Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae

Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft

Band: 62 (1969)

Heft: 1

Artikel: Mineralogisch-Sedimentpetrographische Untersuchungen an den Flussbettsanden im Einzugsbereich des Alpenrheins

Autor: Hahn, Christoph

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-163700

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.08.2025

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

Eclogae geol. Helv.	Vol. 62/1	Seiten 227–278	17 Figuren und 9 Tabellen im Text	Basel, Juni 1969

Mineralogisch-Sedimentpetrographische Untersuchungen an den Flussbettsanden im Einzugsbereich des Alpenrheins

von CHRISTOPH HAHN (Heidelberg)[1])

ABSTRACT

The present study deals with the sedimentology of the river channel sands of the Alpenrhine (Rhine before entering the Lake Constance) and its most important affluents. The rock detritus transported by the Alpenrhine is deposited in Lake Constance. Therefore, the sediments of the Alpenrhine have been investigated, to comprehend the influence of the Rhine on sedimentation in the basin of Lake Constance. 226 samples of the whole drainage area were investigated on size frequency distributions and mineral compositions. Most samples are sands with silt and gravel content up to 50 percent of weight, the clay content ($<2\mu$) is always small. Graphical measures to characterize the size frequency distributions as M_Z, σ_I Sk_I and K_G were defined. Mean sizes M_Z of the most samples vary between -1Φ and 4Φ. Most size frequency distributions are moderately and poorly sorted ($\sigma_I = 0{,}7-1{,}8$), 70% of the distributions are positively skewed ($Sk_I > 0$). The relations between some parameters were investigated on scatter plots.

The most important clay minerals are clay-grade micas (illite and ledikite) and orthochlorites.

With respect to the carbonate content and the calcite/dolomite ratio the sediments of the drainage area may be subdivided into four distributive provinces:

Province I with carbonate content of <5 percent of weight, mainly calcite.
Province II with carbonate content of 30–50 percent of weight, calcite/dolomite-ratio >5.
Province III with carbonate content of 40–80 percent of weight, calcite/dolomite-ratio <1.
Province IV with carbonate content of 35–40 percent of weight, the calcite/dolomite-ratio changes from 5–6 to 2–3.

The carbonate content in samples of some important affluents of the Rhine was investigated on plots.

The mineral constituents besides the carbonates are quartz, sodic plagioclases, potassium feldspars, micas and orthochlorites. Six quantitative X-ray analyses were made to determine the quartz, plagioclase and potassium feldspar content in samples, who are representative for greater parts of the drainage area. Carbonates, quartz and feldspars compose 80 percent of the sediments, the rest are mainly micas and chlorites.

With respect to the heavy mineral content the sediments of the drainage area may be subdivided into seven distributive provinces:

Helvetische Province with the association zircon–tourmaline–rutile in connection with garnet.
Silvretta-province with the associations garnet–staurolite in connection with zircon, tourmaline and kyanite and hornblende–epidote in connection with garnet.
Vorderrhein-province with the association epidote–garnet in connection with zircon, tourmaline and hornblende.
Hinterrhein-province with the association tourmaline–zircon in connection with rutile.
Rheinwald-province with the associations epidote–garnet–hornblende in connection with zircon, epidote in connection with zircon, garnet and hornblende and garnet–epidote in connection with tourmaline.
Ostalpine Province with the association zircon–rutile–tourmaline in connection with garnet.

[1]) Jetzige Adresse des Autors: Dr. Christoph Hahn, Porzellanfabriken Lorenz Hutschenreuther AG, Zentrallaboratorium, D-8672 Selb.

Alpenrhein-province with the associations epidote–garnet in connection with hornblende, tourmaline and zircon and epidote–garnet–hornblende in connection with staurolite, tourmaline and zircon. The heavy mineral content in samples of some important affluents of the Rhine was investigated on plots.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit ist ein Auszug aus der von der Naturwissenschaftlich-mathematischen Fakultät der Universität Heidelberg genehmigten Dissertation. Im Rahmen des Wasserforschung-Bodenseeprojektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden Flussbettsande aus dem Einzugsgebiet des Alpenrheins mineralogisch-sedimentpetrographisch bearbeitet, um deren Einfluss auf die Bildung und Zusammensetzung der Bodenseeablagerungen erfassen zu können. Mit Hilfe granulometrischer, optischer, chemischer und röntgenographischer Methoden wurden insgesamt 226 Proben auf Korngrössenverteilung und Mineralbestand untersucht.

Bei den untersuchten Proben handelt es sich meist um Sande mit Silt- bzw. Kiesanteilen bis zu 50 Gew.%, der Tonanteil ($<2\mu$) ist immer sehr gering. Die Korngrössenverteilungen kennzeichnenden Parameter M_Z, σ_I, Sk_I und K_G wurden bestimmt. Die mittleren Durchmesser der meisten Proben liegen zwischen -1Φ und 4Φ. Mehr als 90% der Verteilungen sind mässig bis schlecht sortiert ($\sigma_I=0{,}7$–$1{,}8$). Fast 70% der Verteilungen sind asymmetrisch gegen den feinen Bereich ($Sk_I>0$). Zudem wurden die Beziehungen der Parameter zueinander untersucht.

Als Tonminerale finden sich di- und trioktaedrische glimmerähnliche Minerale und Orthochlorite. Hier handelt es sich meist um detritische Chlorite der Pennin–Klinochlor–Grochauit-Reihe und der Diabantit–Pyknochlorit–Rhipidolith–Reihe.

Als Karbonatminerale finden sich Calcit und stöchiometrisch zusammengesetzter Dolomit. Auf Grund des Gesamtkarbonatgehaltes sowie des Calcit/Dolomit-Verhältnisses kann das Einzugsgebiet in vier distributive Provinzen gegliedert werden:

Provinz I mit Gesamtkarbonatanteil von weniger als 5 Gew.%, es tritt meist Calcit auf, kaum Dolomit.

Provinz II mit Gesamtkarbonatanteil von 30–50 Gew.%, das Calcit/Dolomit-Verhältnis ist >5.

Provinz III mit Gesamtkarbonatanteilen von 40–80 Gew.%, das Calcit/Dolomit-Verhältnis ist <1.

Provinz IV mit Gesamtkarbonatanteilen von 35–40 Gew.%, das Calcit/Dolomit-Verhältnis ändert sich von 5–6 auf 2–3.

Im weiteren wurden die Karbonatführungen einiger wichtiger Zuflüsse des Rheins untersucht und in Diagrammen dargestellt.

Der silikatische Leichtmineralbestand setzt sich bei wechselnden Anteilen zusammen aus Quarz, sauren bis intermediären Plagioklasen, Kalifeldspaten, di- und trioktaedrischen Glimmern und Orthochloriten. Die Chlorite sind Glieder der Pennin–Klinochlor–Grochauit-Reihe und der Diabantit–Pyknochlorit–Rhipidolith-Reihe. Stellenweise kommt reichlich Serpentin vor. In sechs quantitativ-röntgenographischen Phasenanalysen wurde der Leichtmineralbestand bestimmt. Jede dieser Proben ist für ein grösseres Einzugsgebiet repräsentativ. Auf Grund ihres Mineralbestandes werden diese Proben als feldspatführende, phyllosilikathaltige, karbonatreiche Sande bezeichnet.

Als Schwerminerale finden sich etwa 25 verschiedene Minerale oder Mineralgruppen. Für den rezenten Abtrag im Einzugsbereich ist ein epi- bis mesozonal geprägtes Schwermineralspektrum charakteristisch. Auf Grund der Schwermineralgesellschaften der einzelnen Proben kann das Einzugsgebiet in sieben distributive Provinzen gegliedert werden:

Helvetische Provinz mit Zirkon–Turmalin–Rutil-Assoziation und Granat als Nebenbestandteil.

Silvrettaprovinz mit Granat–Staurolith-Assoziation und Zirkon, Turmalin und Disthen als Nebenbestandteilen und Hornblende–Epidot-Assoziation und Granat als Nebenbestandteil.

Vorderrheinprovinz mit Epidot–Granat-Assoziation und Zirkon, Turmalin und Hornblende als Nebenbestandteilen.

Hinterrheinprovinz mit Turmalin–Zirkon-Assoziation und Rutil als Nebenbestandteil.

Rheinwaldprovinz mit Epidot–Granat–Hornblende-Assoziation und Zirkon als Nebenbestandteil, Epidot-Assoziation und Zirkon, Granat und Hornblende als Nebenbestandteilen und Granat–Epidot-Assoziation und Turmalin als Nebenbestandteil.

Ostalpine Provinz mit Zirkon–Rutil–Turmalin-Assoziation und Granat als Nebenbestandteil.

Alpenrheinprovinz mit Epidot–Granat-Assoziation und Hornblende, Turmalin und Zirkon als Nebenbestandteilen und Epidot–Granat–Hornblende-Assoziation und Staurolith, Turmalin und Zirkon als Nebenbestandteilen.

Weiter wurden die Schwermineralführungen einiger wichtiger Zuflüsse des Rheins untersucht und in Diagrammen dargestellt.

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung und Problemstellung . . . 230
- Frühere Untersuchungen an alpinen Flussanden . . . 231
- Geographische Übersicht . . . 231
- Geologisch-petrographische Übersicht . . . 234

Probenahme . . . 237

Granulometrie . . . 237
- Methodik . . . 237
- Ergebnisse . . . 238
  - Das Verhältnis Kies : Sand : Silt . . . 238
  - Korngrössenparameter . . . 241
  - Mean size . . . 241
  - Standard deviation . . . 242
  - Skewness . . . 243
  - Kurtosis . . . 245
  - Beziehungen zwischen den Parametern . . . 245

Tonmineralanteil der Sedimente . . . 246
- Methodik . . . 246
- Ergebnisse . . . 247

Karbonatanteil der Sedimente . . . 247
- Methodik . . . 247
- Ergebnisse . . . 249
  - Karbonatminerale . . . 249
  - Beziehungen zwischen Korngrösse und Karbonatgehalt . . . 249
  - Regionale Verteilung der Karbonate . . . 249
  - Karbonatführung wichtiger Zuflüsse . . . 253

Silikatischer Leichtmineralanteil der Sedimente . . . 255
- Qualitative Untersuchungen . . . 255
- Quantitative Phasenanalysen . . . 255

Schwermineralanteil der Sedimente . . . 257
- Methodik . . . 257
- Ergebnisse . . . 257
  - Durchsichtige Schwerminerale . . . 257
  - Beziehungen zwischen Korngrösse und Schwermineralanteil . . . 258
  - Regionale Verteilung der Schwermineralgesellschaften . . . 258
  - Distributive Provinzen . . . 259
  - Helvetische Provinz . . . 261
  - Silvrettaprovinz . . . 263
  - Vorderrheinprovinz . . . 264
  - Hinterrheinprovinz . . . 265
  - Rheinwaldprovinz . . . 267
  - Ostalpine Provinz . . . 268
  - Alpenrheinprovinz . . . 268
  - Schwermineralführung wichtiger Zuflüsse . . . 269

Zusammenfassung der Ergebnisse . . . 271

Literaturverzeichnis . . . 276

VERZEICHNIS DER FIGUREN UND TABELLEN IM TEXT

Fig. 1 Geographische Übersicht 232
Fig. 2 Stoffdreieck Kies – Sand – Silt 238
Fig. 3 Siltanteil im Rheinsediment 239
Fig. 4 Korngrössenparameter in Rheinsedimenten 240
Fig. 5 Beziehungen zwischen den Parametern 244
Fig. 6 Karbonatgehalte der Einzelproben 248
Fig. 7 Karbonatprovinzen 250
Fig. 8 Karbonatführung des Rheins 252
Fig. 9 Karbonatführung des Vorderrheins 253
Fig. 10 Karbonatführung des Hinterrheins 254
Fig. 11 Karbonatführung der Ill 255
Fig. 12 Schwermineralgehalte der Einzelproben 260
Fig. 13 Schwermineralprovinzen 262
Fig. 14 Schwermineralführung des Rheins 269
Fig. 15 Schwermineralführung des Vorderrheins 270
Fig. 16 Schwermineralführung des Hinterrheins 270
Fig. 17 Schwermineralführung der Ill 271
Tab. 1 Mittlere jährliche Auflandungen im Rheindelta 233
Tab. 2 Ionenfracht des Rheins 1962/63 234
Tab. 3 Tektonische Gliederung 235
Tab. 4 Parameter nach FOLK and WARD (1957) 241
Tab. 5 Statistische Auswertung der einzelnen Parameter 242
Tab. 6 Mittlere Parameterwerte der verschiedenen Sedimenttypen 245
Tab. 7 Leichtmineralanteile 256
Tab. 8 Schwermineralassoziationen der einzelnen Provinzen 259
Tab. 9 Kurze Charakterisierung der rezenten Rheinschüttung 272

EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Die vorliegende Arbeit ist ein Teil der im Rahmen des Bodenseeprojektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft am Mineralogisch-Petrographischen Institut der Universität Heidelberg durchgeführten sedimentologischen Untersuchungen an den rezenten Ablagerungen des Bodensees und seiner Zuflüsse. Ziel dieses Projektes ist es, genaue Angaben über die Vorgänge im Wasserkörper des Bodensees insbesondere zur Gewässernutzung zu erhalten. Da zwischen Wasserkörper und Bodensediment eines Sees zahlreiche Wechselwirkungen bestehen, wurden die Ablagerungen des Bodensees und seiner Zuflüsse in die Untersuchungen einbezogen.

Die Sedimentbildung wurde von G. MÜLLER und seinen Mitarbeitern untersucht (G. MÜLLER, 1963, 1964a, 1966a, 1966b, 1967a, 1967b, G. MÜLLER und SCHÖTTLE, 1965, G. MÜLLER und TIETZ, 1966, SCHÖTTLE, 1968 und WAGNER, 1968). Diese Untersuchungen zeigten, dass der Alpenrhein mit seinem klastischen Material massgeblich an der Zusammensetzung der Sedimente im Obersee beteiligt sein muss.

Wegen der grossen Bedeutung des Alpenrheins für die Sedimentbildung im Bodensee wurden 1964 vorläufige Untersuchungen über die Zusammensetzung der Rheinsande angestellt (G. MÜLLER und HAHN, 1964). Die Ergebnisse legten es nahe, eine eingehende Bearbeitung der Sande im Einzugsbereich des Alpenrheins durchzuführen.

Anhand eines umfangreichen Probenmaterials sollte versucht werden, Art und Herkunft der in den See gelangenden Sedimente aufzuzeigen und darüber hinaus die

Beziehungen zwischen Herkunft, Transport und Sedimentation in alpinen Flüssen aufzuklären.

Diese Untersuchungen stellen eine Fortsetzung der Arbeit von VAN ANDEL (1950) dar, der die Herkunft von Sedimenten des Rheins und seiner Zuflüsse zwischen Aareeinmündung und Nordsee beschrieb.

Danksagung

Meinem verehrten Lehrer Herrn Prof. Dr. G. Müller (Heidelberg) danke ich für die Überlassung des an interessanten Problemen reichen Themas, insbesondere aber für seine stetige fördernde Anteilnahme am Fortgang dieser Untersuchungen und seine richtungsweisenden Anregungen.

Für freundliche Unterstützung und zahlreiche Diskussionen bin ich auch Herrn Dr. J. Quakernaat zu Dank verpflichtet. Weiterhin sei Frl. A. Wissmann für die Hilfe bei der Durchführung der zahlreichen Röntgengoniometeraufnahmen und bei der Fertigstellung des Manuskriptes gedankt.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die gewährte materielle Unterstützung.

Für einen Druckkostenzuschuss bin ich dem Deutschen Alpenverein zu Dank verpflichtet.

Frühere Untersuchungen an alpinen Flussanden

Bisher befassten sich nur wenige Untersuchungen mit dem Mineralbestand rezenter Flussande in alpinen Liefergebieten.

BURRI (1929) bearbeitete die Flussande des Ticino auf Korngrössenverteilung, Leicht- und Schwermineralbestand. Von A. MÜLLER (1938) wurden die mechanischen und mineralogischen Eigenschaften der Saane-Sande untersucht. GEES (1965) beschreibt Korngrössenanalysen einiger Sande aus vier schweizerischen Flüssen (Aare, Reuss, Landquart und Ticino). Flussande im Südtessin wurden von HOFMANN (1966) auf Schwerminerale bearbeitet.

Im Zusammenhang mit geomorphologischen und glazialgeologischen Untersuchungen in Vorarlberg wurden von HAAGSMA (1958), DRIESEN-BUINING (1956) und BIK (1960) einige Flussande von Rhein, Ill, Frutz und Lutzbach und deren Zuflüssen, Alfenz und Litz auf ihren Schwermineralbestand untersucht.

Die Sande des Westalpenflusses Durance wurden von VAN ANDEL (1951) beschrieben.

Geographische Übersicht

Von allen Bodenseezuflüssen ist der Alpenrhein der wichtigste. Er entwässert einen grossen Teil der zentralen und nördlichen Alpen. Sein Einzugsgebiet ist 6123 km² gross. Die Schweiz, Österreich, Liechtenstein und Italien teilen sich den Einzugsbereich. Fig. 1 gibt einen Überblick des Gewässernetzes im Einzugsgebiet.

Topographisch lässt sich eine Gliederung in folgende Teilgebiete vornehmen:

a) Gebiet des Vorderrheins bis zur Einmündung des Hinterrheins. Dieses Teilgebiet ist 1514 km² gross. Der Vorderrhein entspringt im zentralen Gotthardmassiv in 2345 m Höhe (Lai de Tuma). Seine Länge beträgt etwa 67,5 km. Die wichtigsten und langen südlichen Seitentäler sind von Ost nach West das Safiental (Rabiusa), das Lugnez (Glogn und Valserrhein), Val Sumvitg (Rein de Sumvitg) und Val Medel (Rein de Medel). Die nördlichen Seitentäler sind kurz und steil.

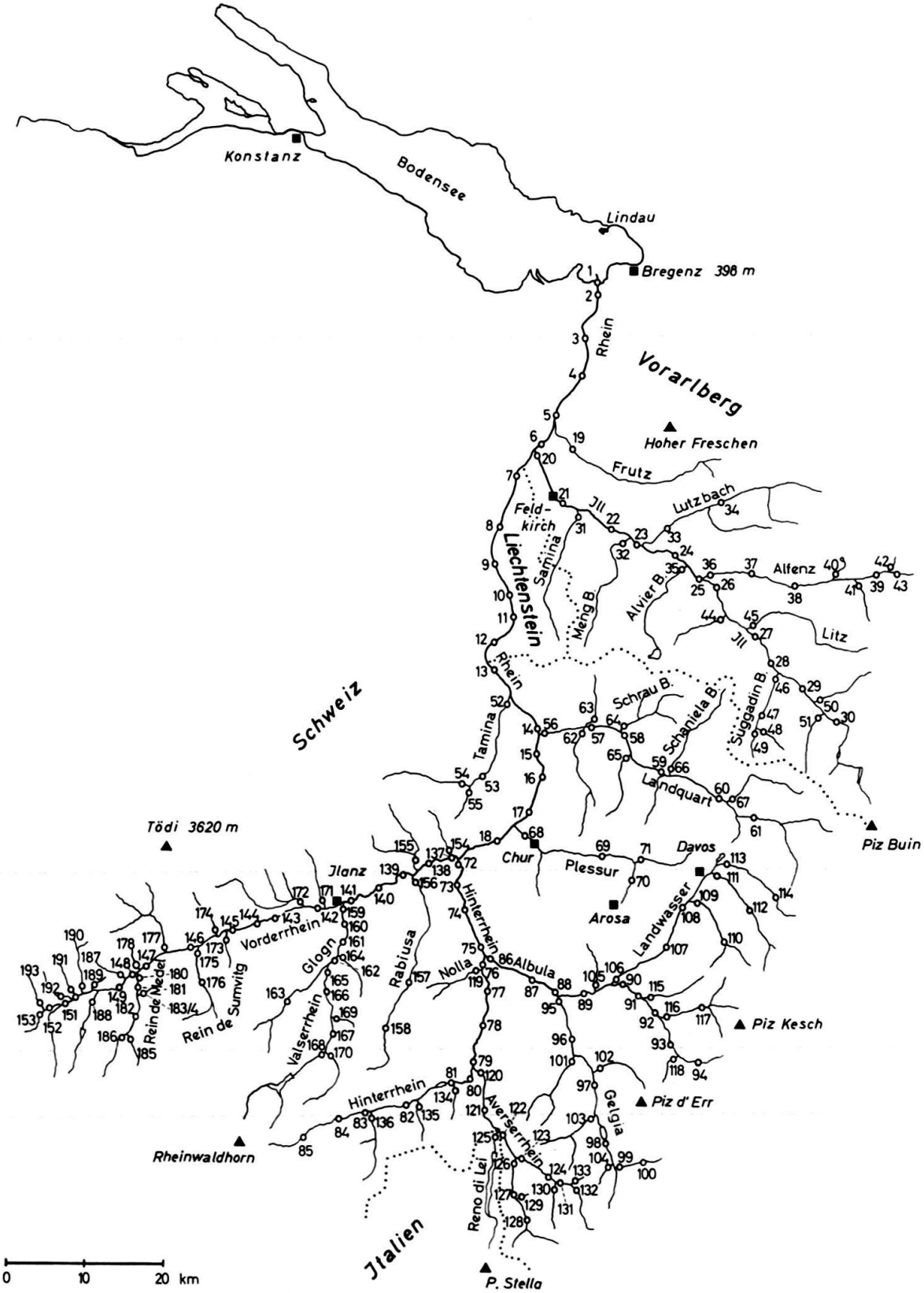

Fig. 1 Geographische Übersicht mit Probeentnahmestellen.

b) Gebiet des Hinterrheins bis zur Einmündung in den Vorderrhein. Dieses Teilgebiet ist 1693 km² gross. Der Hinterrhein entspringt am Rheinwaldhorn im Adulamassiv in 2365 m Höhe (Zungenende des Paradiesgletschers). Die grossen Nebentäler sind das Avers (Averserrhein) und das Albulatal (Albula) mit den Seitentälern des Oberhalbsteins (Gelgia) und des Landwassers.

c) Gebiet des Rheins vom Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein bei Reichenau bis zur Mündung in den Bodensee. Dieses Teilgebiet ist 2916 km² gross. Der Rhein ist 91,2 km lang. Die grossen Seitentäler sind von Süd nach Nord das Schanfigg (Plessur), das Prättigau (Landquart), das Vättnertal (Tamina), das Tal der Ill in Vorarlberg und das Laternsertal (Frutz).

