

Mitt. österr. geol. Ges.	69 1976	S. 267—290 8 Abb., 1 Tab.	Wien, September 1978
--------------------------	------------	------------------------------	----------------------



Schwermineraluntersuchungen in den klastischen Serien der variszischen Geosynklinale der Ost- und Zentralpyrenäen *)

Von Karl STATTEGGER **)

Mit 8 Abbildungen und 1 Tabelle

Zusammenfassung

Schwermineraluntersuchungen an Sandsteinen und Konglomeraten aus klastischen Formationen des Variszikums der Ost- und Zentralpyrenäen ermöglichten mit dem Einsatz multivariabler Methoden der mathematischen Statistik (Q-Modus Cluster- und Faktorenanalyse, R-Modus Cluster-Analyse, Diskriminanzanalyse) die Erstellung eines lithostratigraphischen Modells dieser Formation und eine Rekonstruktion der Liefergebiete (Abb. 2, 7, 8).

Die Proben aus den Basisserien des Kambro-Ordovizium bilden eine inhomogene Gruppe, in der meist Zirkone und Turmalin überwiegen.

Dem Oberdevon werden neben den Viella-Schichten die bisher altersfraglichen Formationen von Sia, Vilaller und Klastika aus der Llavorsi-Synklinale zugeordnet. Daraus ergibt sich eine weiträumige Verbreitung von klastischem Oberdevon im Untersuchungsgebiet, vom Gave d'Osseau im Westen bis Andorra la Vieja im Osten. In diesem Bereich werden folgende Schwermineralprovinzen unterschieden: Eine Hornblende-Zoisit-Klinozoisit-Epidot-Provinz im Westen (= Formation von Sia), eine Zirkon-Provinz im Zentral- und Ostteil (= Viella-Schichten, Kern der Llavorsi-Synklinale) und eine Turmalin-Provinz im Südteil (= Formation von Vilaller). Die stabilen Minerale Zirkon und Turmalin stammen wahrscheinlich aus dem kambro-ordovizischen Basement. Die biostratigraphische Einstufung von Teilen der bisher als Oberdevon geltenden „Mananet Griotte“-Formation in das Unterdevon kommt auch in dem von den übrigen Oberdevon-Vorkommen abweichenden Schwermineralspektrum zum Ausdruck.

Das Schwermineralspektrum des variszischen Karbon mit den Leitmineralen Apatit und Zirkon ist einheitlich zusammengesetzt und erlaubt eine signifikante

*) Publikation im Rahmen des Projekts 2640/2132 des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in Österreich.

IGCP-Projekt: Prevariscic and variscic events of the alpine mediterranean mountain belts.

**) Adresse des Verfassers: Dr. Karl STATTEGGER, Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 Graz.

Trennung von den älteren Formationen. Ab Unterkarbon kommt es im Einzugsgebiet zur Freilegung und Abtragung magmatisch-metamorpher Basisserien, wofür nach Vergleichsproben der hohe Apatitgehalt spricht, der im Oberdevon fehlt. Dies weist auf eine Frühphase der variszischen Tektonik hin. Daneben dienen auch ältere Klastika mit den stabilen Schwermineralien Zirkon, Turmalin und Rutil als Sedimentlieferanten.

Abstract

Heavy mineral analyses in sandstones and conglomerates of some clastic formations in the Variscic geosyncline of the Eastern and Central Pyrenees make it possible to establish a lithostratigraphical model for these formations using multivariate statistics (Q-mode cluster- and factor analysis, R-mode cluster analysis, discriminant functions) and to decipher provenance (fig. 2, 7, 8).

The sandstones and graywackes of Cambro-Ordovician age represent an inhomogenous group of mature sediments, in which zircon and tourmaline prevail.

The formations of Sia, Vilaller and clastics of the core of the Llavorsi syncline have probably the same Upper Devonian age as the "Viella-beds". Therefore the clastic Upper Devonian covers a large area from Gave d'Osseau in the West to Andorra in the East. One can distinguish the following three heavy mineral provinces in this area: A hornblende-zoisite-clinozoisite-epidote-province in the West (= Formation of Sia), a zircon-province in the Central and Eastern part (= Viella beds, Llavorsi syncline) and a tourmaline province in the South (= Formation of Vilaller). The stable minerals zircon and tourmaline probably derive from the Cambro-Ordovician basement. Parts of the "Mananet-Griotte" Formation, which before were considered to be Upper Devonian and now are biostratigraphically dated as Lower Devonian, differ strongly from the Upper Devonian clastics by heavy minerals in clastic intercalations.

The heavy mineral association of the Variscic Carboniferous shows a homogenous spectrum with apatite and zircon as the most important constituents, which permits a significant differentiation from the older formations. This indicates Early Variscic tectonic movements with an uplift of the "hinterland" and erosion of magmatic-metamorphic basement rocks, which deliver the high apatite content, from the Lower Carboniferous onward. Other source areas are older clastics with the stable minerals zircon, tourmaline and rutile.

Inhalt

1. Problemstellung	269
2. Kurzbeschreibung der klastischen Formationen	269
a) Allgemeines	269
b) Klastische Formationen	271
3. Probennahme	272
4. Ermittlung der Schwermineraldaten	273
5. Statistische Auswertung	273

6. Ergebnisse	274
a) Allgemeines	274
b) Cluster-Analyse	275
c) Faktorenanalyse	276
d) Mittelwerte der Variablen und Cluster-Diagramme	279
e) Diskriminanzanalysen	281
7. Lithostratigraphische Interpretation	281
8. Die Schwermineralspektren der untersuchten klastischen Formationen . .	289
9. Literatur	289

1. Problemstellung

Die Literatur über das Paläozoikum der Ost- und Zentralpyrenäen (ARCHE 1972, BOERSMA 1973, CLIN et al. 1970, GROOS-UFFENORDE et al. 1972, KLEINSMIEDE 1960, KRYLATOV & STOPPEL 1971, MEY 1967, MIROUSE 1966, WATERLOT 1969 mit der in diesen Arbeiten angeführten Literatur) zeigt die zeitlich unsichere Stellung einiger klastischer Formationen dieses Gebietes innerhalb des variszischen Stockwerkes.

In diesen klastischen Gesteinen sind stratigraphische Korrelationen schwierig herzustellen, da es sich um lithologisch monotone, teilweise leicht metamorphe Sandstein/Grauwacken-Schiefer-Wechselfolgen mit Einschaltungen von unregelmäßig verteilten karbonatischen bzw. konglomeratischen Partien handelt. Biostratigraphische Alterseinstufungen liegen kaum vor.

Aufgrund dieser Gegebenheiten wurde versucht, mit Schwermineralen aus Sandsteinen bzw. Grauwacken geeignete Parameter für eine Unterscheidung bzw. Zusammenfassung verschiedener variszischer klastischer Formationen zu gewinnen. Dabei gingen die Untersuchungen von conodontenstratigraphisch datierten Fixpunkten aus, um durch den Vergleich der Schwermineralspektren Schichtfolgen, in denen stratigraphisch verwendbare Fossilien fehlen, in einen lithostratigraphischen Rahmen einordnen zu können. Eine weitere Zielsetzung bestand in der Rekonstruktion der Liefergebiete, wobei sämtliche noch vorhandenen Liefergebiete zu Vergleichszwecken in die Untersuchung einbezogen wurden.

2. Kurzbeschreibung der klastischen Formationen

a) Allgemeines

Die paläozoischen Sedimente der Ost- und Zentralpyrenäen liegen größtenteils in der variszisch geprägten Axialzone, dem zentralen Teil des Gebirgsmassivs. Vom Oberordovicium bis zum Mitteldevon überwiegen Plattformsedimente mit Tonschiefern und Kalken. Ab dem Grenzbereich Mitteldevon/Oberdevon geht diese Entwicklung in das Geosynklijalstadium über, in dem Tiefwasserkalke mit Lyditen und flyschartige klastische Schichtfolgen dominieren. Die Sedimentation endet vor den orogenen Bewegungen der leonesisch-asturischen Phase. Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf die folgenden angeführten klastischen Formationen des Karbon und Devon (vgl. Abb. 1 und 2).

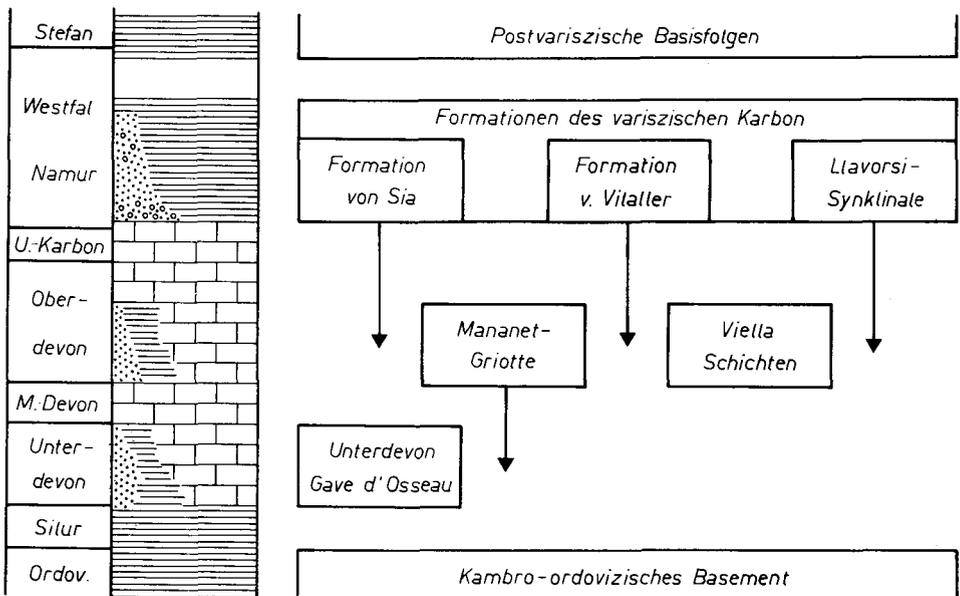


Abb. 1: Bisherige und neue zeitliche Einstufung sandsteinführender klastischer Formationen aus der variszischen Geosynklinale der Ost- und Zentralpyrenäen. Die Pfeile zeigen die lithostratigraphische Neueinstufung aufgrund von Schwermineralanalysen an.

Variszisches klastisches Karbon im allgemeinen: Die im gesamten Untersuchungsgebiet verbreiteten variszischen Karbon-Klastika bestehen nach BUCHROITHNER & MILAN (1977), HARTEVELT (1970) und WATERLOT (1969) aus Wechselfolgen von Peliten und Sandsteinen mit variablen Mächtigkeiten zwischen 200 und 1000 Metern, wobei die Pelite meist stark überwiegen. Besonders in den Basisanteilen finden sich nicht horizontbeständig Einschaltungen von Konglomeraten und Gerölltonen, im Hangenden treten vereinzelt geringmächtige bituminöse Kalkbänke auf. Die Sandführung nimmt gegen das Hangende ab. Die petrographische Zusammensetzung der Sandsteine reicht von den vorherrschenden, teilweise quarzreichen Grauwacken bis zu Lithareniten und karbonatischen Sandsteinen. An Fossilien liegen Pflanzen, die in einigen Fällen eine stratigraphische Einstufung in das Westfal ermöglichen, Lebensspuren und in den tieferen Anteilen Goniatiten namurischen Alters vor. Die stratigraphische Reichweite läßt sich nur indirekt aus den unter- bzw. überlagernden Schichtfolgen erschließen. Die in die Klastika überleitende Karbonatsedimentation endet im Grenzbereich Visé/Namur, die ältesten diskordant auflagernden postvariszischen Basisfolgen sind mit Pflanzen als hohes Westfal D bis Stefan A datiert.

