

Die tektonische Erforschung der Penninischen Alpen

Autor(en): **Müller, Ruedi**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **75 (1982)**

Heft 3

PDF erstellt am: **17.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-165238>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eclogae geol. Helv.	Vol. 75/3	Seiten 447–479	21 Textfiguren	Basel, November 1982
---------------------	-----------	----------------	----------------	----------------------

Die tektonische Erforschung der Penninischen Alpen

Von RUEDI MÜLLER¹⁾

ZUSAMMENFASSUNG

Nach Einzelbeobachtungen in den Alpen durch Horace Bénédict de Saussure (1780) vermittelt Bernhard Studer eine Gesamtschau («Geologie der Schweiz», 1851). Zwar erkennt Heinrich Gerlach, welcher die Walliser Alpen als erster detailliert bearbeitet (1869), im Antigorio-Gneis eine gewaltige, liegende Falte, doch nach seinem frühen Tod bleibt das bisherige Modell der Alpen bis zur Jahrhundertwende weitgehend unangetastet: Kristalline Regionen gelten als in situ wurzelnde «Centralmassen», welche durch ihr orogenetisches Aufdringen die dazwischenliegenden Sedimentmulden zusammenpressen.

1884 wird Marcel Bertrands Deckentheorie von Hans Schardt auf die Präalpen übertragen, um 1900 wagt Maurice Lugeon ihre Anwendung auf die bisher als autochthon betrachtete Zentrale Gneiszone. Die detaillierte Gliederung und kinematische Deutung des Deckenbaus im penninischen Raum nimmt Emile Argand vor, unter Einbezug der Kontinentaldrift-Theorien Alfred Wegeners.

In den folgenden Jahrzehnten wird Argands Deckensynthese mittels konventioneller und moderner Methoden (Geophysik, Ozeanographie, Petrologie) verfeinert und in das plattentektonische Modell eingefügt.

Vorgeschichte der Deckentheorien

«Voyages dans les Alpes», das berühmte Werk des Genfer Naturforschers HORACE BÉNÉDICT DE SAUSSURE, markiert 1779 gleichsam den Beginn geologischen Interesses an den Schweizer Alpen. Zahlreiche Einzelbeobachtungen werden zusammengetragen, sie reichen jedoch nicht aus, um ein Gesamtbild im modernen Sinn zu zeichnen. Trotzdem erkennt dieser Forscher schon eine zentrale Zone der Alpen, welche, im Gegensatz zu den mehr schiefrig-kalkigen Randregionen, hauptsächlich aus kristallinen Gesteinen aufgebaut wird.

Bis weit ins 19. Jahrhundert hinein dauert diese frühe, beschreibende Phase der Erforschung der Alpen. Auch BERNHARD STUDER, der in seiner zweibändigen «Geologie der Schweiz» (1851–1853) eine geologische Karte der Alpen veröffentlicht, ist noch dem Modell eines symmetrisch angelegten Gebirgszuges verhaftet, obwohl er schon klar in die verschiedenen Zonen aufgliedert: Jura, Mittelland-Molasse, Kalkalpen und die «*Centralmassen der Mittelzone*»²⁾.

Nach damaliger Ansicht ist die Symmetrie der Gebirge – im Falle der Alpen meist mit «nördliche Kalkalpen – zentrale Gneiszone – südliche Kalkalpen» umschrieben – Ausdruck des Aufdringens entweder vulkanischen Materials (v. a. deutsche Lehrbücher vertreten die Theorie solcher «Erhebungskrater») oder einer

¹⁾ Geologisches Institut der Universität und der ETH Zürich, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

²⁾ Die *kursiv* gedruckten Begriffe werden im Anhang erläutert (S. 475).

Hebung plutonischer Granit- oder Porphyrmassen. In beiden Fällen sollen die überlagernden Sedimente aufgebrochen und zur Seite, zu den sogenannten Randketten, zusammengeschoben worden sein. Dabei konnte das aufquellende Urgestein sich intensiv mit seiner früheren Bedeckung verfangern, was zahlreiche Unregelmäßigkeiten dieses Bauplans erklären soll (Fig. 1).

Die Ursache dieser Bewegungen wird im Schrumpfen der sich abkühlenden Erde vermutet. Dieser Schrumpfungsprozess wird auch als Motor für neuere Modelle der Gebirgsbildung herangezogen, welche nun in die Diskussion Eingang finden: Gebirge könnten durch ein Auspressen («écrasement transversal») von sedimentgefüllten Senken zwischen den Kontinenten entstanden sein, vergleichbar weicherem Material zwischen den widerstandsfähigeren Backen eines Schraubstokkes. Die Bewegungen müssten entlang konvergenter Verwerfungen erfolgt sein. Vulkane, früher als die wichtigsten Phänomene betrachtet, werden dabei zu Nebenerscheinungen an Bruchstellen der Gebirge.

Welche Schwierigkeiten diese Theorien einer vernünftigen Interpretation der Feldbeobachtungen entgegensetzen können, das beschreibt STUDER selbst (1851, S.215):

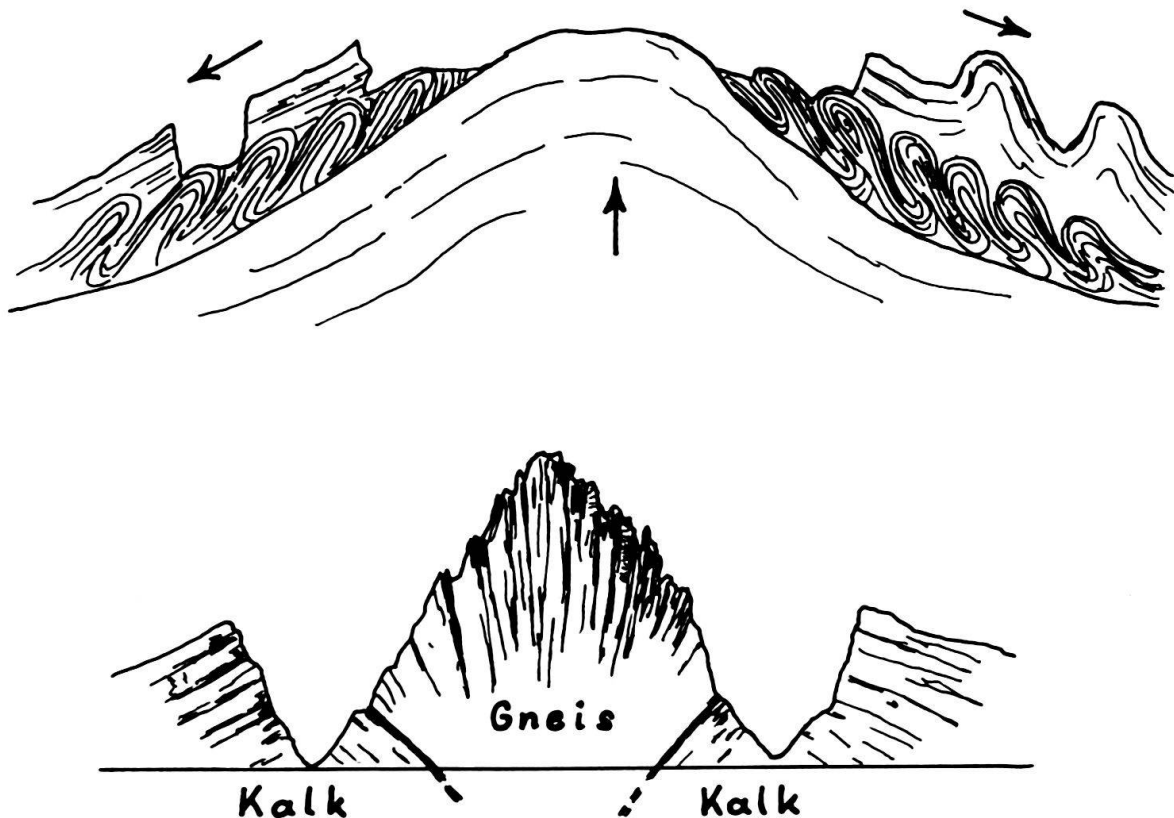
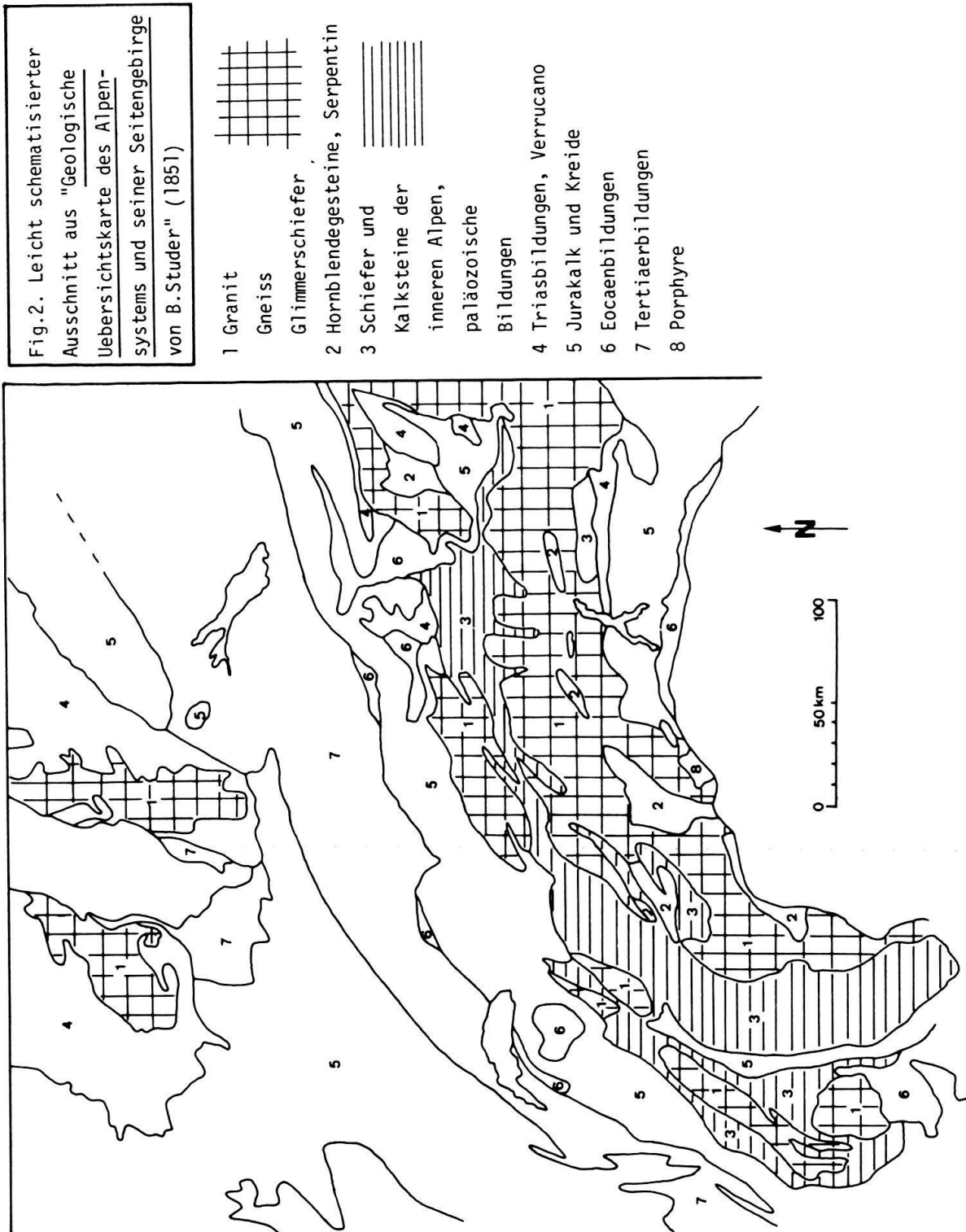


Fig.1. Vorstellungen über Entstehung und Bau der Gebirge zur Zeit Bernhard Studers (STUDER 1847, S.183 und 202).

«Dass jedoch der Felszahn des M. Cervin aus der Tiefe hervorgestossen sei, fand bereits de Saussure eine unmögliche Ansicht; es spricht dagegen die Schärfe der Kanten, die pfeilerähnliche Gestalt, die gleichförmige, geneigte Stratification. Wie sollte eine hebende Kraft, deren Wirken wir im Aufsteigen ganzer Ländermassen, oder in blasenartigen Anschwellungen erkennen, ein so scharf begrenztes Felsstück aus der Erdrinde hervorschieben können! Der M. Cervin müsste offenbar starr wie er jetzt ist ausgestossen worden sein, und die hebende Masse wäre erst noch unter ihm zu suchen; was



wir für die Kuppe nur der Aiguilles Rouges voraussetzen, müsste für den ganzen mehrere tausend Meter hohen Stock des Matterhorns angenommen werden. Die Erklärung des Niveauunterschiedes durch Einsenkungen und Einstürze der Umgebung des Felsstocks, scheint für diesen Fall die einfachere Annahme; die Hebung des Bodens hätte demnach ursprünglich eine mächtige, weithin ausgedehnte Anschwellung gebildet, ein grosser Theil der Masse wäre zurückgestürzt, und die mächtigen, aus ungleichartigen, stratificirten Steinarten bestehenden Pfeiler des M. Rosa, des Lyskamms, des M. Cervin, der Dent Blanche u.s.w. wären die Ruinen des alten Gewölbebaues. Würden jedoch die späteren Beobachtungen lehren, dass die Masse des Hirli, nach der früheren Ansicht von de Saussure, und wie auch ich zu sehn glaubte, in den Fuss der Pyramide fortsetze, so müsste die Entblössung des M. Cervin nothwendig ein Product der Erosion sein, so unmöglich es uns werden möchte, uns von einer solchen Abtragung von Masse eine klare Vorstellung zu machen.»

Die vor allem in den *Penninischen Alpen* noch lückenhaften Kenntnisse (erst die Talsohlen waren morphologisch-lithologisch einigermaßen erforscht; der Aufbau der höheren Regionen wurde daraus abgeleitet) konnten nicht genügen, um die Geologie der Walliser Alpen einigermaßen befriedigend zu verstehen. Entsprechend grob bleibt das Kartenbild für diese Region (Fig. 2).

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts – die Alpen öffnen sich nun den Geologen dank besseren topographischen Karten und der fortschreitenden verkehrstechnischen Erschliessung – bringen lokale Synthesen neue Erkenntnisse (Escher, Desor, Suess, Lory, Diener, Franchi, Stella, Bertrand u. a.): Der asymmetrische Baustil und die nach Norden gerichteten Bewegungen bis zu einem starren Vorland, dies alles verlangt nach neuen Interpretationen.

In dieser Zeit erscheinen auch die beiden grundlegenden Arbeiten des Bergbauingenieurs HEINRICH GERLACH: «Die penninischen Alpen» und «Das südwestliche Wallis» (1869, 1871). Gerlachs Karte der Penninischen Alpen ist die erste detaillierte Darstellung des Gebietes zwischen dem Rhone- und dem Aostatal. In ihrer Unterscheidung und räumlichen Abgrenzung der geologischen Einheiten stimmt sie bemerkenswerterweise auch mit den heutigen tektonischen Karten schon weitgehend überein (Fig. 3). Interessant ist nun, wie aus der an sich guten Kartierung mit den damaligen geologischen Vorstellungen von Gebirgsbau und Petrogenese eine dem heutigen Betrachter völlig fremde Interpretation entsteht. Sie wird uns deutlich im Kapitel über die Lagerungsverhältnisse sowie anhand der begleitenden Profile (Fig. 4). In den *Lepontischen Alpen* erkennt Gerlach zwar als erster den «Antigorio-Gneis-Sattel», eine Struktur im Sinne des heutigen Deckenbegriffs. Die übrigen Gneis- und Granitkörper betrachtet er jedoch noch als in situ wurzelnd, obwohl er in fast allen Gebieten das Einfallen der vermutlich jüngeren Einheiten unter diese Massen richtig beobachtet hat und diese störende Tatsache nur mit Mühe mit seinem geologischen Modell vereinbaren kann. Was ihm fehlt, ist eine verlässliche Stratigraphie, welche ihm aufzeigen könnte, dass in den «paläozoischen Serien» auch metamorphe mesozoische Elemente enthalten sind. Die Zeit ist offenbar noch nicht reif für die kühnen Hypothesen der Deckentektonik, d. h., jüngere Sedimente dürfen auf keinen Fall die «Centralmassen» in ihrer ganzen Erstreckung unterlagern!