Im Süden und Südosten begrenzt die europäische Hauptwasserscheide das Einzugsgebiet. Nördlich und westlich des Vorderrheins verläuft eine Nebenwasserscheide gegen Reuss und Linth. Höchster Punkt des Einzugsgebietes ist der Tödi mit 3620 m Höhe, die Erosionsbasis, die Höhe des Obersees bei Mittelwasser, liegt bei 395 m. Die mittlere Höhe des Einzugsgebietes beträgt etwa 1800 m.

Seinem grossen Einzugsgebiet entsprechend bringt der Rhein riesige Sedimentmengen aus den verschiedenen Gebieten in den Obersee. Auf Grund der in regelmässigen Abständen vor dem Rheindelta erfolgenden Seegrundaufnahmen durch die österreichische Rheinbauleitung sind wir über die Auflandungen genau orientiert. Die mittleren jährlichen Auflandungen nach WAIBEL (1962) sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Dabei handelt es sich jeweils um zehnjährige Mittelwerte. Aus den Angaben dieser Tabelle errechnet sich eine jährliche Sedimentfracht von 3033000 m³ als Mittelwert aus 30 Jahren. Vergleichsweise entspricht diese Menge einer täglichen Anlieferung von 16 Güterwagen mit jeweils 50 m³ Inhalt. Im wesentlichen wird Schlamm abgelagert, die jährliche Kiesfracht ist gering. WAIBEL gibt sie mit maximal 40000 m³ im normalen Abflussjahr an.

Tabelle 1. Mittlere jährliche Auflandungen im Rheindelta nach WAIBEL (1962). Die zweite Vertikalkolonne enthält die je km² Einzugsgebiet abgetragene Menge.

1931–1941	3 428 000 m³	559,9 m³/km²
1941–1951	1 883 000 m³	307,5 m³/km²
1951–1961	3 787 000 m³	618,5 m³/km²

Wie die Zahlen für die mittleren jährlichen Auflandungen zeigen, sind von Jahrzehnt zu Jahrzehnt Schwankungen im Deltawachstum zu verzeichnen, die in ursächlichem Zusammenhang mit der Wasserführung des Rheins stehen.

Für den Zeitraum von 1931–1961 wurde aus Pegelmessungen eine mittlere Jahresabflussmenge von 7,03 Mia m³ ermittelt. Umgerechnet ergeben sich daraus 224 m³/sec. Der Anteil des Rheins am Gesamtzufluss in den Bodensee dürfte bei 70 % liegen.

Aus Untersuchungen von WAIBEL (1962) über die Verteilung der Schlammfracht auf einzelne Wassermengenstufen geht hervor, dass der Rhein bei Wassermengen über 400 m^3/sec rund 90% der Jahresschlammfracht führt. Eine Wasserführung von 400 m^3/sec und mehr wird jährlich aber nur an 55 Tagen erreicht (1931–1961), so dass innerhalb dieser Zeit etwa 90% des Gesamtmaterials transportiert werden. Aussergewöhnliche Hochwasser wie das am 22./23. 8. 1954 führten 2500–2700 m^3 Wasser in der Sekunde. Allein während dieses Hochwassers dürften etwa 2,6 Mio m^3 Schlamm in den Bodensee gelangt sein.

Das Abflussverhalten des Rheins ist klimatisch bedingt. Niedrigwasser herrscht in den Wintermonaten bei schneebedecktem und gefrorenem Boden, Hochwasser im Juni und Juli als Folge der Schneeschmelze und sommerlicher Regen im Hochgebirge. Nähere Angaben zu Klima und Abfluss finden sich in den Jahrbüchern der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt in Zürich und des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft in Bern.

Zur Berechnung der Gesamtfracht des Rheinwassers muss dem festen Anteil (Schwebstoffe und Geschiebe) noch das im Wasser gelöste Material zugezählt werden. In einjährigen systematischen Untersuchungen wurde von G. MÜLLER (1965) die jährliche Ionenfracht des Rheins bei Lustenau bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 Ionenfracht des Rheins 1962/63 nach MÜLLER (1965).

Mittlere Wasserführung (m^3/s)	186,8
Wasserführung im Berichtsjahr (Mio m^3)	5890
Mittlere HCO_3^--Führung (kg/s)	22,14
HCO_3^--Führung im Berichtsjahr (t)	698 207
Mittlere SO_4^{--}-Führung (kg/s)	9,32
SO_4^{--}-Führung im Berichtsjahr (t)	293 915
Mittlere Cl^--Führung (kg/s)	0,22
Cl^--Führung im Berichtsjahr (t)	6937
Mittlere Ca^{++}-Führung (kg/s)	7,89
Ca^{++}-Führung im Berichtsjahr (t)	248 819
Mittlere Mg^{++}-Führung (kg/s)	1,92
Mg^{++}-Führung im Berichtsjahr (t)	60 349
Mittlere Na^+-Führung (kg/s)	0,31
Na^+-Führung im Berichtsjahr (t)	9776

Geologisch-petrographischer Überblick

Im folgenden soll ein kurzer geologischer und petrographischer Überblick der Verhältnisse im Einzugsbereich des Rheins gegeben werden, soweit er im Rahmen dieser Arbeit erforderlich ist.

In einer umfangreichen Arbeit hat es JÄCKLI (1957) unternommen, die aktuogeologischen Vorgänge von Abtrag und Auffüllung im bündnerischen Rheingebiet quantitativ zu erfassen. Nach seinen Angaben wirken im Einzugsgebiet fluviatile Abtragsfaktoren am intensivsten, andere wie Gletscher- und Lawinentransport, Rutschungen, Blockströme, Steinschlag und äolischer Transport fallen nicht sehr ins Gewicht. Eine weitere Arbeit von JÄCKLI (1958) versucht, den Abtragsprozess im Rheingebiet auf

Grund der Vorlandsedimentation mathematisch zu erfassen. Danach soll in 3–4 Mio Jahren die mittlere Höhe auf die Hälfte reduziert worden sein.

Als Grundlage der folgenden Ausführungen dienten die zusammenfassenden Darstellungen von CADISCH (1953) und SCHAFFER (1951).

Die Alpen sind ein Deckengebirge. Der Gebirgskörper wird in überschobene Teile (Decken) und in autochthone Teile gegliedert. Zu den autochthonen Teilen gehören die herzynischen Zentralmassive Aar- und Gotthardmassiv. Zwischen beiden Massiven eingeschaltet liegt das kleine Tavetscher Zwischenmassiv. Zusammen bilden sie das alte präalpidische Skelett der Alpen, das durch sein Vorhandensein den tektonischen Aufbau der Alpen wesentlich mitbestimmt hat. Ihre Fortsetzung nach Westen finden die Zentralmassive im Montblanc-Massiv. Im Osten tauchen sie unter tektonisch höheren Einheiten ab. Die zentralen Massive werden im Norden von den helvetischen, im Süden von den penninischen Decken umgeben. Im Osten stehen höhere tektonische Einheiten, die ostalpinen Decken an.

Den tektonischen Einheiten entsprachen grosse voralpidische Sedimentationszonen. Durch die alpidische Orogenese wurden diese Geosynklinaltröge verfaltet und nach Norden abgeschoben.

Die normal-stratigraphische mesozoische Sedimentbedeckung der Zentralmassive wurde unter dem Druck der aus Süden anbrandenden penninischen Decken nach Norden abgeschoben und liegt heute in Form der helvetischen Decken und Schubmassen vor. Im Ablagerungsgebiet blieben nur die Wurzelzonen als massivscheidende Mulden übrig. Die Zentralmassive selbst wurden dem Deckenbau nicht eingegliedert.

Die Ablagerung der penninischen Geosynklinale wurden bei der Orogenese mit ihrer kristallinen Unterlage zusammen verfaltet und als ein Falten- oder Deckenbündel an das Gotthardmassiv heran-

Tabelle 3 Tektonische Gliederung.

		Teildecken, Sedimentzonen
oberostalpin	Jnntal - D.	
	Lechtal - D.	
	Allgäu - D.	
	Silvretta - D.	Tschirpen - D.
mittelostalpin	Ortler - Campo - D.	Aela-D., Aroser Dolomiten - D.
unterostalpin	Bernina - D.	Alv-, Sassalbo - Serien u.a.
	Err - D.	Carungas-D., Albula - Zone
hochpenninisch	Platta - D.	Aroser Schuppenzone (z.T.)
mittelpenninisch	Margna - D.	Falknis - Sulzfluh - D. (?)
		Schamser- D.
	Suretta - D.	
	Tambo - D.	Areue - Zone, Splügener - Z.
tiefpenninisch	Adula - D.	Misoxer Zone
		Fanella -, Zervreiler Lappen
	Soja - D.	Piz Terri - Serie
	Simano-D.	
	Lucomagno - D. u. Leventina - Masse	Lugnezer Schiefer

geschoben. Eine genaue Abgrenzung zwischen den penninischen Einheiten und den nächst höheren, den ostalpinen Decken ist kaum möglich, da stets Zwischenglieder vorhanden sind, denen auf Grund ihrer Gesteinsfolgen eine intermediäre Stellung zukommt.

Die ostalpinen Sedimentmassen wurden ebenfalls mit ihren kristallinen Kernen über tektonisch tiefere Einheiten hinweg nach Norden verfrachtet.

Tabelle 3 gibt einen Überblick der im Einzugsbereich wichtigen tektonischen Einheiten.

Im folgenden soll eine kurze Beschreibung der Gesteinsserien der oben genannten tektonischen Einheiten erfolgen. Diese Gesteine stellen das Ausgangsmaterial für die rezenten Sedimente im Einzugsbereich dar. Sie sind bestimmend für den qualitativen und quantitativen Mineralbestand der Ablagerungen. Jeder Wechsel der Gesteinsbeschaffenheit im Liefergebiet führt zu einer Bestandsänderung im Sediment. Von Bedeutung ist auch die unterschiedliche Erosionsresistenz verschiedener Gesteine (JÄCKLI, 1957).

Die weitgehende Bedingtheit von Orogenese und Sedimentation hat zur Folge, dass die grossen tektonischen Einheiten der Alpen zugleich stratigraphische Einheiten, d.h. Faziesbezirke darstellen. Sie unterscheiden sich in ihren Gesteinsfolgen charakteristisch voneinander.

Die helvetische Fazies der mesozoischen Sedimentation (Perm – Alttertiär) ist vorwiegend durch eine reiche Gliederung von Jura und Kreide gekennzeichnet. Die Ablagerungen bestehen aus wechselnden Folgen von grob- und feinklastischem Material mit kalkigen Zwischenschichten. Die alpidische Metamorphose führte zu einer Verfestigung von Sandsteinen und Kalken und zur Verschieferung mergelig-toniger Gesteine, eigentlich metamorphe Gesteine sind selten und auf das südliche Helvetikum beschränkt.

Die penninische Fazies der mesozoischen Sedimentation ist hauptsächlich durch die eintönigen Bündnerschiefer gekennzeichnet. Diese setzen sich aus wechselnden Folgen meist epimetamorpher Tonschiefer, Kalkschiefer und Quarzite zusammen mit allen Übergängen dieser Gesteine zu Sandsteinen und Sandkalken. Dabei ist eine Zunahme des Metamorphosegrades von den hoch- zu den tiefpenninischen Sedimentserien zu beobachten. Begleitgesteine der Bündnerschiefer sind die mesozoischen Ophiolithe, basische bis ultrabasische Eruptivgesteine, die heute grösstenteils metamorph vorliegen. Die dislokationsmetamorphen Ophiolithe der tief- und mittelpenninischen Decken sind als Grünschiefer, Prasinite, Amphibolite und Serpentine ausgebildet. Unter den hochpenninischen Ophiolithen treten auch weniger metamorphe Gesteine wie Gabbros und Diabase auf. Die Schichtfolgen der hochpenninischen Decken zeigen Anklänge an die ostalpine Fazies, sie bilden den Übergang von penninischer zu ostalpiner Fazies.

Die ostalpine Fazies der mesozoischen Sedimentation unterschiedet sich von den vorwiegend klastischen und kalkigen Folgen des helvetischen und des penninischen Raumes durch starkes Vorherrschen triasisch-dolomitischer Ablagerungen, wie sie für die mediterrane Fazies typisch sind. Die unterostalpinen Sedimentfolgen zeigen noch gewisse Anklänge an die penninische Fazies. Die unterostalpine Trias zeigt gegenüber der mittel- und oberostalpinen eine reduzierte Entwicklung. In den oberostalpinen Decken ist die alpidische Metamorphose recht geringfügig, für die Sedimente gilt ähnliches Verhalten wie in der helvetischen Zone. In den unterostalpinen Decken ist die metamorphe Beeinflussung stärker.

Zum Abschluss dieses Abschnitts sollen kurz die kristallinen Gesteinsserien der penninischen und der ostalpinen Decken sowie der Zentralmassive erwähnt werden.

Alle penninischen Decken enthalten einen Granitgneiskern, der von einer polymetamorph vergneisten älteren Hülle sedimentogenen Ursprungs umgeben ist. Letztere enthält vielfach Amphibolite.

Die unterostalpinen Decken werden im Kern von Graniten und Dioriten aufgebaut. Der altmetamorphe Rahmen setzt sich aus Para- und Orthogneisen mit eingelagerten Amphiboliten zusammen. Das Kristallin der oberostalpinen Silvrettaschubmasse enthält keine wenig oder nicht metamorphe Eruptiva. Die jüngsten Bildungen sind Orthogneise, wesentlich älter sind Ortho- und Paraamphibolite, die im Silvrettakristallin in aussergewöhnlicher Menge auftreten. Weit verbreitet sind Mischgneise und hochmetamorphe Paragneise.

Die Zentralmassive sind polyorogene prätriasische Gesteinskörper. Gotthard- und Aarmassiv weisen beide eine ähnliche zonare Gliederung im Bau auf. Das östliche Gotthardmassiv gliedert sich in zwei Komplexe. Der ältere Komplex besteht aus Para- und Orthogneisen, darin liegen diskordant die jüngeren Eruptivgesteinsstöcke, die als herzynische Granit- bis Granodioritstöcke beschrieben werden. Das südöstliche Aarmassiv setzt sich zusammen aus Granitgneisen sowie kristallinen Schiefern und Gneisen sedimentogenen Ursprungs. Darin liegen diskordant die jüngeren herzynischen Intrusivstöcke in Form paralleler Granitbatholiten. Innerhalb und am Rand des Aargranits treten ältere Magmatite auf, die basischer sind als der Hauptgranit (Syenite, Monzonite und Diorite). Innerhalb der Zentralmassive lässt sich eine starke Zunahme des Metamorphosegrades von Nord nach Süd beobachten. Im Aarmassiv ist die alpidi-Überprägung noch geringfügig, und zwar von epizonalem Charakter, während sie im Gotthardmassiv, besonders am Südrand, schon mesozonal und ausgeprägt konstruktiv ist.

Probenahme

Die in dieser Arbeit untersuchten Proben aus dem Einzugsbereich des Alpenrheins wurden auf zwei Fahrten im August und Oktober 1964 aufgesammelt. In unregelmässigen Abständen, bedingt durch die örtlichen Geländeverhältnisse, wurden an 193 Punkten insgesamt 226 Proben im ganzen Flussystem entnommen. In Fig. 1 sind alle Probenstellen eingezeichnet.

Bei der Probenahme wurde darauf geachtet, dass nur jüngst sedimentierte Flussbettsande aufgesammelt wurden. Die entnommenen Proben sind ausschliesslich Durchschnittsproben.

GRANULOMETRIE

Methodik

Die Bestimmung der Korngrössenverteilung der einzelnen Proben erfolgte in einem Siebsatz nach DIN 4188. Verwendung fand hierbei eine elektrische Laborsiebmaschine EML der Firma Haver u. Boeker, Oelde/Westf., die nach dem Prinzip der Wurfsiebung arbeitet.

Die Bestimmung der Korngrössenverteilung im Bereich <0,04 mm wurde mit einem Sedimentometer der Firma Evans Electroselenium Ltd. durchgeführt.

Die Ergebnisse der Sieb- und Sedimentometeranalysen ergeben lückenlose Korngrössenverteilungen vom Kies- bis zum Tonbereich.

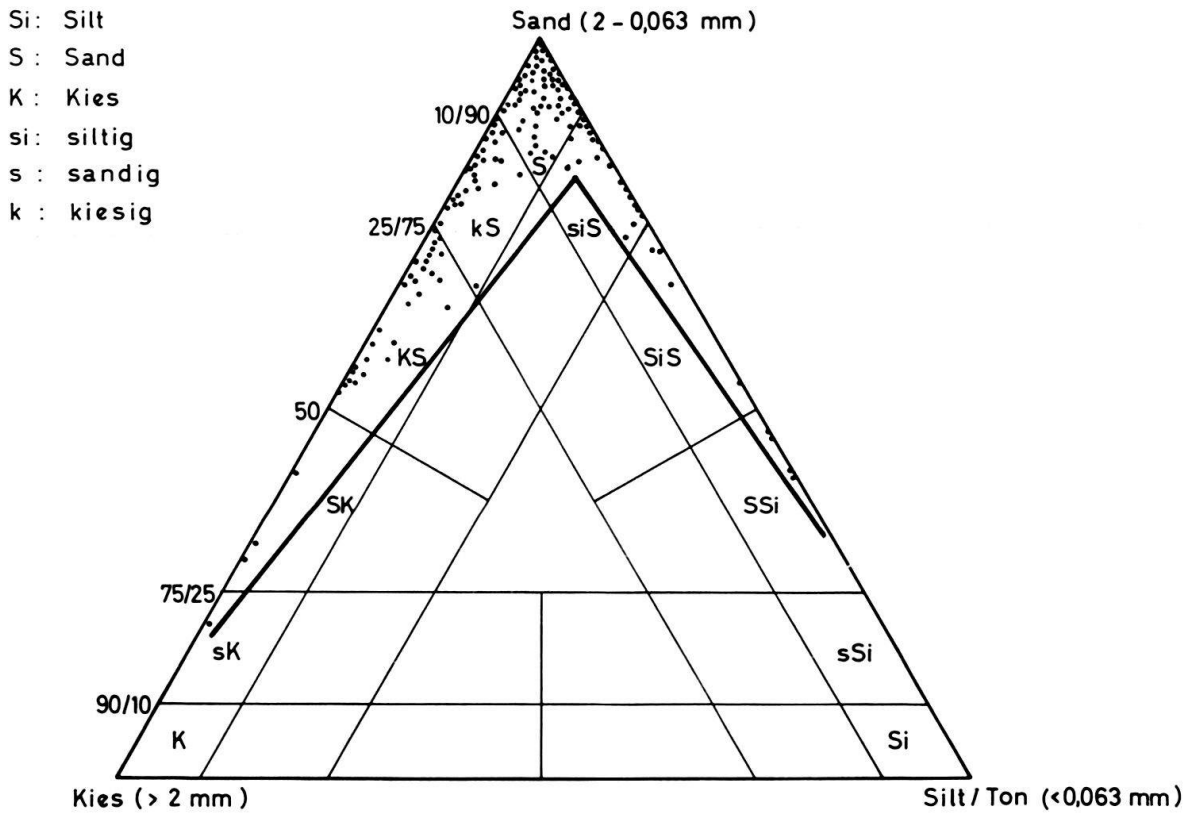

Fig. 2 Stoffdreieck Kies – Sand – Silt.