In bezug auf den Ablagerungsraum gibt es verschiedene Deutungen: Gradierte Bereiche bzw. mehr oder weniger vollständig ausgebildete Bouma-Sequenzen werden als Flaschfazies, Konglomerat-Fächer und Pflanzenreste als Hinweis auf eine paralische Molassefazies interpretiert.

b) Klastische Formationen

Formation von Sia: Unter dem Namen „Serie von Sia“, benannt nach einem Dorf in den westlichen Zentralpyrenäen (s. Abb. 2), beschreibt MIROUSE (1966) eine über 400 Meter mächtige Schichtfolge. Sie besteht hauptsächlich aus Quarziten und Lithareniten, zwischen die sich besonders im oberen Teil Pelite, Kalksandsteine und dünne Kalkbänke einschalten. Die Serie soll diskordant über Kalken des Oberdevon und Unterkarbon liegen und ein Alter von Namur bis Westfal besitzen.

Aus Kalken im Hangenteil der Formation von Sia bestimmten KRYLATOV & STOPPEL eine Conodontenfauna des Oberdevon I. Die Oberdevon- und Unterkarbonkalken, die MIROUSE (1966) als Unterlage anführt, liegen danach über den Klastika. Conodontenuntersuchungen von BUCHROITHNER (1978) bestätigen und erweitern diese Ergebnisse.

Viella-Schichten: Im Gebiet von Viella in den Zentralpyrenäen (s. Abb. 2) unterscheidet KLEINSMIEDE (1960) in einer bis zu 500 Meter mächtigen klastischen Schichtfolge, die als „Viella-Schichten“ bezeichnet wird, vom Liegenden zum Hangenden: eine nur lokal auftretende Litoralfazies mit dünnbankigen, rasch auskeilenden Sandstein- und Schieferlagen, Quarzite, ungradierte Sandsteine, gradierte Sandsteine und Schiefer. Neben der Litoralfazies stellen auch die Quarzite, die meist über Kalken des tieferen Devon (?) folgen, sofern die dazwischenliegende Litoralfazies fehlt, einen flachen Ablagerungsraum dar, gradierte Sandstein-Schiefer-Bereiche werden als Turbidit-Assoziation gedeutet. Über den Viella-Schichten liegen mit unklarem Kontakt Klastika des Karbon.

Da bisher Fossilien fehlten, erfolgte die zeitliche Einstufung in das Oberdevon anhand lithostratigraphischer Vergleiche. Neue biostratigraphische Anhaltspunkte liefert BUCHROITHNER (1978).

Formation von Vilaller und Mananet-Formation: Die „Serie von Vilaller“ in den südlichen Zentralpyrenäen (s. Abb. 2) wurde von MEY (1967) und WATERLOT (1969) lithostratigraphisch in das Karbon gestellt. Die klastische Schichtfolge besteht überwiegend aus Peliten, in die sich vereinzelt meist karbonatreiche linsenförmige Sandsteinkomplexe von maximal 10 Meter Mächtigkeit einschalten. Die Gesamtmächtigkeit wird mit einigen hundert Metern angegeben, genauere Angaben liegen nicht vor. Unter den nur selten vorkommenden Fossilien sind unbestimmbare Einzelkorallen- und Brachiopodenreste in den Karbonatsandsteinen zu erwähnen. Überlagert wird die Formation von Vilaller diskordant von spätkarbonatischen postvariszischen Basisserien.

Die konkordante Unterlage bildet die Mananet-Formation, die sich aus Flaser- und Knollenkalken mit tonig-sandigen Partien zusammensetzt und eine Mächtigkeit bis zu 250 Metern erreicht. Aus Fossilienmangel wurde diese Formation von MEY (1968) lithostratigraphisch dem Oberdevon zugeordnet. Conodontenstratigraphische Ergebnisse von BUCHROITHNER & STATTEGGER (1976) weisen auf ein unterdevonisches Alter hin.

Llavorsi-Synklinale: Eine der Formation von Vilaller ähnliche Schichtfolge baut den Kern der Llavorsi-Synklinale in den östlichen Zentralpyrenäen auf (s. Abb. 2) und wird lithostratigraphisch von ZANDVLIET (1960), WATERLOT (1969) und HARTEVELT (1970) als Karbon eingestuft. Der Übergang von Knollenkalken und Kalkschiefern, die der Mananet-Formation ähneln und deshalb dem Oberdevon zugeordnet wurden, erfolgt kontinuierlich durch allmähliche Abnahme des Karbonatgehaltes. Die größte meßbare Mächtigkeit beträgt etwa 700 Meter. In den Peliten kommen mitunter leicht karbonatische, geringmächtige Sandsteinlagen vor, vereinzelt schalten sich Kalkbänke ein, aus denen Crinoidenstielglieder, Gastropoden und Tentakuliten bekannt sind. Diese Fossilien liegen nur in unbestimmbaren Fragmenten vor, doch spricht das Auftreten von Tentakuliten gegen ein Karbon-Alter.

BUCHROITHNER & STATTEGGER (1976) und BUCHROITHNER (1978) konnten in Kalkschiefern nordöstlich von Llavorsi, die die Klastika unterlagern, Conodonten des mittleren Ems finden. Ein devonisches Alter der Klastika ist daher wahrscheinlich.

Die Bearbeitung einiger Proben aus dem Kambro-Ordovizium und den post-variszischen Basisserien erfolgte zur Abrundung des stratigraphischen Rahmens. An dieser Stelle sei daher nur auf die detaillierten Beschreibungen von CAVET (1957), HARTEVELT (1970) und NAGTEGAAL (1969) verwiesen.

3. Probennahme

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich vom Rio Aragon im Westen bis in den Raum Prades im Osten (vgl. Abb. 1). Aus diesem Gebiet wurden 313 Sandsteinproben bearbeitet, von denen 248 Proben eine genügend große Anzahl von durchsichtigen Schwerminerkörnern für eine statistische Auswertung lieferten.

Profilmäßige Untersuchungen, die sich vorerst auf das variszische Karbon beschränkten, ergaben wegen der geringen Unterschiede im Schwermineralspektrum keine Gliederungsmöglichkeit. Das Erfassen großer Bereiche im Raum-Zeit-Gefüge durch Beprobung klastischer Schichtfolgen vom Kambro-Ordovizium bis Perm in breiter lateraler Streuung ließ positive Ergebnisse erwarten.

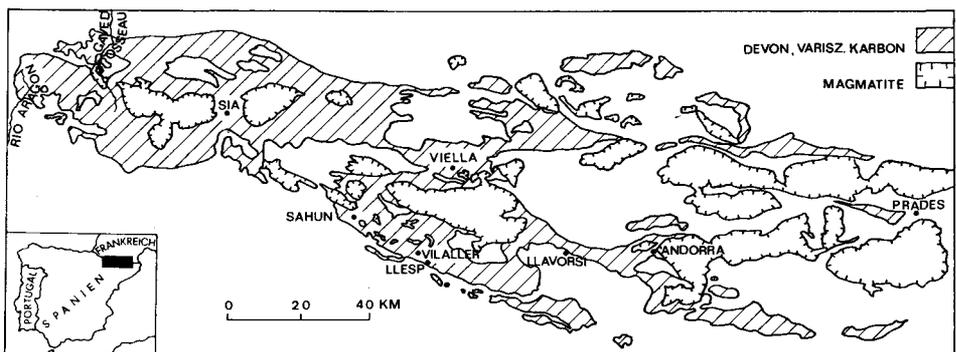


Abb. 2: Geologische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes (nach ZWART 1972).

4. Ermittlung der Schwermineraldaten für die statistische Auswertung

Zu den grundlegenden Überlegungen einer quantitativen Analyse gehört die Bestimmung der Anzahl von Individuen, die für die repräsentative Beschreibung einer Probe erforderlich ist. Bei Schwermineraluntersuchungen bestehen unterschiedliche Auffassungen über die Menge der auszuzählenden Mineralkörner (BLANKENBURG & JAGUSCH 1964, PETTIJOHN et al. 1973 cum lit.). Die Genauigkeit kann wesentlich durch eine große Probenzahl erhöht werden, indem man Proben mit ähnlichen Schwermineralspektren in Gruppen zusammenfaßt. Daher kann eine Gesteinsserie durch eine größere Probenzahl mit geringerer Kornzahl pro Probe besser typisiert werden als durch eine geringe Probenzahl mit einer sehr großen Kornzahl. Aufgrund dieser Überlegungen wurden 200–250 durchsichtige Mineralkörner pro Probe ausgezählt, was sich für eine Typisierung als ausreichend erwies.

Schwierigkeiten bereitet die Ermittlung der Variablen für die statistische Auswertung aus den Schwermineraldaten. Minerale, die in größeren Prozentsätzen in verschiedenen Proben vorkommen, können subjektiv eine Ähnlichkeit zwischen diesen Proben vortäuschen. Daher sind vor allem jene Merkmale zu berücksichtigen, welche Unterschiede zwischen Proben und Probengruppen ausdrücken, wobei man versuchen soll, von einem häufig vorkommenden Mineral mehrere Varianten zu unterscheiden. Auch Minerale, die nur einen kleinen Teil des Spektrums ausmachen, dürfen nicht vernachlässigt werden. Die nach diesen Kriterien ausgewählten, quantitativ erfaßbaren veränderlichen Größen, deren Kombinationen die einzelnen Proben beschreiben, werden als Variable bezeichnet.

In der vorliegenden Untersuchung ergaben sich folgende 15 Variablen, die numerisch als Prozentwerte bzw. Längenangaben in Mikron der statistischen Auswertung zugrundeliegen: opake Minerale, Apatit mit Einschlüssen, Apatit ohne Einschlüsse, idiomorpher Zirkon, gerundeter Zirkon, zonarer Zirkon, idiomorpher Turmalin, gerundeter Turmalin, TiO_2 -Minerale (Rutil und Anatas), Granat, Hornblende, Zoisit-Klinozoisit-Epidot, maximale Korngrößen von Zirkon, maximale Korngrößen von Turmalin; außerdem wurde der Karbonatgehalt als weitere Variable berücksichtigt. Für die Prozentwerte der Schwerminerale gilt folgender Schlüssel: opake Minerale + durchsichtige Minerale = 100%; Gesamtheit der durchsichtigen Minerale = 100%.

5. Statistische Auswertung

Bei der Auswertung größerer Datenmengen finden in steigendem Maße Methoden der multivariablen Statistik Anwendung, welche durch die Entwicklung zahlreicher Rechenprogramme für elektronische Datenverarbeitung in dieser Sparte wirkungsvoll eingesetzt werden können. Die Methodik der multivariablen Analyse behandeln im Bereich der Geologie u. a.: AGTERBERG 1974, DAVIS 1973, HARBAUGH & MERRIAM 1968, KOCH & LINK 1970, 1971, KRUMBEIN & GRAYBILL 1965, SOKAL & SNEATH 1963, JÖRESKOG et al. 1976.