Einige Ausschnitte aus den beiden Werken mögen Gerlachs Beobachtungen und Interpretationen illustrieren. 1896 beschreibt er im Kapitel 7 seine Profile (S. 119–132):

«Fassen wir nun den Gesamtbau der penninischen Alpen ins Auge, so sehen wir, dass es nur die zu Sätteln zusammengeschobenen oder in Fächern ausgebreiteten Gneissmassen, und nächst diesen die

älteren metamorphischen Schiefer sind, welche das eigentliche Grundgerüst des Gebirges bilden. In welcher Gestalt diese Gesteine ursprünglich auftraten, darüber können eben nur Vermuthungen aufgestellt werden. Sicherlich waren, wie in den lepontischen Alpen, so auch hier, die metamorphischen Schiefer und auch die grosse Mehrheit der Gneisse sedimentären Ursprungs ... Wahrscheinlich waren sie anfangs zu einem flachen, vielleicht etwas wellenförmigen Plateau ausgebreitet, welches mehr oder weniger den ganzen Raum des penninischen Alpengebiets einnahm. An seinem nordwestlichen Rande fand dann die *Anthracit- oder die Kohlenbildung* statt, und nach dieser scheint erst, zur Triaszeit, eine grössere allgemeinere Senkung eingetreten zu sein ...

(Mit der mittleren Juraperiode) scheint auch im penninischen Alpengebiete die Reihe der sedimentären Schichten ihren Abschluss und gleich darauf die Metamorphisirung derselben ihren Anfang genommen zu haben. Thatsache ist, dass in den ältesten Gesteinsgebieten, wie in den Gneissen der Centralmasse der Dent Blanche und des Monte Rosa auch die intensivste Umbildung, welche wahrscheinlich in den *Arkesinen* und in den granitischen Gneissen den höchsten kristallinen Umbildungsgrad erreichte, stattgefunden hat. An die Gneisse reihen sich dann in zweiter Ordnung die älteren metamorphischen Schiefer, und an diese die erkennbaren mehr oder weniger umgewandelten Sedimentärformationen der Kohlen-, Trias- und Jura-Schichten ...

Man kann daher wohl auch der Vermuthung Raum geben, dass sowohl diese jüngeren metamorphischen Schiefer und zum Theil auch die Gneisse lediglich nur Umwandlungsprodukte sind, welche bei tiefem Niveau, grossem Drucke und hoher Temperatur aus den gerade an Ort und Stelle befindlichen Schichten hervorgegangen sein dürften. Ob nun dabei vielleicht der eine oder andere Theil selbst plutonisch sei oder nicht, das können wir hier ebensowenig bestätigen wie wir es bei den Gesteinen der lepontischen Alpen vermochten.»

In der Meinung, dass die «Centralmassen und Gneissgewölbe» autochthone Elemente seien, wird also die «räthselhafte Fächerstruktur der Dent Blanche» als deformiertes Gewölbe interpretiert.

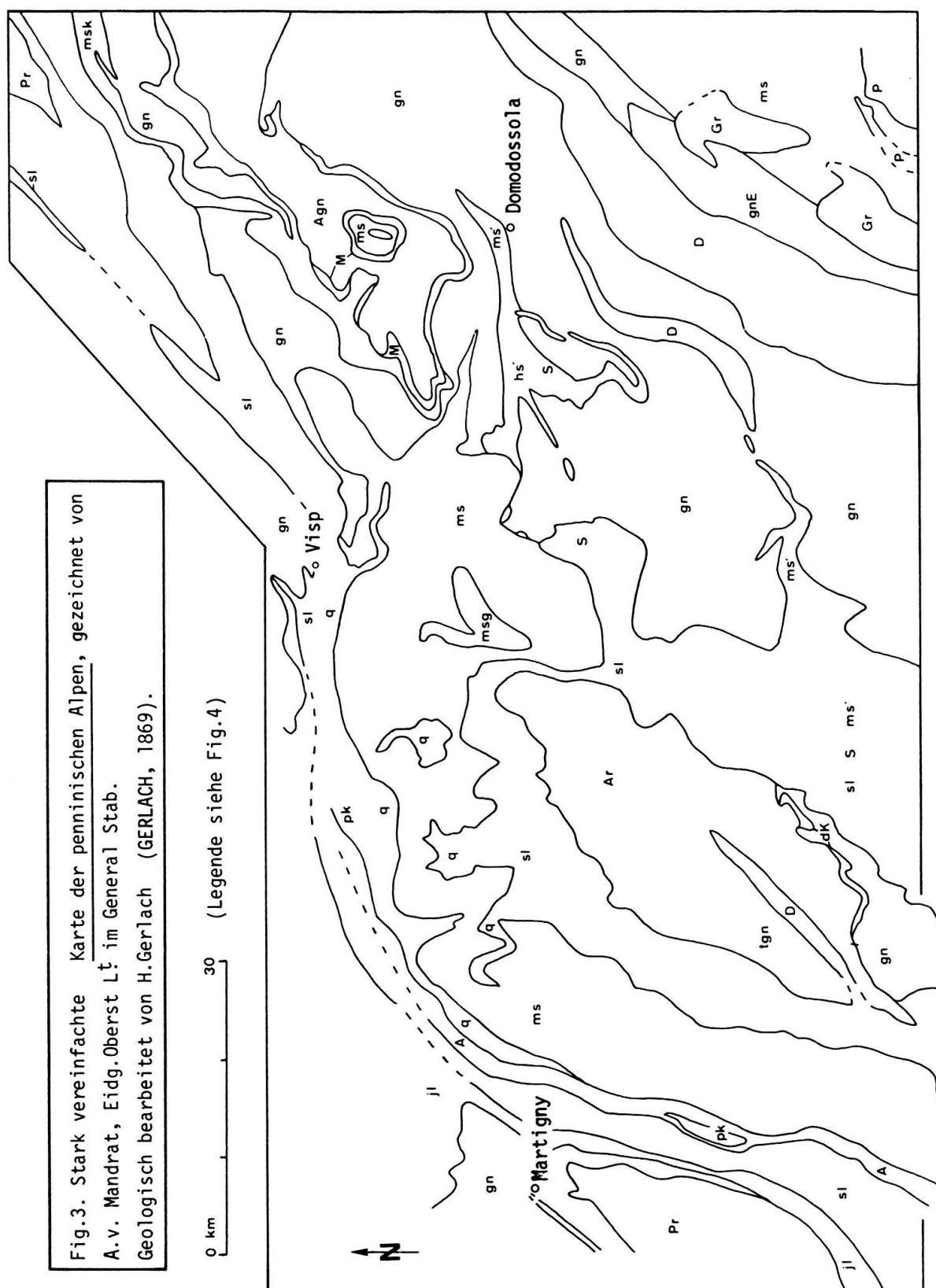
Eine Gliederung des penninischen Raumes gibt GERLACH (1871):

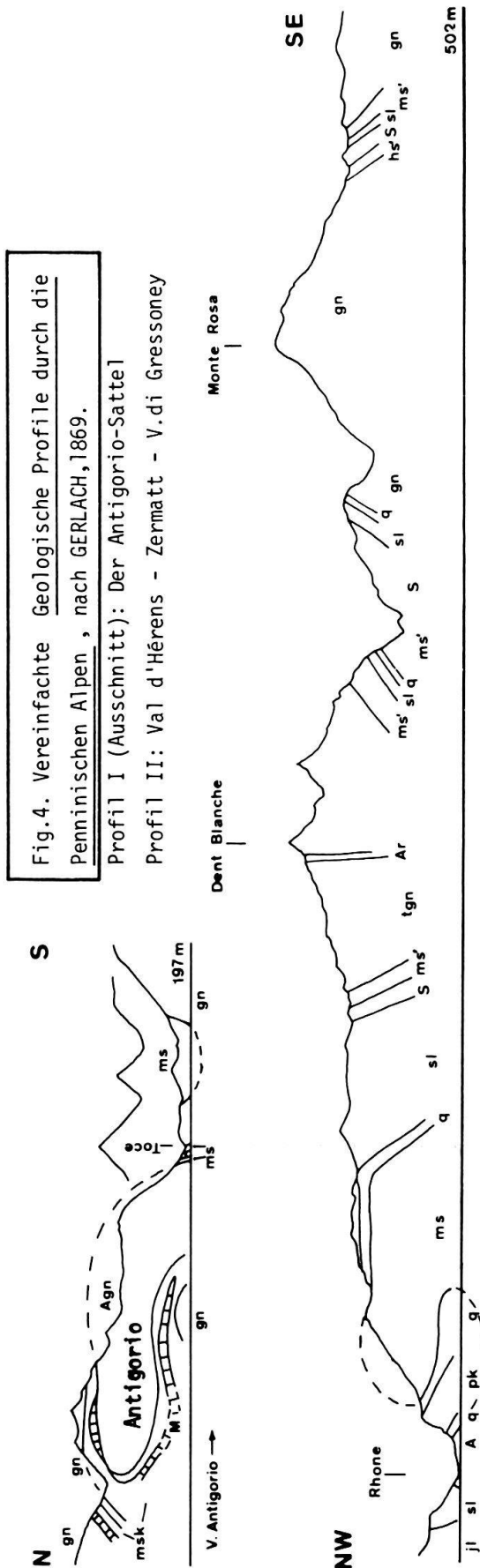
- «I Centralmasse der Aiguilles Rouges
- II Centralmasse des Mont Blanc
- III Mittelzone des Grossen St. Bernhard
- IV Centralmasse der Dent Blanche»

Zur Mittelzone des Grossen St. Bernhard zählt er nicht nur die als Grundgebirge betrachteten, mächtigen *Casannaschiefer* (vor allem alte, metamorphe Sedimente), sondern auch die sie begleitenden Anthrazitbildungen (die «*zone houillère*») mit jüngeren Sedimenten entlang dem Rhonetal sowie sämtliche Sedimente zwischen den Casannaschiefern und der «Centralmasse der Dent Blanche»:

«Das Gebiet der Mittelzone des Grossen St. Bernhard ist kein abgeschlossenes, einheitliches Ganzes, wie die Centralmassen, sondern ist zusammengesetzt aus mehreren parallellaufenden, mächtigen Gesteinszonen, welche im Westen an das Mont Blanc-Massiv, im Osten an dasjenige der Dent Blanche sich anschmiegen ... Als tiefstes Glied und zwar als das eigentliche Grundgebirg unserer Mittelzone können die Casannaschiefer betrachtet werden ... Die Lagerungsverhältnisse deuten darauf hin, dass die Casannaschiefer älter sind als die Kohlenbildung und wahrscheinlich den paläozoischen Ablagerungen angehören dürften ... Nach Ablagerung der Kohlenschichten scheint erst zur Triaszeit eine grössere Absenkung des Bodens stattgefunden zu haben ... da bemerken wir zuunterst den Quarzit, darüber Gyps, Rauchwacke und dolomitischen Kalk und dann die grosse, mächtige Gruppe der *Grauen Schiefer*. Der Quarzit tritt in grösseren, zusammenhängenden Massen nur in dem Gebiete zwischen dem Bagne- und Visperthale auf und zwar sowohl unter, wie auch regelmässig über dem Casannaschiefer ... Die grauen Schiefer bilden eine regelmässige, ununterbrochene Zone ... aus dieser Lagerung der grauen Schiefer im Verein mit dem dolomitischen Kalke, der Rauchwacke, des Gypses und des Quarzits zwischen der Jura- und Kohlenbildung lässt sich schliessen, dass diese sämtlichen Gesteinsglieder höchst wahrscheinlich der Triasformation angehören dürften» (1871, S. 112–116).

Kurz vor der Jahrhundertwende wird in den Präalpen (Schardt) und im Helvetikum der Deckenbau nach grossen Widerständen (Heim) allmählich anerkannt und





Legende zu Fig.3 und 4

j1	Jura und Lias
sl	schistes lustrés, Glanzschiefer
dk	Dolomit und dolomitischer Kalk
pk	Pontiskalk
q	Quarzit
A	Anthraxitbildungen
M	Marmor, Kalk- u. Dolomit-Einlagerungen
ms'	Chlorit- u. Talkschiefer
hs'	Hornblendeschiefer
S	Serpentin
gn	Gneis u. Glimmerschiefer
tgn	Talkgneis

ms	Glimmerschiefer, Talkglimmerschiefer	} Aeltere metamorphe Schiefer
	u. Chloritschiefer	
msk	idem, kalkig	
msg	Gneis-Einlagerungen	}
Agn	Antigorio-Gneis ("Unterer Plutonit" nach Scheerer)	
D	Hornblende-Gestein (Diorit u.z.T. Syenit)	
Pr	Protogin	
Ar	Arkesin	
Gr	Granit	
p	Porphyr	

Fig.5-8. Die drei unterschiedlichen Simphonprofile von H.Schardt, C.Schmidt und H.Golliez aus dem "Livret-guide géologique" (z.T. vereinfacht). Der Deckenbau ist noch gegen Süden gerichtet.

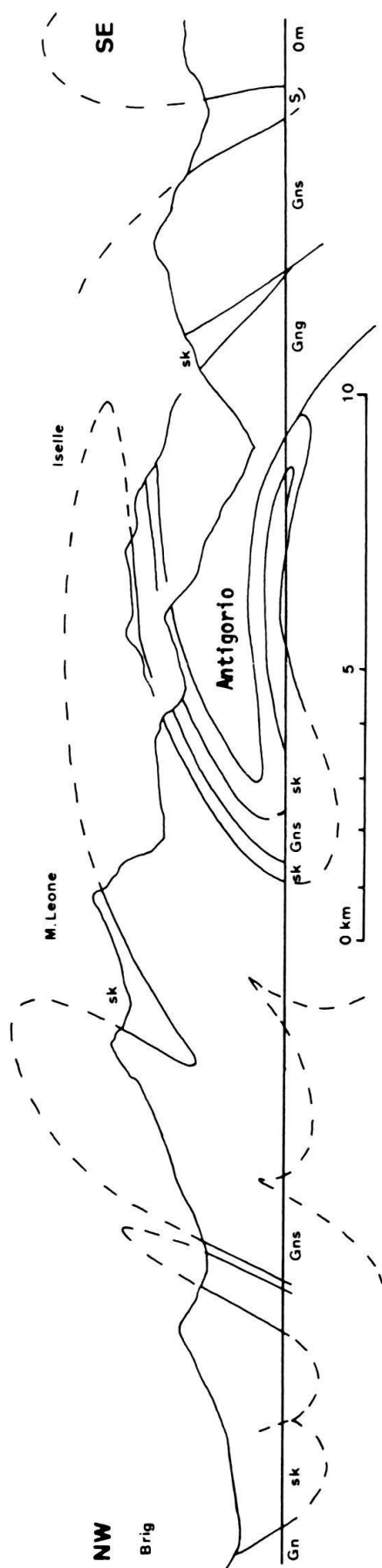


Fig.5. H.SCHARDT (1894, pl.10, Fig.5): sk schistes lustrés, avec marbre, gypse, brèches etc.

