, der die voralpine steile Lage der Gneise schon mehrere Jahrzehnte vorher erkannt hatte, und im Gegensatz zu Heim, der damals diese Aufrichtung noch ganz alpinen Bewegungen zuschrieb). Bei der alpinen mechanischen Umformung wurde diese Schichtung am Nordrand des Massivs verwischt und es bildete sich eine transversale, ebenfalls steil südostfallende Schieferung aus (p. 231), die stellenweise auch die darüberliegenden Sedimente erfasst hat. Baltzer hat ihr entscheidende Bedeutung zugemessen (p. 12): «Ich fand die mechanische Lösung der Frage für die von mir untersuchten Gebiete vorzugsweise in der Ausbildung einer transversalen Gneisschieferung, die in den fraglichen Regionen die Schichtung meist bis zur Unkenntlichkeit verwischt hat.» Die Schieferung war von einer Faltung begleitet; dabei wurden Stücke der Sedimentdecke ins Massiv hineingezogen. Da nach ihm die Aufrichtung der Gneise eben teilweise alpin erfolgt ist, suchte er nach Gneisfalten (p. 228): «Für direkte Beobachtung von Gneisfalten ist nun leider mein Beobachtungsgebiet ein ungünstiges, da die Schichten mit einer merkwürdigen Einförmigkeit nach Süd bis Südost fallen und die Scheitel der Gewölbe durch eine grossartige Denudation abgetragen sind... Ich möchte diese Erscheinung versteckte Faltung des Gneisses nennen.» Baltzer sind die vielen weiteren Bewegungsflächen nicht entgangen; er scheint ihnen jedoch keine grosse Bedeutung zugemessen zu haben. Immerhin erwähnt er seinen Bericht an die geologische Kommission vom Jahre 1865 und bemerkt «... Damals erklärte ich die Gneiskeile auf diese Weise.» Er hatte die Idee anscheinend nach mikroskopischen Studien später fallengelassen.

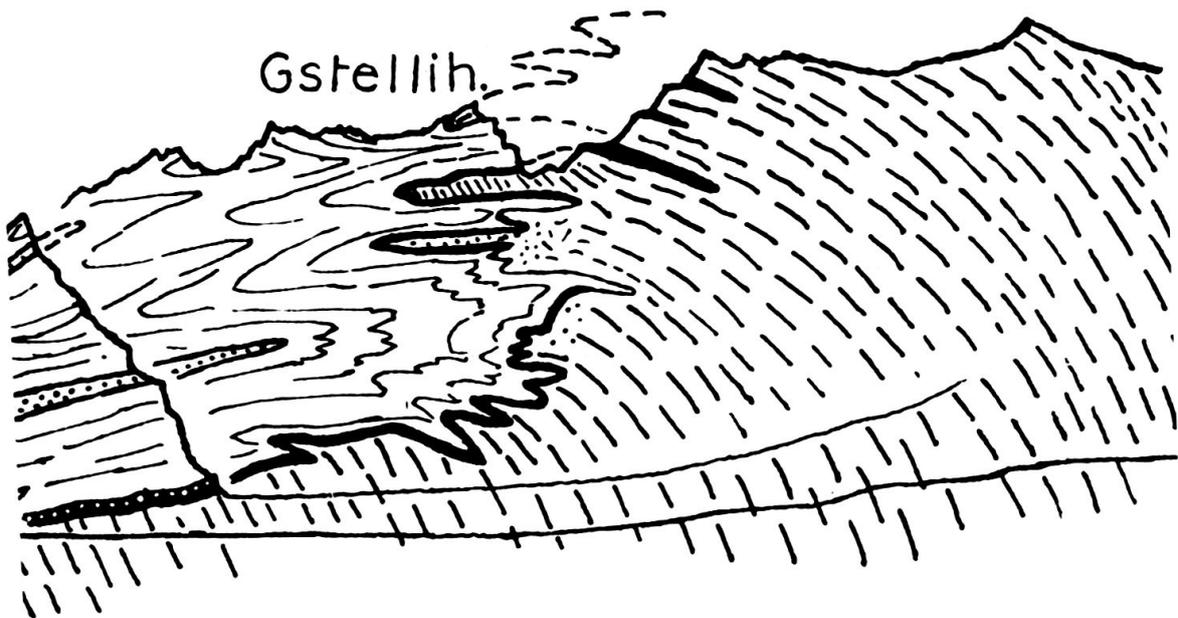


Fig. 19e. ALBERT HEIM (1921, Bd. 2/I, Ausschnitt aus Tafel VII, vergrössert).