Zu den ersten über die Bestimmung der prozentuellen Mineralanteile hinausgehenden statistischen Auswertungen von Schwermineraldaten gehören die Arbeiten

von CARROLL (1957) und HUBERT (1960), die Varianz- und Regressionsanalysen beinhalten. Bei der Abtrennung verschiedener Liefergebiete durch Schwermineralspektren wandten IMBRIE & van ANDEL (1964) und BRIGGS (1965) erstmals faktorenanalytische Modelle an.

Multivariable statistische Verfahren, die den Vorteil bieten, eine große Zahl von Variablen gleichzeitig verwenden zu können, objektivieren quantitative Analyseergebnisse. In Verbindung mit EDV gestatten sie eine rasche Hypothesenprüfung, sodaß für einzelne Probleme verschiedene Lösungswege auf ihre Effektivität überprüfbar sind. Vorteilhaft ist eine Kombination mehrerer Methoden im Q- und R-Modus, weil auf diese Weise verschiedene Beziehungen zwischen den Daten erfaßt und präzisiert werden können (vgl. BROUWER & VEINUS 1974, PARK 1974). Q-Modus-Analysen ermitteln Ähnlichkeits- bzw. Unterscheidungskriterien zwischen Proben, R-Modus-Analysen eignen sich zur Untersuchung der Merkmale, durch welche die Proben charakterisiert sind. Erstere ermöglichen eine Klassifizierung von Proben, letztere erfassen die korrelativen Beziehungen zwischen Variablen. Ausgehend von einer Klassifizierung lassen sich so die wesentlichen Merkmale innerhalb einzelner Gruppen eruieren und interpretieren.

Bei der vorliegenden stratigraphischen und paläogeographischen Problemstellung bieten sich für eine Auswertung der Schwermineraldaten besonders Cluster-, Faktoren- und Diskriminanzanalyse an. Diese Methoden werden in folgender Weise eingesetzt:

1. Q-Modus Cluster- und Faktorenanalyse zur Klassifizierung der Proben mit deren Variablen.
2. Mittelwerte und Standardabweichungen der Variablen verbunden mit R-Modus Clusteranalyse innerhalb der Gruppierungen, die sich aus der Q-Modus Klassifikation ergeben, um die Beziehungen zwischen den Variablen in einer Gruppe zu untersuchen.
3. Diskriminanzanalysen zur Signifikanzprüfung und Präzisierung der Q-Modus Klassifikation unter Angabe der wesentlichen Unterscheidungsmerkmale.

Das Ziel war eine Unterscheidung verschiedener lithostratigraphischer Einheiten sowie eine Zuordnung altersfraglicher Schichtfolgen und die Rekonstruktion der Liefergebiete (vgl. Abb. 1).

Eine Urliste sämtlicher Schwermineraldaten ist in STATTEGGER (1976) enthalten. Die verwendeten Rechenprogramme stammen aus DAVIS (1973), die Berechnungen wurden an der Abteilung für Mathematische Geologie der Freien Universität Berlin über das Großrechenzentrum Berlin ausgeführt. (Vorstand Prof. Dr. W. Skala, dem hiermit für seine Unterstützung herzlichst gedankt sei.)

6. Ergebnisse

a) Allgemeines

Von den insgesamt 248 Proben wurden aus Gründen einer übersichtlichen Darstellung und wegen des großen Speicherplatzbedarfes der Programme für Q-Modus Cluster- und Faktorenanalyse 138 Proben für Gesamtanalysen ausgewählt, die übrigen bei den R-Modus Cluster- und Diskriminanzanalysen miteinbezogen. Jede Probe ist durch 15 Variablen (vgl. Abschnitt 3) repräsentiert. Produkt-Moment-

Korrelationskoeffizient (r_{ij}) und Distanzkoeffizient (d_{ij}) dienen als Ähnlichkeitsmaße.

b) Cluster-Analyse

Die Ergebnisse der Cluster-Analyse zeigt das Dendrogramm in Abb. 3, welches eine zusammenfassende Vereinfachung des sämtliche 138 Proben umfassenden Dendrogramms darstellt. Es lassen sich neun Gruppen unterscheiden, die mit Großbuchstaben bezeichnet sind und folgende lithostratigraphische Einheiten widerspiegeln:

A: Variszisches Karbon, Westteil.

B: Variszisches Karbon, Ostteil, Liegendanteil.

C: Variszisches Karbon, Ostteil, Hangendanteil.

D: Viella-Schichten (Oberdevon nach KLEINSMIEDE 1960, KRYLATOV & STOPPEL 1971). Sandsteine aus dem Kern der Llavorsi-Synklinale (Karbon nach HARTEVELT 1970, WATERLOT 1969). Kambro-ordovicische Klastika.

E: Formation von Vilaller (Karbon nach MEY 1967, WATERLOT 1960).

F: Mananet-Griotte (Oberdevon nach MEY 1967, BOERSMA 1973).

G: Kambro-ordovicische Magmatite-Metamorphite (Gneise, Migmatite).

H: Von G beeinflusste Klastika.

I: Formation von Sia (Oberkarbon nach MIROUSE 1966, Oberdevon nach KRYLATOV & STOPPEL 1971).

Aus dieser Gliederung geht hervor, daß keine Unterscheidung zwischen den oberdevonischen Viella-Schichten und kambro-ordovicischen Klastika wegen der Ähnlichkeit der Schwermineralspektren möglich ist. Die Gruppen aus dem variszischen Karbon zeigen untereinander größere Ähnlichkeiten als zu den übrigen

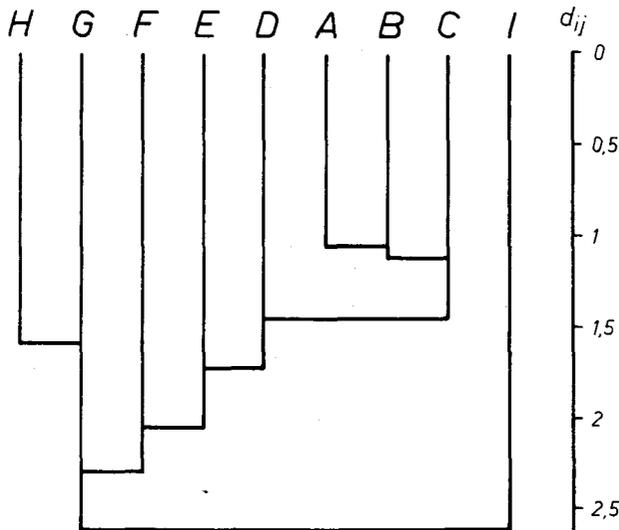


Abb. 3: Vereinfachtes Q-Modus Cluster-Diagramm von 138 Proben mit den sich daraus ergebenden lithostratigraphischen Einheiten A—I (vgl. S. 275). Als Ähnlichkeitsmaß wurde der Distanzkoeffizient (d_{ij}) verwendet.

Gruppen. Proben aus den postvariszischen Basisserien sind nicht berücksichtigt, da sie nach der Cluster-Analyse keine homogene Gruppe bilden.

c) Faktorenanalyse

Für eine Gesamtanalyse im Q-Modus wurde die Datenmatrix der Cluster-Analyse verwendet. Die Extraktion der Eigenvektoren ergibt, daß die ersten vier Eigenwerte mehr als 93% der Gesamtvarianz beschreiben. Daher sind diese vier Faktoren für die weiteren Berechnungen ausreichend. Eigenvektoren, Eigenwerte und Faktorenladungen der einzelnen Proben sind in STATTEGGER (1976) tabellarisch zusammengefaßt.*)

Die Gruppierungen der Proben zwischen jeweils zwei Faktoren zeigen die Achsendiagramme in Abbildung 4.

Die vorliegende Analyse soll die Gruppierungen der Proben im Verhältnis zu ihrer stratigraphischen Stellung überprüfen. Die unterschiedlichen Faktorenladungen der Proben sind in den factor scores auf die Variablen rückführbar (Abb. 5), sodaß sich sekundär Beziehungen zwischen Probengruppen und Variablen herstellen lassen.

Nach der Aufteilung der Proben in Abb. 4 können die vier ausgewerteten Faktoren als stratigraphische Indikatoren interpretiert werden.

Die dem ersten Faktor (I) zugehörigen Proben, die insgesamt dem variszischen Karbon entstammen, sind deutlich von den übrigen Proben getrennt. Dieser Faktor besitzt große positive factor scores der Variablen: opake Minerale, Apatit mit Einschlüssen, maximale Korngrößen von Zirkon und Turmalin, was den Schwermineraldaten entspricht (Abb. 5). Danach wird die Sedimentation durch ein starkes Relief im Hinterland beeinflusst und ein hochenergetisches Milieu im Ablagerungsraum nach kurzen Transportwegen angezeigt, worauf große Korn-durchmesser und opake Minerale mit hoher Dichte hinweisen. Der hohe Apatit-Wert spricht für saure Plutonite im Liefergebiet.

Im zweiten Faktor (II) werden hauptsächlich Proben präkarbonischer Klastika zusammengefaßt. Hohe Faktorenladungen für diesen Faktor haben Proben aus Viella-Schichten, Fm. von Vilaller, Llavorsi-Synklinale, Mananet-Griotte, Unterdevon, Kambro-Ordoviciem, Sandsteingerölle aus variszischen Karbon-Konglomeraten, sowie Proben aus spätkarbonischen Intrusiva und postvariszischen Basisserien. Eine Differenzierung dieser verschiedenen Serien ist mit der Faktorenanalyse nicht möglich, wohl aber eine deutliche Abgrenzung vom variszischen Karbon. Die factor scores liefern nur Durchschnittswerte der genannten Schicht-

*) Geometrisch betrachtet stellt eine Probe einen Vektor dar, dessen Richtung und Größe durch die Beträge der einzelnen Variablen definiert ist. Die Gesamtheit der Proben bildet einen multidimensionalen Raum aus den einzelnen Proben-Vektoren, wobei die Dimensionalität dieses „Proben-Raumes“ der Anzahl der Variablen entspricht. Die Achsen (= Eigenvektoren) dieses Raumes werden aus einer Korrelationsmatrix der Proben berechnet. Die Länge eines Eigenvektors gibt der zugehörige Eigenwert an, welcher zugleich den Anteil eines Eigenvektors an der Gesamtvarianz der Proben ausdrückt. Das Maß der Interpretationsmöglichkeit nach der Gewichtung der einzelnen Proben bezüglich der Faktoren ist die Faktorenladung einer Probe. Die Gewichtung jeder Variablen für jeden Faktor wird als „factor score“ bezeichnet. (Hinweise zur Methodik findet sich bei DAVIS 1973, JORESKOG et al. 1976.)

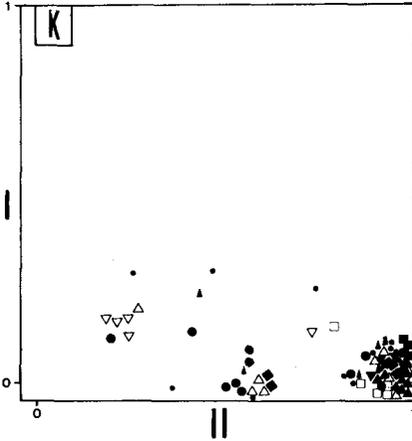


Abb. 4a: Faktoren I und II.