Gns Gneiss schisteux Gng Gneiss granitoide S Micaschists

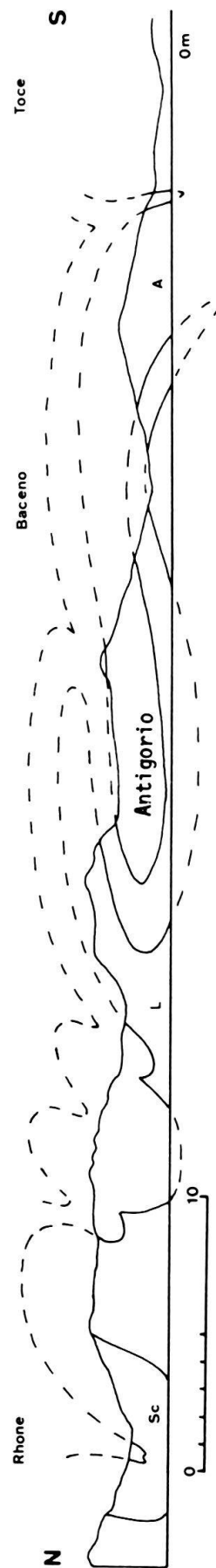


Fig.6. C.SCHMIDT (1894, pl.8, Fig.6): sc sericitische Schiefer

L Lebendun Gneiss A Antigorio Gneiss

im zentralen Gneisgebirge mindestens vermutet. Doch alle diese Neuerungen stehen noch innerhalb des alten Rahmens, den RENEVIER & GOLLIEZ im «Livret-guide géologique» (1894, S. 198-199) so beschreiben:

«Nous distinguons dans les Alpes suisses une zone centrale, dite habituellement Alpes cristallines, et deux zones latérales Nord et Sud.

- A. Les Alpes latérales nord (Préalpes romandes et Hautes-Alpes calcaires), essentiellement calcaréo-schisteuses ... plus ou moins métamorphisées, du Carbonique à l'Eocène. Les plis y sont très accusés, et généralement déjetés au nord-ouest.
- B. Les Alpes centrales ou cristallines ... noyaux cristallins, séparés les uns des autres par un réseau schisteux ... le plissement est difficile à déterminer.
- C. Les Alpes latérales sud ... présentent la même série sédimentaire que la zone septentrionale ... le pendage habituel est au sud, et le plissement y est généralement beaucoup moins accusé.»

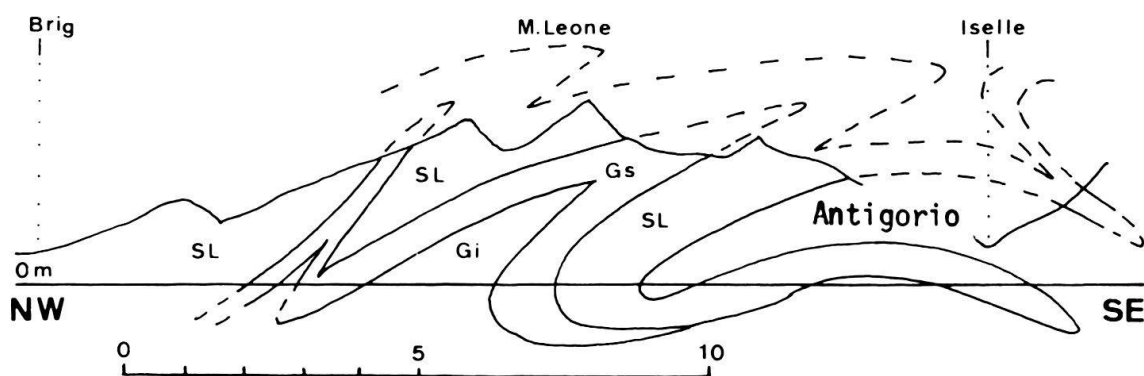


Fig.7. H.GOLLIEZ (1894, p.230): SL Schistes lustrés
Gs Gneiss supérieur (Mte.Leone)
Gi Gneiss inférieur (Antigorio)

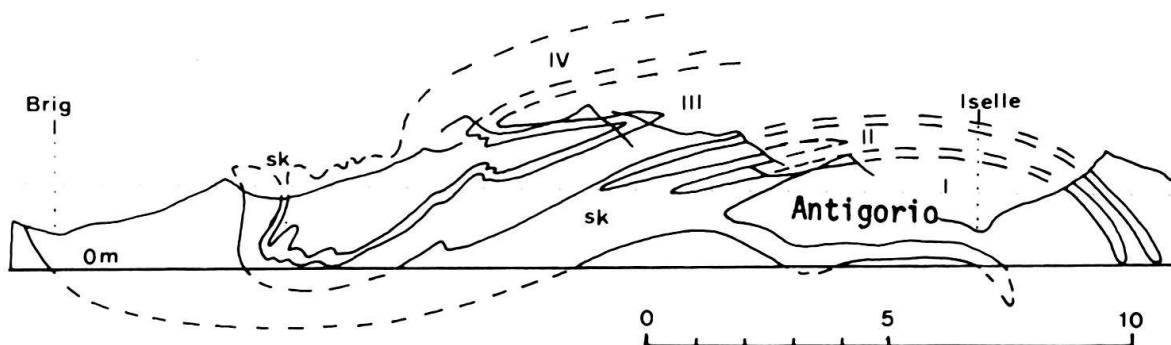


Fig.8. Zum Vergleich: Schardt's Simplonprofil, angefertigt nach dem Tunneldurchstich (SCHARDT 1908, pl.VII, Fig.4)

sk schistes lustrés (Jurassique)

I - IV nappes de gneiss:

- I Antigorio
- II Lebendun, avec 2 ou 3 digitations
- III Monte Leone
- IV Berisal (Gd.St.Bernard)

Im Zuge der Abklärungen zum geplanten Bau des Simplontunnels wird das Gebiet zwischen Brig und Domodossola von namhaften Geologen genauer untersucht. Über Gerlachs Antigorio-«Sattel» werden in der Folge die Monte Leone- und die Lebendun-Decke postuliert. Die Darstellungen bleiben zwar recht widersprüchlich (z.B. jene von Gollier, Schardt und Schmidt 1894, alle im «Livret-guide géologique»; siehe dazu Fig. 5–8); sie stimmen jedoch darin überein, dass die Antiklinalen generell gegen Süden gerichtet sind.

Die Theorien der Deckentektonik werden auf die Penninischen Alpen übertragen

Weniger eingeengt durch das vorherrschende Denkgebäude, in welchem seine älteren Lehrer noch weitgehend gefangen sind, aber mit deren ganzem Schatz an geleisteten Vorarbeiten im Reisegepäck, vermag sich MAURICE LUGEON endlich von zahlreichen Schemata zu lösen. 1895 akzeptiert er die von Hans Schardt auf die Präalpen angewendete Deckentheorie Marcel Bertrands, welche er zuvor noch abgelehnt hatte (SCHARDT 1893). 1901 formuliert LUGEON die neuen Hypothesen: Der Tessiner Gneisdom sei der Normalschenkel der Antigorio-Antiklinale, welche im Osten eventuell in den Falten von Tambo und Suretta ihr Äquivalent habe, und Monte Leone und Lebendun seien der Antigorio-Decke übergelagerte Decken. Diese stirnen nicht mehr im Süden, sondern sollen nach Norden überliegende Antiklinalen sein. Ähnliches vermutet er für die Monte-Rosa-Einheit, und für die «Centralmasse der Dent Blanche», welche auf schweizerischem Gebiet durchwegs von Schistes lustrés unterlagert wird, drängt sich der Deckenbegriff geradezu auf (Fig. 9).

«Ainsi, une série de plis couchés paraissent se presser contre les massifs hercyniens de la première zone alpine. Ils n'ont pu les franchir» (LUGEON 1901, S. 816).

Natürlich werden diese neuen Ideen nicht kritiklos hingenommen, doch ist die Auseinandersetzung bald zugunsten der Deckenhypothese entschieden: Die Erkenntnisse aus dem Bau des Simplontunnels (Fertigstellung 1906) tragen entscheidend dazu bei, dass der Deckenbau der Penninischen Alpen akzeptiert werden kann.

1903 fasst LUGEON zusammen:

«Toutes les Hautes-Alpes calcaires de la Suisse, qui s'étendent (fournant le front de la chaîne), du lac de Thoune au Sentis, sont bien des montagnes charriées ... Tout l'ensemble vient du sud. Le mouvement horizontal dépasse 30 km.

Ainsi, puisque soit la nappe du Falknis, soit celle du Rheticon, représentent dans l'est ce que sont les Préalpes médianes et les régions de la Brèche du Chablais et de la Hornfluh dans l'ouest, il devient à peu près évident que les grandes nappes préalpines viennent du versant sud de la chaîne ... Le chemin parcouru par ces nappes ... dépasse plusieurs centaines de kilomètres.

En cherchant si ces phénomènes s'étaient propagés ailleurs, j'arrivais à montrer qu'ils n'étaient pas propre au Chablais, que l'ensemble du front nord des Alpes en avait été victime, puis que d'immenses régions gneissiques de l'intérieur prenaient part aussi à ces immenses marches vers le nord. Et, chose curieuse, les preuves absolues se trouvaient justement là où l'on n'avait jamais été les chercher.

Dans l'intérieur de la chaîne ... de très grandes nappes de gneiss s'avancent très loin du sud vers le nord. Tous les massifs cristallins du Monte Leone, du Tessin, de l'Adula se terminent au Nord par de grands plis couchés ...» (1903, S. 338–342).

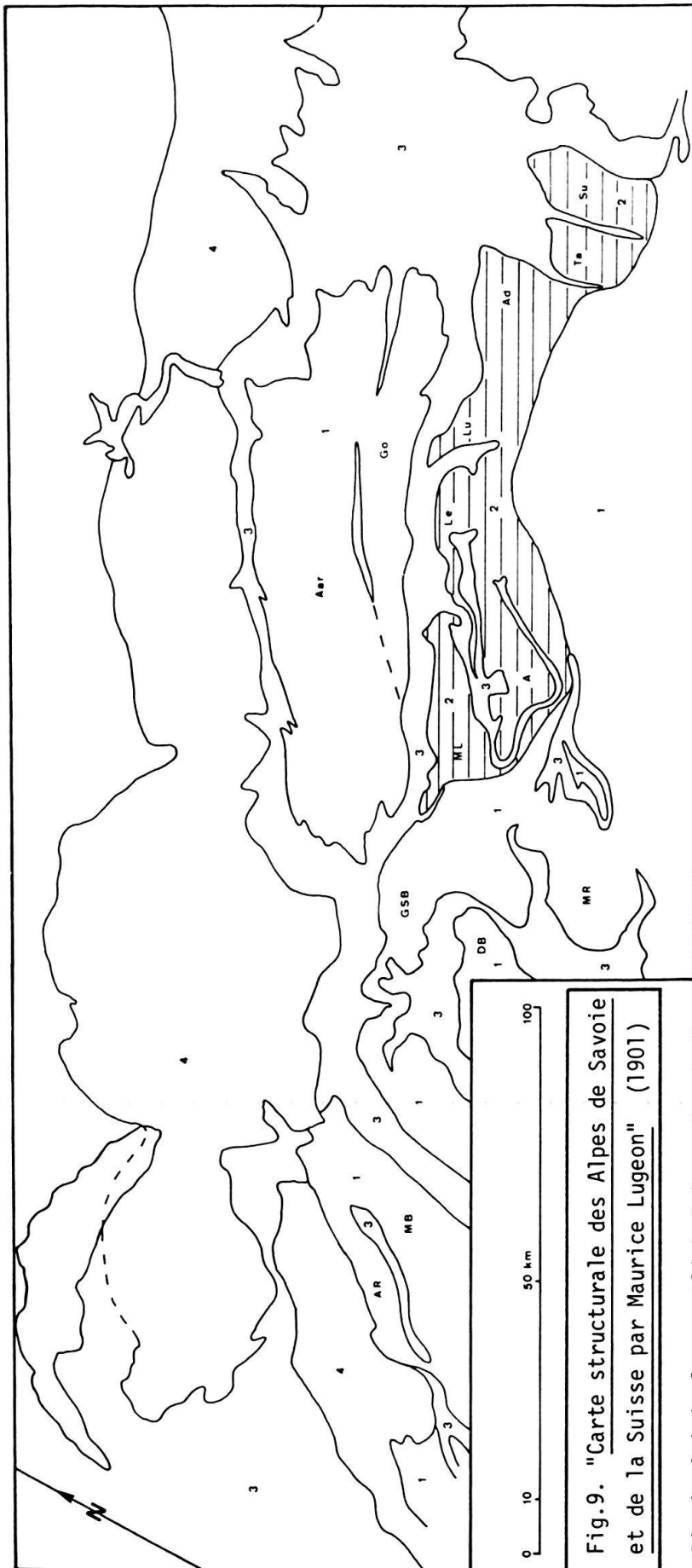


Fig.9. "Carte structurale des Alpes de Savoie et de la Suisse par Maurice Lugeon" (1901)

Die im Original wesentlich feiner abgestufte Legende ist vereinfacht wiedergegeben, um die tektonische Einteilung in die verschiedenen Deckengebiete zu verdeutlichen.

1 Gneiss et granite:

AR Massif des Aiguilles Rouges
 MB " du Mont Blanc
 DB " de la Dent Blanche
 Aar " du Finsteraarhorn
 Go " du St. Gothard
 GSB Grand St. Bernard
 MR Mont Rose

2 Nappes des régions gneissiques:

ML Monte Leone
 Le Lebendun
 A Antigorio
 Lu Lucomagno
 Ad Adula
 Ta Tambo
 Su Suretta

3 Terrains en place ou participant aux grands
 plus des régions gneissiques

4 Nappes des racines externes et internes
 des Hautes-Alpes calcaires et des Préalpes.

Lugeon leitet daraus ein Gesetz ab: Je weiter nördlich heute eine Decke (evtl. als Rest einer Deckfalte) liegt, desto weiter südlich muss ihre Wurzel gesucht werden. Schardt (in: LUGEON 1903, S.343–346) meldet jedoch Bedenken an: Auf der Nordseite der Alpen kann er Lugeons Hypothesen zwar zustimmen, im übrigen Alpengebiet «forciere dieser die neue Theorie jedoch zu stark».

Das Bild vom Aufbau der Alpen erfährt jedenfalls eine völlige Umgestaltung. Schematisch dürfte es nun ungefähr so aussehen (Fig. 10):

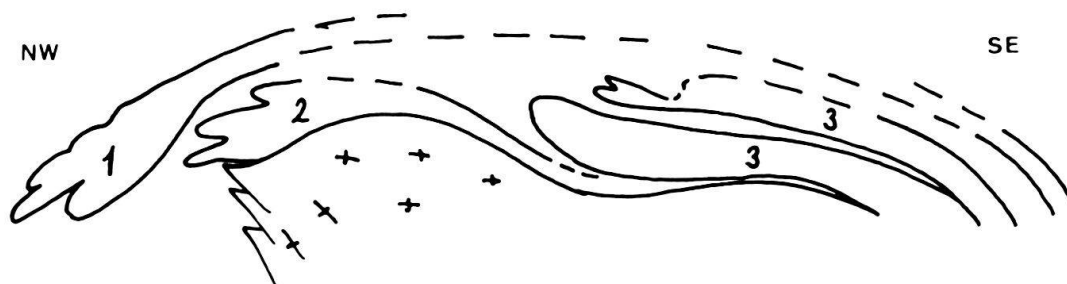


Fig.10. Schematisches Profil durch die Penninischen Alpen, um 1900.