Ergebnisse

Das Verhältnis Kies: Sand: Silt

Eine erste Aussage über die Zusammensetzung der einzelnen Proben lässt sich aus dem prozentualen Gewichtsanteil des Kies-, Sand- und Silt/Ton-Bereiches machen, wobei unter Kies, Sand und Silt/Ton die Korngrössenbereiche >2 mm ($<-1\Phi$)[1]), 2–0,06 mm (-1–4Φ) und <0,06 mm ($>4\Phi$) verstanden werden. Für die Bezeichnung und den Vergleich mehrerer Sedimente eignet sich ein Stoffdreieck mit Eckpunkten Kies, Sand und Silt/Ton. Fig. 2 zeigt die Verteilung der vorliegenden Proben in diesem Stoffdreieck und gibt die Benennung von Mischsedimenten aus Kies, Sand und Silt/Ton.

Es zeigt sich, dass alle Proben nahe der Sand-Silt- und der Sand-Kies-Linie liegen. Sie enthalten stets weniger als 10 Gew. % der jeweiligen dritten Komponente.

[1]) Φ=griech. Phi ist der negative Logarithmus zur Basis 2 der Korngrössenmessung in mm (KRUMBEIN, 1934). Bei dieser Korngrössenskala hat die Korngrösse 1 mm den Φ-Wert 0, kleinere Korngrössen haben positive, grössere negative Φ-Werte.

Folgende Sedimenttypen treten bei den untersuchten Proben auf: Sand (S), siltiger Sand (siS), Siltsand (SiS), Sandsilt (SSi), kiesiger Sand (kS), Kiessand (KS), Sandkies (SK) und sandiger Kies (sK).

Eine Häufung der Punkte im Sandbereich ist offensichtlich. Es finden sich aber auch etliche Proben in den Bereichen siltiger Sand, kiesiger Sand und Kiessand. Der maximale Kiesanteil ist 79,07 Gew. % (Probe 186), der höchste Siltgehalt 62,59 Gew. % (Probe 68 B). Der maximale Tongehalt (<0,002 mm) beträgt 6,17 Gew. % (Probe 38) bei einem Siltanteil von 58,17 Gew. %. In den meisten Proben ist der Tongehalt aber wesentlich geringer, so dass fortan nur noch vom Siltanteil der Proben gesprochen wird, der immer einen geringen Tonanteil einschliesst.

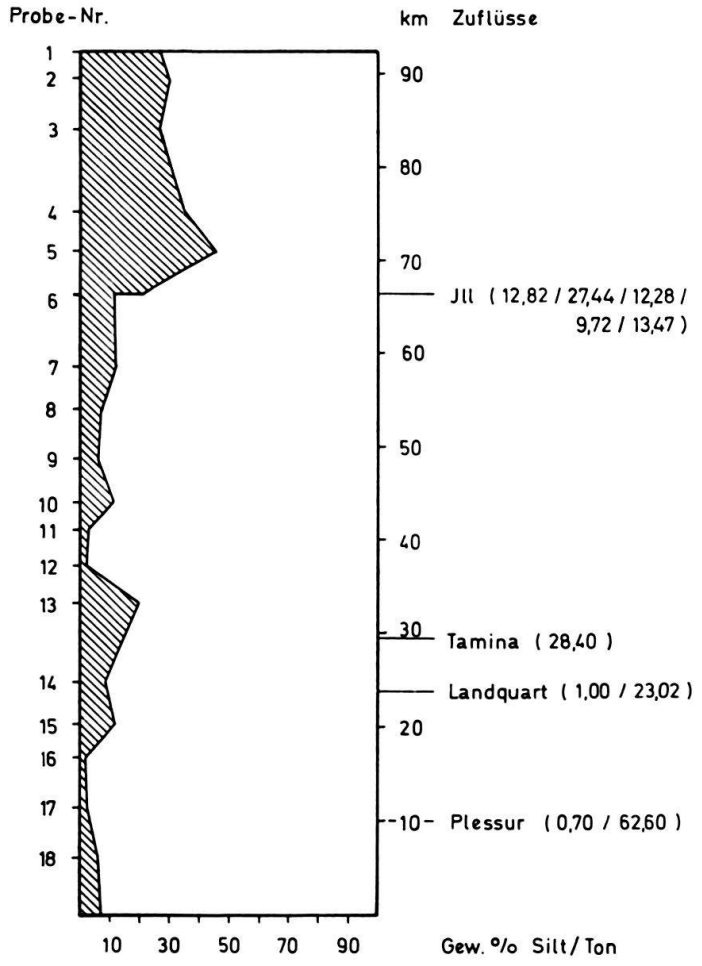

Fig. 3 Siltanteil im Rheinsediment.

Fig. 3 zeigt, wie mit zunehmendem Transportweg und abnehmendem Gefälle der Siltanteil im Rheinsediment ansteigt. Proben aus dem Oberlauf weisen Siltgehalte von 5–15 Gew. % auf, Proben aus dem Unterlauf nach Einfluss der Ill enthalten höhere Siltanteile von 25–35 Gew. % bei einem Tonanteil von <3 Gew. %. Die Ill beeinflusst die Flussbettsande des Rheins in starkem Masse, wie sich auch aus den übrigen Untersuchungen ergibt.

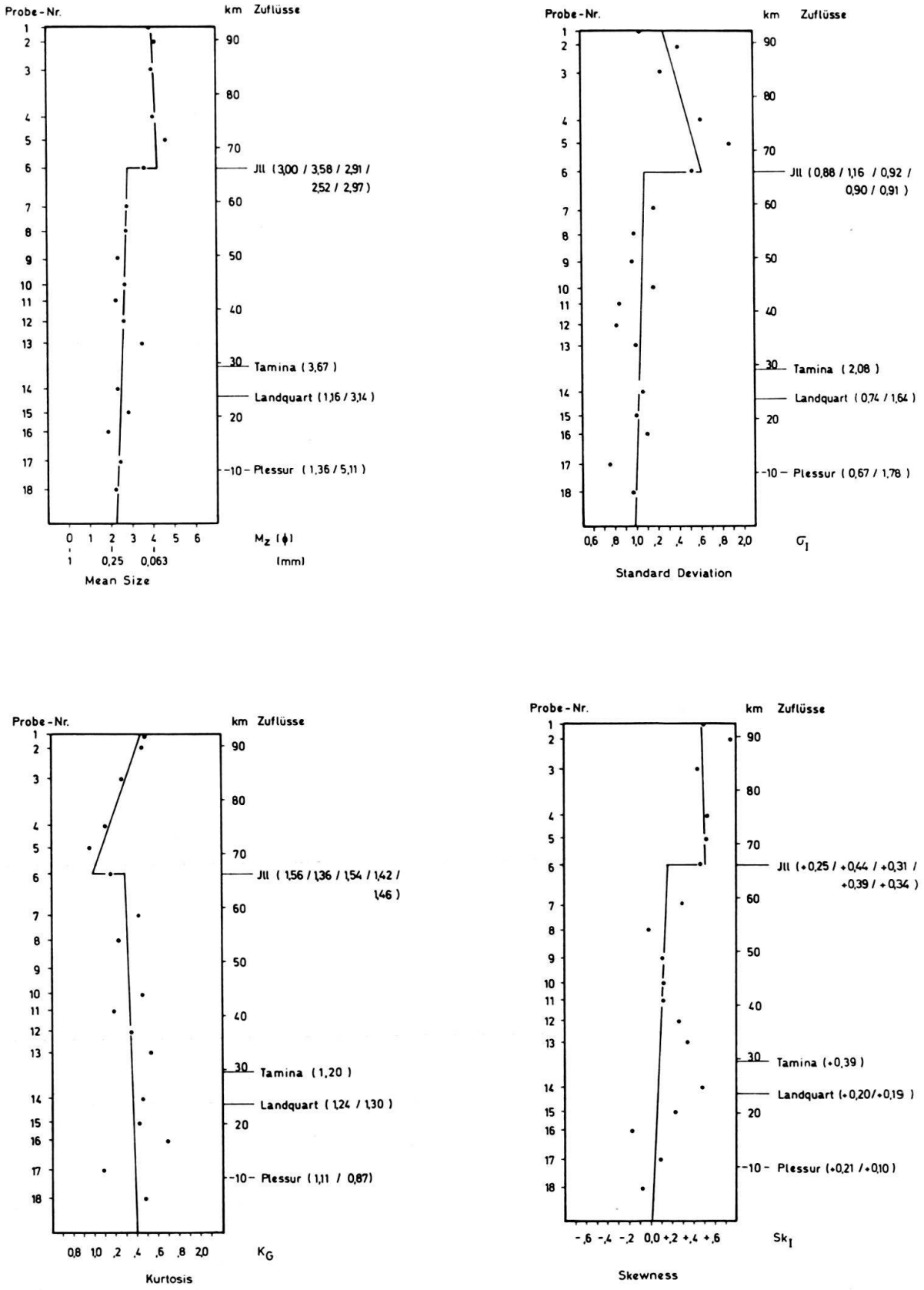

Fig. 4 Korngrössenparameter in Rheinsedimenten.

Korngrössenparameter

Aus den Ergebnissen der mechanischen Analysen wurden die Kornsummenkurven aufgezeichnet. Hierzu wurde ein Formblatt mit logarithmisch geteilter Abszisse (in Φ-Einheiten) und einer nach dem Gauss-Integral geteilten Ordinate verwendet. Die Summenlinie einer Gausschen Normalverteilung erscheint in diesem Netz als Gerade. Die Korngrössenverteilung eines natürlichen Sediments nähert sich einer Gausschen Verteilung. Verschiedene Autoren (FRIEDMAN, 1962 u.a.) diskutieren dieses Problem und weisen darauf hin, dass die meisten Sedimente keine normale Verteilung aufweisen. Eine bestimmte Art der Abweichung von der Normalität lässt eine Aussage über die Art des Ablagerungsraumes zu (Zusammenfassung bei FOLK, 1966).

Um die Summenlinien einer grösseren Anzahl von Proben miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, kennzeichnende Parameter aus den Summenlinien abzuleiten. Im folgenden werden die Parameter verwendet, die FOLK and WARD (1957) für Korngrössengemische vorgeschlagen haben. Sie basieren auf der Geometrie der Normalkurve. Die einzelnen Parameter sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Es sind dies mean size M_Z, inclusive graphic standard deviation σ_I, inclusive graphic skewness Sk_I und graphic kurtosis K_G. Die zur Bestimmung dieser Parameter nötigen Percentilmasse werden graphisch den Summenlinien entnommen.

Tabelle 4 Parameter nach FOLK and WARD (1957). (Φ 5 bzw. Φ 16 usw. geben diejenigen Korngrösse an, bei der 5 bzw. 16% des Korngemisches kleiner als diese Korngrösse ist.)

$$M_Z = \frac{\Phi 16 + \Phi 50 + \Phi 84}{3}$$

$$\sigma_I = \frac{\Phi 84 - \Phi 16}{4} + \frac{\Phi 95 - \Phi 5}{6{,}6}$$

$$Sk_I = \frac{\Phi 16 + \Phi 84 - 2\Phi 50}{2(\Phi 84 - \Phi 16)} + \frac{\Phi 5 + \Phi 95 - 2\Phi 50}{2(\Phi 95 - \Phi 5)}$$

$$K_G = \frac{\Phi 95 - \Phi 5}{2{,}44(\Phi 75 - \Phi 25)}$$

Mean size

Der Parameter für die mittlere Korngrösse ist M_Z. Er variiert für die vorliegenden Flussande zwischen 5,27Φ (Probe 38) und $-1{,}61\Phi$ (Probe 186). Wie in Tabelle 5 zu ersehen ist, liegen die mittleren Durchmesser der meisten Proben zwischen 4Φ und -1Φ.

In Fig. 4 ist die mittlere Korngrösse M_Z der Proben aus dem Rhein entlang des Flussverlaufes aufgetragen. Es lässt sich deutlich eine leichte Abnahme der mittleren Korngrösse ersehen, die wohl weniger durch Abrasion des Materials als durch nachlassendes Gefälle bedingt ist. Mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit gelangen feinere Sedimente zum Absatz. Im Oberlauf des Rheins beträgt der mittlere Durchmesser etwa 2–3Φ, im unteren Teil nach Zufluss der Ill zwischen 3–5Φ. Die Ill ist in-

Tabelle 5 Statistische Auswertung der einzelnen Parameter.

			% aller Proben
Mean size M_Z (Φ)	< −1,01		2,2
	−1,00 – −0,01		12,0
	0,00 – 0,99		20,3
	1,00 – 1,99		21,2
	2,00 – 2,99		28,0
	3,00 – 3,99		10,6
	4,00 – 4,99		3,9
	>5,00		1,8
	Einteilung nach FOLK and WARD (1957)		
Standard deviation σ_I	< 0,35	very well sorted (vws)	0,4
	0,36 – 0,50	well sorted (ws)	1,3
	0,51 – 0,71	moderately well sorted (mws)	4,0
	0,72 – 1,00	moderately sorted (ms)	25,7
	1,01 – 2,00	poorly sorted (ps)	64,6
	2,01 – 4,00	very poorly sorted (vps)	4,0
Skewness Sk_I	−1,00 – −0,30	very negatively skewed (vns)	2,2
	−0,29 – −0,10	negatively skewed (ns)	14,6
	−0,09 – 0,09	nearly symmetrical (nsy)	30,5
	−0,10 – 0,29	positively skewed (ps)	34,1
	−0,30 – −1,00	very positively skewed (vps)	18,6
Kurtosis K_G	< 0,67	very platykurtic (vpk)	0,9
	0,68 – 0,90	platykurtic (pk)	11,5
	0,91 – 1,11	mesokurtic (mk)	34,5
	1,12 – 1,50	leptokurtic (lk)	43,4
	1,51 – 3,00	very leptokurtic (vlk)	9,7

folge ihrer höheren Strömungsgeschwindigkeit reich an Trübstoffen, die im Rhein zur Ablagerung gelangen. Die Abnahme des mittleren Durchmessers in den Rheinsanden geht parallel der Änderung des Siltanteiles (Fig. 3).

Die mittlere Korngrösse der Flussbettsande, die im Bodensee zur Ablagerung gelangen, liegt um 3,5–4,0Φ.

Standard deviation

Standard deviation σ_I ist ein Parameter für die Breite einer Kornverteilung und damit für die Sortierung eines Gemisches. Dieser Parameter ist für asymmetrische Verteilungen besonders geeignet, denn er berücksichtigt auch die Sortierung in den Randbereichen der Summenlinien.

Mit $\sigma_I = 0{,}32$ (Probe 72 A) und $\sigma_I = 2{,}64$ (Probe 42) sind die Extremwerte gekennzeichnet. Eine statistische Auswertung aller Proben bezüglich ihres Sortierungskoeffizienten ist in Tabelle 5 ersichtlich. Diese Tabelle zeigt auch die von FOLK and WARD (1957) angegebenen Sortierungsgrade. Danach sind über 90% aller Proben mässig bis schlecht sortiert.

In einer genetischen Sortierungsklassifikation gibt FRIEDMAN (1962) den Bereich für Flussandsortierungen ($M_Z > 1\Phi$) mit $\sigma_I = 0{,}35$–$1{,}40$ an. Für gröbere Flussande ($M_Z < 1\Phi$) liegt σ_I zwischen 0,80 und 2,00.
Die Sortierungen der vorliegenden Proben bestätigen diese Bereiche, die unteren Grenzen bei FRIEDMAN liegen jedoch etwas niedriger als unsere Werte. Als mittlerer Wert für die Sortierung der Flussbettsande des Alpenrheins ergibt sich ein Bereich von $\sigma_I = 0{,}70$–$1{,}80$.

In Fig. 4 sind die Sortierungswerte der Proben aus dem Rhein längs des Flusslaufes aufgetragen. Stromabwärts lässt sich eine leichte Abnahme der Sortierungswerte erkennen. Proben des Oberlaufes weisen Werte von $\sigma_I < 1{,}10$ auf, während Proben im Unterlauf – nach Zufluss der Ill – höhere Werte aufzeigen. Diese Verschlechterung der Sortierung stromabwärts ist auf die Abnahme des mittleren Durchmessers zurückzuführen. Wie FOLK and WARD (1957) nachwiesen, sind nicht nur σ_I sondern auch Sk_I und K_G korngrössenabhängig.

Den Bodensee erreichen im wesentlichen schlecht sortierte Sedimente mit $\sigma_I = 1{,}20$–$1{,}40$.

Skewness

Dieser Parameter ist ein Mass für die Symmetrie der Summenlinie eines Korngrössengemisches. Er markiert die Lage des mittleren Durchmessers M_Z hinsichtlich des Medians. Negative Werte für Sk_I besagen, dass M_Z auf der gröberen Seite des Medians zu finden ist. Positive Werte zeigen an, dass M_Z auf der feineren Seite des Medians liegt. Die Normalskurve hat den Wert $Sk_I = 0{,}00$. Die theoretischen Maxima sind $Sk_I = -1{,}00$ und $+1{,}00$.

Die Skewness-Werte der untersuchten Proben variieren zwischen $Sk_I = -0{,}89$ (Probe 136) und $Sk_I = +0{,}76$ (Probe 2). Eine statistische Auswertung der Symmetriekoeffizienten aller Proben ist in Tabelle 5 zusammengefasst.

Aus den Untersuchungen von FRIEDMAN (1961) geht hervor, dass Flussande meist positive Sk_I-Werte aufweisen, während Strandsande grösstenteils negative Sk_I-Werte haben. Die Asymmetrie einer Kornverteilung lässt also eine Aussage über die Art des Ablagerungsraumes zu.

Von den vorliegenden Proben weisen fast 70% Kornverteilungen mit positiven Sk_I-Werten auf, welche die Untersuchungen von FRIEDMAN zumindest teilweise bestätigen.

In Fig. 4 ist der Verlauf der Sk_I-Werte rheinabwärts aufgezeichnet. Mit zunehmendem Siltanteil im Sediment (Fig. 3) nehmen die positiven Werte zu. Grund hierfür ist die Korngrössenabhängigkeit des Skewness-Parameters.

Die den Bodensee erreichenden Flussande mit 25–35 Gew. % Siltanteil weisen Sk_I-Werte von $+0{,}30$–$+0{,}50$ auf.