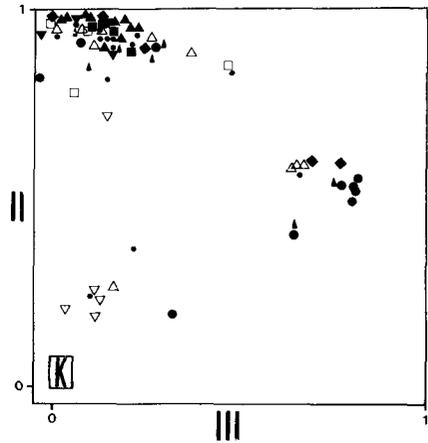


Abb. 4c: Faktoren II und III.

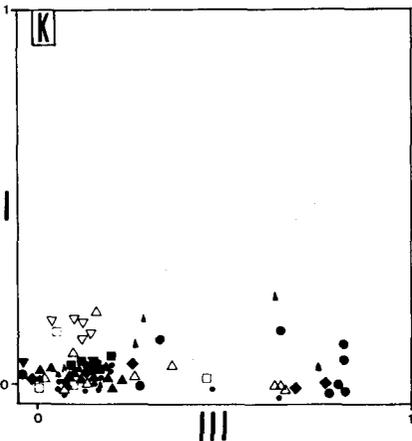


Abb. 4b: Faktoren I und III.

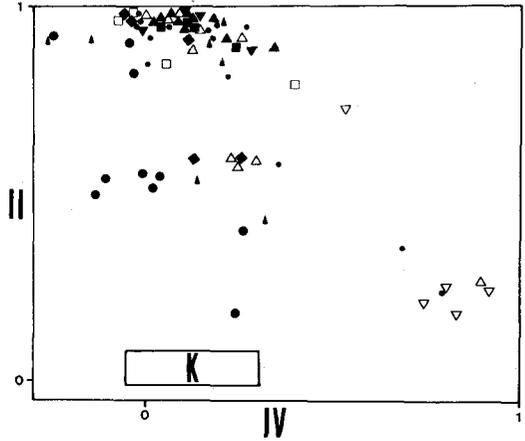


Abb. 4d: Faktoren II und IV.

□:1, △:2, ▲:3, ▽:4, ▼:5, ■:6, □:7, ◆:8, ●:9, ▲:10, ●:11

Abb. 4: Achsendiagramme von Faktorenladungen der Faktoren I—IV für 138 Proben im Q-Modus. 1 = variszisches Karbon, 2 = Viella Schichten, 3 = Formation von Villaller, 4 = Formation von Sia, 5 = Llavorsi-Synklinale, 6 = Mananet-Griotte-Formation, 7 = Unterdevon, 8 = kambro-ordovizische Sandsteine, 9 = kambro-ordovizische Magmatite-Metamorphite, 10 = Stefan/Perm, 11 = Sandsteingerölle aus variszischem Karbon- und Stefan/Perm-Konglomerat.

folgen und lassen deshalb keine weiteren Rückschlüsse auf Leitminerale in den Schwermineralspektren und auf das Sedimentationsgeschehen zu. Allerdings dürfte zumindest teilweise ein gemeinsames Liefergebiet vorhanden gewesen sein bzw. ältere Serien für jüngere das Liefergebiet abgegeben haben, um die Ähnlichkeiten erklären zu können. Hervorzuheben ist die Ähnlichkeit der postvariszischen Basisserien aus dem Stefan und Perm mit den präkarbonischen Klastika, während keine Beziehungen zum variszischen Karbon aufscheinen. Dies wird auch durch Sandsteingerölle aus postvariszischen Basiskonglomeraten bestätigt.

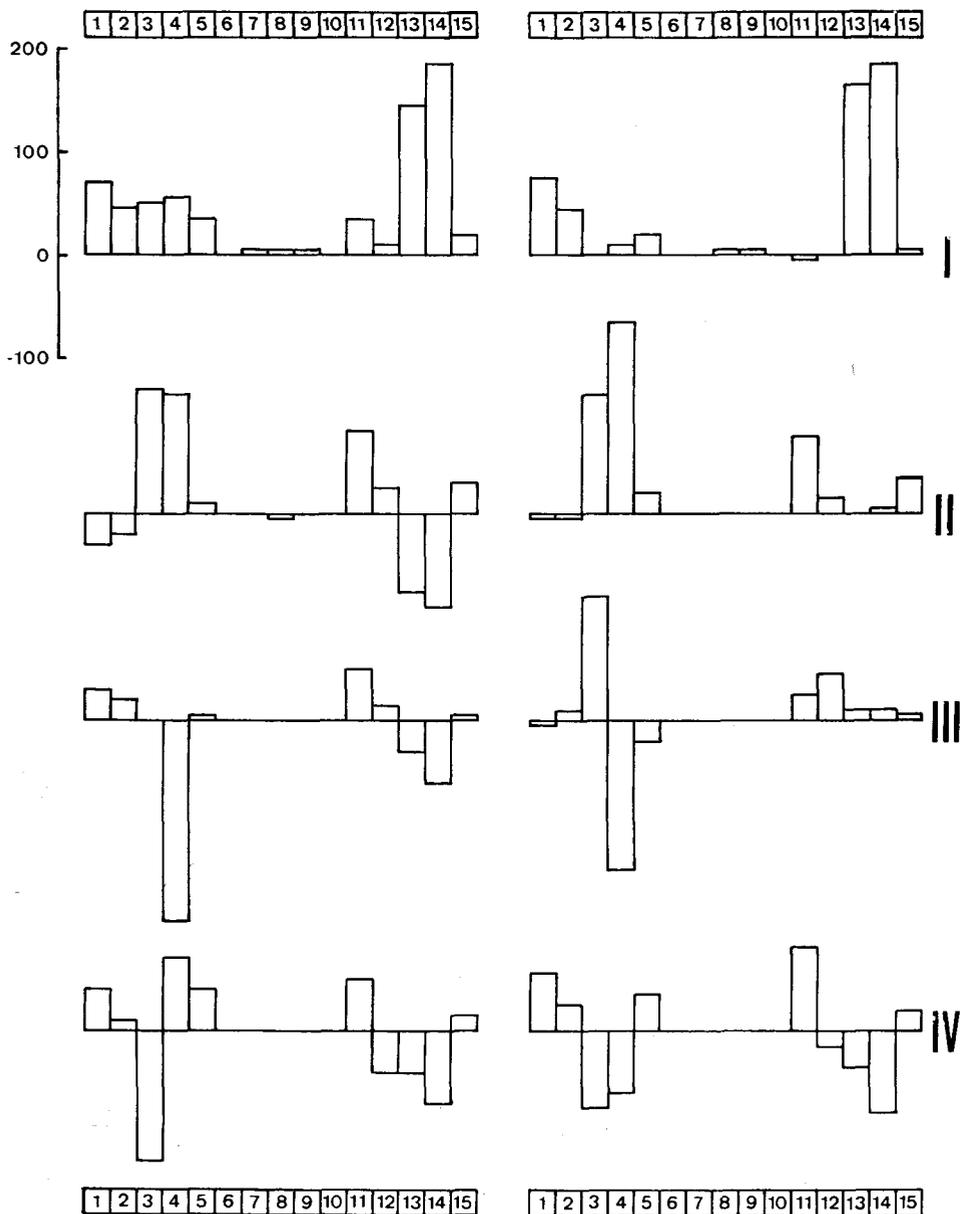


Abb. 5: Factor scores der nicht rotierten und rotierten Faktoren I—IV im Q-Modus. 1 = opak, 2 = Apatit mit Einschlüssen, 3 = Apatit ohne Einschlüsse, 4 = Zirkon idiomorph, 5 = Zirkon gerundet, 6 = Zirkon zonar, 7 = Turmalin idiomorph, 8 = Turmalin gerundet, 9 = TiO₂-Minerale, 10 = Granat, 11 = Hornblende, 12 = Zoisit-Klinozoisit-Epidot, 13 = maximale Korndurchmesser Zirkon, 14 = maximale Korndurchmesser Turmalin, 15 = Karbonatgehalt.

Daneben deutet der zweite Faktor auch den Einfluß präkarbonischer Klastika auf das Schwermineralspektrum des variszischen Karbon an. Das zeigen die niedrigen factor scores für gerundeten Zirkon und Turmalin bei beiden Faktoren, was bedeutet, daß die beiden Minerale entweder auf beide Faktoren in gleicher Weise einwirken oder nicht vorhanden sind. Da diese Minerale im Karbon geringere Prozentwerte als in den älteren Klastika aufweisen, in denen sie dominieren, also keinen direkten Vergleich der verschieden alten Einheiten erlauben, kann die Faktorenanalyse eine Gemeinsamkeit trotz unterschiedlicher Häufigkeiten verdeutlichen. Danach kommen zu den Plutoniten ältere Klastika als Lieferanten für die Schwerminerale in Frage. Außerdem nehmen nach Abb. 4 Sandsteingerölle aus variszischen Karbonkonglomeraten und die übrigen untersuchten präkarbonischen Sandsteine ähnliche Positionen ein. Dieses Argument scheint von geringerer Bedeutung zu sein, da es sich nur auf die Ablagerung der Grobklastika bezieht, die im variszischen Karbon untergeordnet auftreten.

Die kambro-ordovicische Magmatite-Metamorphite sind in der Mehrzahl durch den dritten Faktor (III) repräsentiert. Auch einige Sandsteinproben aus dem Kambro-Ordovicium besitzen hohe Faktorenladungen für diesen Faktor. Nach den factor scores scheint im Vergleich zu den anderen Faktoren ein sehr unterschiedliches Verhältnis vom Apatit ohne Einschlüsse zu idiomorphem Zirkon zu bestehen. Da Apatit ohne Einschlüsse im Verhältnis zu idiomorphem Zirkon viel seltener in den Klastika als in den Magmatiten-Metamorphiten vorkommt, drückt das einen speziellen Transport- oder Verwitterungseinfluß aus, der zum teilweisen Verlust des Apatites geführt hat.

Der vierte Faktor (IV) umfaßt Proben der Fm. von Sia mit großen factor scores für opake Minerale und Hornblende, was für das Schwermineralspektrum dieser Folge charakteristisch ist.

Die Achsendiagramme in Abbildung 4 zeigen deutlich an mehreren Proben die Übergänge zwischen zweitem, drittem und viertem Faktor und die klare Unterscheidung dieser drei Faktoren vom variszischen Karbon. Der dritte und vierte Faktor stellen Besonderheiten in der Schwermineral-Führung einiger weniger Proben dar, die im zweiten Faktor nicht zum Ausdruck kommen und durch die abweichenden Schwermineralspektren der kambro-ordovicischen Magmatite-Metamorphite und der Fm. von Sia gegeben sind. Die ähnlichen Positionen von Proben aus den oberdevonischen Viella-Schichten und den altersfraglichen Fm. von Vilaller, Sia und der Llavorsi-Synklinale zueinander legen eine stratigraphisch ähnliche Stellung dieser Schichtfolge nahe. Das bedeutet, daß die Fm. von Vilaller, Sia und der Llavorsi-Synklinale mit großer Wahrscheinlichkeit dem Devon und nicht dem Karbon zuzuordnen sind.

d) Mittelwerte der Variablen und Cluster-Diagramme

Nach der Gruppierung der Proben mittels Cluster- und Faktorenanalyse im Q-Modus sollen nun die korrelativen Beziehungen zwischen Variablen innerhalb verschiedener lithostratigraphischer Einheiten, die sich aus der Faktorenanalyse ergeben, im R-Modus untersucht werden.