- 1 nappes à racines internes
- 2 nappes à racine externe ou nappes de la 1^{re} zone alpine
- 3 Alpes valaisannes: nappes centrales, formées de grands plis déversés, peuvent même se coucher, présenter des allures de nappes, comme dans l'exemple remarquable du Simplon.

(Beschreibung nach LUGEON, 1901, p.812–813).

Trotz der teilweise berechtigten Kritik am neuen Modell verdrängt dieses die Autochthonisten rasch aus der Diskussion. Die Alpen sind in der Sprache der Geologen nicht mehr symmetrisch um eine Zentralzone angeordnet, sondern werden als ein Stapel von nach Norden gerichteten, übereinanderliegenden Deckfalten begriffen, und die Zahl autochthoner Massive wird dementsprechend drastisch reduziert.

In dieser Situation muss nach völlig neuen Erklärungen gesucht werden. Nach der Übertragung des Geosynklinalbegriffs auf die Alpen durch HAUG (1900) bemerkt Lugeon abschliessend:

«Les chaînes de montagnes naissent de grands géosynclinaux. Elles sont la réaction exagérée d'un phénomène qui s'exagérait trop.

Ce serait pendant l'Oligocène que ces mouvements considérables seraient fait sentir, se perpétuant jusque dans le Miocène» (1901, S.820–821).

Zu Anfang des Jahres 1905 wird Lugeon in seinem kleinen Lausanner Institut von einem Medizinstudenten besucht, welcher zufällig in der Bibliothek der medizinischen Fakultät auf eine Beige verirrter Geologiebücher gestossen ist. Später (1940, S.2) schreibt er über diese Begegnung:

«Ce soir-là, rentré chez moi, je cessais de travail, tant j'étais bouleversé; un homme de vingt-cinq ans m'avait parlé avec la science d'un grand maître!»

Der junge Mann, der ursprünglich Architekt werden wollte, nachher aber das Studium der Medizin aufnahm, schliesst sich Lugeon an und wird schliesslich zum genialen Architekten des neuen Modells der West- und Zentralalpen: Es ist EMILE ARGAND.

Sobald die Verhältnisse es gestatten, schickt Lugeon seinen neuen Mitarbeiter ins Aostatal. Die Frage, welche beiden unter den Nägeln brennt, ist offensichtlich: Lässt sich die Deckenhypothese auch dort vertreten? Drei Monate später, im Mai 1905, legen sie in Paris zwei kurze Mitteilungen vor: Zwischen Tessin und Piemont postulieren sie einen Stapel von sieben mächtigen, nach Nordwesten überliegenden Gneisdecken, getrennt durch meist schmale Sedimentmulden:

«La synthèse des Alpes occidentales était accomplie!» (LUGEON 1940, S.4).

Der Deckenstapel nach LUGEON & ARGAND (1905):

VII Dent-Blanche-Decke; vollständig von Mesozoikum unterlagert.

VI Decke von Mont Mary und Mont Emilius.

V Monte Rosa und Gran Paradiso in enger Homologie; beides sind grosse, liegende Falten, nicht Dome.

IV Decke des Grossen St. Bernhard; eine riesige, liegende Antiklinale, bestehend hauptsächlich aus Casannaschiefern.

III Monte-Leone-Decke, inklusive Gantergneise.

II Lebendun-Decke.

I Antigorio-Decke.

– Die Gneiskuppel von Crodo (und die tiefsten Aufschlüsse im Simplontunnel): Rücken der nächsttieferen Decke?

Das allgemeine Axialgefälle – die den tektonischen Aufbau des Penninikums bestimmenden Achsen tauchen alle von der Tessiner Kulmination gegen Westen bzw. Südwesten ab – ermöglicht erst, dass der Deckenbau überhaupt erkannt werden kann. Nach der Axialdepression im Querschnitt des Aostatals kommen verloren geglaubte Elemente jedoch wieder an die Oberfläche: Dem Paar Mischabel (= Rückfalte der Decke IV)–Monte Rosa entspricht im Südwesten das Paar Valsavaranche–Gran Paradiso.

Die Decke IV wird also zwischen die nächsthöheren Decken V und VII in Form einer südvergenten Antiklinale hinaufgepresst. Argand nennt dies eine «falsche Synklinale» und sucht die Ursache für deren Entstehung in einer «vague en retour», welche dem Anbranden der Decken an die externen herzynischen Horste folgte.

Das «Massif du Tessin» wird zum Herzstück der Alpen und sein Südrand zur Wurzelzone der Decken, deren Abtauchen im Querschnitt des Toce-Tales prächtig aufgeschlossen ist:

«La résistance des anciens horsts ... provoque souvent, sur de grandes longueurs, soit le renversement des racines droites vers l'intérieur de la chaîne, soit la formation des plissements postérieurs à la naissance des nappes» (LUGEON & ARGAND 1905b)

– selbst die spätere Steilstellung der «Wurzelzone», die Existenz von «post-nappe folding» und die «phase insubrienne» werden schon erkannt!

Nach den kühnen Hypothesen gilt es, diese in hartnäckiger Kleinarbeit zu überprüfen. Noch zeigen die Darstellungen verschiedener Autoren grosse Abweichungen (Fig. 11–13), doch Schritt für Schritt schafft ARGAND in der Folge Klarheit.

1906 stellt er fest, dass die Dent-Blanche-Decke zur Zone von Sesia-Lanzo gehört und dass die Zone houillère der Westalpen (zuvor «zone axiale» genannt) einen Teil der Decke des Grossen St. Bernhard bildet.

1908 erscheint seine Dent-Blanche-Karte, ein Jahr später der Textband dazu: Mont Mary und Mont Emilius sind nur mehr isolierte Teile ein und derselben Decke, der Dent-Blanche-Decke lato sensu (nun als Decke VI₁-VI₂-VI₃ bezeichnet).

Nach der ersten flüchtigen Skizzierung und zahlreichen Detailarbeiten liegt 1911 die tektonische Gesamtbetrachtung des penninischen Raumes vor. Im 31. Band der «Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz» entsteht das umfassende Bild der «nappes de recouvrement des Alpes pennines», und vier beigelegte Tafeln (Spezialkarte Nr. 64) verdeutlichen Argands Vorstellungen in graphisch meisterhafter Art: Eine Strukturkarte der Westalpen erlaubt die Übersicht, zahlreiche Längs- und Querprofile (insgesamt 30) veranschaulichen die Interpretation entlang kontinuierlicher Faltenachsen in die Tiefe, und drei Blockdiagramme aus dem östlichen Teil verbinden Karte, Längs- und Querprofile zur dreidimensionalen Ansicht (Fig. 14-16).

Ein Leitgedanke bestimmt diese Darstellungen: Die Bewegung war einförmig von Süden gegen Norden gerichtet und beinhaltete keine rückläufigen Phasen.

«Le phénomène qui domine tout: le déversement unilatéral des pli-nappes ... l'idée d'une marche progressive des nappes vers l'extérieur de la courbe des Alpes occidentales» (ARGAND 1911b, S. 23-24).

Völlig überzeugt ist Argand, was die Homologie von Monte Rosa und Gran Paradiso angeht:

«Personne ne contestera sérieusement que la «coupole» du Grand Paradis ne prolonge le flanc normal du Mont Rose, et que ces deux objets ne soient le même, continu en profondeur sous les masses mésozoïques de la vallée d'Aoste moyenne» (1911b, S. 19).

Energisch widerspricht er C. SCHMIDT, welcher im Simplongebiet Transversalstrukturen zu erkennen glaubt:

«... et croit y voir un faisceau de racines dirigées sud-est-nord-ouest, appartenant à des plis qui auraient marché vers le nord-est, c'est-à-dire à des plis transversaux très couchés» (S. 5).

Fig. 11. "Geotektonische Karte der Schweiz, von Dr. H. Schardt" 1906, vereinfacht.

9	Nagelfluh, Miozän		MP	Mediane Präalpen
8	Flysch u. Nummulitenflysch		Ch	Chablais-Breccie
7	Flyschbreccie		NF	Niesen-Flysch
6	Helvetisch-jurassische Fazies	} Meso- zoisch	HK	Hohe Kalkalpen
5	Austroalpine Fazies		ZB	Zone des Briançonnais
4	Glanzschiefer-Fazies		GZ	Glanzschieferzone
3	Karbon		ZB	Zone der Bündnerschiefer
2	Amphibolit, Diorit, Gabbro		PV	Zone der Pietri Verdi
1	Gneis und Granit		GS	Gneiszone der Sesia
			AI	Amphibolitzone von Ivrea
	 Mutmassliche Verbindung der Gneisdecken		SG	Südliche Gneise
	~~~~~ Deckfaltenränder		SK	Südliche Kalkalpen
	~~~~~ Ueberschiebungsränder		OUe	Ostalpine Ueberschiebung
			UE	Unter-Engadin
			I - VI	Penninische Gneisdecken

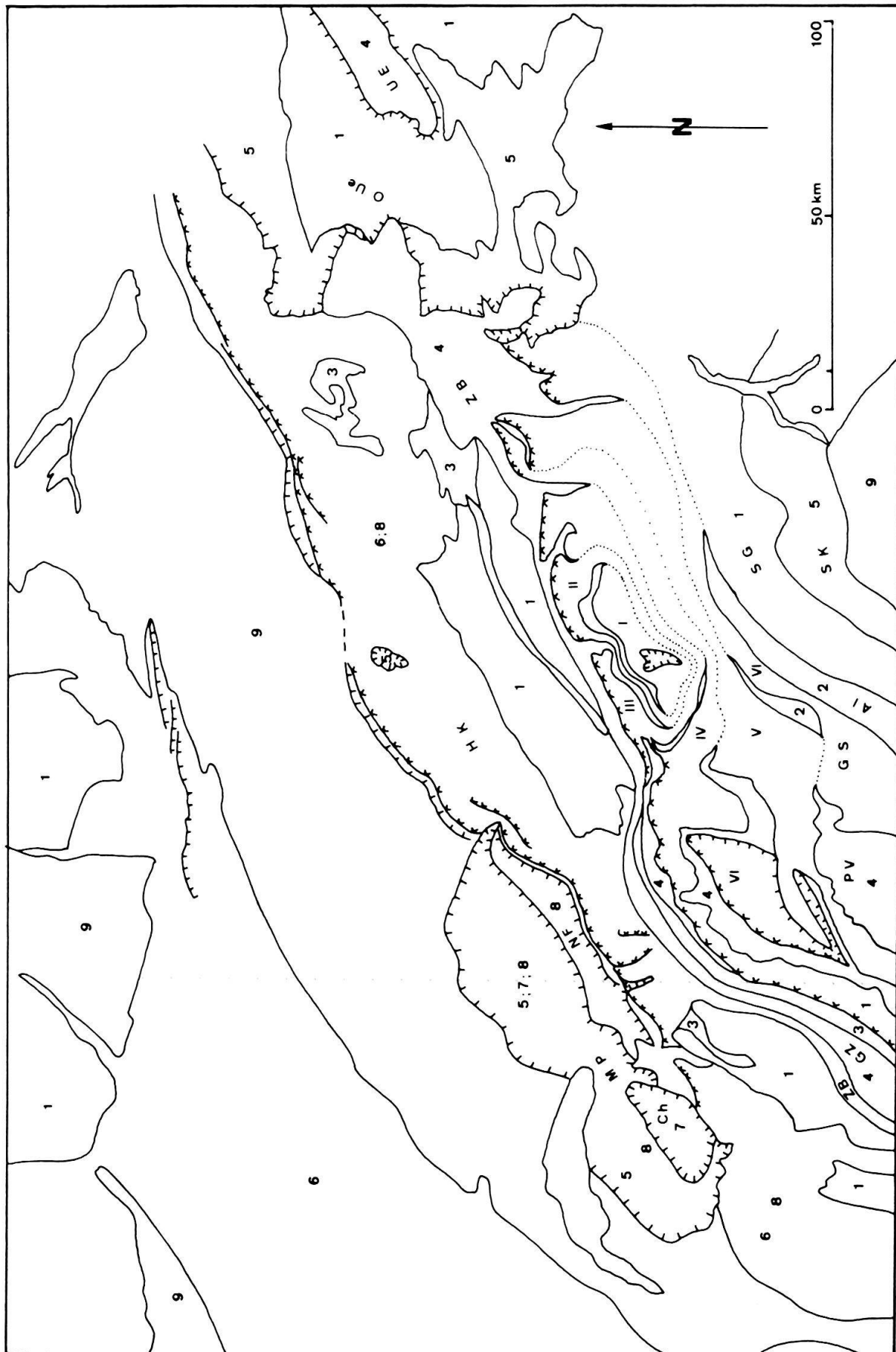


Fig.12+13. Zwei zum Teil vereinfachte Nord-Süd - Profile durch das Simplongebiet

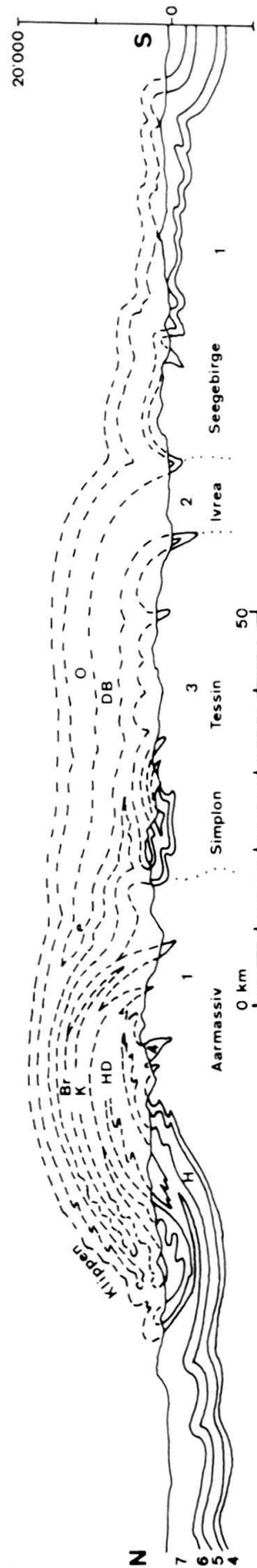


Fig.12. C.SCHMIDT (1907, Tafel 1, Ausschnitt aus Fig.6)

- | | | | |
|--|----|-------------------------|-------------------|
| 7 Neogen, Rote Molasse | DB | Dt.Blanche - Deckenkern | Wurzeln: |
| 6 Palaeogen | O | Ostalpine Decke | Südalpen |
| 5 Trias, Jura und Kreide | H | Helvetisch Autochthon | Wurzeln: |
| 4 Carbon, Perm und Trias | HD | Helvetische Decken | Centralmassive |
| 3 Autochthone Centralzone der Alpen | K | Klippen- und Breccien- | Wurzeln: |
| 2 Zone v. Ivrea, Dent Blanche - Decke | Br | decke | Rhein-Rhone-Narbe |
| 1 Schwarzwald, Aar- u. Gotthard-Massiv | | | |

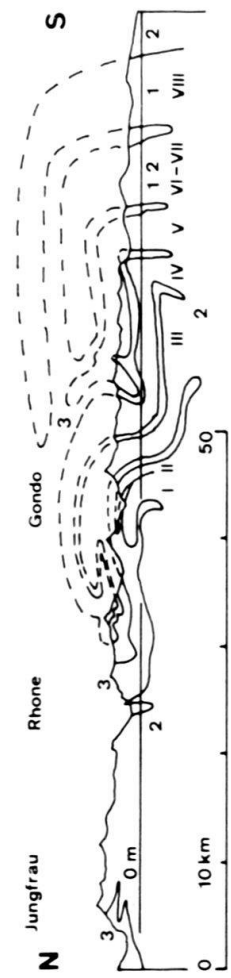


Fig.13. H.SCHARDT (1908, pl.7, Fig.3)

- | | | |
|-----------------------------|----------|--------------------|
| 3 Mesozoische Sedimente | I - VIII | Penninische Decken |
| 2 Gneis und Glimmerschiefer | | |
| 1 Granit | | |

– die transversale Anordnung der tektonischen Zonen erklärt sich einfach durch das nach Südwesten gerichtete Axialgefälle des Deckenstapels. Schmidt habe die Richtung der Schichten mit jener der Falten verwechselt und die Richtung des Abtauchens mit jener des Schubes.