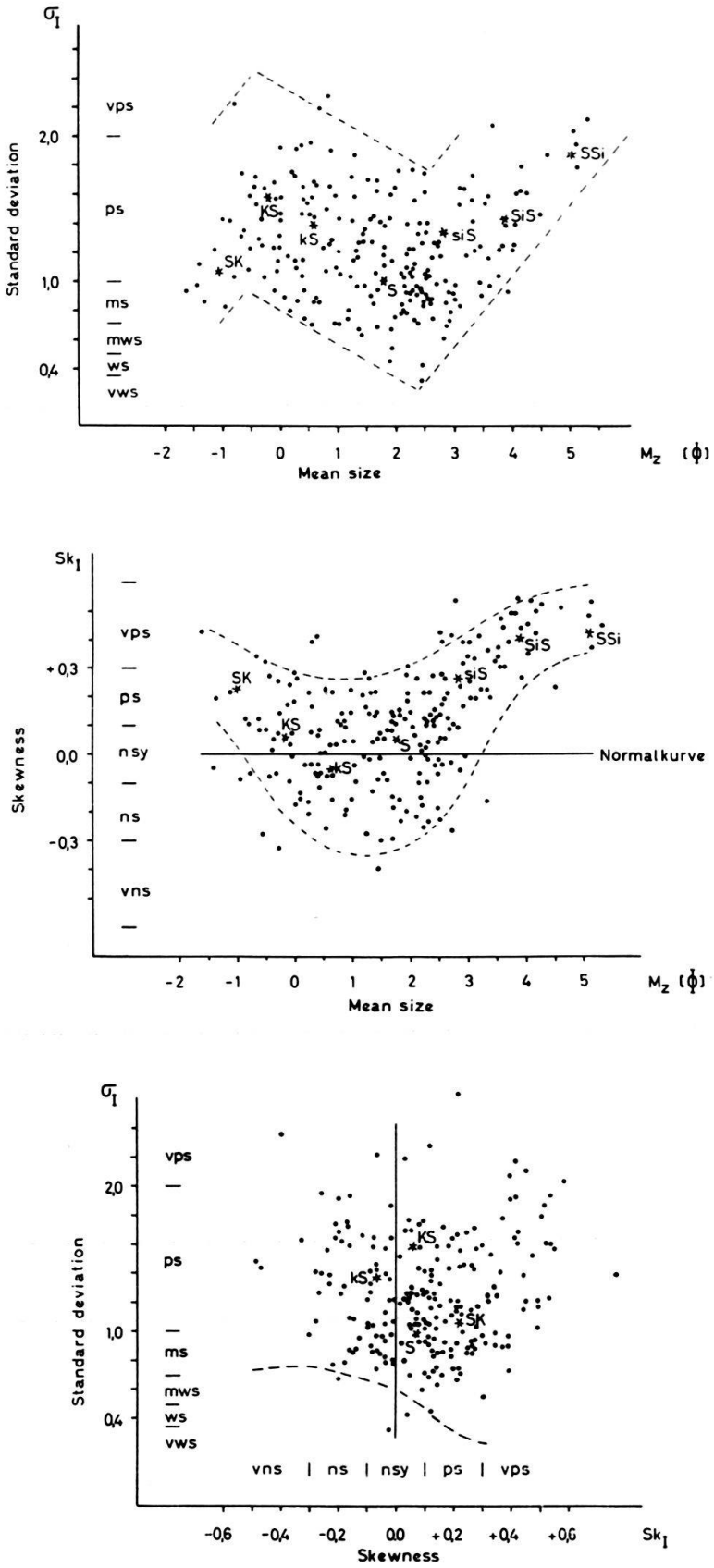

Fig. 5 Beziehungen zwischen den Parametern.

Kurtosis

Kurtosis gibt das Verhältnis von Sortierung in den Randbereichen zu Sortierung im zentralen Teil einer Kornverteilung an. Dieser Parameter ist wie der Skewness-Parameter ein Mass für die Abweichung einer Kornverteilung von der Normalität. Die Normalkurve hat den Wert $K_G = 1$. Die theoretische untere Grenze liegt bei $K_G = 0{,}41$, die obere nach FOLK and WARD (1957) erfahrungsgemäss bei etwa 5,00. Ein Wert $K_G > 1$ zeigt an, dass eine Verteilung im zentralen Bereich besser sortiert ist als in den Randbereichen. Wird $K_G < 1$, so ist die Sortierung in den Randbereichen besser als im zentralen Teil.

Extremwerte sind $K_G = 0{,}66$ (Probe 15 B und Probe 31) und $K_G = 2{,}59$ (Probe 7 B). Eine statistische Aufteilung nach den von FOLK and WARD (1957) gegebenen Grenzen geht aus Tabelle 5 hervor. Es ergibt sich, dass fast 80 % aller Proben Kurtosiswerte > 1 aufweisen.

In Fig. 4 ist der Verlauf der K_G-Werte rheinabwärts aufgetragen. Das Verhalten des Kurtosisparameters steht in engem Zusammenhang mit dem Siltanteil im Rheinsediment.

Die im Bodensee zur Ablagerung gelangenden Flussbettsande weisen Kurtosiswerte von $K_G = 1{,}20$–$1{,}40$ auf.

Beziehungen zwischen den Parametern

Obwohl die vier Korngrössenparameter in der Theorie geometrisch unabhängig voneinander sind, zeigen sich doch Beziehungen zwischen den einzelnen Massen, wie FOLK and WARD (1957) nachgewiesen haben. In Tabelle 6 sind die errechneten mittleren Parameterwerte für die verschiedenen Sedimenttypen zusammengefasst. Daraus geht hervor, dass sich mit abnehmender Korngrösse die Sortierungs-, Symmetrie- und Kurtosisparameter in charakteristischer Weise ändern. Diese Änderungen entsprechen ganz den Angaben von FOLK and WARD.

Tabelle 6 Mittlere Parameterwerte der verschiedenen Sedimenttypen.

	sK	SK	KS	kS	S	siS	SiS	SSi
M_Z (Φ)	−1,61	−1,03	−0,21	0,58	1,78	2,81	3,85	5,01
σ_I	0,92	1,06	1,58	1,39	1,01	1,34	1,41	1,87
Sk_I	+0,43	+0,22	+0,06	−0,07	+0,06	+0,23	+0,40	+0,41
K_G	1,17	1,08	0,97	1,04	1,17	1,46	1,25	0,78

Im weiteren wurden die einzelnen Werte von M_Z, σ_I, Sk_I und K_G in Diagrammen gegeneinander aufgetragen. Aus diesen Diagrammen sind die wichtigsten drei in Fig. 5 zusammengefasst. Die Abhängigkeit von Standard deviation σ_I und Skewness Sk_I von der mittleren Korngrösse M_Z ist trotz weiter Streuungen gut ersichtlich. Im dritten Diagramm sind Standard deviation- und Skewness-Werte gegeneinander aufgetragen. σ_I und Sk_I haben sich als ablagerungskritisch erwiesen. Dieses Diagramm

und andere wurden von FRIEDMAN (1967) dazu benutzt, Flussbett- und Strandsande auf Grund ihrer unterschiedlichen Werte zu trennen. Die Trennungslinie von FRIEDMAN ist in dieses Diagramm eingetragen. Es zeigt sich, dass diese Linie die untersuchten Flussbettsande sehr gut begrenzt. Das Feld von Strandsanden liegt jenseits dieser Linie.

TONMINERALANTEIL DER SEDIMENTE

Methodik

In siltreichen Proben wurden die teilweise recht geringen Tonfraktionen (<0,002 mm) in Atterbergzylindern abgeschlämmt. Ein Teil der gewonnenen Fraktion wurde zur röntgenographischen Untersuchung in Texturpräparate mit einem bei MÜLLER (1964b) beschriebenen Zentrifugeneinsatz in einer Laborzentrifuge weiterverarbeitet.

Die anschliessenden röntgenographischen Untersuchungen wurden mit einem registrierenden Zählrohrgoniometer der Firma Philips ausgeführt.

Im Bereich hoher d-Werte waren in allen Texturpräparaten drei starke Reflexe zu finden:

a) starker Reflex bei d = 14 Å
b) sehr starker Reflex bei d = 10 Å
c) sehr starker Reflex bei d = 7 Å

Anschliessend wurden dieselben Präparate auf quellfähige Tonminerale mit Äthylenglykol untersucht. Es ergab sich, dass keine Probe quellfähige Tonminerale enthält.

Der 14 Å-Reflex ergibt sich aus der Anwesenheit von Chloriten. Bei d = 4,7 Å wurde ein mittlerer Reflex als Chlorit (003) bestimmt. An texturfreien Präparaten trat Chlorit (060) mit d = 1,54 Å auf.

Der sehr starke 10 Å-Reflex ergibt sich aus der Anwesenheit von glimmerähnlichen Tonmineralen. Die (060)-Reflexe an texturfreien Präparaten lassen erkennen, dass sowohl trioktaedrische Tonglimmer (Biotit – Ledikit) als auch dioktaedrische (Muskovit-Illit) auftreten. Mengenmässig sind die trioktaedrischen Tonglimmer weniger häufig als die dioktaedrischen.

An texturfreien Präparaten konnte der (060)-Reflex von Kaolinit nicht ermittelt werden. Dasselbe Ergebnis erbrachte «transmission»-Aufnahmen an Texturpräparaten.

Nach der Methode von ANDREW, JACKSON and WADA (1969) wurde dann versucht, vielleicht vorhandene geringe Mengen von Kaolinit neben Chlorit nachzuweisen. Kaolinit erfährt beim Zerreiben mit Kaliumacetat (CH_3COOK) eine Gitterdehnung längs der c-Achse auf 14 Å. Anschliessendes Waschen des Tones in NH_4NO_3-Lösung verändert den Basalabstand des Kaolinitkomplexes auf 11,6 Å. Die Chlorite werden bei dieser Behandlung nicht verändert. Auch diese Untersuchungsmethode ergab an einigen Tonen des Rheins keinen Hinweis für das Vorhandensein von Kaolinit.

Im folgenden soll versucht werden, zu einer genaueren Identifizierung der Chlorite zu kommen, soweit dies bei den vorliegenden Chloritmischungen möglich ist.

Der Ersatz von Si durch Al in tetraedrischer Position und von Mg durch Fe in oktaedrischer Umgebung beeinflusst d-Werte und Intensitäten, so dass die ungefähre chemische Zusammensetzung angegeben werden kann. Der Ersatz von Si durch Al in Orthochloriten steht in direktem Zusammenhang mit den basalen Abständen. Aus den zusammenfassenden Untersuchungen von BRINDLEY (1961) ergibt sich die lineare Beziehung

$$d(001) = 14{,}55 - 0{,}29\ x$$

zwischen d(001) und dem Ersatz von Si durch Al in der vereinfachten Formel

$$(Mg_{6-x-y}Fe_yAl_x)\,(Si_{4-x}Al_x)\,O_{10}\,(OH)_8\,.$$

Die aus den eigenen Röntgenaufnahmen ermittelten d(001)-Werte ergeben bei Anwendung dieser Beziehung von BRINDLEY Werte für x zwischen 0,8 und 1,6.

Der b_0-Parameter der Chlorite wird direkt aus d(060) errechnet. Dieser ist, wie aus verschiedenen Arbeiten hervorgeht, vom Ersatz der Mg-Ionen durch Fe abhängig. SHIROZOU (1958) gibt zwischen dem b_0-Parameter und dem Fe-Gehalt folgende lineare Beziehung an:

$$b_0 = 9{,}21 + 0{,}037\ y$$

Die auf Grund der eigenen Röntgenaufnahmen errechneten b_0-Parameter zeigen Fe-Gehalte von y = 0,1–1,8 an.

Nach der Chloritklassifikation von HEY (1954) entsprechen den aufgefundenen Werten von x und y Chlorite der Klinochlor–Grochauit-Reihe und der Pyknochlorit–Rhipidolith-Reihe.

Auf Grund der Röntgenaufnahme der Tonfraktion von Probe 119 (Nolla) konnte ein weiteres Schichtsilikat der Natriumglimmer Paragonit nachgewiesen werden (HAHN, 1968).

Ergebnisse

In den röntgenographisch untersuchten Tonfraktionen fanden sich detritische Chlorite und glimmerähnliche Tonminerale.

Bei den Chloriten treten vorwiegend die gesteinsbildenden Arten der Mg-Chlorite und der Mg-Fe(II)-Chlorite auf. Die glimmerähnlichen Tone setzen sich aus dioktaedrischem Muskovit–Illit und trioktaedrischem Biotit-Ledikit zusammen.

Das vorliegende Tonmineralspektrum ist charakteristisch für metamorphe alpine Gesteine.

KARBONATANTEIL DER SEDIMENTE

Methodik

Der Gesamtkarbonatgehalt der Sedimente wurde mit einem Gerät nach SCHEIBLER aus der volumetrisch gemessenen CO_2-Menge bestimmt (vgl. G. MÜLLER, 1964b).

Das Verhältnis von Calcit zu Dolomit wurde röntgenographisch mit einem registrierenden Zählrohrgoniometer nach der Methode von WEBER and SMITH (1961) gemessen. Diese Methode beruht auf der Messung der relativen Intensitäten der stärksten Reflexe von Calcit und Dolomit. Mit 60prozentiger Wahrscheinlichkeit beträgt

Fig. 6 Karbonatgehalte der Einzelproben.

der Fehler $\pm 1{,}06$ Gew. % Dolomit. Zur Kontrolle der Ergebnisse wurde in einigen Proben der Ca- und der Mg-Gehalt mit einem Perkin Elmer 303 Atomic Absorption Spectrophotometer bestimmt.

Ergebnisse

Karbonatminerale

Bei der röntgenographischen Identifizierung der einzelnen Karbonatminerale konnte nur Calcit und Dolomit festgestellt werden.

Da zwischen der Lage der jeweils stärksten Reflexe von Calcit und Dolomit und dem Magnesiumeinbau eine enge Beziehung besteht (GOLDSMITH, GRAF and JOENSUU, 1955), wurde zur Ermittlung des Chemismus die genaue Lage der (104)-Reflexe bestimmt.

Es zeigte sich, dass die in den Flussanden auftretenden Calcite und Dolomite im wesentlichen stöchiometrisch zusammengesetzt sind. Hieraus folgt, dass die anstehenden alpinen Kalke und Dolomite im Einzugsbereich des Alpenrheins in ihrer Mehrheit ebenfalls stöchiometrische Zusammensetzung aufweisen.

Beziehungen zwischen Korngrösse und Karbonatgehalt

Ein Vergleich zwischen Korngrössenanalysen und Karbonatanalysen lässt erkennen, in welchem Masse die Karbonatgehalte von der Korngrössenverteilung beeinflusst werden. Dabei ergab sich, dass quantitative Veränderungen in den Karbonatgehalten durch Korngrössenunterschiede auftreten. Sie sind aber meist gering. Da die vorliegenden Proben meistens Gemische von Sedimenten verschiedener Herkunft sind, deren Mischungsgrad nicht abgeschätzt werden kann, sind generelle Aussagen über den Grad der Veränderungen kaum möglich.

Regionale Verteilung der Karbonate

In Fig. 6 ist die Karbonatverteilung der Flussande im Einzugsbereich des Alpenrheins dargestellt. Der maximale Karbonatgehalt beträgt 97,3 Gew. % (Probe 55), höchster Dolomitgehalt ist 71,0 Gew. % (Probe 32), maximaler Calcitanteil 86,7 Gew. % (Probe 55). Andererseits sind etliche Proben völlig karbonatfrei.

In Fig. 6 lassen sich beträchtliche regionale Differenzen im Ca/Do-Verhältnis und in der Gesamtkarbonatführung erkennen. Auf Grund dieser regionalen Unterschiede ist es möglich, die Sedimente des Stromgebietes in vier distributive Provinzen zu gliedern. Fig. 7 gibt einen Überblick über Lage und Abgrenzung der einzelnen Provinzen. Im folgenden sind die verschiedenen Provinzen kurz beschrieben.

Provinz I

Der Karbonatanteil der Flussbettsande dieser Provinz ist gering, er liegt immer unter 5 Gew. %. Es tritt meist nur Calcit auf. Vielfach sind die Proben völlig karbonatfrei.

Gesteine im Anstehenden sind die meist kalkfreien bis kalkarmen sauren bis basischen Eruptiva und deren metamorphe Derivate sowie Paragneise, Paraschiefer und

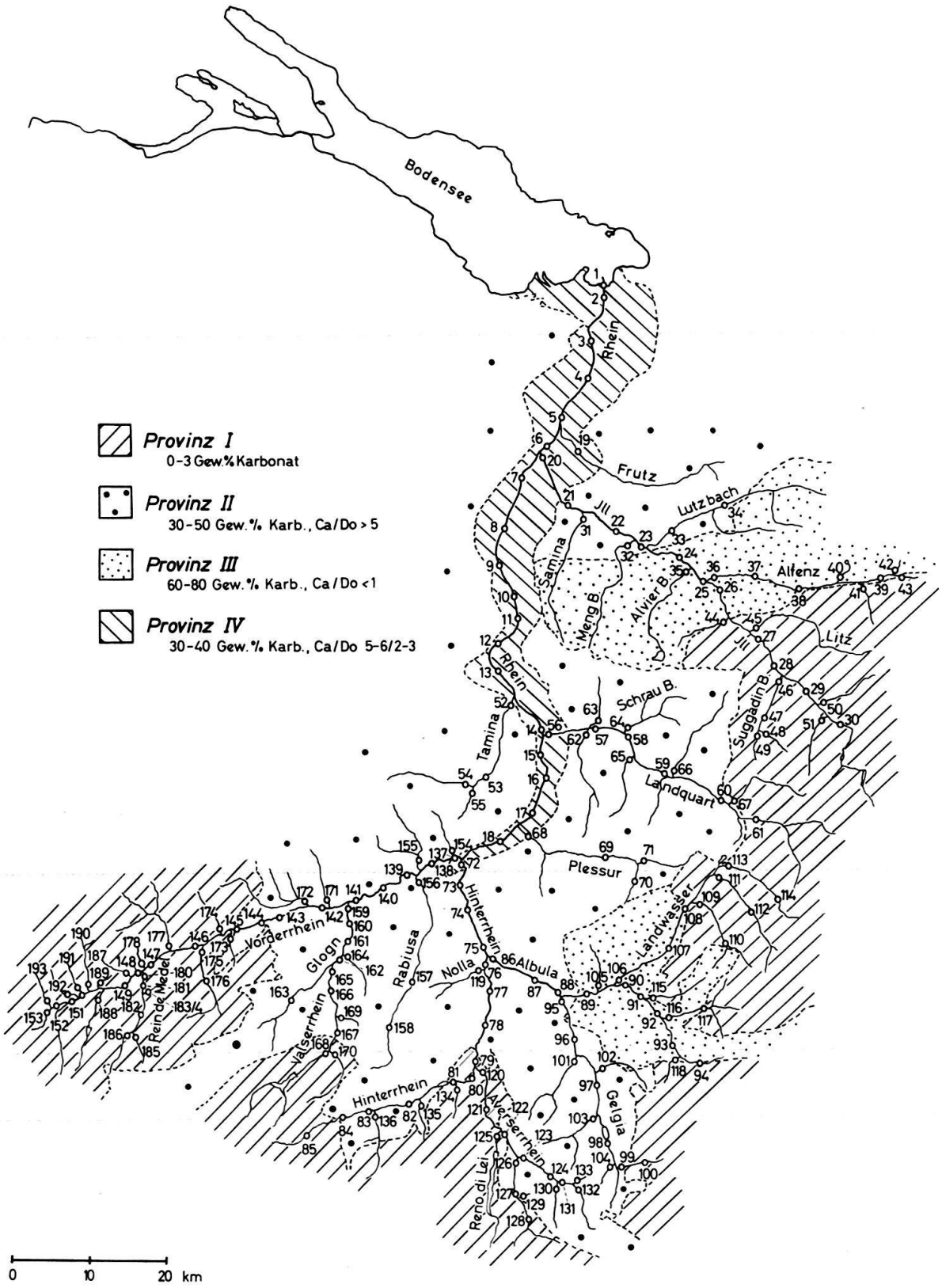

Fig. 7 Karbonatprovinzen.

Amphibolite sedimentären Ursprungs. Diese kalkarmen Gesteine bilden im wesentlichen die Umrandung des Einzugsgebietes im Westen, Süden und Osten.

Proben dieser Art wurden dem oberen Vorderrhein und seinen Zuflüssen, dem oberen Valserrhein, dem oberen Hinterrhein, dem Averserrhein, dem oberen Landwasser und der Landquart und der oberen Ill entnommen. Liefergesteine dieser Flüsse sind die kristallinen Serien der Zentralmassive und die kristallinen Deckenkerne der penninischen und der ostalpinen Decken.