Eine Zusammenstellung von Variablen-Mittelwerten mit zugehörigen Standardabweichungen für neun lithologische Gruppen bietet Tab. 1. Darin sind die Proben aus dem variszischen Karbon wegen der großen Ähnlichkeiten zu einer Gruppe zusammengefaßt, hingegen die Proben aus den Viella-Schichten, dem Kern der Llavorsi-Synklinale und dem Kambro-Ordovicium voneinander getrennt angeführt. Die großen Standardabweichungen bei Mittelwerten aus den postvariszischen Basisserien, der Llavorsi-Synklinale und dem Kambro-Ordovicium ergeben sich aus der Inhomogenität dieser Gruppe.

Mit Cluster-Diagrammen im R-Modus lassen sich neben einer Kontrolle der Q-Modus-Analysen weitere Differenzierungen zwischen den lithostratigraphischen Einheiten und vor allem innerhalb derselben herausarbeiten. Daneben ergänzen Mittelwerte und Cluster-Diagramme die Ergebnisse der Diskriminanzanalysen, die im nächsten Abschnitt besprochen werden. Aus den Korrelationsmatrices ergab sich für die präkarbonischen Folgen das Diagramm in Abb. 6a, für das variszische Karbon Abb. 6b. Für die graphische Darstellung wurde die vorliegende Form gewählt, da die Ähnlichkeiten zwischen den Variablen direkt aus der Korrelationsmatrix beziehbar sind, während im Dendrogramm nur die jeweils höchsten Korrelationen berücksichtigt und die übrigen gemittelt werden.

In den präkarbonischen Klastika liegen nach Abb. 6a verschiedene Schwermineralgesellschaften vor. Zirkon ist für kambro-ordovicische Klastika und die Viella-Schichten charakteristisch. Die Variablen, die sich auf dieses Mineral beziehen, besitzen untereinander hohe positive Korrelationen. Das gilt auch für Turmalin in der Fm. von Vilaller, in der Turmalin und Rutil die Leitminerale sind. Das Schwerpunktspektrum der Fm. von Sia besteht überwiegend aus Hornblende und Zoisit-Klinozoisit-Epidot, was in der hohen positiven Korrelation zwischen diesen Mineralen zum Ausdruck kommt. Die signifikante positive Korrelation zwischen den maximalen Korngrößen von Zirkon und Turmalin weist nach RITTENHOUSE (1943) auf hydraulisch ähnliche Bedingungen verschiedener Serien während der Sedimentation hin. Die Korngrößenverhältnisse sind also, da diese Korrelation in den magmatisch-metamorphen Gesteinen fehlt, in erster Linie durch den Transport bedingt. Das bestätigt auch der Zusammenhang von maximalen Zirkon-Korngrößen mit den schweren opaken Mineralen. Allgemein betrachtet stellen die präkarbonischen Sandsteine bis auf die Serie von Sia reife Sedimente dar, in denen als stabilste Schwerminerale Zirkon, Turmalin und Rutil überwiegen, was dem Maturitätsindex von HUBERT (1960) entspricht.

Die häufigsten Bestandteile des Schwermineralspektrums im klastischen variszischen Karbon sind nach Tab. 1 Apatit und gerundeter Zirkon. Das entspricht den Ergebnissen und Schlußfolgerungen der Faktorenanalyse. Wegen der Vorherrschaft dieser beiden Minerale gehen in Abb. 6b von ihnen nur negativ signifikante Korrelationen aus. Zonarität bei Zirkon tritt besonders in idiomorphen Körnern auf. Die positive Korrelation zwischen opaken Mineralen und Granat läßt sich auf sandige Konglomerat-Matrix rückführen, in der opake Minerale und Granat hohe Prozentwerte erreichen, während Granat in den Grauwacken kaum auftritt. Die Zusammenhänge zwischen opaken Mineralen, idiomorphem Zirkon, zonarem Zirkon und TiO_2 -Mineralen mit dem Karbonatgehalt erlauben keine Interpretation.

Transportbeeinflussung wie in den präkarbonischen Klastika zeigen die Beziehungen zwischen den maximalen Korngrößen von Zirkon und Turmalin an.

Aus einer Korrelationsmatrix der postvariszischen Basisserien ergeben sich außer den Ähnlichkeiten idiomorpher Zirkon – zonarer Zirkon und idiomorpher Turmalin – gerundeter Turmalin keine signifikanten Korrelationen. Das häufigste Mineral ist idiomorpher Zirkon, gefolgt von Apatit mit Einschlüssen und gerundetem Zirkon.

e) Diskriminanzanalysen

Diskriminanzanalysen prüfen die Klassifizierung der Proben durch die Schwermineraldaten auf ihre Signifikanz und geben die für die Unterscheidung der Formationen wesentlichen Merkmale an (z. B. GASSER 1968, DEMINA 1970). Damit wird das Ziel verfolgt, zusammen mit den Ergebnissen aus Q-Modus Cluster- und Faktorenanalyse und R-Modus Cluster-Analyse ein lithostratigraphisches Modell der variszischen sandsteinführenden Klastika zu erstellen, in das auch altersfragliche Serien eingegliedert werden können (Abb. 2, Abb. 7). In die Analyse wurden folgende Gesteinsserien einbezogen:

1. Kambro-ordovicische Serien
2. Mananet-Formation
3. Viella-Schichten
4. Fm. von Vilaller
5. Fm. von Sia
6. Kern der Llavorsi-Synklinale
7. variszisches Karbon
8. postvariszische Basisserien.

An den acht Gruppen wurden insgesamt 22 Diskriminanzanalysen durchgeführt. Damit ließen sich die Ergebnisse von Cluster- und Faktorenanalyse bestätigen und präzisieren. Keine signifikante Trennung gelang zwischen kambro-ordovicischen Folgen und Viella-Schichten, Viella-Schichten und dem Kern der Llavorsi-Synklinale, Fm. von Sia und Llavorsi-Synklinale sowie in den im variszischen Karbon ausgeschiedenen Bereichen der Cluster-Analyse (vgl. Abschnitt 5.2), während alle übrigen Analysen eine signifikante (Trennwahrscheinlichkeit größer als 97,5%), in den meisten Fällen sogar hochsignifikante Trennung (Trennwahrscheinlichkeit größer als 99,5%) der ausgeschiedenen lithologischen Einheiten ergeben (Abb. 7).

7. Lithostratigraphische Interpretation der statistischen Auswertung der Schwermineraldaten

Die Ergebnisse von Cluster-, Faktoren- und Diskriminanzanalyse fassen die Abb. 7 und 8 zusammen.

Die kambro-ordovicischen Klastika bilden, wie aus den Mittelwerten und Standardabweichungen in Tab. 1 hervorgeht, keine einheitliche Gruppe. So wird z. B. der für präkarbonische Serien hohe Apatit-Mittelwert nur von zwei Proben mit hohen Apatitgehalten verursacht. Einigermaßen charakteristisch für das Schwermineralspektrum ist gerundeter Zirkon. Die Abgrenzung von anderen

	op	ame	aoe	zid	zr	zz	tid	tr	tit	gr	hb	zke	mkz	mkt	ka
Kambro-ordovicische Magmat.-Metamorph.	50.9	46.1	6.9	8.5	3.4	0.2	1.7	—	0.3	24.8	0.9	7.6	153.2	262.5	1.4
	25.2	37.2	7.2	4.0	19.5	0.6	3.7	—	0.5	36.5	2.4	23.6	30.4	120.4	2.8
Kambro-ordovicische Klastika	85.1	20.4	1.3	7.5	46.8	0.8	2.4	14.9	5.2	0.2	—	0.8	147.4	172.4	—
	11.9	28.9	2.5	5.6	28.6	0.8	2.9	21.0	8.3	0.6	—	2.6	43.8	48.1	—
Mananet-Formation	71.8	56.1	1.8	2.7	18.0	0.8	2.6	7.8	12.1	—	—	—	75.9	121.9	43.8
	15.6	20.4	2.4	3.5	14.6	1.0	3.5	5.0	9.1	—	—	—	9.3	29.8	21.0
Viella-Schichten	88.2	6.7	0.7	8.6	50.3	1.7	3.6	12.0	9.2	2.3	0.5	1.3	124.8	131.1	6.2
	9.9	8.2	1.0	10.5	26.2	1.7	4.4	15.5	8.5	4.8	1.0	2.7	24.3	27.2	5.5
Formation von Vilaller	84.8	9.3	0.2	6.0	32.9	2.3	7.5	29.5	9.7	3.1	1.0	0.9	109.4	130.2	38.0
	10.2	8.4	0.5	3.1	14.4	1.7	3.1	11.5	4.5	8.9	2.0	1.2	23.0	27.8	14.4
Formation von Sia	85.0	0.1	—	0.7	9.6	0.5	0.2	0.7	0.2	1.0	41.3	48.0	130.0	71.7	23.9
	13.1	0.3	—	2.0	28.3	1.4	0.7	1.1	0.7	1.6	34.1	37.3	99.0	12.6	30.5
Llavorsi-Synklinale	83.9	7.0	0.3	12.3	38.0	2.4	—	0.4	4.0	5.4	29.3	3.4	125.8	—	22.6
	16.9	11.0	0.5	12.3	34.5	2.1	—	0.8	4.7	12.2	47.3	5.9	32.2	—	21.1
Variszisches Karbon	80.0	39.1	2.5	8.1	31.3	2.3	2.6	6.3	5.6	2.3	0.4	—	159.3	209.9	10.6
	12.4	16.1	2.2	7.4	15.2	2.2	2.4	3.9	4.1	8.2	0.9	—	27.8	70.6	15.4
Postvariszische Basisserien	90.6	24.6	7.0	35.7	19.3	11.8	1.8	5.8	4.8	0.4	0.4	—	196.0	233.6	6.8
	9.4	17.8	4.7	30.6	11.1	10.1	1.9	6.4	4.7	0.5	0.7	—	27.5	64.7	6.0

T a b. 1: Schwermineral-Mittelwerte und Standardabweichungen von neun lithologischen Gruppen mit 15 Variablen aus insgesamt 248 Proben. Die Zahlenwerte der Mittelwerte bedeuten Prozente, bei Korngrößen Mikron. Die Standardabweichungen stehen unter den zugehörigen Mittelwerten. Abkürzungen der Variablen: op = opake Minerale, ame = Apatit mit Einschlüssen, aoe = Apatit ohne Einschlüsse, zid = idiomorpher Zirkon, zr = gerundeter Zirkon, zz = zonarer Zirkon, tid = idiomorpher Turmalin, tr = gerundeter Turmalin, tit = TiO₂-Minerale, gr = Granat, hb = Hornblende, zke = Zoisit-Klinozoisit-Epidot, mkz = maximale Korngrößen von Zirkon, mkt = max. Korngrößen von Turmalin, ka = Karbonatgehalt. Summe der durchsichtigen Minerale — zz = 100%, Op + durchsichtige Minerale = 100%.