Die Wurzeln dieser Decken sind also nicht in der Querdepression des Simplon zu suchen, vielmehr verlaufen sie parallel und analog zu jenen der höheren penninischen Decken in Ost–West-Richtung, und die Decken bewegten sich von Süden gegen Norden eindeutig als Longitudinalfalten.

Verschiedene kleinere Veröffentlichungen zeigen die Richtung an, in welche Argands anschliessende Forschungen zielen: Aus der Beschreibung des Westalpenbogens heraus versucht er, die Deutung der ursächlichen Prozesse abzuleiten, welche zum Bau dieses Gebirges führen konnten.

Emile Argands Theorien zum Bau der Westalpen und Eurasiens

«Sur l'arc des Alpes occidentales» wird 1916 zu einem Markstein, und daraus seien hier einige Stellen zitiert:

«Par rapport (au faisceau des grands plis couchés penniques), les plis couchés helvétiques sont passifs et toute l'histoire de leurs formes, depuis la naissance jusqu'à la mise en place, est le contrecoup d'événements penniques.» – Der neue Begriff der Embryonaltektonik wird umschrieben: «Chaque cordillère recouvre, en profondeur, la partie la plus active, la plus mobile, la plus intensément plissée de l'embryon d'un grand anticlinal couché. Au total, le dos de la cordillère n'est que la surface structurale de l'embryon en marche.

Le paroxysme: A la première phase, le géanticlinal briançonnais s'étale sur l'avant-fosse et déferle sur l'avant-pays. La nappe du Grand St. Bernard, depuis longtemps marquée en profondeur par un embryon très couché, acquiert toute son amplitude.

A la deuxième phase, le géanticlinal du Dolin s'avance sur les restes du géosynclinal piémontais; la nappe de la Dent Blanche, après avoir couvert cette dépression, fonce dans le flanc normal de la nappe du Grand St. Bernard en y produisant un premier train de plis en retour, l'éventail de Bagnes.

A la troisième phase, la nappe du Mont Rose se prononce et va, comme la précédente, s'encapuchonner dans le flanc normal de la nappe du Grand St. Bernard. Ainsi naissent les plis en retour de l'éventail franco-italien et ainsi s'exagère le gros pli Valsavaranche–Mischabel. Vers le même temps se produit le foisonnement simplon-tessinois.

Le retour d'énergie qui suit correspond à la phase insubrienne proprement dite, qui détermine la formation du troisième éventail, le redressement, le renversement, l'amincissement des racines, ainsi que la naissance du faite structural» (ARGAND 1916, S. 171–183).

Um die Jahrhundertwende noch schien die Theorie der sich abkühlenden, schrumpfenden Erde die einzige Erklärungsmöglichkeit für grossräumige Bewegungen an der Erdoberfläche zu bieten. Doch nun eröffnet die noch junge Geophysik neue Wege: Seltsame Unregelmässigkeiten im Schwerfeld der Erde werden entdeckt, und Argand, auf der Suche nach den Kräften, welche die Horizontalbewegungen der Deckenschübe ermöglichen, verarbeitet diese Hinweise zusammen mit seinen immensen Kenntnissen der Tektonik und mit seiner genialen Vorstellungskraft zu einem einzigartigen Werk: «La tectonique de l'Asie.»

Was unserer heutigen Generation, die wir mit dem damaligen geologischen Weltbild nicht mehr vertraut sind, bei der Lektüre dieses Meisterwerks in weiten Teilen als selbstverständlich erscheinen wird, kommt 1924 einer grundlegenden Umgestaltung der herrschenden Theorien über die Gebirgsbildung gleich.

CH. JACOB (Les théories tectoniques nouvelles, E. Argand-A. Wegener) schildert 1925 diesen Wandel so: Die alte Theorie der schrumpfenden Erde lieferte die Erklärung dafür, dass grosse, starre Kontinente einander näherrückten und schliesslich die mit Sedimenten angefüllten, plastischeren Geosynklinalen allmählich auspressten. Innerhalb der Kontinente liefen vor allem vertikale (auf den Globus bezogen: radiale) Bewegungen ab in Form epirogenetischer (grossräumiger, langzeitlicher) und orogenetischer (kürzerer, gebirgsbildender) Prozesse. Meere und Kontinente sollten sich in ihrer Beschaffenheit jedoch ziemlich ähnlich sein. So wurde z. B. im Atlantik eine versunkene Bergkette vermutet, welche die variskischen und kaledonischen Gebirge Europas mit jenen Nordamerikas verbinden sollte, und unter den Wassern des Pazifiks sollte ein überfluteter Kontinent liegen. Schon nach damaligen Vorstellungen aber entstanden Gebirgsketten aus früheren Geosynklina-

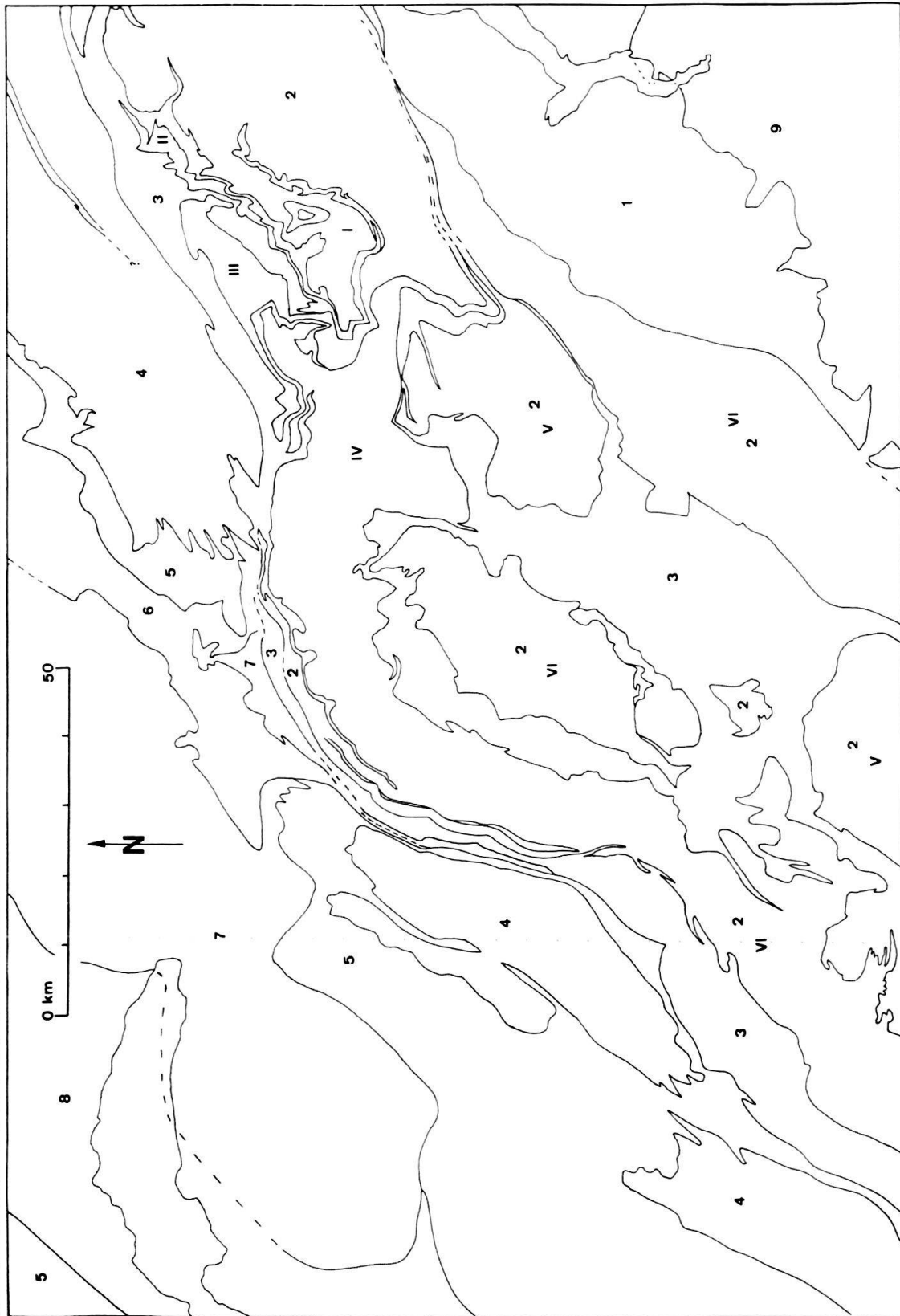
Legende zu Fig.14-16

Fazies

Tektonische Elemente

Grosse Quartär-Ablagerungen (Poebene)	9	
Oligozäne und miozäne Senken im Jura, Schweizerische Molasse	} 8	Molasse-Becken
(vorwiegend Flysch)	7	{ Brekzien-Decke, Decken der Préalpes médianes und der externen und internen Zone der Präalpen
v.a. mesozoische Sedimente der helvetischen (dauphi- nois) Fazies	6 5	{ Wildhorn- und Diablerets-Decke. Autochthone Serie und parautochthone Decken mit ihren Tertiär-Hüllen
Granite, vorkarbonische Schiefer und Gneise, Karbon-Senken	} 4	Externe Massive, "Horste"
Mitteltrias-Tertiär: Kalkig-dolomitische Trias und schistes lustrés mit Grüngesteinen der piemontesischen Fazies; m.Trias, o.Trias und Kreide der Briançonnais-Fazies	} 3	Hülle der penninischen Decken
Penninische Decken:		
Paläozoikum und Trias	4	VI Dent Blanche mit Valpelline-Serie, M.Mary, Mt.Emilius, Sesia- zone und Canavese
		V Monte Rosa (- Gran Paradiso)
		IV Grosser St.Bernhard (+ zone houillère)
		Simplon-Tessiner - Decken:
		III Monte Leone
		II Lebendun
		I Antigorio
		Verampio
Kristalline Schiefer, Diorit-Kinzigit-Zone von Ivrea-Verbano, etc.	} 1	Dinariden und insubrische Zone

Fig.14. Vereinfachter Ausschnitt aus der Strukturkarte von E.ARGAND (1911, Spezialkarte Nr.64, Tafel 1)



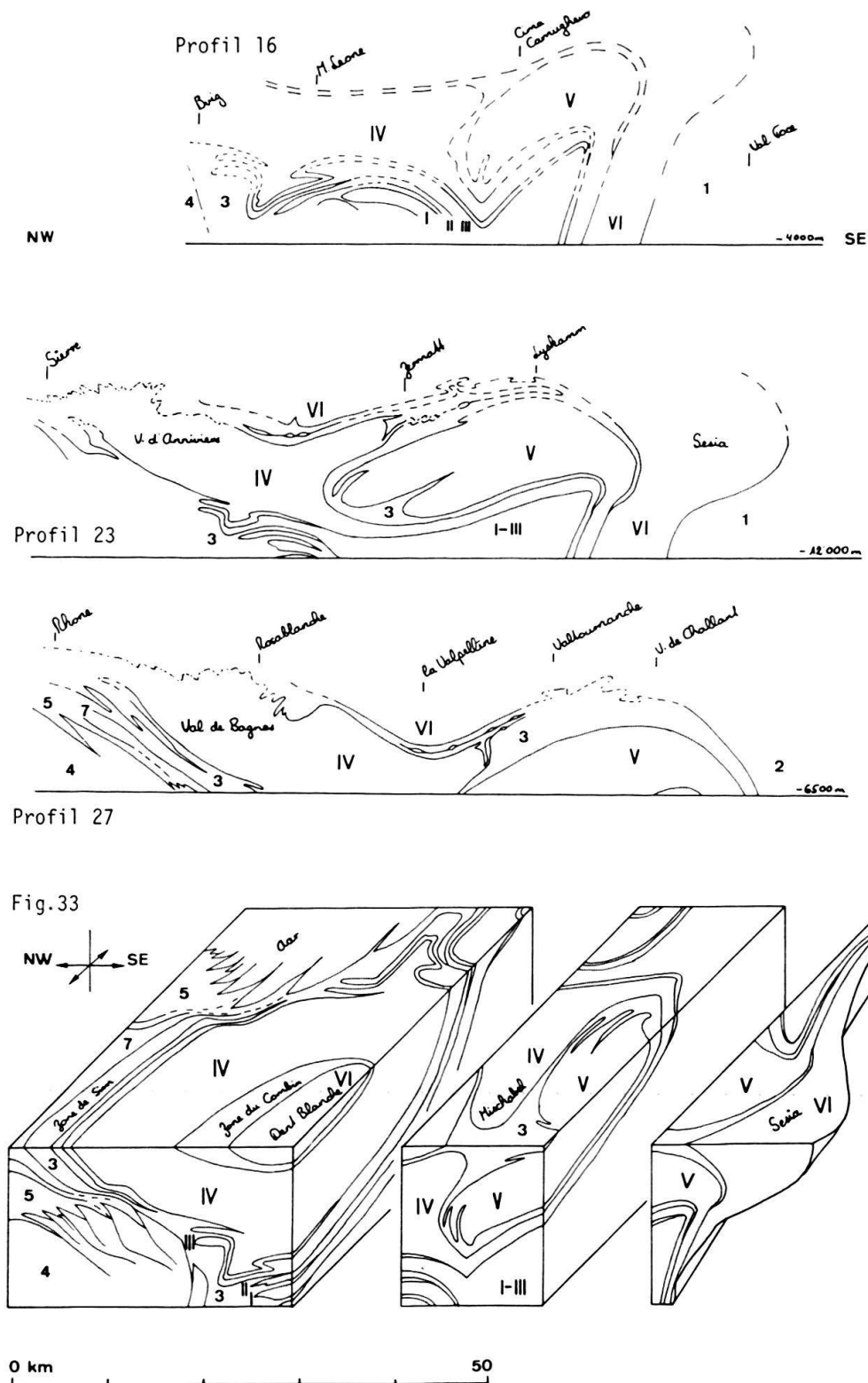
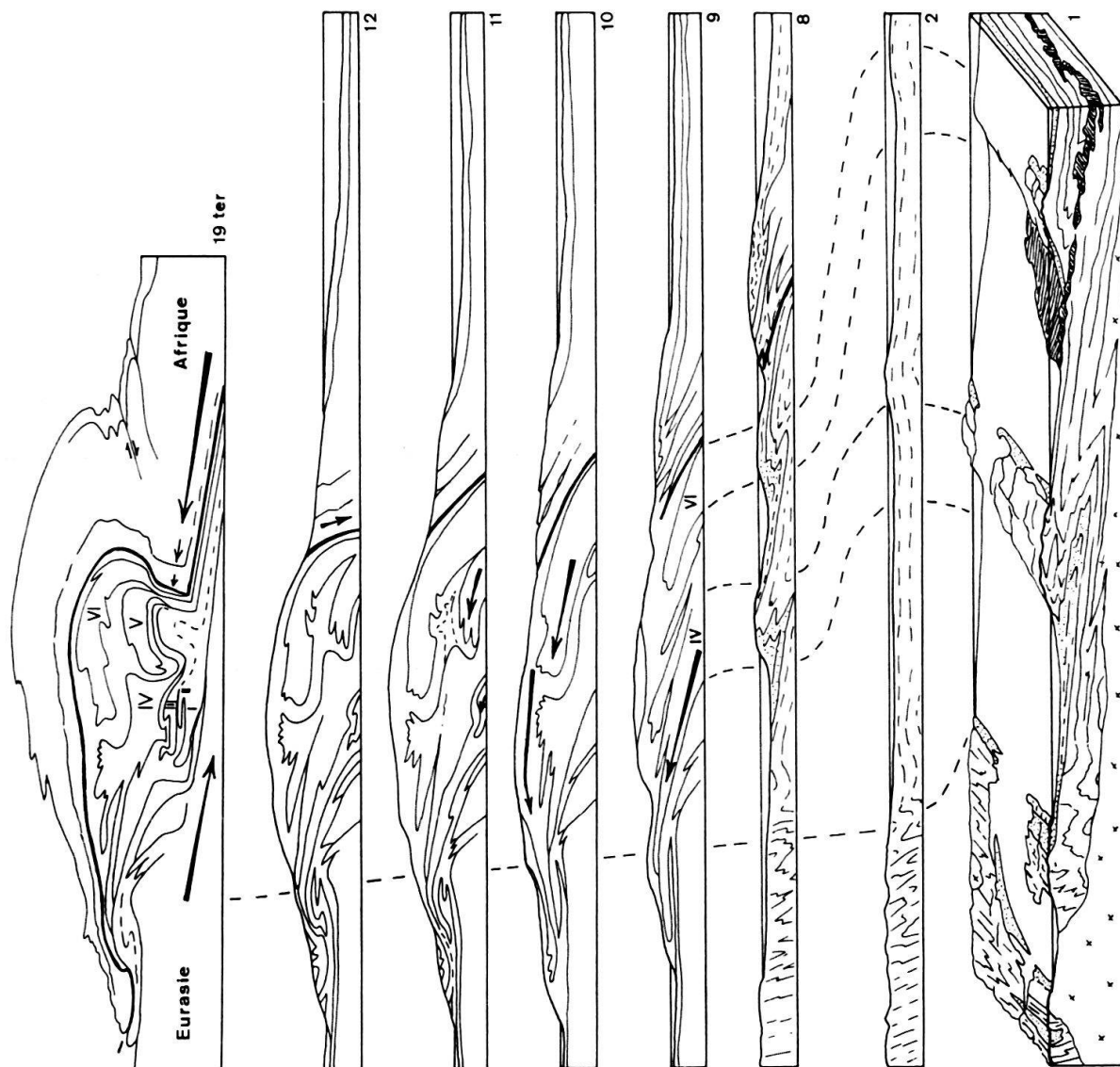