³⁾ Die Innertkirchner-Granitmasse war zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt.

ALBERT HEIM (1921, Bd. 2/I, Tafel VII, unsere Fig. 19e) zeichnet ein Profil, in dem die zentralmassivische Schieferung von steiler Lage in der Tiefe zu flacher Lage in Keilnähe kontinuierlich umbiegt. Den Kommentar dazu findet man auf p. 147: «Die Faltennatur des Massivs zeigt sich aber am allerbestimmtesten in den eingeklemmten carbonischen Synklinalzonen und in den Einfaltungen des mesozoischen Sedimentmantels. Nur wer selbst sich faltig legt, kann seine Hülle mit einfalten.» Dem glänzenden Beobachter HEIM sind diesem Leitsatz widersprechende Feststellungen im Felde nicht entgangen, zum Beispiel erwähnt er: «nur sehr selten sind in den autochthonen Zentralmassiven deutliche, grosse faltenförmige Biegungen zu sehen».

H. MORGENTHALER (1921) erkannte die Wichtigkeit der flachliegenden Überschiebungsflächen. Wie aus seinen Profilen (Tafel III, unsere Fig. 19f) hervorgeht, glaubt er an die Existenz weniger, aber bedeutender solcher Flächen; die wichtigste ist für ihn die Überschiebung des Erstfelder-Gneises auf den «Gasternlakkolithen». Auch er nimmt an (siehe Pfeil auf Fig. 19f), dass das hangende Kristallin «en bloc» überschoben worden ist.

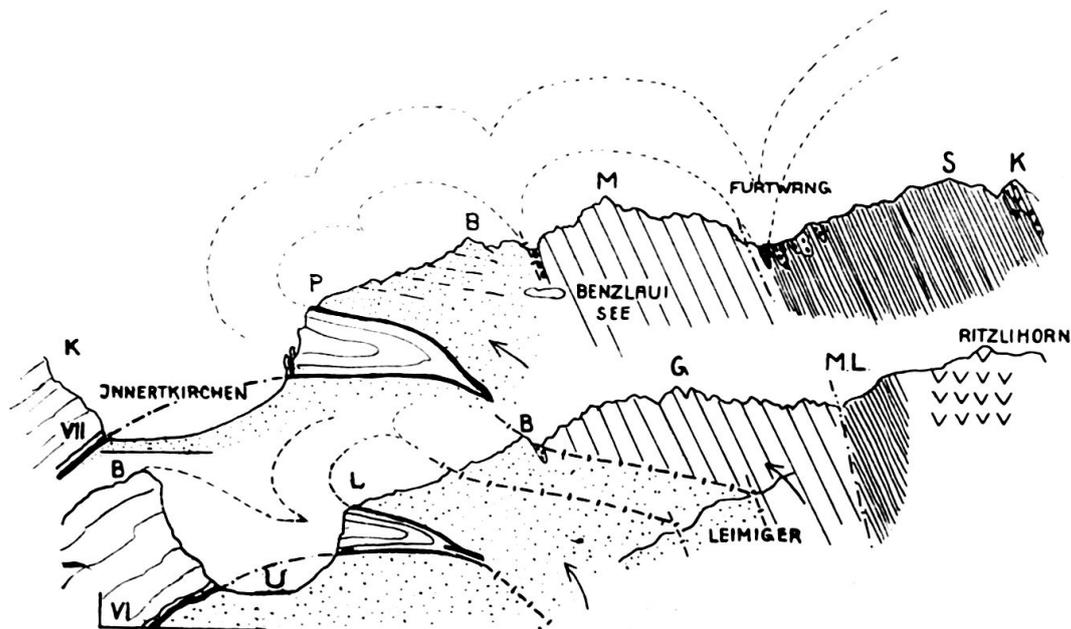


Fig. 19f. HANS MORGENTHALER (1921, Ausschnitt aus Tafel III).