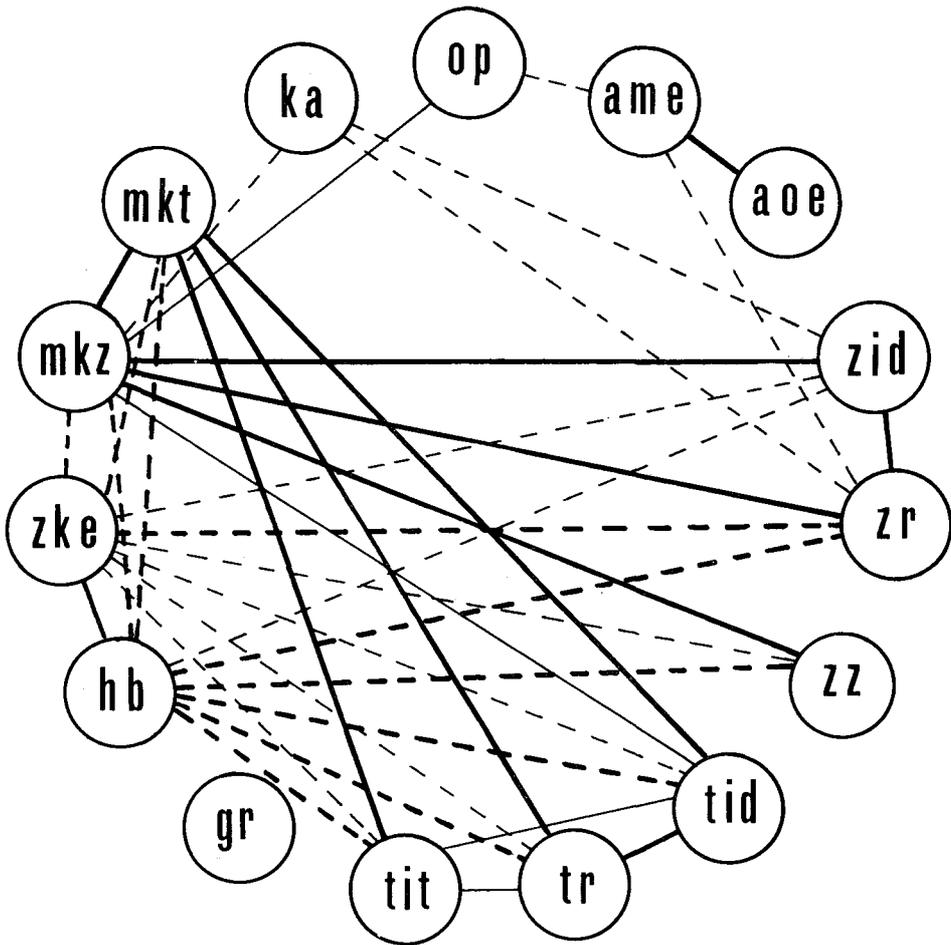


Abb. 6a: R-Modus Cluster-Diagramm von 84 Proben aus präkarbonischen Klastika mit 15 Variablen (Abkürzungen s. Tab. 1). Signifikanz-niveau 99% (dicke Linien) und 95–99% (dünne Linien). Signifikant negative Korrelationen sind strichliert gezeichnet.

Gruppen läßt sich nur bedingt durchführen. Hochsignifikant sind die Unterschiede zu Mananet-Griotte, Fm. von Vilaller, variszischem Karbon und post-variszischen Basisserien. Die Unterschiede zur Serie von Sia liegen an der Signifikanzgrenze, während eine Abtrennung von den Viella-Schichten nicht möglich ist. Das entspricht den Ergebnissen der Cluster- und Faktorenanalyse (S. 275 ff.), welche die Diskriminanzanalyse noch präzisieren kann. Die Schwermineraldaten weisen die Mehrzahl der kambro-ordovicischen Sandsteine als reife Sedimente aus, in denen Zirkon und Turmalin vorherrschen. Die Liefergebiete können nur von apatitreichen Proben des oberen Ordovicium mit kambro-ordovicischen Magmatiten-Metamorphiten erschlossen werden (Abb. 7, 8).

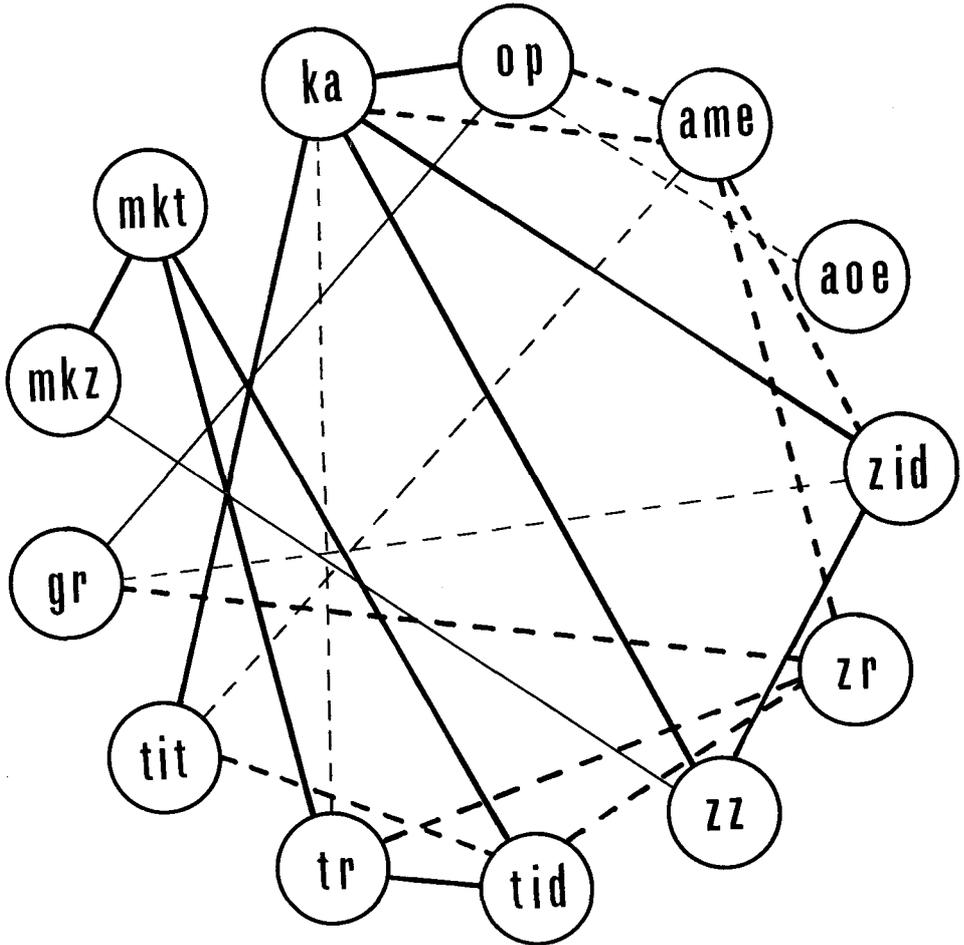


Abb. 6b: R-Modus Cluster-Diagramm von 122 Proben aus dem variszischen Karbon mit 13 Variablen (Erläuterungen s. Abb. 6a).

Die klastischen Anteile der Mananet-Formation zeigen aufgrund der Diskriminanzanalyse hochsignifikante Unterschiede zu allen übrigen Einheiten, die vor allem durch den hohen Apatit- und Karbonatgehalt und die kleinen Korngrößen bedingt sind (Abb. 7). Trotz des hohen Apatitgehaltes ist eine deutliche Abtrennung vom variszischen Karbon möglich. Die lithostratigraphisch verschiedene Position der bisher dem Oberdevon zugeordneten Mananet-Formation zu den anderen untersuchten Serien wird durch biostratigraphische Untersuchungen von BUCHROITHNER & STATTEGGER (1976), die mit Conodonten aus Flaserkalken in der Mananet-Grotte bei Llesp als Alter oberes Gedinne bis mittleres Siegen ergeben, bestätigt.

Die Abtrennung aller oberdevonischen Klastika vom variszischen Karbon, die bereits in Cluster- und Faktorenanalyse zum Ausdruck kommt, erweist sich mit der

Diskriminanzanalyse als hochsignifikant. In sämtlichen sich darauf beziehenden Diskriminanzanalysen stellt Apatit neben den für die oberdevonischen Serien charakteristischen Leitmineralen ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal dar. Dies ist besonders im Hinblick auf die Fm. von Vilaller, Sia und den Kern der Llavorsi-Synklinale, die von einigen Autoren als Karbon betrachtet wird, hervorzuheben.

Die Viella-Schichten, die Fm. des Agudes – Cap de Pales und die Fm. von Sia werden von KRYLATOV & STOPPEL (1971) zu einer lithostratigraphischen Einheit zusammengefaßt. Von diesen drei Folgen haben Proben aus den Viella-Schichten und der Fm. des Agudes – Cap de Pales identische Schwermineralspektren mit hohen Zirkon-Gehalten und werden daher gemeinsam wegen der Probenmajorität als Viella-Schichten bezeichnet, während das Schwermineralspektrum der Fm. von Sia im Bereich des *Locus typicus* wegen der Hornblende-Zoisit-Klinozoisit-Epidot-Vormacht stark davon abweicht. Dies bestätigen Cluster-Analyse (S. 275), Faktorenanalyse (S. 276), Clusterdiagramme (Abb. 6a) und die Variablenmittelwerte (Tab. 1). Die Trennwahrscheinlichkeit zwischen der Fm. von Sia und den Viella-Schichten beträgt nach der Diskriminanzanalyse 98%. Conodontenbestimmungen aus Kalkeinschaltungen in beider Serien bzw. aus unterlagernden Kalken liefern nach KRYLATOV & STOPPEL (1971) und BUCHROITHNER (1976) ähnliche Alterswerte von do I – do II. Daher sind für beide Folgen gleiches Alter aber verschiedene Liefergebiete anzunehmen.

Als Liefergebiet der Viella-Schichten kommen hauptsächlich kambro-ordovicische Klastika in Betracht (Abb. 8). Letztere erlauben nach den Klassifikationsmethoden (S. 275) und der Diskriminanzanalyse keine Trennung von den Viella-Schichten. Nur an deren Basis tritt vereinzelt ein wenig Granat verbunden mit etwas höheren Apatitwerten auf, der auf einen geringen Einfluß kambro-ordovicischer Magmatite-Metamorphite als Liefergebiet hinweisen könnte. Das Schwermineralspektrum der Fm. von Sia läßt sich nach den bisherigen Untersuchungen von keinem konkreten Liefergebiet ableiten.

Eine Mittelstellung zwischen den Viella-Schichten und der Fm. von Sia nehmen die teilweise karbonatischen Sandsteine aus dem andorranischen Teil der Llavorsi-Synklinale im Bereich des Pico Caumer westlich von Andorra la Vieja ein. Sie besitzen hohe Zirkon- und teilweise hohe Hornblendeanteile, die keine Trennung von den Viella-Schichten und der Fm. von Sia gestatten, wobei die Ähnlichkeiten zu den Viella-Schichten größer sind (Abb. 7). Da auch die Faktorenanalyse (S. 276) ähnliche Ergebnisse liefert, ist für diese andorranischen Klastika der Llavorsi-Synklinale ebenfalls ein oberdevonisches Alter wahrscheinlich.