Provinz II

Die Sedimente dieser distributiven Provinz zeichnen sich durch hohe Karbonatgehalte aus. Es tritt überwiegend Calcit auf, gelegentlich auch wenig Dolomit. Der mittlere Calcitgehalt beträgt 30–50 Gew. %, der Dolomitgehalt ist immer weniger als 5 Gew. %.

Im Anstehenden dieser Provinz finden sich die sedimentären, mesozoischen bis tertiären Gesteine der helvetischen und der penninischen Zone. Die mesozoisch-tertiäre Sedimentation zeichnet sich überwiegend durch mächtige jurassische und kretazische Ablagerungen vorwiegend detritisch-kalkiger Natur aus.

Flüsse, deren Material aus diesen Gebieten stammt, sind der untere Vorderrhein, Glogn, unterer Valserrhein, Rabiusa, oberer Averserrhein, unterer Hinterrhein, Nolla, untere Albula, Gelgia, Plessur, Landquart, Tamina und Frutz.

Provinz III

In dieser Provinz treten in den Flussbettsanden sowohl hohe Calcit- als auch Dolomitgehalte auf. Meist überwiegt der Dolomit. Der mittlere Calcitgehalt beträgt 10–30 Gew. %, der durchschnittliche Dolomitanteil liegt zwischen 40–70 Gew. %.

Flussande dieser Karbonatprovinz treten in den Gebieten der ostalpinen Decken auf. Die Hüllen der unter-, mittel- und oberostalpinen Decken bestehen aus mächtigen mesozoischen, vorwiegend triasischen Ablagerungen, die mit ihren Dolomit- und Kalkmassen dem mediterranen Faziesgebiet angehören.

Flüsse in diesen Gebieten sind Albula, Landwasser, obere Plessur und die Ill mit ihren Zuflüssen.

Provinz IV

Nach dem Zusammenfluss von Vorderrhein und Hinterrhein bei Reichenau verläuft der Rhein in seinem alluvialen Talboden, der Provinz IV bildet. Sie ist eine Mischprovinz der anderen Provinzen. In Fig. 8 ist die Karbonatführung des Rheins flussabwärts aufgetragen. Daraus lässt sich die Karbonatführung dieser Provinz ersehen.

Der Rhein zeigt auf seiner ganzen Länge fast konstante Gesamtkarbonatführung, im Mittel etwa 35–40 Gew. %. Das unterschiedliche Ca/Do-Verhältnis berechtigt zu einer Einteilung des Rheins in zwei Zonen. Im Oberlauf enthalten die Rheinsedimente 5–6 Gew. % Dolomit und 30–33 Gew. % Calcit. Für das Ca/Dolomit-Verhältnis ergibt sich ein Wert von 5–6. Die Zuflüsse Plessur, Landquart und Tamina sind bei Gesamtkarbonatgehalten von 40–50 Gew. % und Dolomitanteilen von weniger als 10 Gew. % ohne sichtbaren Einfluss auf die Karbonatführung des Rheins (siehe Fig. 8:

die Tamina führt zum Beispiel Flussbettsande mit etwa 34 Gew. % Calcit und 4 Gew. % Dolomit). Die Rheinproben 16 und 11 weisen korngrössenbedingt etwas höhere Gesamtkarbonatgehalte auf.

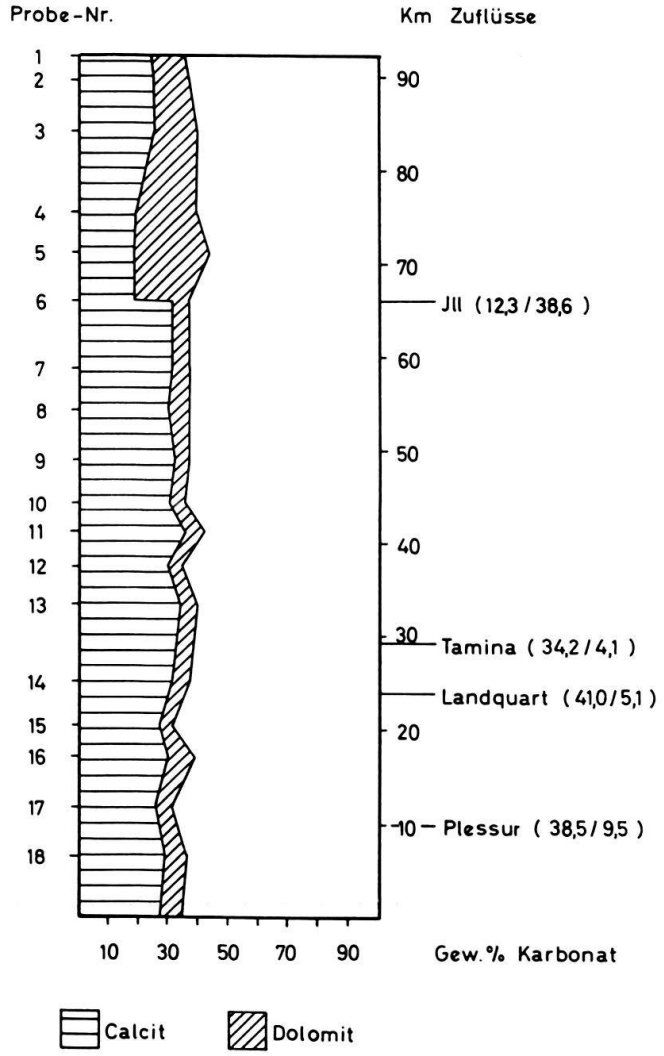

Fig. 8 Karbonatführung des Rheins.

Nach Einmündung der Ill verschiebt sich das Ca/Do-Verhältnis in den Rheinsedimenten auf etwa 2, bei gleichem Gesamtkarbonatanteil wie im Oberlauf. Die Ill führt im wesentlichen Sedimente der Provinz III. Für die Proben der Ill unmittelbar vor der Mündung ergab sich ein Gesamtkarbonatanteil von etwa 50 Gew. % bei einem Ca/Do-Verhältnis von etwa 0,3. Aus den für den Unterlauf des Rheins typischen Proben errechnen sich ein mittlerer Gesamtkarbonatwert von 39,9 Gew. % und ein Dolomitanteil von 12,9 Gew. %.

Den Bodensee erreichen Flussbettsande mit 35–40 Gew. % Gesamtkarbonatanteil bei einem Ca/Do-Verhältnis von 2–3.

Wie weiter aus Fig. 8 ersichtlich ist, ist der Einfluss der Ill auf den Rhein unmittelbar nach dem Zusammenfluss am grössten. Rheinabwärts lässt dieser nach, was am sinkenden Dolomitanteil zu ersehen ist. Sinngemäss trifft dies auch für alle anderen Zuflüsse zu.

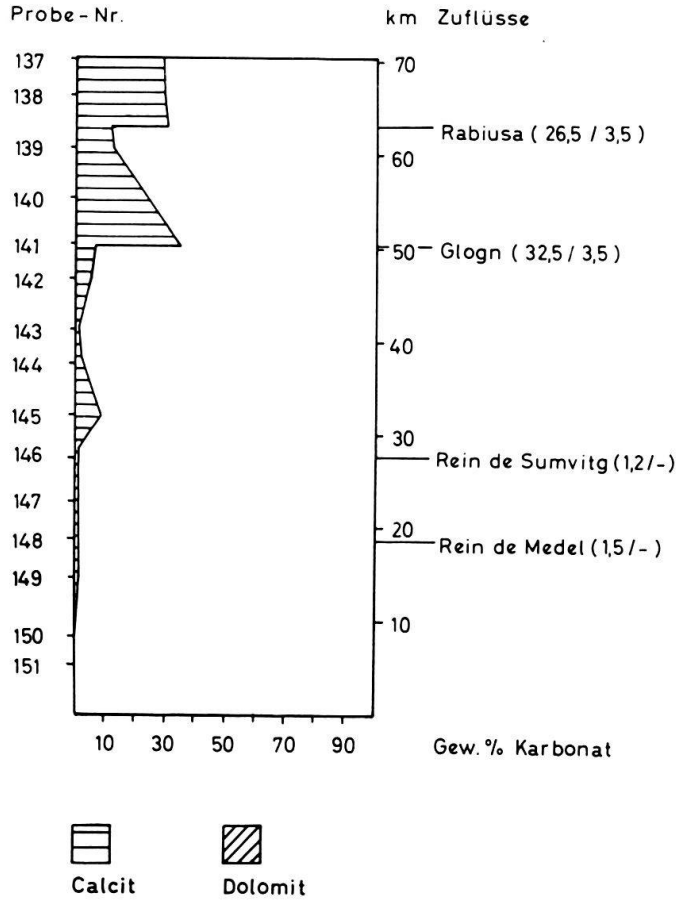

Fig. 9 Karbonatführung des Vorderrheins.

Karbonatführung wichtiger Zuflüsse

In einigen Figuren sind die Karbonatführungen von Vorderrhein, Hinterrhein und Ill flussabwärts aufgezeichnet. Diese grossen Zuflüsse sind die wichtigsten Sedimentlieferanten des Rheins.

Fig. 9 zeigt die Karbonatführung des Vorderrheins. Dieser führt in seinem Oberlauf bis zum Zufluss des Glogn Sedimente mit sehr geringem Karbonatanteil. Im Unterlauf nach dem Zufluss des Glogn treten Karbonatgehalte um 30 Gew. % auf, die flussabwärts rasch abnehmen. Durch den Zufluss der Rabiusa treten dann erneut höhere Karbonatanteile von 20–30 Gew. % auf. Im Vorderrhein konnte röntgenographisch kein Dolomit nachgewiesen werden, wohl aber in den Sanden von Glogn und Rabiusa. Wie spektrometrische Untersuchungen ergaben, enthalten Proben des unte-

ren Vorderrheins nur etwa 1–2 Gew. % Dolomit bei 25–30 Gew. % Calcit. Der Dolomitgehalt des Rheinoberlaufes dürfte also im wesentlichen vom Hinterrhein angeliefert werden.

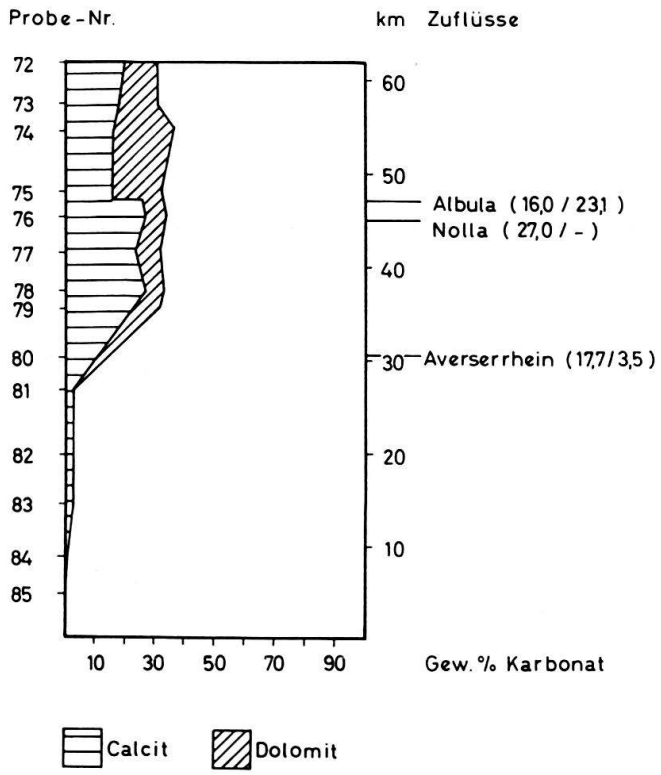

Fig. 10 Karbonatführung des Hinterrheins.

Der Hinterrhein (Fig. 10) führt im Oberlauf Flussande mit niedrigen Karbonatanteilen. Flussabwärts erfolgt dann eine Zunahme auf 30–40 Gew. %, besonders nach Einmündung des Averserrheins. Das Ca/Do-Verhältnis beträgt in diesem Abschnitt etwa 3. Im Unterlauf nach Zufluss der Albula ändert sich bei gleichbleibendem Gesamtkarbonatanteil (30–40 Gew. %) das Ca/Do-Verhältnis auf etwa 1,0. Beim Zusammenfluss mit dem Vorderrhein enthalten Hinterrheinsedimente 30–35 Gew. % Gesamtkarbonat bei einem Ca/Do-Verhältnis von 1–2. Probe 74 weist korngrössenbedingt einen etwas höheren Karbonatgehalt auf. Der Dolomitanteil des oberen Rheins wird hauptsächlich durch die Albula via Hinterrhein zugeführt.

Der bedeutendste Zufluss des unteren Rheins, die Ill in Vorarlberg, führt in seinem Oberlauf fast karbonatfreie Flussbettsande (Fig. 11). Sie durchfliesst dort die kristallinen Serien der oberostalpinen Silvrettadecke. Im Unterlauf dagegen treten karbonatreiche Sedimente auf mit Gehalten zwischen 50–60 Gew. % bei einem Ca/Do-Verhältnis von 0,3–0,4. Verantwortlich für den hohen Karbonatanteil sind die Zuflüsse der Ill und hier ganz besonders die Alfenz.

Die Karbonatführung weiterer Zuflüsse lässt sich aus den Daten der Originalarbeit ersehen.

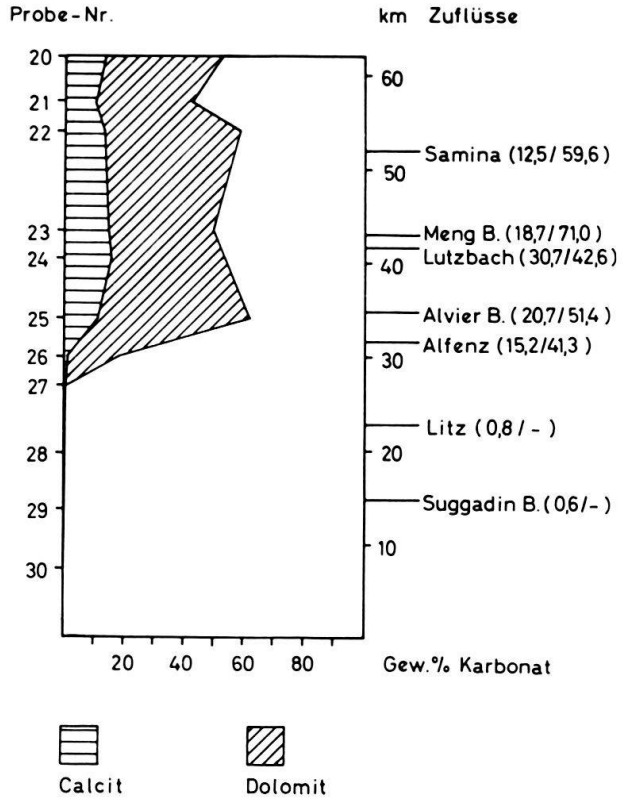

Fig. 11 Karbonatführung der Ill.

SILIKATISCHER LEICHTMINERALANTEIL DER SEDIMENTE

Qualitative Untersuchungen

Von zahlreichen Proben wurden mit einem Zählrohrgoniometer der Firma Philips Übersichtsaufnahmen hergestellt. Als Hauptbestandteile erwiesen sich – bei örtlich stark wechselnden Anteilen – Quarz, verschiedene Plagioklase und Kalifeldspate, die Glimmerminerale der Muskovit- und der Biotitgruppe und die Orthochlorite. Örtlich tritt in grösseren Mengen Serpentin auf.

Auf Grund der Angaben von SMITH and GAY (1958) liessen sich bei den Plagioklasen saure bis intermediäre Glieder der Mischkristallreihe ermitteln. Unter den Orthochloriten fanden sich die gesteinsbildenden Mg-Chlorite der Klinochlor–Grochauit-Reihe und die Mg-Fe(II)-Chlorite der Pyknochlorit–Rhipidolith-Reihe.

Nach den bekannten lichtoptischen Methoden wurde an etlichen Streupräparaten im Korngrössenbereich 0,06–0,32 mm der obengenannten Leichtmineralbestand bestätigt.

Quantitative Phasenanalysen

Die Quarz-, Plagioklas- und Kalifeldspatgehalte von sechs wichtigen Proben wurden röntgenographisch nach der Methode von von ENGELHARDT und HAUSSÜHL (1960) bestimmt. Aufnahmetechnik und Auswertungsverfahren entsprachen den Angaben

von ENGELHARDT (1955, 1959). Die untersuchten Proben wurden so ausgewählt, dass jede für ein grosses Einzugsgebiet als repräsentativ gelten kann (Tabelle 7).

Tabelle 7 Leichtmineralanteile.

Pr.-Nr.	Einzugsbereich des(r)	Quarz (Gew. %)	Plagioklas (Gew. %)	Kalifeldspat (Gew. %)	Calcit (Gew. %)	Dolomit (Gew. %)
2	Rheins gesamt	24,7	9,4	1,6	25,1	11,8
7A	Rheins ohne Ill	35,6	10,5	1,9	31,6	5,2
20A	Ill	14,8	7,5	1,0	13,4	45,3
72A	Hinterrheins	32,8	10,0	1,9	18,8	12,3
86	Albula	31,3	8,5	1,9	16,0	23,1
137A	Vorderrheins	30,7	15,8	2,3	28,1	—

Die ermittelten Werte für die verschiedenen Leichtmineralgehalte sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Zur Übersicht sind die Karbonatgehalte der einzelnen Proben beigefügt.

Die gemessenen Werte für die Quarzanteile liegen zwischen etwa 15 und 36 Gew. %. Den höchsten Quarzanteil weist die Probe des Rheins vor dem Zufluss der Ill auf mit knapp 36 Gew. %. Drei weitere Proben aus dem Vorderrhein, dem Hinterrhein und der Albula enthalten ein knappes Drittel Quarz. Die karbonatreiche Ill enthält etwa ein Siebtel Quarz.

Rheinsande, die den Bodensee erreichen, führen um 25 Gew. % Quarz.

Die Plagioklasgehalte variieren zwischen etwa 7 und 16 Gew. %. Den höchsten Plagioklasanteil weist der Vorderrheinsand auf mit 15,8 Gew. %, den niedrigsten Anteil enthält wiederum die karbonatreiche Probe der Ill.

Die Kalifeldspatgehalte aller Proben liegen unter 3 Gew. %, die kalifeldspatreichste Probe entstammt dem Vorderrhein.

Der Feldspatgehalt der in den Bodensee gelangenden Sedimente liegt bei 11 Gew. %.

Bei den untersuchten Proben zeigt sich, dass Karbonate, Quarz und Feldspäte zusammen etwa 75–80 Gew. % des Gesamtsediments ausmachen. Der Rest verteilt sich im wesentlichen auf Glimmer und Chlorite.

Nach einem Nomenklaturvorschlag von FÜCHTBAUER (1967) werden diese sieben Flussbettsande auf Grund ihres Mineralbestandes als karbonatreiche, phyllosilikathaltige und feldspatführende Sande bezeichnet.

Im folgenden sei kurz auf künstliche Bestandteile eingegangen, die sich immer wieder im Sediment finden. Häufig sind Bruchstücke von Gläsern, Ziegeln, Beton, Schlacken und industriellen Abfallstoffen zu beobachten.

An organischen Bestandteilen finden sich oft Holz-, Laub-, Chitin- und Knochenreste.

SCHWERMINERALANTEIL DER SEDIMENTE

Methodik

Zur Schwermineralanalytik sind im Laufe der Zeit verschiedene Methoden beschrieben und diskutiert worden. Für den Zeitraum bis 1950 gibt VAN ANDEL (1950) eine umfassende Zusammenstellung. Für die Zeit bis 1964 geben BLANKENBURG und JAGUSCH (1964) eine Übersicht.

Als Ausgangsmaterial zur Dichtetrennung wurde von jeder Probe eine bestimmte Menge der Korngrössenfraktion 0,063–0,32 mm verwendet. Diese Fraktion ist aus analytischen Gründen und zu Vergleichszwecken gut geeignet.