K. ROHR (1926) hat am Nordrand des Massivs eingehende tektonische Untersuchungen vorgenommen. Er gibt erstmals eine detaillierte Deutung der Tektonik. Auf seinen Profilen (z. B. Profil III, unsere Fig. 19g) dominiert im Kristallin eine mit etwa 60° südostfallende Schieferung. Wie diese steile Schieferung und die flachvergente Faltung der Sedimente zusammengehören sollen, erläuterte er für eine Lokalität, das Achtelsassgrätli (das in der direkten nördlichen Fortsetzung des von uns untersuchten Stollenprofils liegt): «Am Achtelsassgrätli verlief die Bewegung des Kristallinen... nordwärts $60-65^\circ$ ansteigend. Der Gneis ist intensiv geschiefert, Verschiebungsfläche steht an Verschiebungsfläche. Schicht um Schicht ist an diesen Verschiebungsflächen emporgespresst worden und hat bruchlos den Raum der weichenden, sich überschiebenden Dolomitschuppen eingenommen. Wir

suchen in der Nähe der Schuppenwurzeln vergebens nach horizontalen Überschiebungslinien im Gneise. Sie haben nicht entstehen können, weil die Eruptivmassen zwar seitlich zusammengepresst worden sind, aber niemals aus ihrer hercynischen Schieferungstektonik herausgebracht werden konnten.» (p. 36/37).

Allen seinen Profilen liegt die Annahme des geschilderten Mechanismus zugrunde. Allgemein stellt ROHR fest (p. 36): «Die Tektonik des Gneises scheint in grossem Widerspruch zu derjenigen der Sedimente zu stehen, indem er nirgends mit abgeschuppt worden ist... Wenn irgendwo im Kristallin Schuppung erfolgt ist, so verläuft sie immer anders als diejenige der Sedimente...» Im Gegensatz zu den Bewegungen an den steilen Scherflächen hält ROHR diejenigen an den Überschiebungsflächen für ganz untergeordnet (p. 40): «Wenn nun gegen den Kontakt hin die Schieferung dennoch nordwärts etwas abgebogen ist, so ist diese Erscheinung lediglich auf das Ausweichen der Sedimentmassen gegenüber der Zusammenpressung des Untergrundes zurückzuführen.»

ROHR hat sich im Felde vielen tektonischen Situationen gegenübergesehen, die er nicht mit seinem Schema in Übereinstimmung bringen konnte. So schreibt er (p. 40): «Es ist im weitern bei Analyse der tektonischen Untersuchungen noch oftmals zur Annahme verschiedener Phasen der Bewegung Zuflucht zu nehmen.»

Die Untersuchungen von F. MÜLLER (1938) ergaben unter anderem eine Reihe sehr schöner Detailansichten der Keile, worunter auch eine des Pfaffenkopfkeils (Taf. V). Darauf kommen die zahlreichen tektonischen Komplikationen gut zur Geltung. Über den Bildungsmechanismus äussert sich F. MÜLLER kaum. Auf seinen Profilen (unsere Fig. 19h) zeichnet er im Keil gebogene (nach unten steiler werdende) Überschiebungsbahnen. Im übrigen hält sich MÜLLER für die Darstellung des Kristallins an ROHR. Wie mir Dr. H. A. STALDER, Bern, freundlicherweise mitteilte, hat ihn MÜLLER in späteren Jahren anlässlich gemeinsamer Begehungen auf die oft unterschätzte Bedeutung flacher Überschiebungen im Kristallin aufmerksam gemacht.

Seit FRANZ MÜLLER hat sich niemand mehr im Detail mit tektonischen Fragen in diesem hochinteressanten Gebiet beschäftigt. In jüngeren Arbeiten, vor allem auch in Lehrbüchern, finden sich meistens Ideen von K. ROHR. Insbesondere seine schönen Profile sind in die Literatur eingegangen. So reproduzierte H. CLOOS (1932, p. 207, Abb. 153) einen Ausschnitt aus einer Tafel von K. ROHR (1926, Tafel IV) und bemerkte dazu: «Verwickelter Verband von Scherung im kristallinen Untergrund des Aarmassivs und Faltung in der mesozoischen Schichtdecke.»