Fig.16. Profile von E.ARGAND, vereinfacht (1911, aus der Tafel 4). Legende gegenüber Fig.14.

Fig. 17. "La formation des Alpes Occidentales. Essai de reconstitution embryotectonique" - vereinfachte Darstellung aus ARGAND 1916, planche 3, und aus ARGAND, 1924.



Le paroxysme
orogénique:
Oligocène
moyen

19 ter: Phase insubrienne
12: Phase d'affaissement
adriatique

11: Phase Mont Rose

10: Phase Dent Blanche

9: Phase Saint-Bernard

8: Oligocène inférieur: le déve-
loppement embryonnaire

2: Carbonifère moyen: les ébau-
ches hercyniennes

1: Diagramme d'une chaîne de
type alpin à l'état
embryonnaire.

len, und jeder dieser Vorgänge gehörte zu einem bestimmten Zyklus: präkambrisch, kaledonisch, herzynisch oder alpin.

Vor diesem Hintergrund postuliert A. Wegener seine revolutionäre Theorie der Kontinentaldrift. Er lässt die leichteren Kontinente aus «Sial» auf dem schwereren «Sima» driften, welches auch die Ozeanböden aufbaut. Gondwana zerbricht, und eine Tethys öffnet sich. Neue Begriffe tauchen auf, und alte erhalten z. T. eine neue Bedeutung; es entsteht ein Vokabular, das uns auch heute noch vertraut erscheint.

Auf E. Argand üben diese neuen Theorien sogleich eine grosse Anziehungskraft aus, und er versucht, sie in ein neues globaltektonisches Modell einzubauen. Er stellt fest, dass die alten, kontinentalen Sockel durch zusammengefaltete (metamorphe) Sedimente älterer Zyklen aufgebaut sind. Die Reibung am Sima verursacht interne Deformationen, das gegenseitige Zusammenstossen vor allem eine randliche Stauung dieser Blöcke (Fig. 18).

Die bisher als wichtige Phänomene betrachteten Faltengürtel der jüngeren, dem Sockel aufgelagerten Sedimente werden in seiner Theorie zum recht unbedeutenden



Fig.13



Fig.14



Fig.19



Fig.19bis

Fig.18. E.ARGAND 1924: "Coupes transversales de la zone d'affrontement Eurasie — Gondwanie" (Fig.13,14); "Les Alpes et l'Afrique avant et après les grandes distensions" (Fig.19, 19bis).

Abklatsch der grossen, den Baustil bestimmenden «plis de fond» (Deformationen der Kruste) zurechtgestutzt:

«... la couverture sédimentaire du socle tend à épouser les plissements de celui-ci ... et peut avoir ensuite ses mouvements propres qui produisent les plis de couverture (Deckfalten). Des sédiments bathaux fournissent les chaînes neuves» (JACOB 1925, S. 103);

aus den Geosynklinalräumen entstehen im langsamen Prozess der Embryogenese die neuen Gebirgsketten.

So löst E. Argand schliesslich den Dualismus von Epirogenese und Orogenese auf: Jede grossräumige Veränderung der Erdkruste geschieht allein durch horizontale (tangentielle) Bewegungen, und:

«Les mouvements d'apparence verticale ne sont qu'une des manifestations des plissements ... les mouvements épirogéniques ne sont que des plis à très grand rayon ...» (JACOB 1925, S. 99).

Die neuere geologische Erforschung des West-Penninikums

Um 1925 steht das globaltektonische Modell, auch wenn es in den folgenden Jahrzehnten oft bekämpft und beiseite geschoben wird, mehr oder weniger so vor uns, wie wir es noch heute kennen. Zugleich geht die wohl eindrucklichste Epoche alpingeologischer Forschung ihrem Ende entgegen, und mindestens die zwei berühmtesten Synthesen, welche in diesen Jahren erscheinen, müssen noch erwähnt werden. Es sind dies die «Geologie der Schweiz» von ALB. HEIM (1919–1922) und «Der Bau der Alpen» von R. STAUB (1924).

Speziell zur penninischen Zone gibt E. ARGAND (1934), im neuen «Geologischen Führer der Schweiz», eine Übersicht. Illustriert durch die Karte und die Profile von 1911 (Spezialkarte Nr. 64), kann «La zone pennique» als schematische Zusammenfassung seiner damaligen Ansichten angesehen werden. Einige wichtige Punkte, welche nicht schon aus dem zuvor Gesagten hervorgingen, sollen kurz gestreift werden:

«Vues d'ensemble – D'une part l'immense effort d'élucidation stratigraphique et pétrographique fourni de bonne heure, dans les Alpes franco-italiennes, a eu une grande portée pour l'intelligence de la zone pennique en général (Bertrand, Franchi, Kilian, Haug, Novarese, Stella, Termier) ... d'autre part la tectonique des profondeurs de l'Intra-alpin franco-italien n'a pu être élucidée sans un recours étendu au Valais et plus généralement aux Alpes Pennines, région où est réalisée la visibilité optimum des nappes» (ARGAND 1934, S. 172).

Die penninischen Decken werden nun eingeteilt in höhere penninische Decken (Dent Blanche, Monte Rosa, Bernhard) und in tiefere, welche auch als Simplon-Tessiner Decken bezeichnet werden (Monte Leone, Lebendun, Antigorio, Lucomagno-Verampio usw.). Die Parallelisierung dieser westpenninischen Decken mit den ostpenninischen Graubündens (Simano, Adula, Tambo, Suretta, Margna), über die Tessiner Kulmination hinweg, wird zwar immer wieder versucht (R. STAUB 1936, 1938); als auf die Spitze getriebener Zylindrismus bleibt sie jedoch bis heute geometrische Spekulation.

Wichtig für das Verständnis vieler nachfolgender Arbeiten ist die von Argand eingeführte Stratigraphie der penninischen Serien, welche hier in Figur 19 wiedergegeben wird. Erstaunlicherweise gilt ihm nicht die Obergrenze des Paläozoikums oder die herzynische Diskordanz als wichtigste Bezugsfläche, sondern die Obergren-

ze der (quarzitischen) Trias. Der Grund für diese Eigentümlichkeit sowie für die Tatsache, dass Argand vielenorts von scheinbar konkordanten Abfolgen getäuscht wird und diese als autochthone Auflagerungen interpretiert, dürfte darin zu suchen sein, dass die relativen Alter sehr vieler penninischer Formationen zu dieser Zeit noch unbestimmt sind.

Mit den heutigen Kenntnissen der Metamorphose dieser Serien darf nicht mehr von einem «type compréhensif» gesprochen werden; die Paragneise reichen nämlich nur bis zur herzynischen Diskordanz (Karbon), die Schistes lustrés setzen erst im Lias, z.T. sogar erst als Kreideflysche ein, und dazwischen sind heute fast alle Stufen dokumentiert.

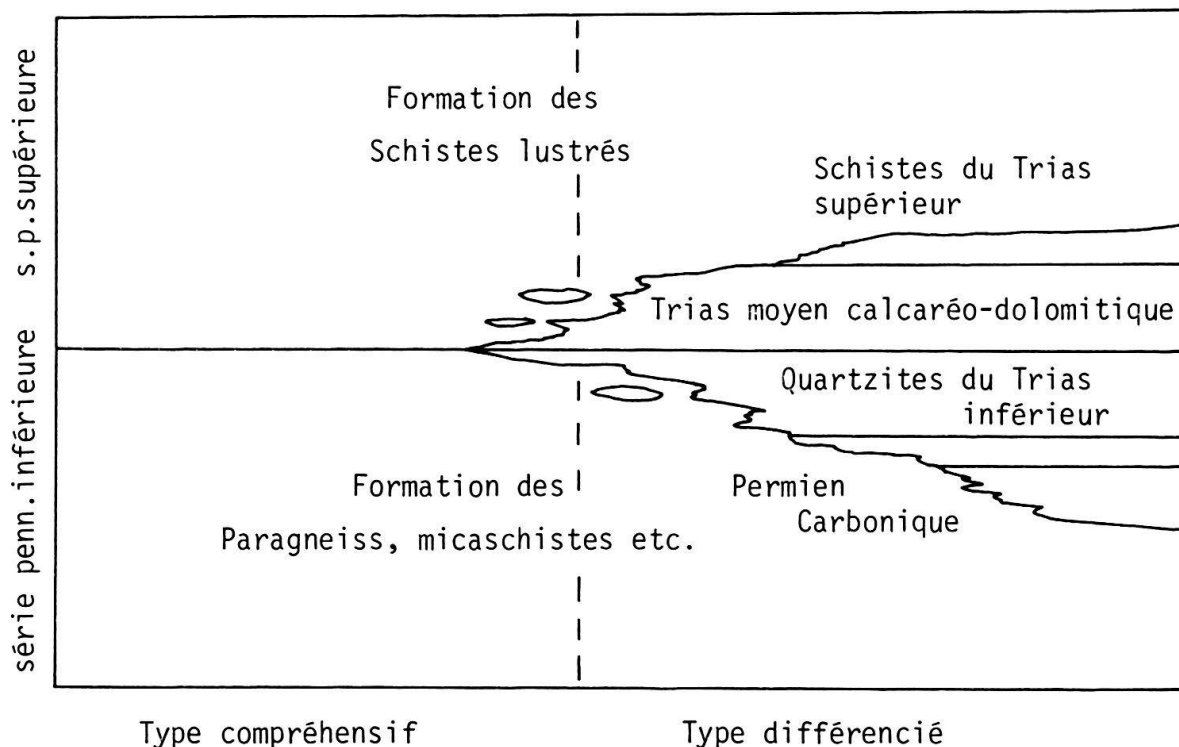


Fig.19. E.ARGAND 1934: Les séries penniques

s.p.supérieure (m.Eozän - u.Oligozän): Nummulitique, abgesichert z.B. im Embrunais und Niesen-Flysch, ursprünglich auf der Briançonnais-Schwelle abgelagert.

Tektonisch: äussere Hülle der Antiklinalkerne.

s.p.moyenne (m.Trias - Kreide): im Wallis nur bis zum Lias gesichert.

Type compréhensif: bathyal, v.a.Kalkschiefer, charakterisiert die Geosynklinalräume. Mit beträchtlichen Massen basischer Eruptiva als konkordanten Einlagerungen.

Type différencié: v.a. auf Geantiklinalen und Schwellen.

Tektonisch: innere (zweite) Hülle der Antiklinalen

s.p.inférieure (Altpaläozoikum - u.Trias): bildet die kristallinen Deckenkerne der penninischen Antiklinalen.

Argand zur alpinen Kinetik: In der mittleren Trias ist das herzynische Gebirge eingeebnet, und die Geosynklinalen des Wallis und des Piemont werden angelegt. Diese Dehnungstektonik als Vorläufer der alpinen Hauptbewegung dauert – mit Unterbrüchen im Lias – bis ins Nummulitique (Alttertiär); im Oberen Jura werden in tiefen Senken Radiolarite abgelagert, und die Gliederung in Geosynklinalen und Geantiklinalen erreicht ihren Höhepunkt gegen Ende dieser Vorbewegungen, als im Oligozän die Kompression gegenüber der Dehnung überhandnimmt.

Auf dem Höhepunkt der alpinen Bewegungen spielen sich in relativ kurzer Zeit die vier Hauptphasen (St. Bernhard–Dent Blanche–Monte Rosa–erste insubrische Phase) ab, und noch vor dem Rupélien (mittleres Oligozän) ist das Geschehen abgeschlossen. Nur unbedeutende Bewegungen folgen nach: Die Faltung der Molasse im jüngeren Miozän und seit Beginn des Quartärs die allmähliche Hebung der Alpen. Auch die hohe seismische Aktivität entlang der Rhone–Rhein-Linie wird schon vermerkt.

Emile Argand stirbt 1940. Ausgehend von den Penninischen Alpen, ist es ihm gelungen, den Ablauf orogenetischer Prozesse allgemein zu beschreiben und das tektonische Bild der penninischen Zone zum Teil bis in Einzelheiten nachzuzeichnen und zu deuten. Das ist aussergewöhnlich, denn selten genug gelingt es auch heute noch, in dieser komplexen Kernzone der Alpen eigene Modelle oder wenigstens Arbeitsmethoden zu entwickeln. Weit häufiger gilt, dass in den weniger metamorphen, externeren Gebieten – vor allem in den West- und den Präalpen – neue Ideen geboren und schliesslich auf die penninische Zone übertragen werden. Nur E. Argand ging den umgekehrten Weg und entwickelte seine Hypothesen konsequent weiter bis hin zu seiner globalen «Tectonique de l'Asie».