Zur Entfernung der teilweise hohen Karbonatanteile wurde das Ausgangsmaterial mit 10%iger Essigsäure bei 50 °C (zur Schonung des Apatits) behandelt. Bis zur vollständigen Karbonatlösung waren bei Proben mit hohen Dolomitanteilen 8–10 Tage nötig. Nach der Durchsicht der ersten Schwermineralpräparate zeigte es sich, dass die Bestimmung des Apatits mit Schwierigkeiten verbunden war. Alle Apatitkörner waren trübe geworden und schlecht bestimmbar. Nun wurde Hydroxil-Apatit (Fundort: Zillertal) derselben Körnung unter denselben Bedingungen behandelt. Nach 7 Tagen bereits ergab sich ein Gewichtsverlust von 18%. Apatit ist gegen warme verdünnte Essigsäure nicht beständig, auf seine Auszählung wurde deshalb verzichtet, da sich keinesfalls verlässliche Werte ergeben hätten.

Die schwere Fraktion wurde mit Tetrabromäthan (D = 2,967 g/cm³ bei 20 °C) in einer Zentrifuge abgetrennt und teilweise ausgewogen. Aus der Zusammenstellung von BLANKENBURG und JAGUSCH (1964) geht hervor, dass bei der Dichtetrennung nicht zu unterschätzende Fehler auftreten, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

Von den abgetrennten Schwermineralfraktionen wurden Streupräparate hergestellt. Einbettungsmittel war Aroclor (n = 1,665). Mit Hilfe eines Kreuzschlittens wurden nach den bekannten optischen Methoden 500 durchsichtige Mineralkörner unter dem Mikroskop bestimmt und ausgezählt. Diese Anzahl genügt für mittlere Ansprüche an die Genauigkeit (BLANKENBURG und JAGUSCH, 1964).

Ergebnisse

Durchsichtige Schwerminerale

Im Verlauf der Untersuchungen konnten etwa 25 verschiedene Schwerminerale oder Schwermineralgruppen identifiziert werden. In alphabetischer Reihenfolge sind dies:

Anatas, Andalusit, Augitgruppe (monokline Pyroxene), Chloritoid, Disthen, Enstatit-Hypersthen-Gruppe (rhombische Pyroxene), Epidot-Klinozoisit-Gruppe, Glaukophangruppe, Granatgruppe, grüne Hornblenden, aktinolithische Hornblenden, Rutil, Sillimanit, Staurolith, Titanit, Topas, Turmalingruppe, Zirkon, Zoisit.

Am häufigsten treten Minerale der Epidot- und Granatgruppe, grüne Hornblenden und die stabilen Minerale Rutil, Turmalin und Zirkon auf. Sie bilden meist die Hauptmenge der schweren Fraktionen. Weitere Minerale wie Disthen, Glaukophan, aktino-

lithische Hornblenden, Staurolith, Titanit und Zoisit finden sich weniger häufig und sind z. T. an bestimmte Gesteine gebunden. Die restlichen Schwerminerale kommen nur selten vor. Äusserst selten wurden einige weitere Minerale beobachtet, so Brookit, basaltische Hornblende, Korund, Monazit und Vesuvian.

Weitere Bestandteile der schweren Fraktionen sind nicht diagnostizierbare verwitterte Körner und opake Erze.

Insgesamt ergibt sich für das alpine Rheingebiet ein epi- bis mesozonal geprägtes Schwermineralspektrum.

Beziehungen zwischen Korngrösse und Schwermineralanteil

Die einzelnen Schwerminerale können sich je nach Grösse und Form im Primärgestein und Dichte in verschiedenen Korngrössenfraktionen anreichern. Durch einen Vergleich zwischen Mineralanalysen in einzelnen Fraktionen wurde ermittelt, in welchem Masse die Schwermineralgesellschaften von der Korngrösse beeinflusst werden. Dabei ergab sich, dass quantitative Verschiebungen im Schwermineralbestand mit wechselnder Korngrösse auftreten, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt wurden.

Regionale Verteilung der Schwermineralgesellschaften

Die Ergebnisse der einzelnen Schwermineralanalysen sind in Fig. 12 dargestellt.

Zur übersichtlichen Charakterisierung der Schwermineralfraktionen wurde aus den mengenmässig wichtigsten Mineralen eine Schwermineralgesellschaft zusammengefasst. Minerale mit Gehalten über 10 Kornzahl-% sind Hauptbestandteile der schweren Fraktion. Nebenbestandteile treten in Mengen von 3–9 Kornzahl-% auf. Die akzessorischen Bestandteile (<3%) erwiesen sich im Laufe der Untersuchungen ebenfalls als wichtig.

Zur Vereinfachung wurden die Hauptbestandteile mit grossen Buchstaben, die Nebenbestandteile mit Kleinbuchstaben bezeichnet. In der Reihenfolge der Häufigkeit erhält man so für jede Probe eine Schwermineralgesellschaft.

Im folgenden bedeuten:

G, g = Granat	Z_o, z_o = Zoisit
E, e = Epidot	T_i, t_i = Titanit
H, h = Hornblende	G_l, g_l = Glaukophan
S, s = Staurolith	A_g, a_g = Augit
D, d = Disthen	A_k, a_k = Aktinolith
R, r = Rutil	
Z, z = Zirkon	
T, t = Turmalin	

Beim Betrachten der verschiedenen Schwermineralgesellschaften fällt eine regionale Gruppierung bestimmter Gesellschaften auf. Diese lassen sich zu einer Schwermineralassoziation zusammenfassen, für die aus den Einzelgesellschaften unter Berücksichtigung korngrössenbedingter Verschiebungen eine Standardzusammensetzung ermittelt werden kann.

Distributive Provinzen

Die im vorigen Abschnitt erwähnten Schwermineralassoziationen lassen sich in sieben distributive Provinzen gliedern.

Eine Provinz kann verschiedene Assoziationen enthalten und umfasst alle Flussbettsande, die als Folge ihrer Ausgangsgesteine eine genetische und regionale Einheit bilden. Teile eines Flusses können verschiedenen Provinzen angehören. Die beschriebenen Provinzen decken sich nicht immer mit den Grenzen des Einzugsgebietes.

Die im Einzugsbereich des Alpenrheins zu unterscheidenden Provinzen und ihre charakteristischen Schwermineralassoziationen sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8 Schwermineralassoziationen der einzelnen Provinzen.

Provinz	typ. Schwermin.-Assoziationen
Helvetische Provinz	ZTR, g
Silvrettaprovinz	GS, ztd und HE, g
Vorderrheinprovinz	EG, zth
Hinterrheinprovinz	TZ, r
Rheinwaldprovinz	EGH, z; E, zgh und GE, t
Ostalpine Provinz	ZRT, g
Alpenrheinprovinz	EG, htz und EGH, stz

Die Grenzen zwischen benachbarten Provinzen sind in den Flussbettsanden nur unscharf zu erkennen. Gewöhnlich existieren Mischzonen, in denen die Minerale einer Provinz durch solche einer anderen ersetzt werden. Die Abgrenzung wurde in diesen Fällen auf Grund der petrographischen Gegebenheiten des Anstehenden festgelegt.

Die Festlegung der Assoziationen der einzelnen Provinzen wird durch den Einfluss quartärer Moränen erschwert. Zum Teil ist es unmöglich, den anstehenden Felsuntergrund allein zu erfassen, weil mehr oder weniger ausgedehnte alte Moränen meist provinzfremde Schwermineralgesellschaften liefern. Damit erklären sich alle Differenzen, die beim Vergleich der Figuren 12 und 13 auftreten. Mit der Aufklärung der Herkunft alpiner Glazialablagerungen auf Grund ihres Mineral- und insbesondere Schwermineralbestandes befassen sich u. W. nur wenige Arbeiten. Von PORTMANN (1956) liegen Untersuchungen vor, die sich mit würmeiszeitlichen Ablagerungen des Rhonegletschers befassen. In den Arbeiten von VON MOOS (1935), DEVERIN (1948) und LÜTHY,

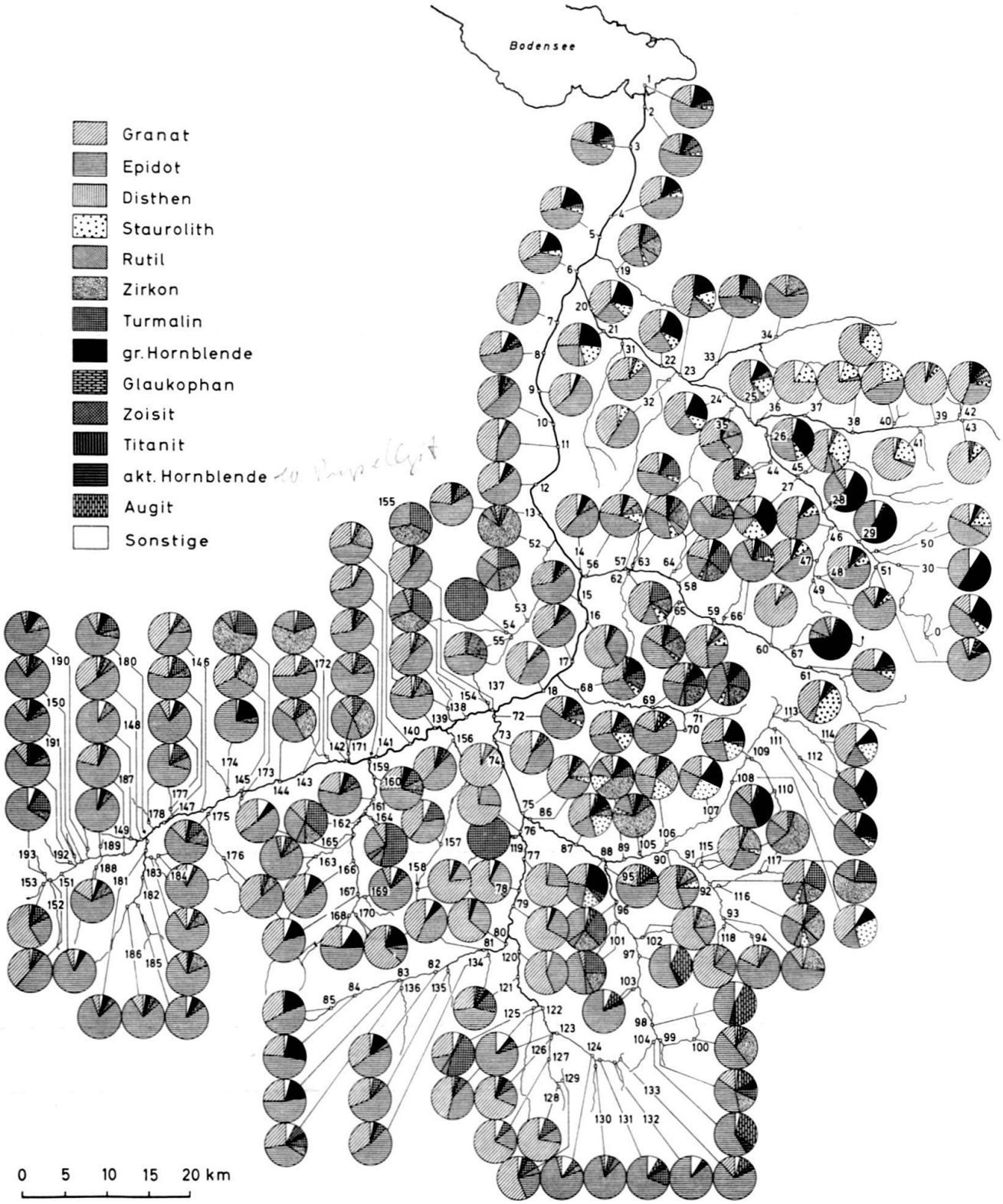

Fig. 12 Schwermineralgehalte der Einzelproben.

MATTER und NABHOLZ (1963) finden sich Hinweise auf den Schwermineralbestand alpiner Quartärablagerungen. Die Ablagerungen des Rheingletschers im Alpenvorland wurden von WEYL (1952) beschrieben.

Detaillierte sedimentpetrographische Untersuchungen an glazigenen Ablagerungen im Einzugsbereich des Alpenrheins liegen nur aus Vorarlberg von DRIESSEN-BUINING (1956), HAAGSMA (1958) und besonders von BIK (1960) vor.

Um die Herkunft der einzelnen Minerale so weit als möglich bestimmen zu können, wurden aus der Literatur petrographische Untersuchungen der Gesteine des alpinen Rheingebietes herangezogen. Die dort beschriebenen Schwerminerale wurden mit den von uns beobachteten verglichen. Dadurch liess sich die Herkunft der verschiedenen Schwerminerale annähernd bestimmen.

Im folgenden sind die einzelnen Provinzen in der in Tabelle 8 aufgeführten Reihenfolge behandelt. Fig. 13 gibt einen Überblick über Lage und Abgrenzung der einzelnen Provinzen.

Helvetische Provinz

Der nördliche und westliche Teil des Einzugsgebietes wird von den Gesteinsserien der helvetischen Decken eingenommen. Die rezenten Flussbettsande in diesen Gebieten weisen dieselben charakteristischen Schwermineralgesellschaften auf. Liefergesteine sind die sedimentären, alpin metamorphen Serien der helvetischen Zone. Die helvetische Fazies der mesozoischen Sedimentation zeichnet sich durch eine reiche Gliederung der detritisch-kalkigen Jura- und Kreideablagerungen aus. Dabei ist zu beachten, dass nur die gröberklastischen Sedimente Träger von Schwermineralen sind. Im ganzen gesehen sind die helvetischen Gesteinsserien in qualitativer und quantitativer Hinsicht ziemlich schwermineralarm. Kristalline Gesteine sind im allgemeinen varietätenreicher und weisen höhere Gehalte auf.

Die umlagerungsstabilen Minerale Zirkon, Turmalin und Rutil sind meist Hauptbestandteile der schweren Fraktionen der Flussbettsande dieser Provinz. Als Nebenbestandteil tritt oft Granat auf, akzessorisch kommt gelegentlich Anatas vor. Das Verhältnis der einzelnen Minerale zueinander kann stark wechseln bis zum völligen Fehlen einer oder mehrerer Komponenten. Am südlichen Rand dieser Provinz tritt häufiger auch etwas Chloritoid auf. Die Flussedimente dieser Provinz lassen sich also durch eine ZTR, g-Assoziation kennzeichnen.

Im folgenden soll die Herkunft der Schwerminerale erörtert werden. Die Minerale Zirkon, Turmalin und Rutil in Verbindung mit Granat stellen eine Restkombination aus den widerstandsfähigsten Schwermineralen dar, wie sie für alte Sedimente typisch ist.

Untersuchungen über den Schwermineralbestand der helvetischen Zone liegen u. W. nur spärlich vor. Aus der mittleren Kreide zwischen Rhein und Reuss beschreibt DE QUERVAIN (1931) Zirkon, Turmalin und Rutil und vereinzelt Granat und Hornblende.

Von BIK (1960) und SMIT-SIBINGA (1965) liegen Schwermineraluntersuchungen aus helvetischen Kreide- und Tertiärschichten östlich des Rheins vor. Aus ihren Auszählungen geht hervor, dass alle Kreideschichten mit Ausnahme des schwermineralfreien Seewerkalkes eine ZTR-Assoziation aufweisen, Schrattenkalk und Kieselkalk können

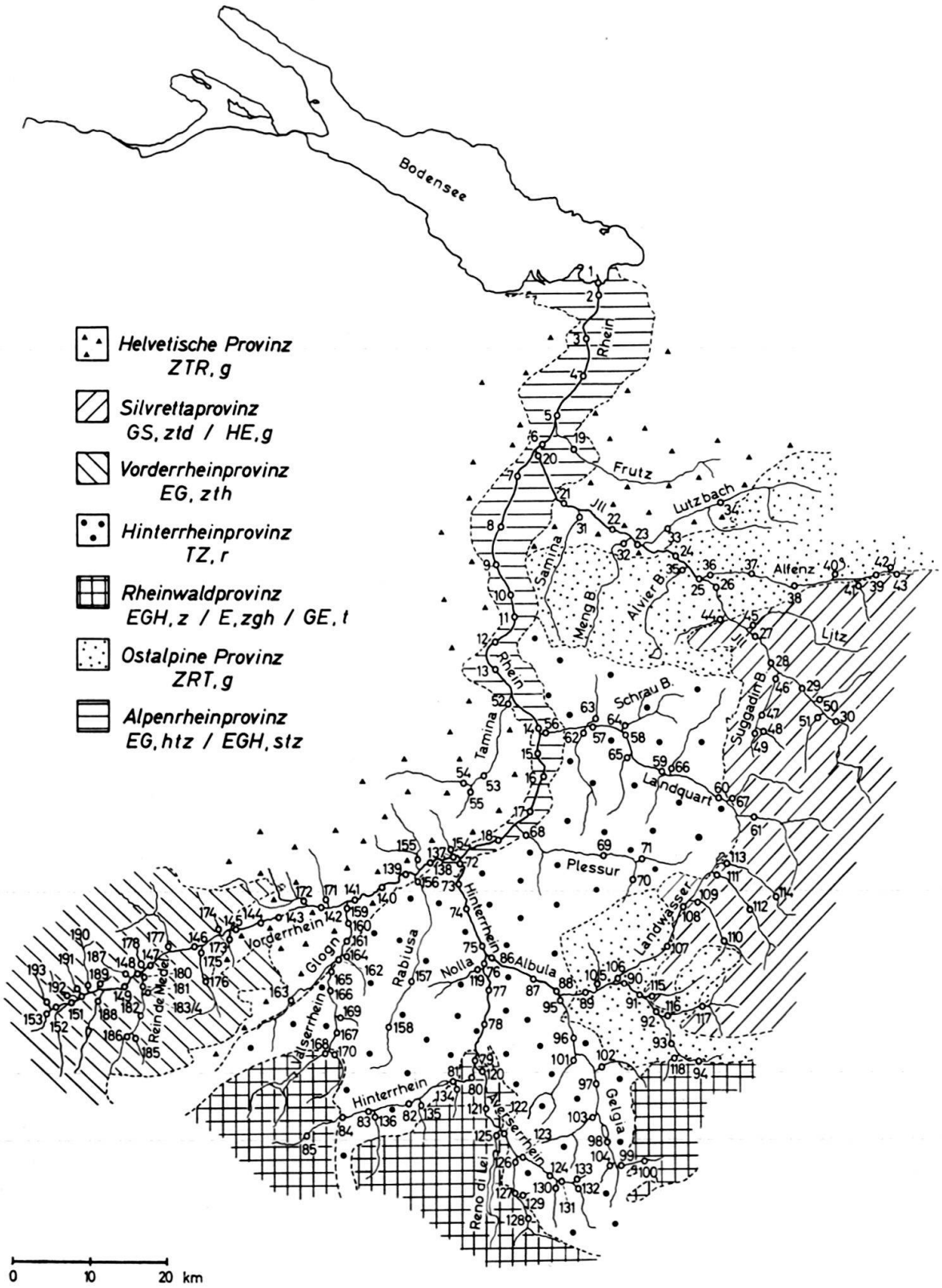

Fig. 13 Schwermineralprovinzen.

etwas Hornblende, Epidot und Staurolith enthalten, während der Flysch teilweise granatreich ist.

FÜCHTBAUER (1964), VON RAD (1964) und GRIMM (1965) beschreiben aus weiteren Helvetikum- und Flyschsedimenten dieselben Schwerminerale.

Die alpidische Metamorphose war in den mesozoisch-tertiären Sedimenten der helvetischen Zone wenig wirksam. Sie äussert sich im wesentlichen in einer Verfestigung mergelig-toniger Gesteine. Der ursprüngliche Schwermineralbestand wurde nicht durch Neubildungen bereichert. Der südliche Teil der helvetischen Zone fällt in die Stilpnomelan- und Chloritoidzone von NIGGLI und NIGGLI (1965). Diese Autoren geben die Verbreitungskarten einiger alpidisch gebildeter Minerale an (Stilpnomelan, Chloritoid, Alkaliamphibol, Staurolith, Disthen und Sillimanit). Diese Mineralzonen zeigen den Grad zunehmender Metamorphose von N nach S an.

Im Bereich der Wurzelzonen der helvetischen Decken, den massivscheidenden Mulden zwischen den Zentralmassiven, hat die alpidische Metamorphose schon deutlich konstruktiven Charakter. Als Mineralneubildung tritt hier bei bestimmtem Gesteinschemismus Chloritoid auf.

Aus den Gesteinen der Disentiser- und der Garveramulde beschreibt NIGGLI (1944) neben den stabilen Mineralen auch Chloritoid. Dieselbe Schwermineralgesellschaft fand JUNG (1963) in der mesozoischen Sedimentbedeckung des Gotthardmassives.