Auch A. KVALE (1957, p. 403, Fig. 2) übernahm, obschon er die flachen Überschiebungsbahnen im Kristallin richtig erkannte, die Abbildung und die Ideen von ROHR. 1966 (p. 70) präziserte er seine Deutung des Bewegungsablaufes: «Am Nordrand des Aarmassivs wurden die mesozoischen Sedimente in grossen Falten zusammengestaucht, mit fast horizontalen Faltenachsen, die quer zu dem nordwärts gerichteten Zusammenschub lagen... Die angrenzenden Gesteine des Aarmassivs wurden nicht gefaltet. Hier wurde die Beanspruchung durch laminare Gleitung auf Schieferungsflächen ausgelöst, und Muskowit und Serizit wurden mit ihrer Längsrichtung in die Bewegungsrichtung eingeregelt. Diese Schieferungsflächen fallen jetzt 60 bis 70° in südlicher Richtung. Zur Zeit der Hauptbewegung fielen sie mit kleineren Fallwinkeln, vielleicht zwischen 20 und 50°.» Für J. CADISCH

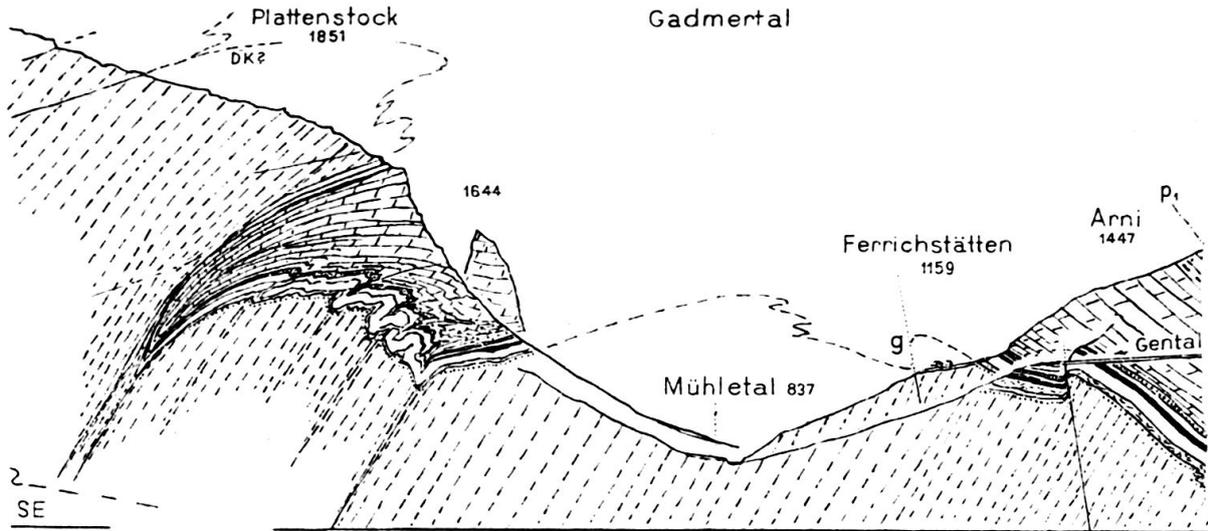


Fig. 19g. KARL ROHR (1926, Ausschnitt aus Profil III).