Allein, die Frage nach den Ursachen, nach dem Motor dieser gebirgsbildenden Vorgänge vermochte er nicht mehr zu lösen. Hier wird, dreissig Jahre später, mit den «New Global Tectonics» ein wichtiger Durchbruch erzielt werden, doch bis dahin ist noch ein weiter Weg, und vielleicht sind die Jahre der Stagnation mit ihren Detailarbeiten im Sinne von Bestandesaufnahmen (z. B. WEGMANN 1923, GÜLLER 1948) notwendige Voraussetzung und Grundlage für die Möglichkeit neuer Deutungen.

In der Fortsetzung der geologisch-tektonischen Bearbeitung erfährt Argands Modell zahlreiche Verbesserungen und Änderungen. HAUG (1925) weist die penninische Herkunft der Klippendecke nach; HERMANN individualisiert die «nappe des schistes lustrés», indem er die von Argand als autochthone Bedeckung der kristallinen Deckenkerne verstandenen Bündnerschiefer von ihrer Unterlage trennt (z. B. 1937, 1938); AMSTUTZ (1951) kreierte, zwar am falschen Ort, den heute gebräuchlichen Begriff der Subduktion; ELLENBERGER (1952) bestätigt Serien der Briançonnais-Fazies auf dem östlichen Teil der Bernhard-Decke; TRÜMPY (1955) umschreibt den von HAUG definierten Walliser Trog; die Arbeiten von ELLENBERGER (1958) und ELTER (1972) über das Briançonnais und die Schistes lustrés der Westalpen geben wichtige Hinweise zum Verständnis dieser Serien auch in den Walliser Alpen; und BEARTH beschreibt in zahlreichen petrographischen Publikationen verschiedene Elemente der Penninischen Alpen (1952 Monte Rosa; 1953, 1967 und 1973 die Ophiolithe von Zermatt–Saas; 1963 und 1964 die Bernhard-Decke; 1976 und 1981 die Bündnerschiefer).

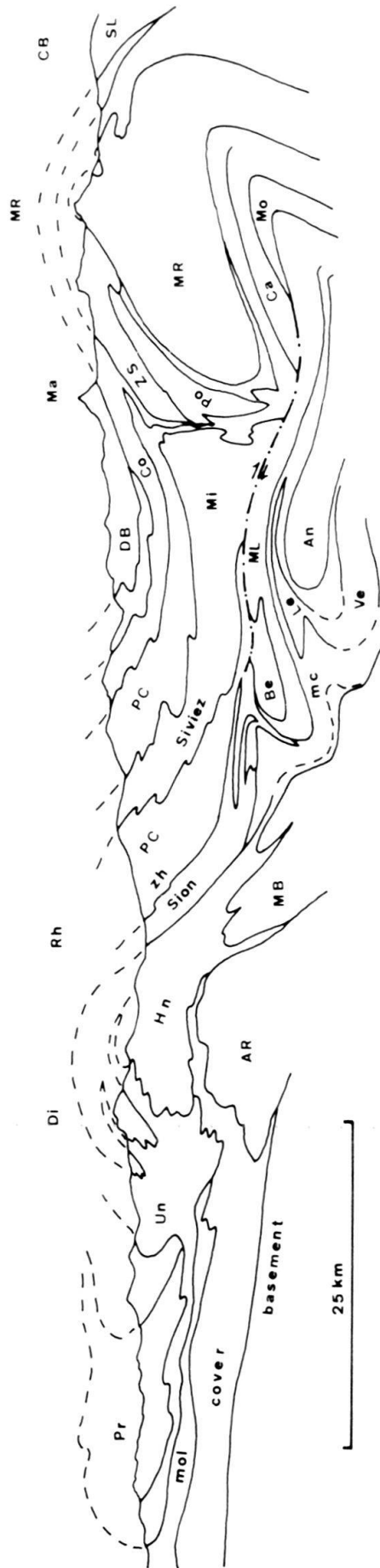


Fig.20. Profil durch die Präalpen, die helvetischen und die penninischen Decken, vereinfacht nach HOMEWOOD et al. 1980.

Di Diablerets	Rh Rhône	Ma Matterhorn	MR Monte Rosa	CB Corno Bianco
Tektonische Einheiten:				
Pr Prealpine nappes	MB Mont Blanc	An Antigorio	ZS Zermatt Saas - zone	
Uh Ultrahelvetic nappes	z.h.zone houillière	ML Monte Leone	Po Portjengrat	
Hn Helvetic nappes	PC Permocarbon	Be Berisal	MR Monte Rosa	
mol Molasse	mc mesozoic cover	Mi Mischabel	SL Sesia - Lanzo	
AR Aiguilles Rouges	Ve Verampio	Co Combin-zone	Ca Camughera	
	Le Lebedun	DB Dent Blanche	Mo Moncucco	

Im internen Teil der Kette arbeitet DAL PIAZ (1965); im Grenzgebiet der penninischen und lepontinischen Decken sind AMSTUTZ (1954), BEARTH (1956a und b, 1957) und MILNES (1974a und b) tätig, und in neuester Zeit wird durch M. Burri, A. Escher und ihre Mitarbeiter in Lausanne die Bernhard-Decke mit den unter- und überlagernden Sedimenten im Walliser Abschnitt des Westalpenbogens neu gegliedert (MARTHALER & ESCHER 1980).

Parallel zur stratigraphisch-tektonischen nimmt auch die petrographische Forschung ihren Fortgang. Es liegt jedoch nicht in meiner Absicht, auch jene Entwicklungen im einzelnen zu verfolgen und zu kommentieren. Statt dessen nehme ich einen Aspekt heraus: jenen Zweig der modernen Petrographie, welcher schliesslich direkt zu den plattentektonischen Modellen führen wird, das Studium der Ophiolithe. Als Grüngesteine in den Synklinalen des penninischen Deckenbaus ordnet sie zwar schon Argand den Geosynklinalräumen zu, doch ist es STEINMANN (1906, 1926), der in ihnen nicht bloss Sedimente, sondern Teile der ozeanischen Kruste erkennt. In den Penninischen Alpen werden sie von BEARTH (1953, 1967, 1973) und von DAL PIAZ (1965, 1971) ausführlich beschrieben; PETERS (1969) weist darauf hin, dass die echte ozeanische Kruste allein von der Ophiolith-Sequenz aufgebaut wird, welche nicht bloss eine Auflagerung auf eine sialische Kruste darstellt. Die grundsätzlich andere Natur der ozeanischen gegenüber der kontinentalen Kruste ist somit erkannt. Von da ist der Schritt nicht mehr weit bis zum Modell der Ophiolithe als selbständige Deckenelemente im Bauplan der Alpen (DAL PIAZ 1974; DIETRICH et al. 1974).

Gegen Ende der sechziger Jahre bringen Geophysik, Ozeanographie und Petrographie ihre weltweiten Ergebnisse auf einen gemeinsamen Nenner: Die Theorie der Plattentektonik findet eine erste Darstellung in der Arbeit von ISACKS et al. (1968). Nun können die Hochdruck-Paragenesen in penninischen Eklogiten (in den Ophiolithen von Zermatt-Saas sowie in den Einheiten von Sesia-Lanzo und der Dent Blanche) interpretiert werden. 1972 veröffentlichen DAL PIAZ et al. ein erstes Subduktionsmodell für die Sesia-Lanzo-Zone (Fig. 21).

Als eine der jüngsten Disziplinen liefert die Methode der radiometrischen Altersbestimmung seit etwa 20 Jahren Datenmaterial für zahlreiche neueste Arbeiten, z. B. BOCQUET-DESMONS (1974), HUNZIKER (1970, 1974) und JÄGER et al. (1967).

Seit 1925 hat eine stetig wachsende Zahl von Geologen mit immer ausgeklügelteren Methoden Einzelprobleme aufgegriffen und versucht, diese Ergebnisse zu neuen Gesamtdarstellungen zusammenzufügen (u. a. TRÜMPY 1960; AYRTON & RAMSAY 1974; FREY et al. 1974; für eine neueste Übersicht siehe TRÜMPY 1980). Und doch sind alle diese Versuche immer wieder, wenngleich modifizierte, so doch Reprisen jenes Modells, das schon 1925 feststand. Wie sehr mag damals der Zufall mitgespielt haben, dass ein solcher Geist zur richtigen Zeit am richtigen Ort sich einfand? Und von dem ALBERT HEIM 1920, in seinem Vorwort zur «Geologie der Schweiz», schreibt: «Argand hat, unterstützt von einem für mich unbegreiflichen Gedächtnis, Wissen und Finden, solche faltenmechanische Probleme aufgerollt und wie in Adlerflug hoch über uns hinweg der Lösung nahegebracht!»

Fünf Jahrzehnte intensiver Forschung haben uns der Lösung noch ein wenig näher gebracht; das heutige Modell der Plattentektonik vermag zahlreiche Fragen

in relativ befriedigender Weise zu erklären, und wir vermeinen, den Geheimnissen der Erde, dem, was sich in ihrem Innern abspielt, auf der Spur zu sein. Doch selbst wenn dereinst alle Fragen nach dem Wie geklärt sein sollten; jene nach dem Warum wird offenbleiben, weil sie mit unseren beschränkten Methoden nicht zugänglich ist.

Anhang: Erläuterung der *kursiv* gedruckten Begriffe

Anthrazit- oder Kohlenbildung. – Ablagerungen der Karbonzeit; auch tektonisch für die *Zone houillère* verwendet, welche in den Westalpen früher z.T. «zone axiale» genannt wurde.

Arkesin. – Ein schon lange nicht mehr gebräuchlicher Name für chloritführenden Hornblende-Granit aus dem Mont-Blanc-Massiv.

Casannaschiefer (altkristalline Paraserien) und *Graue Schiefer* (Glanzschiefer; Schistes lustrés; Bündnerschiefer) präzisiert GERLACH (1881, Fussnote auf S. 86):

«Mit diesem Namen (Casannaschiefer), der von dem Casannapass im Engadin hergenommen ist, bezeichnete Theobald einen Complex von kristallinischen und

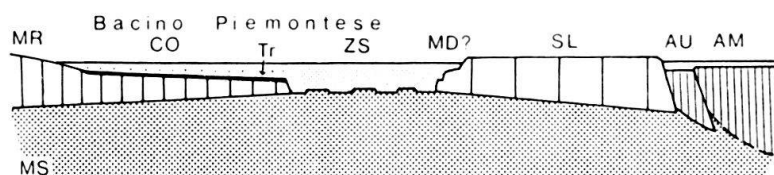
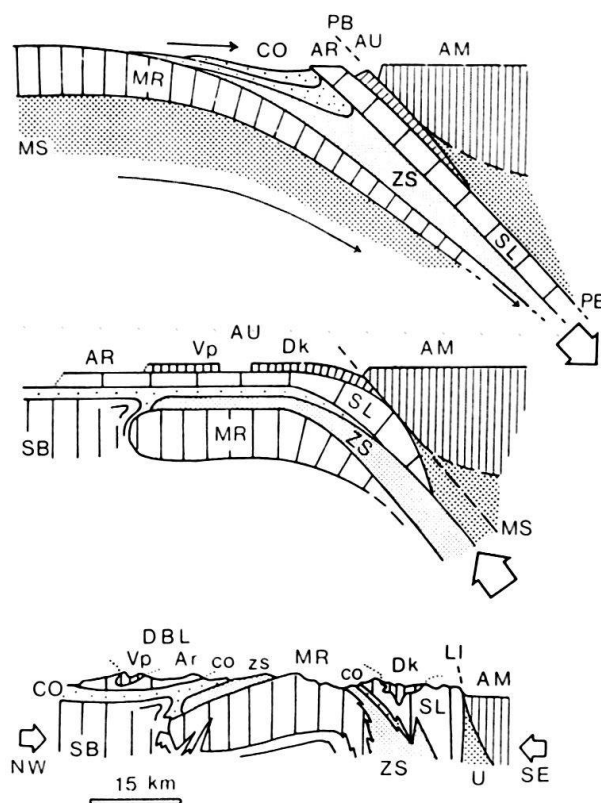


Fig. 21. Subduktionsmodell der Sesia-Lanzo-Zone und der Ophiolithe von Zermatt-Saas (vereinfacht nach DAL PIAZ et al. 1972).



- SB San Bernardo
- MR Monte Rosa
- Co Combin-Zone
- Tr piemontesische Trias
- ZS Ophiolithe Zermatt-Saas
- MD Mont Dolin
- SL Sesia-Lanzo
- AU Oberostalpin
- AM Südalpin
- Vp Valpelline Ar Arolla
- DBL Dent Blanche
- MS Oberer Mantel
- PB Benioff-Zone
- LI Insubrische Linie
- U Schuppen d.ob.Mantels

halbkristallinen, schieferartigen Gesteinen, welcher zwischen dem bunten Sandstein und dem deutlich entwickelten Gneissgebirge, durch Lagerung sowohl als petrographische Beschaffenheit, eine Mittelstellung einnimmt. Die Felsarten schwanken dort zwischen Thonschiefer, Talkschiefer, Glimmerschiefer und gneissartigen Gebilden (Theobald, Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz, Liefg. 3). Von H. Studer wurden diese Schiefer «ältere graue Schiefer», zum Theil auch «grüne Schiefer», genannt, welche letztere Bezeichnung wir indessen für die jüngeren, mit dem *Grauen Schiefer* (*schistes lustrés*, *Glanzschiefer*) in Wechsellagerung stehenden, talkigen und chloritischen Schiefer beibehalten werden. In der Abhandlung über die penninischen Alpen haben wir dieselben als «Metamorphische Schiefer», und zwar diejenigen, welche dem Casannaschiefer gleichgestellt werden können, als «ältere metamorphische Schiefer» aufgeführt.»

P. Bearth schreibt dazu, der Name «Casannaschiefer» sei ein Sammelbegriff, welcher im Wallis für das gesamte prätriadische Kristallin der Bernhard-Decke verwendet wurde; also sowohl für die vorwiegend alpinmetamorphen, oberpaläozoischen Sedimente und vulkanischen Serien als auch für das polymetamorphe Kristallin unbestimmten Alters. Der Begriff hat keine stratigraphische Bedeutung und bezeichnet keine bestimmte Mineral- oder Gesteinsfazies; er muss durch genauere Bezeichnungen ersetzt werden (Int. Stratigraphisches Lexikon, Band 7c).

Centralmassen der Mittelzone. – Andere Bezeichnungen: «zentrales Gneissgebirge»; «kristalline Zentralalpen»; «Zentralzone».

Lepontische Alpen. – Gruppe der kristallinen Alpen mit den Tessiner Alpen, der Simplon- und Gotthardgruppe und Teilen der Bündner Alpen. Auch «lepontinische Alpen» genannt. Geologischer Begriff: *Lepontin* («Lepontikum», «Lepontinikum», «lepontische Decken», «tiefpenninische Decken» usw.).

Penninische Alpen. – Dies ist die geographische Bezeichnung jener Gebirgsregion, welche vom Rhonetal, der Passroute über den Grossen St. Bernhard, dem Aosta- und Tocetal und der Simplonpaßstrasse umgrenzt wird. Unter «Penninische Alpen» werden also die Walliser Hochalpen südlich der Rhone und ihre Ausläufer bis zur Dora Baltea verstanden.

Geologisch: Dieses Gebiet enthält zwar auch ostalpine Elemente sowie Teile des Helvetikums und des Mont-Blanc-Massivs. Den weitaus grössten Raum nehmen jedoch riesige Gneisdecken ein, welche in dieser Art den ganzen internen Teil des Alpenbogens, vom Mittelmeer bis Graubünden, bestimmen. Nach ihrer typischen Ausbildung in den Penninischen Alpen werden diese «penninische Decken» genannt und der entsprechende Teil des Alpenbogens *penninische Zone* oder kurz *Penninikum*.