Aus den Gesteinen des helvetischen Ablagerungsraumes sind nach der erwähnten petrographischen Literatur die Schwerminerale Zirkon, Turmalin, Rutil, seltener auch Granat und Chloritoid zu erwarten. Die anderen in den schweren Fraktionen dieser Provinz z. T. auftretenden Schwerminerale Hornblende, Epidot und wohl auch ein Teil des Granats müssen alten Moränen entstammen.

Typisches Mineral dieser Provinz ist der Chloritoid. Er ist fast immer an die alpidisch metamorphen, tonigen Sedimente des helvetischen Mesozoikums gebunden.

Im Penninikum ist Chloritoid selten anzutreffen. Die lokalen Vorkommen von Chloritoid in der Aduladecke (VAN DER PLAS, 1959) und der Tambodecke (GANSSER 1937) gehören hierher.

Silvrettaprovinz

Im Osten und Südosten des Einzugsgebietes liegt ein Teil der grossen kristallinen Gesteinsserien der oberostalpinen Silvrettadecke. Die Oberläufe der Flüsse Ill, Landquart, Landwasser und Albula samt ihren Zuflüssen führen die charakteristischen Schwermineralassoziationen der Silvrettaprovinz.

Hauptbestandteile der schweren Fraktionen sind bei wechselnden Anteilen die Minerale Granat, Staurolith, Hornblende und Epidot. Häufig werden die Schwermineralgesellschaften HE und GS beobachtet. Als Nebenbestandteile treten zu den erstgenannten noch Zirkon, Turmalin und Disthen hinzu. Akzessorisch kommen abwechselnd Titanit, Rutil, Andalusit, Zoisit, Sillimanit, aktinolithische Hornblende, Topas, rhombische und monokline Pyroxene hinzu. Sande dieser Provinz weisen den gewichtsmässig höchsten Schwermineralanteil im Einzugsbereich auf.

Die Silvrettaprovinz lässt sich durch zwei Schwermineralassoziationen – einer GS, ztd-Assoziation und einer HE, g-Assoziation – kennzeichnen. Zwischen diesen beiden Endgliedern sind alle Mischassoziationen vertreten.

Die charakteristischen Minerale der Silvrettaprovinz sind Staurolith, Disthen, Andalusit und Sillimanit. Von wenigen Ausnahmen abgesehen sind diese Minerale nur in dieser Provinz zu finden.

Ein lokales Vorkommen von Staurolith beschreibt EUGSTER (1951) aus dem östlichen Aarmassiv. VON RAD (1964) u.a. fanden Staurolith in Kreide- und Flyschsedimenten der Vorarlberger und Allgäuer Zone. Fraglichen Disthen und Staurolith beschreibt GANSSER (1937) aus karbonischen Gesteinen am Nordrand der Tambodecke. VAN DER PLAS (1959) gibt ein Disthenvorkommen in mesozoischen Sedimenten der Aduladecke an. Nach NIGGLI (1944) findet sich ein Vorkommen von Sillimanitgneis am Nordrand des Gotthardmassives. Alle diese Vorkommen sind lokaler Art und spielen als Sedimentlieferanten keine Rolle.

Ausgangsgesteine dieser distributiven Sedimentprovinz sind die kristallinen Serien der Silvretta, die in ihrem Stoffbestand genau bekannt sind. Nach den Untersuchungen von STRECKEISEN (1928), SPAENHAUER (1932), BEARTH (1932a, 1932b) und WENK (1934) sind am Aufbau des Silvrettakristallins Paragneise, Granitgneise, Mischgneise, Amphibolite und gangförmige Diabase beteiligt.

Die Paragneise der Silvretta sind mineralreich. Die vorgenannten Autoren beschreiben aus verschiedenen Paragneisen Staurolith, Granat, Zirkon, Turmalin, Rutil, Disthen, Sillimanit und Andalusit.

Im Gegensatz dazu sind die Orthogneise mineralarm. Als wesentliches Schwermineral führen sie nur Zirkon.

Ortho- und Paragneise bilden Mischgneise, ihr Mineralbestand ist dem der unvermischten Glieder gleich.

Die mineralreichen Amphibolite treten im Silvrettakristallin in grosser Mächtigkeit auf. Aus verschiedenen Varietäten werden Hornblenden, Epidot, Rutil, Titanit, Granat, Diopsid und aktinolithische Hornblende beschrieben.

Von untergeordneter Bedeutung sind die gangförmigen Diabase. Sie führen Epidot, Hornblende, rhombische und monokline Pyroxene und braune Hornblende.

Bei diesem Überblick über den in den Silvrettagesteinen zu findenden Schwermineralbestand fällt die grosse Wichtigkeit der Paragneise und Amphibolite auf. Beide nehmen grosse Gebiete ein und sind mineralreich. Sie liefern ein meso- bis katazonal geprägtes Schwermineralspektrum. Die Paragneise und Mischgneise sind Liefergesteine der GS, ztd-Assoziation, die Amphibolite sind Ausgangsgesteine der HE, g-Assoziation. Der Einfluss der schwermineralarmen Orthogneise ist gering und äussert sich in Sedimenten dieser Gebiete durch eine Zunahme des Zirkongehaltes. Rhombische Pyroxene, die auf Diabaseinlagerungen hinweisen, treten im Sediment selten auf.

Vorderrheinprovinz

Die distributive Vorderrheinprovinz umfasst die Sedimente des oberen Vorderrheins und seiner rechten und linken Zuflüsse. Im Anstehenden finden sich die kristallinen Gesteine des Gotthardmassives, des Tavetscher Zwischenmassives und des Aarmassives.

Als Hauptbestandteile der schweren Fraktionen tritt Epidot in hohen Prozentzahlen auf. Granat ist sowohl als Haupt- wie auch als Nebenbestandteil anzutreffen. Wei-

tere typische Nebenbestandteile sind grüne Hornblende, Zirkon und Turmalin. Akzessorisch kommen Titanit, Zoisit und Rutil hinzu.

Das Mineral der Epidotgruppe ist meist ein eisenarmer Klinozoisit. Dieser entstand autometasomatisch durch Saussuritisierung von Feldspäten und ist typisch für alpidisch metamorphe Granite.

Die Schwermineralgesellschaften der linken Zuflüsse sind granatarm. Granat tritt nur als Nebenbestandteil auf. Liefergesteine sind jene des Aarmassives.

In den rechtseitigen Zuflüssen ist Granat häufiger, neben Epidot ist er meist Hauptbestandteil. Liefergesteine sind jene des Gotthardmassives.

Die Vorderrheinprovinz lässt sich durch eine EG, zth-Assoziation kennzeichnen.

Die kristallinen Gesteinsserien des Aarmassives, des Tavetscher Zwischenmassives und des Gotthardmassives sind auf ihren Mineralbestand gut untersucht.

Aus verschiedenen Paragneisen, Paraschiefern und Mischgneisen des Tavetscher Zwischenmassives beschreibt NIGGLI (1944) Epidot, Turmalin, Zirkon, Granat und Titanit. Untergeordnet treten auch Amphibolite und Grünschiefer auf mit Hornblende, Rutil und Zoisit zusätzlich.

Die Gesteine des südöstlichen Aarmassives beschreiben u.a. WEHRLI (1896), HÜGI (1941), HUBER (1948) und EUGSTER (1951). Es finden sich Granite mit Epidot und Zirkon und Syenite, Monzonite und Diorite mit Epidot, Hornblende, Zirkon, Titanit und Zoisit. Weiter treten Granitgneise mit Epidot, Titanit und Zirkon und Mischgesteinsserien mit Epidot, Zirkon, Rutil, Titanit und Zoisit auf. Darin eingelagert finden sich Amphibolite mit Hornblende, Epidot, Titanit, Zoisit und Zirkon. Etwas höher metamorphe Paragneise enthalten Epidot, Hornblende, Titanit, Zirkon, Granat, Rutil, Turmalin und wenig Staurolith und Sillimanit.

Die kristallinen Gesteine des östlichen Gotthardmassives werden in ihrem Stoffbestand von AMBÜHL (1929), WINTERHALTER (1930), HUBER (1943) und NIGGLI (1944) beschrieben. Es finden sich Granite, Granodiorite und Diorite mit Epidot, Hornblende, Turmalin, Zirkon, Rutil und Zoisit. Ferner treten Orthogneise mit Epidot, Granat, Zoisit, Zirkon, Titanit und Rutil auf. Gebietsweise finden sich Misch- und Injektionsgneise mit Epidot, Granat, Zirkon, Titanit, Hornblende, Zoisit und Rutil und Paragneise mit Granat, Epidot, Hornblende, Zoisit, Zirkon, Titanit, Rutil und lokal Sillimanit. Ferner kommen Amphibolite mit Hornblende, Epidot, Zoisit, Granat, Titanit, Zirkon und Turmalin vor, desgleichen Kalksilikatlinsen mit Granat, Diopsid, Titanit, Hornblende, Zoisit, Klinozoisit und Strahlstein.

Insgesamt liefern die Gesteinsserien der Zentralmassive ein mineralarmes Schwermineralspektrum. Es setzt sich zusammen aus den schweren Mineralen der granitischen Gesteine (Epidot, Zirkon, Titanit, Zoisit) und der etwas reicheren Gesellschaft der Amphibolite, Misch- und Paragneise (Epidot, Granat, Zirkon, Turmalin, Rutil, Hornblende, Zoisit). Örtlich tritt der Einfluss von Syeniten und Dioriten hinzu, ohne dass weitere Mineralarten auftreten.

Hinterrheinprovinz

Inmitten eines kristallinen Rahmens liegt das grosse Gebiet der penninischen Schichtfolgen. Die Flüsse Glogn, Rabiusa, Hinterrhein, Averserrhein, Albula, Gelgia, Plessur und Landquart führen die rezenten Erosionsprodukte dieser Gesteinsserien.

Ihre Sedimente weisen eine einheitliche Schwermineralführung auf und werden zur distributiven Hinterrheinprovinz zusammengefasst.

Die mengenmässig wichtigsten Bestandteile der schweren Fraktionen sind zunächst wieder die stabilen Minerale Turmalin und Zirkon mit Rutil als Nebenbestandteil und akzessorischem Granat. Diese TZ, r-Assoziation ist charakteristisch für jene Sedimente, deren Ausgangsgesteine Bündnerschiefer und penninische Flyschserien sind. Die Erosionsprodukte der südlich der Linie Lunschania–Terri gelegenen Bündnerschiefer führen neben den stabilen Mineralen zusätzlich Granat, Hornblende, Epidot, Zoisit und gelegentlich Titanit und sehr selten Chloritoid. Die alpidische Metamorphose führte in dieser Zone zu diesen Mineralneubildungen.

Gebietsweise sind den schweren Fraktionen neben viel Epidot auch abwechselnd Granat, Hornblende, aktinolithische Hornblende, Glaukophan, rhombische und monokline Pyroxene, Zoisit, Titanit und die stabilen Minerale beigemischt. Die Ausgangsgesteine dieser Mineralgesellschaften sind mesozoische Ophiolithe.

Wie die Silvrettaprovinz ist auch die Hinterrheinprovinz durch zwei Schwermineralassoziationen charakterisiert. Die TZ, r-Assoziation, die örtlich auch Granat und Epidot und einige andere Minerale als metamorphe Neubildungen enthalten kann, ist eine Restkombination der stabilen Minerale, wie sie für orogene ältere Sedimente typisch ist. Die epidotreiche Assoziation in Verbindung mit den Mineralen Glaukophan, rhombischer und monokliner Augit, Strahlstein, Vesuvian u.a. kennzeichnet die Abtragungsprodukte der Ophiolithe. Letztere ist im Gebiet des Valserrheins, der Rabiusa, des Hinterrheins, des Averserrheins, der Gelgia und der Plessur anzutreffen.

Sedimentpetrographische Untersuchungen in den penninischen Serien liegen kaum vor. Lediglich JÄCKLI (1947) hat versucht penninische Flyschserien auf Grund von Schwermineralen zu gliedern. Er fand als Schwermineralgesellschaft eine Kombination von Zirkon und Turmalin mit Rutil als Nebengemengteil und selten Granat.

Über den Mineralbestand der penninisch-mesozoischen Serien unterrichten die Arbeiten von GANSSER (1937) und NABHOLZ (1945). Aus den Gesteinen im Gebiet zwisehen Rheinwald, Valser- und Safiental beschreibt NABHOLZ nur die stabilen Minerale Zirkon, Turmalin und Rutil. Südlich der Linie Lunschania–Talkirch erscheinen unter den Bestandteilen der penninischen Schichtfolgen (Bündnerschiefer) auch metamorphe Mineralbildungen wie Granat, Epidot, Hornblende, Titanit und Zoisit. GANSSER beschreibt einige dieser Gesteine im Gebiet des Hinterrheins. VAN DER PLAS (1959) fand in derselben Zone neben den obengenannten die Minerale Aktinolith, Glaukophan, Chloritoid, Disthen und die stabilen Minerale.

Über den Mineralbestand der Ophiolithe geben die Arbeiten von CORNELIUS (1922), STAUB (1924), GANSSER (1937), NABHOLZ (1945), VUAGNAT (1948), VAN DER PLAS (1959) und PETERS (1963) Auskunft. Danach finden sich bei örtlich stark wechselnden Anteilen die Minerale Aktinolith, Epidot, Glaukophan, Granat, grüne und braune Hornblende, Olivin, rhombische und monokline Pyroxene, Rutil, Titanit, Turmalin, Vesuvian, Zirkon und Zoisit.

Glaukophan ist im Einzugsbereich von wenigen Ausnahmen abgesehen an die penninischen Ophiolithe gebunden. Er kann als typisches Mineral dieser Provinz angesehen werden. Ausnahmen sind die Glaukophanvorkommen in prätriadischen Glimmerschiefern und Amphiboliten am Nordrand der Aduladecke.

Wie in der Helvetischen Provinz ist auch in der Hinterrheinprovinz der Einfluss alter Moränen beträchtlich. Besonders im Prättigau, Schanfigg und Oberhalbstein finden sich ausgedehnte Moränengebiete, die provinzfremde Schwermineralgesellschaften liefern.

Rheinwaldprovinz

Das Einzugsgebiet wird im Süden von den kristallinen Gesteinen der Aduladecke, der Tambodecke und der Surettadecke begrenzt. Im äussersten Südosten stehen die Gesteinsserien der unterostalpinen Err- und Berninadecke an.

Oberer Valserrhein, oberer Hinterrhein, Teile des Averserrheins und seiner Zuflüsse, obere Gelgia und obere Albula führen die Schwermineralassoziationen der distributiven Rheinwaldprovinz.

Hauptbestandteile der schweren Fraktionen dieser Provinz sind die Minerale Epidot und Granat in wechselnden Anteilen. Hornblende tritt als Haupt- wie auch als Nebenbestandteil auf, z.T. auch nur akzessorisch. Weitere Nebenbestandteile sind Zirkon und Turmalin. Akzessorisch treten Rutil, Titanit u.a. auf.

Die distributive Rheinwaldprovinz ist durch drei Assoziationen gekennzeichnet – eine EGH, z-Assoziation, eine GE, t-Assoziation und eine E, zgh-Assoziation. Die EGH, z-Assoziation ist für Sedimente aus kristallinen Serien der nördlichen Adula typisch, sie findet sich im oberen Valserrhein und im oberen Hinterrhein. Die E, zgh-Assoziation kennzeichnet die Ablagerungen aus kristallinen Gesteinen der unterostalpinen Err- bzw. Berninadecke. Diese Assoziation spielt nur eine geringe Rolle, da diese Gesteinsserien zum grössten Teil ausserhalb des Einzugsgebietes liegen. Sie ist in Ablagerungen der oberen Gelgia und der oberen Albula zu finden. Die GE, t-Assoziation ist charakteristisch für den Abtrag der metamorphen Gesteine der Tambo- und Surettadecke. Sie tritt im unteren Averserhein und Reno di Lei auf.

Nach den Untersuchungen von R. O. MÜLLER (1958) und VAN DER PLAS (1959) beteiligen sich am Aufbau des Adulakristallins Orthogneise, Paragneise und Amphibolite. Als Schwerminerale finden sich in Phengitgneisen Epidot, Granat, Titanit, Hornblende, Zoisit, Natriumpyroxen, Rutil und Turmalin. Paragneise enthalten Hornblende, Epidot, Granat, Rutil, Zirkon, Turmalin, Aktinolith, Zoisit, Titanit, teilweise auch Chloritoid und Glaukophan. Amphibolite sind Ausgangsgesteine für Hornblende, Epidot, Granat, Natriumpyroxen, Rutil, Titanit, Zirkon, Turmalin, Aktinolith, Turmalin, zum Teil auch Chloritoid und Glaukophan.

Die Stirnzone der Surettadecke besteht aus dem sogenannten Rofnaporphyr. GRÜNENFELDER (1956) untersuchte diesen epimetamorphen Granit- bis Quarzporphyr petrographisch und beschrieb daraus Epidot, Rutil, Titanit, Hornblende und Strahlstein. Den Kern der Surettadecke bilden sehr alte Muskovit-Granatglimmerschiefer.

Die kristallinen Gesteine am Nordrand der Tambodecke beschreibt GANSSER (1937). Er unterscheidet Alkalifeldspataugengneise mit Epidot, Titanit und Zirkon und Orthoamphibolite.

Die kristallinen Gesteinsserien der Err- und der Berninadecke beschreibt CORNELIUS (1935). Die Albula- und Juliergranite enthalten Epidot, Zirkon und Titanit. Diorite führen Epidot, monoklinen Pyroxen, Hornblende und Zirkon. Untergeordnet treten Orthogneise mit Zirkon, Epidot und selten Granat und Biotitschiefer und Paragneise mit Zirkon und Granat.

Insgesamt zeigen diese Serien mit Ausnahme der Adulagesteine ein mineralarmes Schwermineralspektrum.

Ostalpine Provinz

Teile der Albula, des Landwassers und der Ill – vor allem aber deren Zuflüsse – führen die Schwermineralassoziation der Ostalpinen Provinz. Im Anstehenden findet man die sedimentären Hüllen der ostalpinen Schubmassen. Die ostalpine Fazies der mesozoischen Sedimentation ist durch die mächtige Entwicklung der Trias gekennzeichnet.

Die Schwermineralfraktionen von Proben dieser Provinz sind wiederum durch eine Kombination der stabilen Minerale gekennzeichnet. Neben viel Zirkon sind Turmalin und Rutil Hauptbestandteile der schweren Fraktionen, als Nebenbestandteil tritt öfters Granat hinzu.

Kennzeichnende Schwermineralassoziation der Provinz ist eine ZTR, g-Assoziation.

Über den Schwermineralbestand der ostalpinen Sedimentfolgen liegen u. W. nur wenige Untersuchungen vor. WOLETZ (1963) fand in Serien der kalkalpinen unteren Oberkreide eine TZR-Gesellschaft. JERZ (1964) beschreibt aus den Raiblerschichten (Karn) der westlichen Nordalpen die Schwermineralkombination ZRT, g. Nach GRIMM (1965) kennzeichnet eine TZG-Gesellschaft die kalkalpine Trias. Darin kann der Granatgehalt stark wechseln bis zum völligen Fehlen des Minerals.

Wie in den beiden anderen Provinzen mit sedimentären, gering metamorphen Ausgangsgesteinen ist auch in der Ostalpinen Provinz der Einfluss alter Moränen besonders gross. Immer enthalten die schweren Fraktionen grössere Mengen von Epidot, Hornblende, Staurolith und auch Granat.

Alpenrheinprovinz

Nach Vereinigung von Vorderrhein und Hinterrhein bei Reichenau verläuft der Rhein in seinem alluvialen Talboden, der als Alpenrheinprovinz bezeichnet werden soll. Diese distributive Provinz ist eine Mischprovinz. Die Schwermineralassoziationen der sechs anderen Provinzen vermischen sich zu einer einzigen, deren Sedimente zuletzt im Bodensee zur Ablagerung gelangen. Es zeigt sich dabei eine deutliche Dominanz der Provinzen mit kristallinen Liefergesteinen.