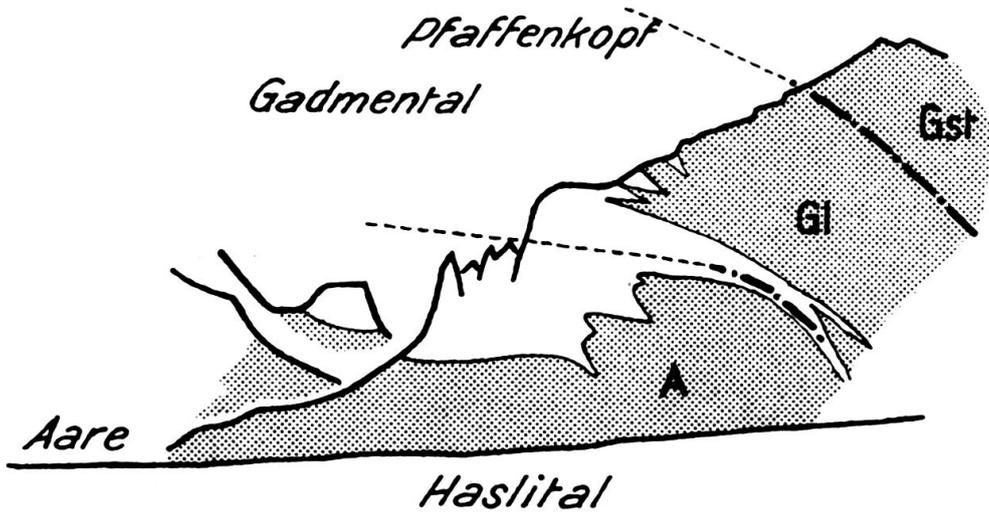


Fig. 19h. FRANZ MÜLLER (1938, Tafel V/1).

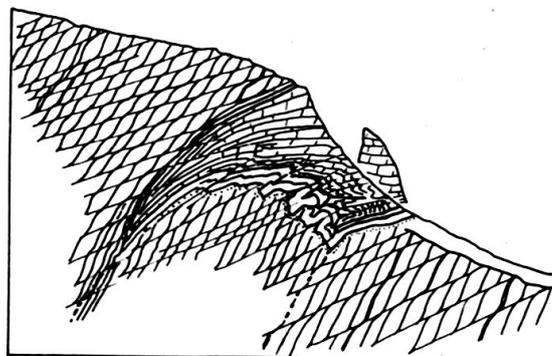


Fig. 19i. Profil von ROHR (Fig. 19g) mit veränderten Strukturen im Kristallin.

(1953, p. 305) ist – wohl ebenfalls nach ROHR – «der ganze Aarmassiv-Nordrand in unzählige steilstehende Gleitbretter aufgelöst».

Wir sind nach unseren Stollenaufnahmen und vielen anschliessenden Begehungen der Ansicht, dass keine der erwähnten Arbeiten den tektonischen Verhältnissen der Umgebung des Pfaffenstockkeils gerecht wird. Wir müssen die Entstehung dieser merkwürdigen «Verkeilungen» als die Folge einer mehraktigen alpinen Tektonik deuten. Wir kommen so auf eine Erklärung zurück, die CHARLES LORY – wenn auch sehr schematisch – vor bald hundert Jahren vom Schreibtisch aus gegeben hat.

Wir haben in Tabelle 2 unsere Idee vom mutmasslichen Bildungsmechanismus des Pfaffenkopfkeils dargestellt. Der Überschiebungsphase, die uns immer als guterkennbare «Leitdeformation» dient, ist eine Steilstellung gewisser Partien der ursprünglich flach über dem Aarmassiv liegenden helvetischen Sedimente vorausgegangen. Wir haben dafür viele Anhaltspunkte. In unserm Stollenprofil sind es die steileren Schieferungen in den Sedimenten des Keils (Fig. 7). Viel auffälliger

Tabelle 2. Mutmasslicher Ablauf der Bildung des Pfaffenkopfkeils.

Trias-Eozän	Ablagerung helvetischer Sedimente auf einer permischen Massivoberfläche.
Alpine Gebirgsbildung	Ausbildung einer ersten, steil südostfallenden Schieferung im Aarmassiv unter bedeutender seitlicher Einengung. Stellenweise Einmuldung der darüberliegenden Sedimente.
	Überschiebung der helvetischen Decken über das Aarmassiv (Transport evtl. bereits eingeleitet oder begünstigt durch obige seitliche Einengung). Zergleiten höchster und nördlichster Massivteile mitsamt den eingemuldeten Sedimenten (= Keilenden).
?	Ausbildung von jüngeren Deformationen wie Längsbrüche, Knitterung und N-S-Brüche, welche das tektonische Bild weiter komplizieren. Gleichzeitig oder später Heraushebung des Massivs gegenüber dem Vorland.