Das Schwermineralspektrum der Fm. von Vilaller ist durch den hohen Turmalin-gehalt charakterisiert, worauf die hochsignifikante Trennung von allen übrigen klastischen Serien beruht (Abb. 7). Einige Proben zeigen Ähnlichkeiten zu den Viella-Schichten, auch die Faktorenanalyse bietet keine Unterscheidungsmöglichkeit der beiden Schichtfolgen, was auf ein ähnliches Alter der Fm. von Vilaller und der Viella-Schichten schließen läßt (S. 276, Abb. 4). Ein von BOERSMA (1973) angeführtes Oberdevon-Unterkarbon-Karbonatprofil bei Sahun enthält im liegenden Teil einen 15 Meter mächtigen überwiegend klastischen Bereich. Schwer-

mineralanalysen einiger Proben aus diesem Profilabschnitt ergaben ein der Fm. von Vilaller sehr ähnliches Spektrum, in dem ebenfalls Turmalin vorherrscht. Da eine der Proben des klastischen Profilbereiches von BUCHROITHNER (1976) mit Conodonten als do I datiert ist, kann auf ein oberdevonisches Alter der Fm. von Vilaller geschlossen werden. Der große Turmalinanteil scheint auf Teile der kambro-ordovicischen Klastika als Liefergebiete hinzuweisen (Abb. 8).

Im unteren Oberdevon gelangen neben den weit verbreiteten Karbonat-Sedimenten in den Zentralpyrenäen klastische Schichtfolgen zur Ablagerung, die sich zwischen Andorra La Vieja und Gave d'Osseau über eine Ost-West-Entfernung von ca. 200 Kilometern verfolgen lassen. Nach Schwermineraldaten gliedern sich diese oberdevonischen Klastika in drei verschiedene Provinzen (vgl. Abb. 7), eine Hornblende-Zoisit-Klinozoisit-Epidot-Provinz im Westen (= Fm. von Sia), eine Zirkon-Provinz im Zentral- und Ostteil (= Viella-Schichten, Llavorsi-Synklinale) und eine Turmalin-Provinz im Südteil (= Fm. von Vilaller).

Das klastische variszische Karbon kann vor allem durch den charakteristischen hohen Apatitgehalt und die größeren maximalen Korndurchmesser von Zirkon und Turmalin von den älteren klastischen Schichtfolgen hochsignifikant getrennt werden (vgl. Abb. 7). Die Trennung von den präkarbonischen Klastika fällt bei Cluster- (S. 275), Faktoren- (S. 276) und Diskriminanzanalyse immer eindeutig aus, da das Schwermineralspektrum im variszischen Karbon gegenüber den älteren Folgen relativ einheitlich ausgebildet ist, wie Vergleiche von Mittelwerten und Standardabweichungen in Tab. 1 zeigen. Nach den Leitmineralen Apatit mit Einschlüssen und gerundetem Zirkon liegen als Liefergebiete kambro-ordovicische Magmatite-Metamorphite und präkarbonische Klastika vor (S. 276, Abb. 8).

Das klastische Karbon folgt meist über verschieden alten Karbonaten, deren jüngste mit Conodonten als tieferes Namur datiert sind (vgl. BOERSMA 1973, BUCHROITHNER 1976, PERRET 1974). Da die kambro-ordovicischen Magmatite-Metamorphite im Karbon – nicht aber im Oberdevon – das Schwermineralspektrum bedeutend beeinflussen, muß vor und während der Sedimentation der Karbon-Klastika auf eine rege tektonische Aktivität des Hinterlandes geschlossen werden, in deren Verlauf die kambro-ordovicischen Magmatite-Metamorphite, welche die Basis des Variszikums bilden, der Erosion zugänglich wurden.

Diese Annahme deckt sich gut mit den Ergebnissen von GUITARD (1960, 1962) und VITRAC-MICHARD & ALLEGRE (1975), die anhand tektonischer Studien und absoluter Altersdatierungen an kambrischen Basisgneisen und darin eingeschalteten frühkarbonischen Graniten der Ostpyrenäen als erste Phase der variszischen Orogenese eine intensive tektonische Episode mit absoluten Alterswerten von 340 bis 330 Millionen Jahren ermitteln konnten. Danach ist die Sedimentation der Klastika des variszischen Karbon im Zusammenhang mit dieser ersten tektonischen Phase der variszischen Orogenese zu betrachten, die das Schwermineralspektrum im gesamten Untersuchungsgebiet beeinflusst.

Die Trennung der postvariszischen Basisserien, deren älteste Schichtglieder als Westfal D datiert sind (HARTEVELT 1970) vom variszischen Karbon erweist sich mit der Diskriminanzanalyse als hochsignifikant. Die Unterscheidung beruht

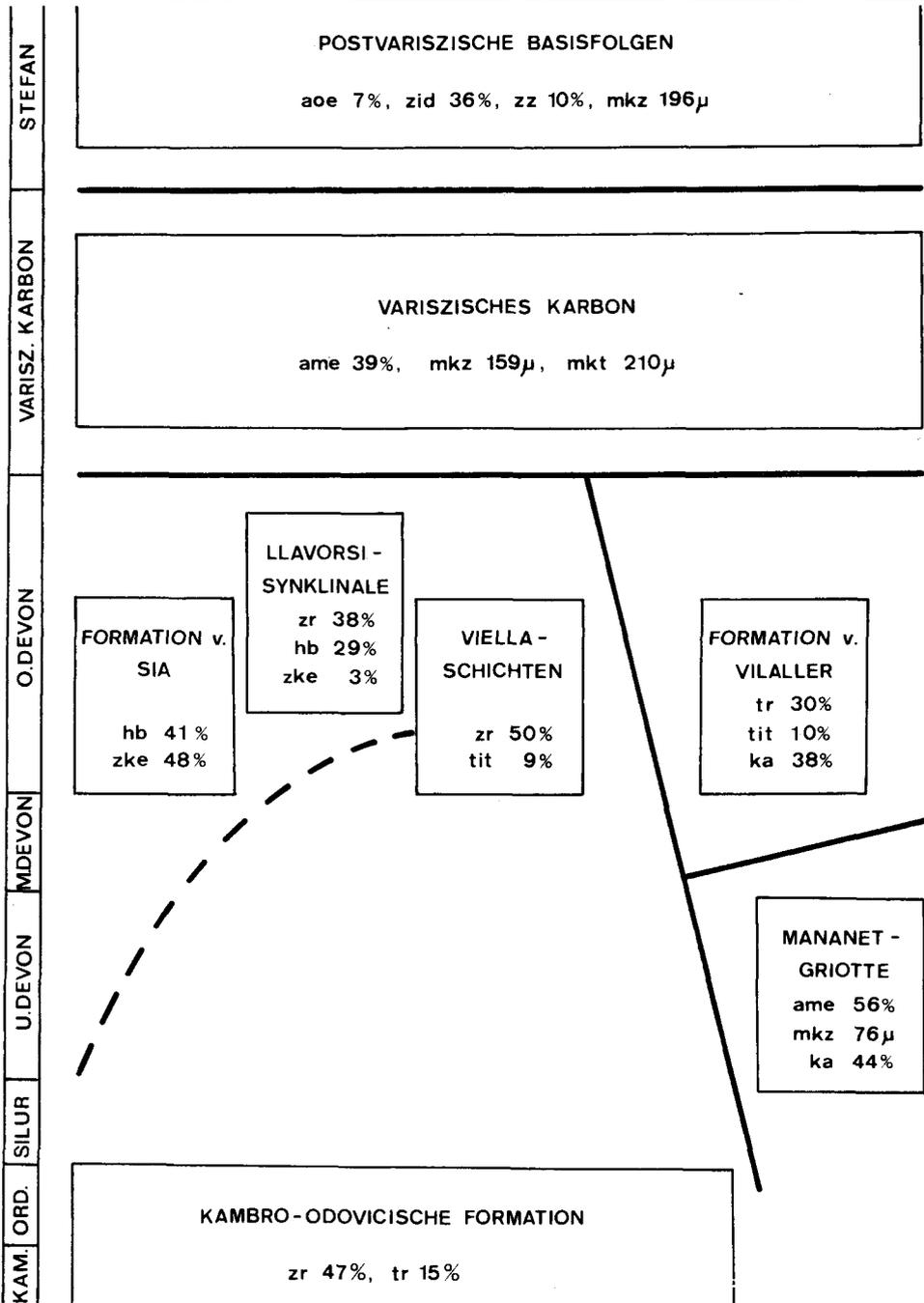


Abb. 7: Lithostratigraphisches Modell der klastischen Schichtfolgen mit hochsignifikanten durchgezogenen Trennlinien (Irrtumswahrscheinlichkeit 0.5%) und signifikanten strichlierten Trennlinien (Irrtumswahrscheinlichkeit 2.5%) unter Angabe der Mittelwerte der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale (Abkürzungen s. Tab. 1).

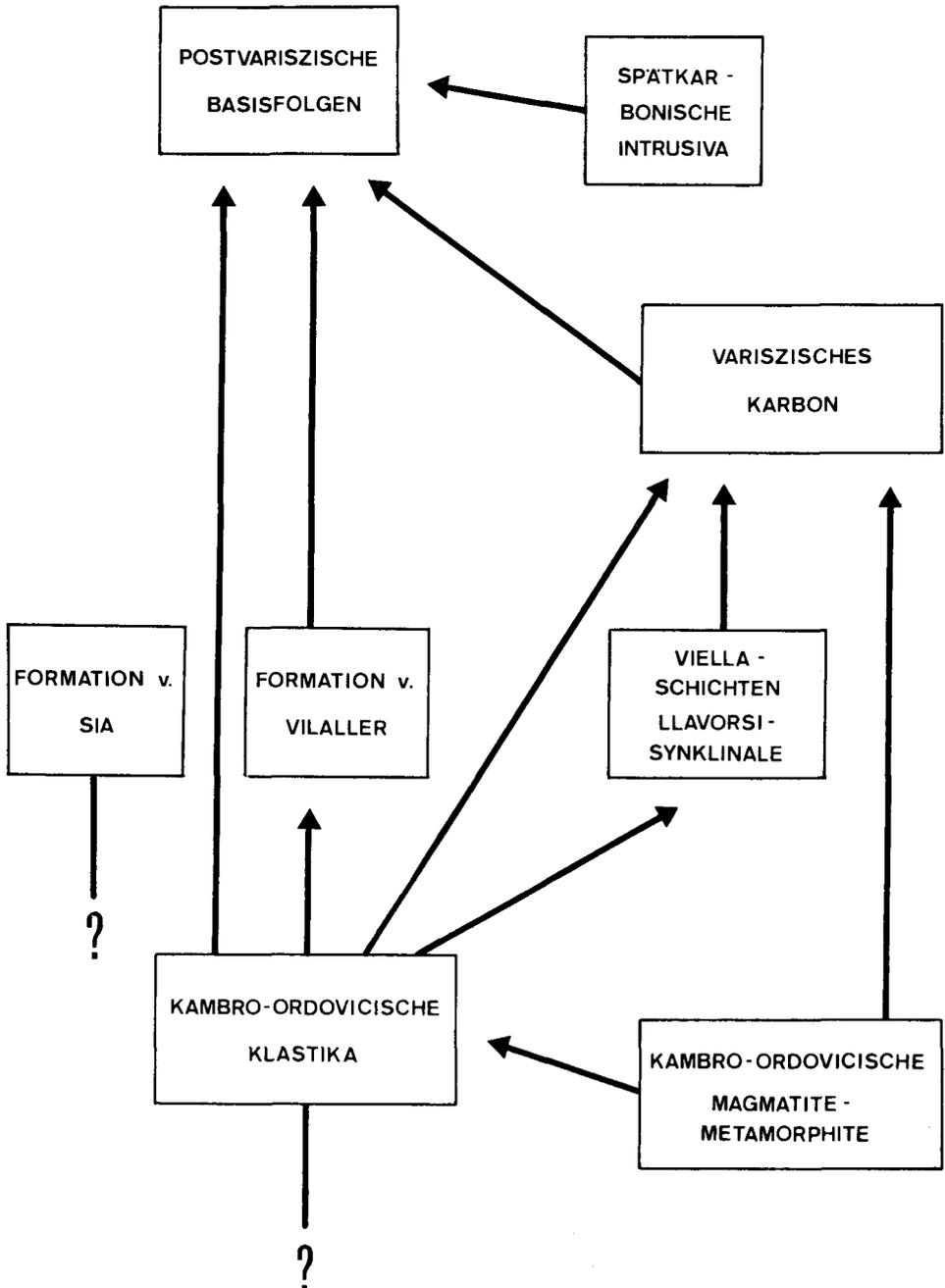


Abb. 8: Rekonstruktion der Liefergebiete der klastischen Schichtfolgen nach dem lithostratigraphischen Modell in Abb. 7.

hauptsächlich auf den hohen Gehalten von idiomorphem Zirkon, zonarem Zirkon, Apatit ohne Einschlüsse und den größeren maximalen Zirkon-Korndurchmessern in den postvariszischen Basisserien (vgl. Abb. 7), die nach der Faktorenanalyse (S. 276) auf spätkarbonische Intrusiva zurückzuführen sein dürften. Daneben dienten lokal verschiedene variszische oder ältere Klastika und Karbonate als Liefergebiete (Abb. 8, vgl. BUCHROITHNER 1976).