Verdankungen

Für zahlreiche Hinweise, Korrekturen und Ergänzungen zu diesem Manuskript danke ich herzlich B. Aemissegger, P. Bearth, V. Dietrich, H. Masson, A. G. Milnes und R. Trümpy.

LITERATURVERZEICHNIS

- AMSTUTZ, A. (1951): *Sur l'évolution des structures alpines*. – Arch. Sci. (Genève) 4, 323.
 — (1954): *Pennides dans l'Ossola et problème des racines*. – Arch. Sci. (Genève) 7, 412–462.
- ARGAND, E. (1906): *Sur la tectonique du massif de la Dent Blanche*. – C.R. Acad. Sci. (Paris), 26 février.
 — (1906): *Contribution à l'histoire du géosynclinal piémontais*. – C.R. Acad. Sci. (Paris), 26 mars.
 — (1908): *Carte géologique du massif de la Dent Blanche 1:50000*. – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 23, Spez.-Karte Nr. 52.
 — (1909): *L'exploration géologique des Alpes Pennines centrales*. – Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 166, 217–276.
 — (1911a): *Sur les plissements en retour et la structure en éventail dans les Alpes franco-italiennes*. – Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 47, 32–36.
 — (1911b): *Les nappes de recouvrement des Alpes pennines et leurs prolongements structuraux*. – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 31, 1–26, und Spez.-Karte Nr. 64, Tf. I–IV. Diese Spezialkarte mit den drei zugehörigen Profiltafeln wurde ursprünglich als Liefg. 27 [N.F.] katalogisiert und wird z. T. auch heute noch fälschlicherweise so zitiert; ziemlich sicher wurde jene Position für Argand offengehalten und vorerst mit der Spezialkarte Nr. 64 belegt, diese aber später dem zugehörigen Textband (31. Liefg.) beigegeben. Die somit wieder freigewordene Position 27 wurde erst 1931, und ohne Bezug zu dieser Thematik, durch einen anderen Autor wieder belegt.
 — (1916): *Sur l'arc des Alpes occidentales*. – Eclogae geol. Helv. 14/1, 145–191.
 — (1923): *La géologie des environs de Zermatt*. – Actes Soc. helv. Sci. nat. 104/2, 96–110.
 — (1924): *La tectonique de l'Asie*. – Congr. géol. int., C.R. 13^e sess. 1, 171–372.
 — (1934): *La zone pennique*. In: *Guide géol. de la Suisse* (Fasc. 3, S. 149–189). – Wepf & Cie., Basel.
- AYRTON, S. N., & RAMSAY, J. G. (1974): *Tectonic and metamorphic events in the Alps*. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 54, 609–639.
- BAILEY, E. B. (1935): *Tectonic Essays, mainly alpine*. – Oxford University Press.
- BEARTH, P. (1952): *Geologie und Petrographie des Monte Rosa*. – Beitr. geol. Karte Schweiz 96, 1–94.
 — (1953): *Erläuterungen zu Blatt Zermatt, Geologischer Atlas der Schweiz, Nr. 29*. – Schweiz. Geol. Komm., Basel.
 — (1956a): *Zur Geologie der Wurzelzone östlich des Ossolatales*. – Eclogae geol. Helv. 49, 267–278.
 — (1956b): *Geologische Beobachtungen im Grenzgebiet der lepontinischen und penninischen Alpen*. – Eclogae geol. Helv. 49, 279–290.
 — (1957): *Die Umbiegung von Vanzone (Valle Anzasca)*. – Eclogae geol. Helv. 50, 161–170.
 — (1963): *Contribution à la subdivision tectonique et stratigraphique du cristallin de la nappe du Grand-St. Bernard dans le Valais (Suisse)*. In: *Livre Paul Fallot 2* (S. 407–418). – Soc. géol. France.
 — (1964): *Erläuterungen zu Blatt Randa, Geologischer Atlas der Schweiz, Nr. 43*. – Schweiz. geol. Komm., Basel.
 — (1967): *Die Ophiolithe der Zone von Zermatt–Saas Fee*. – Beitr. geol. Karte Schweiz 132, 1–130.
 — (1973): *Gesteins- und Mineralparagenesen aus den Ophiolithen von Zermatt*. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 53, 299–334.
 — (1976): *Zur Gliederung der Bündnerschiefer in der Region von Zermatt*. – Eclogae geol. Helv. 69, 149–161.
 — (1980): *Erläuterungen zu Blatt St. Niklaus, Geologischer Atlas der Schweiz, Nr. 71*. – Schweiz. geol. Komm., Basel.
- BEARTH, P., & SCHWANDER, H. (1981): *The post-Triassic sediments of the ophiolite zone Zermatt–Saas Fee and the associated manganese mineralizations*. – Eclogae geol. Helv. 74, 189–205.
- BEARTH, P., & LOMBARD, A. (1964): *Notice explicative de la feuille 6, Sion. Carte géol. générale Suisse, 1:200000*. – Comm. géol. Suisse.
- BOCQUET-DESMONS, J. (1974): *Etudes minéralogiques et pétrographiques sur le métamorphisme d'âge alpin dans les Alpes françaises*. – Thèse Univ. Grenoble.
- DAL PIAZ, G. V. (1965): *La formazione mesozoica dei calcescisti con pietre verdi fra la Valsesia e la Valtournanche ed i suoi rapporti strutturali con il ricoprimento Monte Rosa e con la zona Sesia–Lanzo*. – Boll. Soc. geol. ital. 84, 67–104.
 — (1971): *Alcune osservazioni sulla genesi delle ofioliti piemontesi e dei giacimenti ad esse associati*. – Boll. Soc. min. subalp.

- (1974): *Le métamorphisme de haute pression et basse température dans l'évolution structurale du bassin ophiolitique Alpino-Apenninique (Ire partie: Considérations paléogéographiques)*. – Boll. Soc. geol. ital. 93.
- DAL PIAZ, G.V., HUNZIKER, J.C., & MARTINOTTI, G. (1972): *La zona Sesia-Lanzo e l'evoluzione tettonico-metamorfica delle alpi nordoccidentali interne*. – Mem. Soc. geol. ital. 11, 433–460.
- DE SAUSSURE, H.B. (1789): *Voyages dans les Alpes*. – Neuchâtel.
- DIETRICH, V., VUAGNAT, M., & BERTRAND, J. (1974): *Alpine metamorphism of mafic rocks*. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 54, 291–332.
- ELLENBERGER, F. (1952): *Sur l'extension des faciès briançonnais en Suisse, dans les Préalpes médianes et les Pennides*. – Eclogae geol. Helv. 45, 285–286.
- (1958): *Etude géologique du pays de Vanoise*. – Mém. Carte géol. France.
- ELTER, G.I. (1972): *Contribution à la connaissance du Briançonnais interne et de la bordure piémontaise dans les Alpes Graies nord-orientales et considérations sur les rapports entre les zones du Briançonnais et des Schistes lustrés*. – Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova 28.
- ERNST, G. (1973): *Interpretative synthesis of metamorphism in the Alps*. – Bull. geol. Soc. Amer. 84, 2053–2078.
- FREY, M., HUNZIKER, J.C., FRANK, W., BOCQUET, J., DAL PIAZ, G.V., JÄGER, E., & NIGGLI, E. (1974): *Alpine metamorphism of the Alps. A review*. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 54, 247–290.
- GERLACH, H. (1869): *Die penninischen Alpen*. – Nachdruck in: Beitr. geol. Karte Schweiz 27, 1883.
- (1871): *Das südwestliche Wallis*. – Beitr. geol. Karte Schweiz 9.
- GOSSO, G., DAL PIAZ, G.V., PIOVANO, V., & POLINO, R. (1979): *High-pressure emplacement of early-alpine nappes, post-nappe deformations and structural levels (internal Northwestern Alps)*. – Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova 32, 5–15.
- GÜLLER, A. (1947): *Zur Geologie der südlichen Mischabel- und Monte Rosa-Gruppe*. – Eclogae geol. Helv. 40, 39–161.
- HAUG, E. (1900): *Les géosynclinaux et les aires continentales*. – Bull. Soc. géol. France (3), 28, 617–710.
- (1925): *Contribution à une synthèse stratigraphique des Alpes occidentales*. – Bull. Soc. géol. France (4), 25, 97–244.
- HEIM, ALB. (1919–1922): *Geologie der Schweiz*. – Tauchnitz, Leipzig.
- HERMANN, F. (1937): *Carta geologica delle Alpi nordoccidentali 1:200000*.
- (1938): *Note illustrative per la carta delle Alpi nordoccidentali*. – Milano.
- HOMEWOOD, P., GOSSO, G., ESCHER, A., & MILNES, A.G. (1980): *Cretaceous and Tertiary evolution along the Besançon-Biella traverse (Western Alps)*. – Eclogae geol. Helv. 73, 635–649.
- HUNZIKER, J.C. (1970): *Polymetamorphism in the Monte Rosa, Western Alps*. – Eclogae geol. Helv. 63, 151–161.
- (1974): *Rb-Sr and K-Ar age determinations and the Alpine tectonic history of the Western Alps*. – Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova 31.
- ISACKS, B., OLIVIER, J., & SYKES, L.R. (1968): *Seismology and the new global tectonics*. – J. geophys. Res. 73, 5855–5899.
- JACOB, CH. (1925): *Les théories tectoniques nouvelles. E. Argand-A. Wegener*. – Ann. Géogr., 34e année, 188, 97–112.
- JÄGER, E., NIGGLI, E., & WENK, E. (1967): *Rb-Sr-Altersbestimmungen an Glimmern der Zentralalpen*. – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 134.
- KELTS, K. (1981): *A comparison of some aspects of sedimentation and translational tectonics from the Gulf of California and the Mesozoic Tethys, Northern Penninic Margin*. – Eclogae geol. Helv. 74, 317–338.
- LUGEON, M. (1901): *Les grandes nappes de recouvrement des Alpes du Chablais et de la Suisse*. – Bull. Soc. géol. France (4)/1, 723–825.
- (1903): *Les grandes dislocations et la naissance des Alpes Suisses*. – Eclogae geol. Helv. 7/4, 335–346.
- (1940): *Emile Argand, 1879–1940*. – Actes Soc. helv. Sci. nat. 1940, 379–403.
- LUGEON, M., & ARGAND, E. (1905a): *Sur les grandes nappes de recouvrement de la zone du Piémont*. – C.R. Acad. Sci. (Paris), 15 mai.
- (1905b): *Sur les homologues dans les nappes de recouvrement de la zone du Piémont*. – C.R. Acad. Sci. (Paris), 29 mai.
- MARTHALER, M., & ESCHER, A. (1980): *Pennique: couverture de la nappe du Grand St-Bernard dans le val d'Anniviers*. In: *Compte rendu de l'excursion de la Société Géologique, Suisse (S.343–349)*. – Eclogae geol. Helv. 73.

- MASSON, H. (1976): *Un siècle de géologie des Préalpes: de la découverte des nappes à la recherche de leur dynamique*. – *Eclogae geol. Helv.* 69, 527–575.
- MILNES, A. G. (1974a): *Post-nappe folding in the western leontine Alps*. – *Eclogae geol. Helv.* 67, 333–348.
- (1974b): *Structure of the Pennine Zone (Central Alps): a new working hypothesis*. – *Bull. geol. Soc. Amer.* 85, 1727–1732.
- PETERS, T. J. (1969): *Rocks of the Alpine ophiolitic suite: Discussion on the paper «The origin of ultramafic and ultrabasic rocks» by P. J. Willie*. – *Tectonophysics* 7/5–6, 507–509.
- RENEVIER, E., & GOLLIEZ, H. (1894): *Voyage géologique au travers des Alpes Centrales et Occidentales de la Suisse de Zurich à Lugano*. In: *Livret-guide géologique dans le Jura et les Alpes de la Suisse*. – 6e Congr. géol. int., Zürich.
- SCHARDT, H. (1893): *Sur l'origine des Préalpes romandes*. – *Arch. Sci. phys. nat. (Genève)* 30/12.
- (1894): *Excursion géologique au travers des Alpes Occidentales Suisses*. In: *Livret-guide géologique dans le Jura et les Alpes de la Suisse*. – 6e Congr. géol. int., Zürich.
- (1906): *Die modernen Anschauungen über den Bau und die Entstehung des Alpengebirges*. – *Verh. schweiz. natf. Ges.*
- (1908): *Coup d'œil sur la géologie et la tectonique des Alpes du Canton du Valais*. – *Bull. Murithienne, Soc. valais. Sci. nat.* 35, 246–354.
- SCHMIDT, C. (1894): *Geologische Excursion durch die Zentralen Schweizeralpen von Rothkreuz bis Lugano*. In: *Livret-guide géologique dans le Jura et les Alpes de la Suisse*. – 6e Congr. géol. int., Zürich.
- (1907): *Bild und Bau der Schweizeralpen*. – *Beil. Jb. SAC* 42 (1906/07); Birkhäuser, Basel.
- (1907): *Über die Geologie des Simplongebietes und die Tektonik der Schweizeralpen*. – *Eclogae geol. Helv.* 9/4, 484–584.
- SCHMIDT, C., & PREISWERK, H. (1908): *Erläuterungen zur geologischen Karte der Simplongruppe*. – *Geol. Karte Schweiz, Erläut. Nr. 6*.
- SENGÖR, A. M. C. (1982): *A note on a late revision of the theory of embryotectonics by Argand himself*. – *Eclogae geol. Helv.* 75, 177–188.
- STAUB, R. (1924): *Der Bau der Alpen*. – *Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.]* 52.
- (1936): *Des raccords tectoniques entre les nappes valaisannes et grisonnes*. – *C.R. somm. Séance Soc. géol. France* 1–2, 58–60.
- (1938): *Einige Ergebnisse vergleichender Studien zwischen Wallis und Bünden*. – *Eclogae geol. Helv.* 41, 343–353.
- STEINMANN, G. (1906): *Geologische Beobachtungen in den Alpen (II). Die Schardt'sche Überfaltungstheorie und die geologische Bedeutung der Tiefseeabsätze und der ophiolithischen Massengesteine*. – *Ber. natf. Ges. Freiburg i. Br.* 16, 1–49.
- (1926): *Die ophiolithischen Zonen in den mediterranen Kettengebirgen*. – *C.R. 14e Congr. int. Géol.* 2, 637–668 (Madrid).
- STUDER, B. (1847): *Lehrbuch der physikalischen Geographie und Geologie. Erstes Capitel: Die Erde im Verhältniss zur Schwere*. – J. F. J. Dalp, Bern, Chur und Leipzig.
- (1851): *Geologie der Schweiz* (Bd. 1). – Stämpflische Verlagshandlung, Bern.
- TROMMSDORFF, V., & EVANS, B. W. (1974): *Alpine metamorphism of peridotitic rocks*. – *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 54, 334–352.
- TRÜMPY, R. (1955): *Wechselbeziehungen zwischen Paläogeographie und Deckenbau*. – *Vjschr. natf. Ges. Zürich* 100, 217–231.
- (1960): *Paleotectonic evolution of the central and western Alps*. – *Bull. geol. Soc. Amer.* 71, 843–908.
- (1976): *Du Pèlerin aux Pyrénées*. – *Eclogae geol. Helv.* 69, 249–265.
- (1980): *Geology of Switzerland. Part A: an outline*. – Wepf & Co., Basel.
- WEGENER, A. (1915): *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. – Vieweg, Braunschweig.
- WEGMANN, E. (1923): *Zur Geologie der St. Bernhard-Decke im Val d'Hérens (Wallis)*. – *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 47, 3–63.