und schon von A. BALTZER und ALBERT HEIM vielfach erwähnt ist die Tatsache, dass viele Sedimentpakete, vor allem Keilenden, plötzlich steiler werden und in die Gneisschieferung einbiegen. Diese Parallelität zur ersten alpinen Schieferung ist wohl kaum zufällig. Die Erklärung liegt nicht allzu fern: diese Sedimente sind während der ersten Schieferung, welche im darunterliegenden Kristallin eine bedeutende seitliche Einengung bewirkte, eingemuldet bzw. eingespiesst worden. Dieses «Hineinziehen der Sedimentdecke ins Massiv», wie sich A. BALTZER ausdrückte, ist dort am stärksten erfolgt, wo die sehr selektive erste Schieferung im Massiv am intensivsten ist. Das wichtigste Beispiel ist die Zone Meiental–Lötschentäl, in der die meisten dieser steilen Keilenden liegen und die daher auch als «Wurzelzone» der Morcles-Decke angesprochen wird (J. CADISCH, 1953, p. 303). Im Meiental finden wir in derselben Zone die altbekannte Fernigenmulde, welche ein eindrückliches Beispiel für die bedeutende Einengung im eingemuldeten Sediment

wie auch im darunterliegenden Kristallin ist (vgl. ALBERT HEIM, 1916). Es sei hier darauf hingewiesen, dass schon P. ARBENZ und F. MÜLLER (1920, p. 111) ähnliche Ideen geäußert haben: «Die steile Stellung der Muldenenden deutet auf eine steile, vielleicht sogar gegen Süden schauende Anlage der Falten in der Massivoberfläche.»

Scharf von dieser ersten Phase zu trennen ist die jüngere Überschiebungsphase, in der nun die nördlichsten und höchsten Massivteile mitsamt den eingemuldeten und den darüberliegenden helvetischen Sedimenten nach Nordwesten disloziert sind (wo die Sedimente in ihrer ursprünglichen Lage heute noch zu finden sind, dürften auch die Spuren der Überschiebung fehlen).

Die Gemeinsamkeit des Zergleitens kann nicht genug betont werden. Die unzähligen flachen Bewegungsbahnen im Kristallin lassen sich in die Sedimentkeile verfolgen, ja selbst ins helvetische «Autochthon»; sie finden wahrscheinlich ihre Fortsetzung in der flachliegenden «axial-plane-schistosity» der liegenden Falten der davorliegenden Wildhorndecke. Teile des «autochthonen» kristallinen Aarmassivs sind hier in den Deckenbaustil einbezogen worden; wir haben aarmassivisches Parautochthon vor uns.

Die Auffassungen, wonach hier gleichzeitige Bewegungen im Kristallin und den Sedimenten völlig verschieden gerichtet sein sollen, sind revisionsbedürftig. Wir denken vor allem an die Ideen von BALTZER, ROHR und KVALE, welche die Entstehung der keilförmigen Verschuppung von Sediment und Kristallin und der flachvergenten Scherfalten im Deckengebiet zeitlich gleichsetzen mit der Entstehung der steil südostfallenden ersten Schieferung im Kristallin.

Es spricht für die Exaktheit der ROHR'schen Sedimentdarstellungen, dass man in seinen Profilen keinen Augenblick zweifeln muss, wo man die Überschiebungsflächen im Kristallin zu suchen, bzw. einzuzeichnen hat (wie wir das schematisch in Fig. 19i getan haben). Auch Darstellungen anderer Autoren gewinnen durch die Annahme von flachen Bewegungsbahnen im Kristallin an Glaubwürdigkeit; es sei hier nur auf ein Profil von ALBERT HEIM verwiesen, das in das Lehrbuch von DE SITTER (1964, p. 237, Fig. 176) aufgenommen wurde. Eine flachvergente Sedimentscherfalte liegt dort im Kristallin, in dem lediglich eine steil südostfallende Schieferung schematisch angegeben ist.

Alle Deformationen, welche der Überschiebungsphase folgen, haben wesentlich zur Komplikation des tektonischen Bildes am Aarmassiv-Nordrand beigetragen. Wir denken insbesondere an das Längsbruchsystem mit seinen nicht unbedeutenden Hebungsbeträgen und seiner der ersten Schieferung ähnlichen Raumlage. Es sind uns Fälle bekannt, wo Sedimentpakete durch Schleppung an solchen Flächen in steile Lage versetzt wurden. Derartige Pakete sind dann nur durch sorgfältige, kleintektonische Untersuchung von früher (bei der ersten Schieferung) steilgestellten, bzw. eingemuldeten Sedimentkomplexen zu unterscheiden.