8. Die Schwermineralspektren der untersuchten klastischen Formationen

Zusammenfassend betrachtet liegen in den erfaßten klastischen Formationen der variszischen Geosynklinale der Ost- und Zentralpyrenäen folgende Schwermineralspektren vor:

Kambro-ordovicische Formationen:	Zirkon, Turmalin, Apatit
Mananet-Formation:	Apatit, kleine Korndurchmesser, Anatas (Neubildung?)
Viella-Schichten:	Zirkon, Rutil
Formation von Vilaller:	Turmalin, Rutil
Formation von Sia:	Hornblende, Zoisit-Klinozoisit-Epidot
Llavorsi-Synklinale:	Zirkon, Hornblende
Variszisches Karbon:	Apatit, Zirkon
Postvariszische Basisfolgen:	Zirkon (idimorph, zonar), Apatit, große Korndurchmesser.

9. Literatur

- AGTERBERG, F. P.: Geomathematics. — 596 S., 128 Abb., 50 Tab., Amsterdam — London — New York 1974.
- ARCHE, A.: Flysch Facies in the Devonian of Central Pyrenees (Spain, France). — Rep. 24th int. geol. Congr., Sect. 6, 100—106, 2 Abb., Montreal 1972.
- BLANKENBURG, H. J. & JAGUSCH, K. H.: Mögliche Fehler bei Schwermineraluntersuchungen. — Z. angew. Geol., **10**, 640—650, 1 Abb., 7 Tab., Berlin 1964.
- BOERSMA, K. T.: Devonian and Lower Carboniferous conodont biostratigraphy, Spanish Central Pyrenees. — Leidse geol. Meded., **49**, 307—377, 44 Abb., 15 Tab., Leiden 1973.
- BRIGGS, L. I.: Heavy mineral correlations and provenances. — J. sediment. Petrol., **35**, 939—955, 6 Abb., 7 Tab., Tulsa 1965.
- BROWER, J. C. & VEINUS, J.: The statistical zap versus the shotgun approach. — J. math. Geol., **6** (4), 311—332, 10 Abb., 4 Tab., New York 1974.
- BUCHROITHNER, M. F.: Conodontenstratigraphische Untersuchungen im Paläozoikum der Ost- und Zentralpyrenäen. — Unveröff. Diss. Univ. Graz 1976.
- Conodontenstratigraphie vorwiegend klastischer Folgen im Devon der Ost- und Zentralpyrenäen. — Mitt. österr. geol. Ges., **69**, Wien 1978 (im Druck).
- BUCHROITHNER, M. F. & MILAN, G.: Spätvariszische Geosynklienentwicklung in den Ostpyrenäen. — N. Jb. Geol. Pal. Abh. **155**, 1—17, Stuttgart 1977.
- BUCHROITHNER, M. F. & STATTEGGER, K.: Stratigraphische Untersuchungen im Paläozoikum der Ost- und Zentralpyrenäen II. — Anz. österr. Akad. Wiss., math.-natw. Kl., **112** (1975), 127—128, Wien 1976.
- CARROLL, D.: A statistical study of heavy minerals in sands of the South River, Augusta County, Virginia. — J. sediment. Petrol., **27**, 384—404, 4 Abb., 15 Tab., Tulsa 1957.
- CAVET, P.: Le Paléozoïque de la zone axiale des Pyrénées orientales françaises entre le Roussillon et l'Andorre (étude stratigraphique et paléontologique). — Bull. Serv. Carte géol. France, **55**, 254, 216 S., 36 Abb., 11 Taf., Paris-Liege 1957.
- CLIN, M., HEDDEBAUT, C., MIROUSE, R., MULLER, J., ROGER, P. & WATERLOT, M.: Le cycle hercynien dans les Pyrénées. — Ann. Soc. géol. Nord, **40**, 253—276, 3 Abb., Paris 1970.

- DAVIS, J. C.: Statistics and data analysis in geology. — 550 S., 159 Abb., 91 Tab., New York 1973.
- DEMINA, M. E.: Transport directions for clastic material of Aptian-Senomanian deposits in Western Turkmenia. — *J. math. Geol.*, **2**, 349—363, 2 Abb., 3 Tab., New York 1970.
- GASSER, U.: Die innere Zone der subalpinen Molasse des Entlebuch (Kt. Luzern): Geologie und Sedimentologie. — *Ecolgae geol. Helv.*, **61**, 229—319, 19 Abb., 10 Tab., 1 Taf., Basel 1968.
- GROOS-UFFENORDE, H., KRYLATOV, S. & STOPPEL, D.: Sur quelques synclinoriums à coeur réputé carbonifère des Pyrénées espagnoles. — *C.R. Acad. Sci. Paris*, **274** (D), 1885—1888, 1 Abb., 1 Taf., Paris 1972.
- GUITARD, G.: Lineations, schistosité et phase plissement durant l'orogénèse hercynienne dans les terrains anciens des Pyrénées Orientales. — *Bull. Soc. géol. France*, **7** (2), 862—887, 14 Abb., Paris 1960.
- Sur l'existence de plis anteschisteux dans le Paléozoïque inférieur et le gneiss du Massif Conigou-Caranca, Pyrénées Orientales. — *C.R. Somm. Soc. géol. France*, **1962**, 297—299, 1 Abb., Paris 1962.
- HARBAUGH, J. W. & MERRIAM, D. F.: Computer applications in stratigraphic analysis. — 282 S., 211 Abb., 54 Tab., New York 1968.
- HARTEVELT, J. J. A.: Geology of the Upper Segre and Valira valleys, Central Pyrenees, Andorra/Spain. — *Leidse geol. Meded.*, **45**, 167—236, 67 Abb., 4 Beil., 1 Karte, Leiden 1970.
- HUBERT, J. F.: Petrology of the Fountain and Lyons Formations, Front Range, Colorado. — *Col. School Mines Quart.*, **55**, 242 S., 71 Abb., 40 Tab., Golden 1960.
- IMBRIE, J. & van ANDEL, T. H.: Vector-analysis of heavy mineral data. — *Bull. geol. Soc. Amer.*, **75**, 1131—1155, 12 Abb., 11 Tab., New York 1964.
- JÖRESKOG, K. G., KLOVAN, J. E. & REYMENT, R. A.: Geological Factor Analysis. — 178 S., 53 Abb., 45 Tab., Amsterdam—Oxford—New York 1976.
- KLEINSMIEDE, W. J. F.: Geology of the Valle de Aran (Central Pyrenees). — *Leidse geol. Meded.*, **25**, 131—241, 77 Abb., 10 Tab., 1 Karte, Leiden 1960.
- KOCH, G. & LINK, R.: Statistical Analysis of Geological Data. — 375 S., 79 Abb., 141 Tab., New York—London—Sydney—Toronto 1970.
- Statistical Analysis of Geological Data, Volume 2. — 438 S., 124 Abb., 153 Tab., New York—London—Sydney—Toronto 1971.
- KRUMBEIN, W. C. & GRAYBILL, F. A.: An introduction to statistical models in geology. — 398 S., 68 Abb., 89 Tab., New York 1965.
- KRYLATOV, S. & STOPPEL, D.: Attribution au Frasnien de la série de Sia (zone primaire axiale des Pyrénées). Ses rapports avec celle des Agudes—Cap de Pales. Conséquences paléogéographiques. — *Z. dt. geol. Ges.*, **122**, 213—230, 3 Abb., 1 Taf., Hannover 1971.
- MEY, P. H. W.: The geology of the Upper Ribagorzana and Baliera valleys, Central Pyrenees, Spain. — *Leidse geol. Meded.*, **41**, 153—220, 50 Abb., 1 Karte, Leiden 1968.
- MIROUSE, R.: Recherches géologiques dans la partie occidentale de la zone primaire axiale de Pyrénées. — 451 S., 122 Abb., 16 Taf., 1 Kt., 2 Beil., Paris 1966.
- NAGTEGAAL, P. J. C.: Sedimentology, Paleoclimatology and Diagenesis of post-Hercynian continental deposits in the South-Central Pyrenees, Spain. — *Leidse geol. Meded.*, **42**, 143—238, 73 Abb., 16 Tab., 2 Beil., Leiden 1969.
- PARK, R. A.: A multivariate analytical strategy for classifying paleoenvironments. — *J. math. Geol.*, **6**, 333—352, 13 Abb., New York 1974.
- PERRET, M. F.: Biostratigraphie par Conodontes du Carbonifère Inférieur des Pyrénées Bearnaises. — *C.R. Acad. Sci. Paris*, **279** (D), 791—794, Paris 1974.
- RITTENHOUSE, G.: Transportation and deposition of heavy minerals. — *Bull. geol. Soc. Amer.*, **54**, 1725—1780, 10 Abb., 15 Tab., Washington 1943.
- SOKAL, R. R. & SNEATH, P. H. A.: Principles of numerical taxonomy. — 359 S., 38 Abb., 21 Tab., San Francisco—London 1963.
- STATTEGGER, K.: Schwermineraluntersuchungen im Paläozoikum der Ost- und Zentralpyrenäen (Frankreich/Spainien). — Unveröff. Diss. Univ. Graz 1976.
- VITRAC-MICHARD, A. & ALLEGRE, C. J.: A study of the formation and history of a piece of the continental crust by ^{87}Rb - ^{87}Sr method: The case of the French Oriental Pyrenees. — *Contr. Mineral. Petrol.*, **50**, 257—285, 15 Abb., 9 Tab., New York—Heidelberg—Berlin 1975.
- WATERLOT, M.: Contribution à l'étude géologique du Carbonifère antéstéphanien des Pyrénées centrales espagnoles. — *Mem. Inst. Geol. Min. Esp.*, **70**, 259 S., 63 Abb., 6 Taf., 4 Karten, Madrid 1969.
- ZWART, H. J.: Geological map of the Pyrenees, 1 : 200.000. — Leiden 1972.