Wir haben uns in unseren Folgerungen so gut wie möglich auf die weitere Umgebung des untersuchten Stollenprofils durch den Pfaffenkopf beschränkt. Viele Beobachtungen am ganzen Nordrand des Aarmassivs haben gezeigt, dass für die Erklärung der komplizierten Tektonik ohne Zweifel eine mehraktige alpine Deformation angenommen werden muss. Um ein Gesamtbild der Verhältnisse zu bekommen, ist aber noch umfangreiche tektonische Kleinarbeit zu leisten.

LITERATUR

- ARBENZ, P., und MÜLLER, F. (1920): *Über die Tektonik der Engelhörner bei Meiringen und den Bau der parautochthonen Zone zwischen Grindelwald und Engelberg*. *Eclogae geol. Helv.* 16/1, 111–116.
- BALTZER, A. (1880): *Der mechanische Contact von Gneiss und Kalk im Berner Oberland*. *Beitr. geol. Karte Schweiz* 20.
- (1888): *Das Aarmassiv (mittlerer Teil) nebst einem Abschnitt des Gotthardmassivs*. *Beitr. geol. Karte Schweiz* 24/IV.
- CADISCH, J. (1953): *Geologie der Schweizer Alpen*, Wepf, Basel.
- CLOOS, H. (1932): *Einführung in die Geologie*. Bornträger, Berlin.
- ESCHER VON DER LINTH, A. (1847): *Übersicht der geologischen Verhältnisse der Schweiz*. Zürcher und Furrer, Zürich.
- HEIM, ALBERT (1921): *Geologie der Schweiz*. Tauchnitz, Leipzig.
- HEIM, ALBERT und ARNOLD (1916): *Die Juramulde im Aarmassiv bei Fernigen*. *Vjschr. natf. Ges. Zürich* 61, 503–530.
- (1917): *Der Kontakt von Gneiss und Mesozoikum am Nordrand des Aarmassivs bei Erstfeld*. *Vjschr. natf. Ges. Zürich* 62, 423–451.
- HÜGI, TH. (1955): *Petrographische Beobachtungen im Zuleitungsstollen Gadmental-Rotlawi der Kraftwerke Oberhasli AG*. *SMPM* 35/2, 301–310.
- (1956): *Vergleichende petrologische und geochemische Untersuchungen an Graniten des Aarmassivs*. *Beitr. geol. Karte Schweiz, NF* 94.
- HUGI, E. (1934): *Das Aarmassiv*. In: *Geologischer Führer der Schweiz*, Bd. II, p. 130–138.
- HUGI, F. J. (1830): *Naturhistorische Alpenreise*.
- KVALE, A. (1957): *Gefügestudien im Gotthardmassiv und den angrenzenden Gebieten*. *SMPM* 37/2, 398–434.
- (1966): *Gefügestudien im Gotthardmassiv und den angrenzenden Gebieten*. Sonderveröffentlichung der Schweiz. Geotechn. und Schweiz. Geol. Kommission.
- LABHART, T. (1965): *Petrotektonische Untersuchungen am Südrand des Aarmassivs*. *Beitr. geol. Karte Schweiz, NF* 124.
- LORY, CH. (1874): *Note sur quelques faits de la structure des chaînes centrales des Alpes*. *Arch. sc. phys. nat.* 49, 89–102.
- MORGENTHALER, H. (1921): *Petrographisch-tektonische Untersuchungen am Nordrand des Aarmassivs*. *Eclogae geol. Helv.* 16/2, 179–217.
- MÜLLER, F. (1938): *Geologie der Engelhörner, der Aareschlucht und der Kalkkeile bei Innertkirchen*. *Beitr. geol. Karte Schweiz, NF* 74.
- ROHR, K. (1926): *Stratigraphische und tektonische Untersuchung der Zwischenbildungen am Nordrand des Aarmassivs (zwischen Wendenjoch und Wetterhorn)*. *Beitr. geol. Karte Schweiz, NF* 57.
- DE SITTER L. U. (1964): *Structural Geology*. McGraw-Hill.
- STUDER, B. (1851): *Geologie der Schweiz*, Bd. 1.
- (1865): *Zur Geologie der Berner Alpen*. *Jb. SAC* 2, 3–27.
- (1872): *Gneiss und Granit der Alpen*. *Zeitschr. deutsche geol. Ges.*, 551–557.

Manuskript eingegangen am 3. August 1966.