Im Rheinverlauf lassen sich deutlich zwei Schwermineralassoziationen unterscheiden. In der Zone des Oberlaufes, vom Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein bis zur Einmündung der Ill, liegt in den Rheinsedimenten eine EG, htz-Assoziation vor. Epidot und Granat treten als Hauptbestandteile auf, Nebenbestandteile sind Hornblende und die stabilen Minerale Turmalin und Zirkon. Akzessorisch kommen vor Rutil, Staurolith, Zoisit, Titanit und einige zahlenmässig noch geringere (Disthen, Andalusit, Glaukophan, Chloritoid, aktinolithische Hornblende und Augit).

Die Zone des Unterlaufes, nach Einmündung der Ill, weist gegenüber der Zone des Oberlaufes einige bemerkenswerte Unterschiede auf. Die Sedimente dieser Zone führen die Schwermineralassoziation EGH, stz. Die Ablagerungen im Einzugsbereich der Ill zählen im wesentlichen zur Silvretta- und zur Ostalpinen Provinz. Vor ihrem Zusammenfluss mit dem Rhein führt die Ill Sedimente mit der Schwermineralassoziation

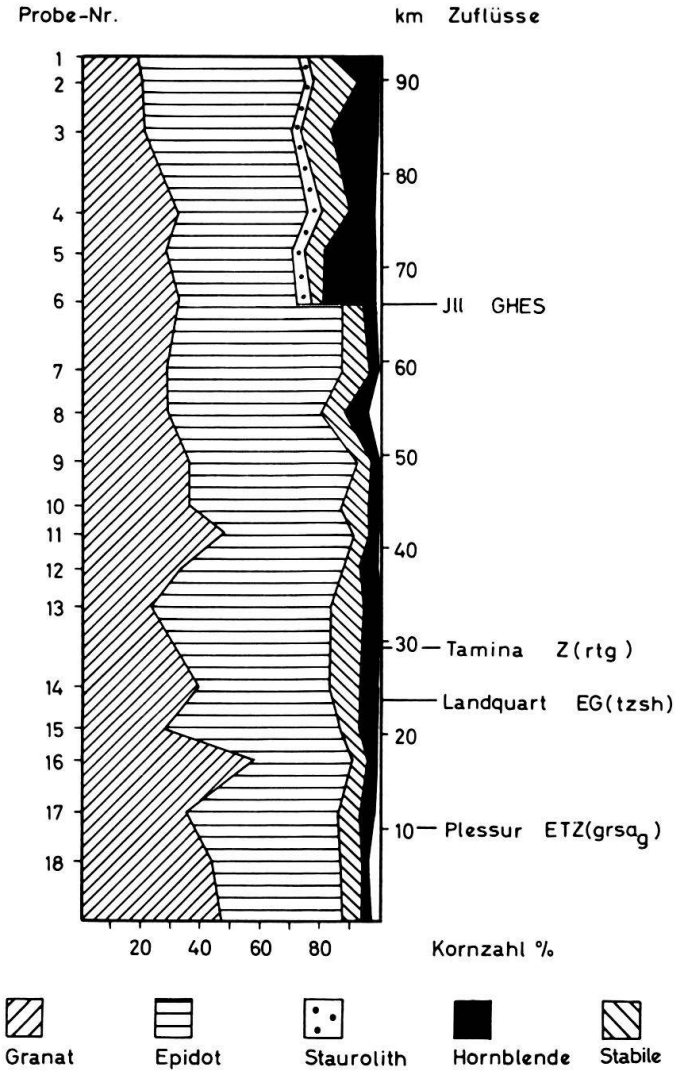

Fig. 14 Schwermineralführung des Rheins.

GHES. Nach dem Zusammenfluss vermischen sich die Assoziationen beider Flüsse – EG, htz und GHES – zu einer EGH, stz-Assoziation.

Gegenüber dem Rheinoberlauf treten im Unterlauf Zunahmen des Hornblendegehaltes auf das Doppelte bis Dreifache ein. Entsprechend werden Epidot und Granat etwas weniger. Alle drei Minerale sind Hauptbestandteile. Der Staurolithgehalt nimmt ebenfalls zu. Neben Turmalin und Zirkon ist Staurolith jetzt wesentlicher Nebenbestandteil. Unter den Akzessorien tritt Disthen nunmehr neben allen anderen Akzessorien des Oberlaufes regelmässig auf. In Fig. 14 ist die Schwermineralführung des Rheins längs des Flusslaufes wiedergegeben. Die Proben 16 und 11 weisen korngrössenbedingt etwas höhere Granatgehalte auf.

Schwermineralführung wichtiger Zuflüsse

Im folgenden soll die Schwermineralführung der wichtigsten Zuflüsse des Rheins besprochen werden.

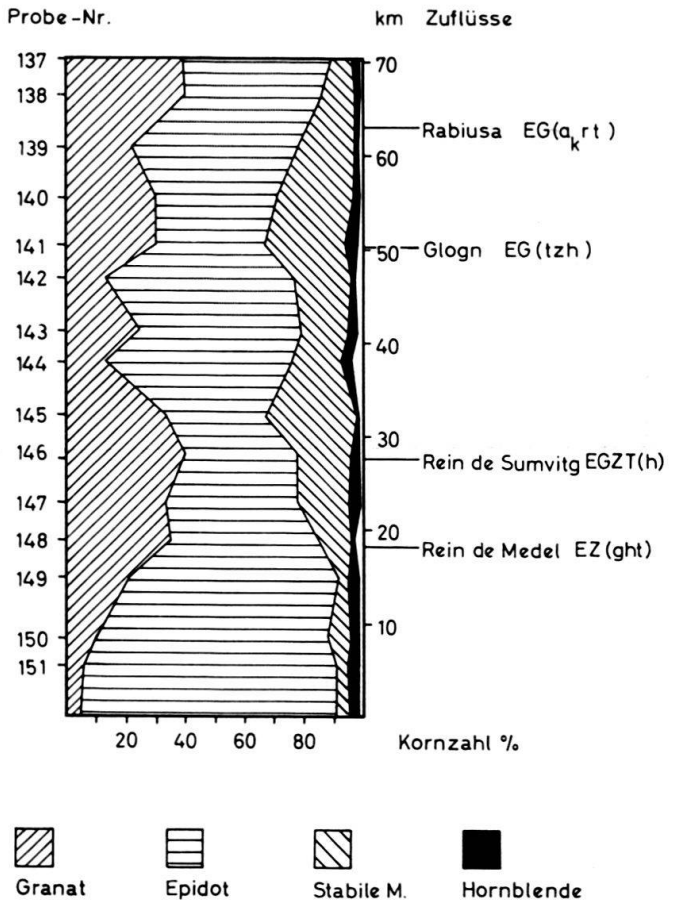

Fig. 15 Schwermineralführung des Vorderrheins.

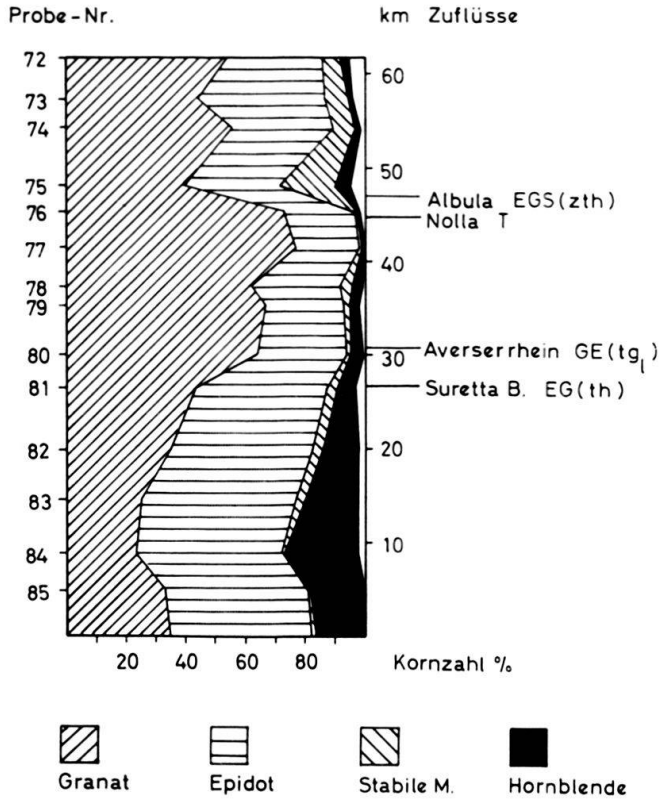

Fig. 16 Schwermineralführung des Hinterrheins.

Fig. 15 zeigt die Schwermineralführung des Vorderrheins. Daraus geht hervor, dass im Verlauf die Schwermineralführung annähernd konstant bleibt. Der Vorderrhein ist epidotreich, besonders aber fällt der grosse Anteil an stabilen Mineralen (hier besonders Zirkon) auf. Die Flussbettsande des oberen Vorderrheins zählen zur Vorderrheinprovinz, deren Epidot- und Zirkonreichtum sich aus den reichlich anstehenden Graniten erklärt. Im Vergleich zum Hinterrhein (Fig. 16) ist der Vorderrhein granatarm. Der Gehalt an Hornblende ist gering, bleibt aber nahezu konstant. Der Einfluss der Zuflüsse lässt sich am Granatgehalt und der Zunahme der stabilen Minerale beobachten.

In Fig. 16 ist die Schwermineralführung des Hinterrheins dargestellt. Der Hornblendegehalt fällt von höheren Werten im Oberlauf auf nahezu konstante Werte ab. Der Einfluss der Albula ist an der Zunahme der stabilen Minerale und der Abnahme des Granatgehaltes ersichtlich.

Fig. 17 zeigt die Schwermineralführung der Ill, des grössten Zuflusses des unteren Rheins. Durch ihren Hornblende- und Staurolithreichtum unterscheidet sie sich von allen anderen Zuflüssen des Rheins. Im Oberlauf führt die Ill Sedimente mit der HE-Assoziation der Silvrettaprovinz, die sich im Verlauf mit der GS-Assoziation der Silvrettaprovinz, die sich im Verlauf mit der GS-Assoziation der Zuflüsse Suggadin-

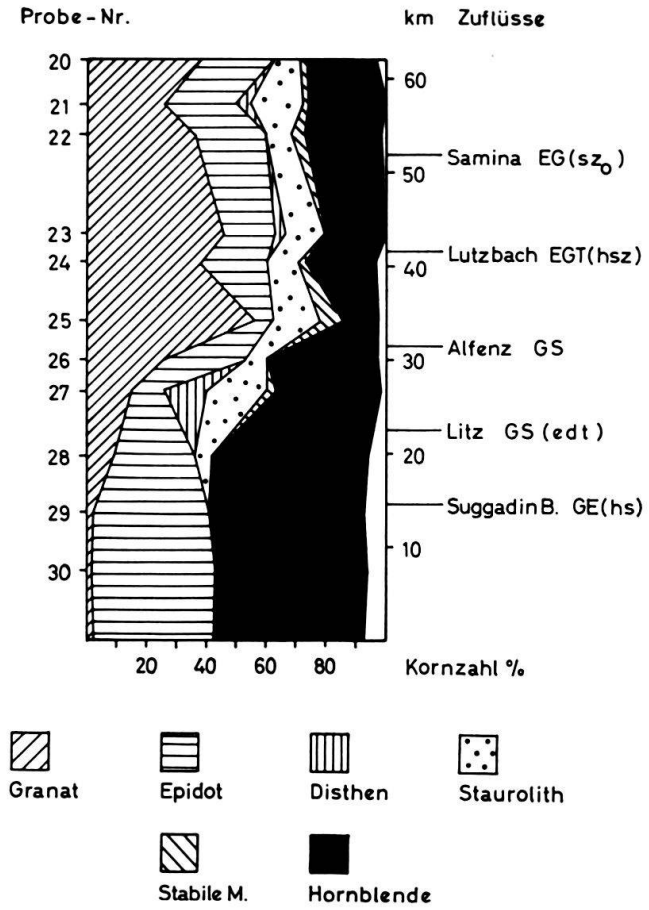

Fig. 17 Schwermineralführung der Ill.

bach, Litz und besonders der Alfenz vermischt. Die Ill beeinflusst die Flussbettsande des Rheins in starkem Masse.

Die Schwermineralführungen weiterer Zuflüsse lassen sich aus den Daten der Originalarbeit ersehen. Sie unterscheiden sich nicht wesentlich von den angeführten Beispielen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Rezente Flussbettsande im Einzugsbereich des Alpenrheins wurden qualitativ und quantitativ auf ihren Mineralbestand untersucht, um deren Einfluss auf die Sedimentbildung im Bodensee erfassen zu können. Mit Hilfe mechanischer, chemischer, optischer und röntgenographischer Methoden wurden 226 Proben aus allen Teilen des Einzugsgebietes analysiert.

A. Granulometrie

Zur Bestimmung der Korngrössenverteilungen wurden Siebanalysen angefertigt. Aus den Ergebnissen wurden die Verhältnisse Kies : Sand : Silt in den einzelnen Proben bestimmt und die Kornsummenkurven aufgezeichnet. Um die verschiedenen Proben besser vergleichen zu können, wurden mit Hilfe der Summenkurven die Korngrössenparameter M_Z, σ_I, Sk_I und K_G errechnet.

Bei den untersuchten Proben handelt es sich – wie aus einem Stoffdreieck Kies–Sand–Silt zu ersehen ist – meist um Sande, siltige Sande, kiesige Sande und Kiessande, es treten aber auch Siltsande, Sandsilte und Sandkiese auf.

Für die mittleren Korndurchmesser wurden Werte zwischen $M_Z = -1{,}61$ und $5{,}27\Phi$ ermittelt. Besonders häufig sind solche zwischen $M_Z = -1{,}0$ und $3{,}5\Phi$.

Die Werte für die Sortierung variieren zwischen $\sigma_I = 0{,}32$ (sehr gut sortiert) und $\sigma_I = 2{,}64$ (sehr schlecht sortiert). Am häufigsten sind aber solche zwischen $\sigma_I = 0{,}7$ und 1,8 (mässig bis schlecht sortiert), mehr als 90 % aller Sortierungen liegen in diesem Bereich.

Die Symmetriewerte liegen zwischen $Sk_I = -0{,}89$ und $+0{,}76$. Fast 70 % der Proben weisen positive Werte auf, d.h. ihre Verteilungen sind asymmetrisch gegen den feinen Bereich.

Die Kurtosiswerte variieren zwischen $K_G = 0{,}66$ und 2,59. Bei fast 80 % der Proben ist $K_G > 1$.

Weiter wurden die Beziehungen einzelner Parameter zueinander untersucht. Dabei bestätigten sich die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse.

Tabelle 9 Kurze Charakterisierung der rezenten Rheinschüttung

Sedimenttyp	Siltsand
Sandanteil (Gew. %)	65–75
Siltanteil (Gew. %)	25–35
Tonanteil (Gew. %)	<1
Mean size M_Z (Φ)	3,5–4,0 (0,09–0,06 mm)
Sandard deviation σ_I	1,2–1,4 (schlecht sortiert)
Skewness Sk_I	+0,3 – +0,5
Kurtosis K_G	1,2–1,4
spez. Gew. (g/cm³)	2,75
Tonminerale	di- und trioktaedrische glimmerähnliche Tonminerale und Mg-Chlorite und Mg-Fe(II)- Chlorite
Karbonatgehalt (Gew. %)	35–40
Calcit/Dolomit-Verh.	2–3
Quarz (Gew. %)	25
Plagioklase (Gew. %)	10
Kalifeldspäte (Gew. %)	<2
Benennung	karbonatreicher Feinsand mit Feldspäten und Phyllosilikaten
Schwermin.-Anteil (Gew. %)	1–2
Schwermin.-Gesellschaft	EGH, stz akzessorisch: r, d, ti usw.

B. Tonminerale

Röntgenographische Untersuchungen an Textur- und texturfreien Präparaten ergaben, dass glimmerähnliche Minerale und Chlorite die charakteristischen Tonminerale (<0,002 mm) im Einzugsgebiet sind. Bei den glimmerähnlichen Tonmineralen treten sowohl dioktaedrische Typen (Muskovit–Illit) als auch trioktaedrische Varietäten (Biotit–Ledikit) auf. Die dioktaedrischen Arten überwiegen. Die auftretenden Chlorite sind auf Grund der röntgenographischen Daten meist Mg-Chlorite und Mg-Fe(II)-Chlorite.

C. Karbonate

Der Karbonatgehalt der einzelnen Proben wurde gasometrisch und das Verhältnis von Calcit zu Dolomit röntgenographisch bestimmt. Auf Grund der Ergebnisse konnte das Einzugsgebiet in vier distributive Karbonatprovinzen gegliedert werden.

Provinz I

Der Karbonatanteil beträgt weniger als 5 Gew. %. Es tritt meist nur Calcit auf, selten Dolomit. Diese Provinz bildet die Umrandung des Einzugsbereiches im Westen, Süden und Osten. Im Anstehenden finden sich die kristallinen Gesteinsserien der Zentralmassive, der penninischen und der ostalpinen Decken.

Provinz II

Der Karbonatgehalt liegt durchschnittlich bei 30–50 Gew. %. Es tritt meist nur Calcit auf, seltener Dolomit. Das Calcit/Dolomit-Verhältnis ist hoch. Diese Provinz umfasst die Kernzone des Einzugsbereiches. Im Anstehenden findet man die sedimentären Serien der helvetischen und penninischen Schichtfolgen.

Provinz III

Der Karbonatgehalt beträgt zwischen 40 und 80 Gew. %. Der Dolomitanteil liegt zwischen 30 und 70 Gew. %, der mittlere Calcitgehalt liegt um 10–30 Gew. %. Das Calcit/Dolomit-Verhältnis ist immer <1. Im Anstehenden finden sich die Gesteine der ostalpinen Sedimentserien.

Provinz IV

Der alluviale Talboden des Rheins bildet eine sedimentäre Mischprovinz des Materials der anderen Provinzen. Es lassen sich zwei Zonen unterschiedlicher Karbonatführung erkennen. Der Gesamtkarbonatgehalt beträgt in beiden Zonen etwa 35–40 Gew. %, nur das Verhältnis von Calcit zu Dolomit ändert sich von 5–6 im Oberlauf auf 2–3 im Unterlauf. Ursache ist der Zufluss der dolomitreichen Ill, deren Sande grösstenteils der Provinz III zuzuordnen sind.

Im weiteren wurde die Karbonatführung einiger wichtiger Zuflüsse des Rheins (Vorderrhein, Hinterrhein und Ill) in Diagrammen dargestellt und der Einfluss ihrer Nebenflüsse untersucht. Alle drei führen in ihren Oberläufen karbonatarme Flusssande, flussabwärts nehmen die Karbonatanteile zu. Beim Zusammenfluss enthalten Sande des Vorderrheins 25–30 Gew. % Karbonat bei sehr geringen Dolomitanteil,

Sedimente des Hinterrheins weisen 30–35 Gew. % Karbonatanteil auf bei Calcit/Dolomit-Verhältnissen von 1–2. Die Ill führt im Unterlauf Sande mit 50–60 Gew. % Karbonat bei Calcit/Dolomit-Verhältnissen von 0,3–0,4.

Ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Korngrössenverteilung und Karbonatgehalt konnte nicht nachgewiesen werden.

Röntgenographische Untersuchungen an den auftretenden Dolomiten ergaben, dass diese stöchiometrisch zusammengesetzt sind. Daraus folgt, dass die anstehenden alpinen Dolomite in ihrer Mehrheit ebenfalls stöchiometrisch zusammengesetzt sein dürften.

D. Leichtminerale

Der silikatische Leichtmineralbestand wurde röntgenographisch und optisch ermittelt. Am Aufbau der Sande beteiligen sich Quarz, saure bis intermediäre Plagioklase, Kalifeldspäte, di- und trioktaedrische Glimmer und Mg-Chlorite und Mg-Fe(II)-Chlorite. Stellenweise findet sich reichlich Serpentin.

In sechs quantitativen Phasenanalysen wurden die Quarz-, Plagioklas- und Kalifeldspatgehalte röntgenographisch bestimmt. Jede dieser untersuchten Proben ist für ein grösseres Einzugsgebiet repräsentativ. Auf Grund ihres Mineralbestandes sind sie als feldspatführende, phyllosilikathaltige, karbonatreiche Sande zu bezeichnen.

E. Schwerminerale

Der qualitative und quantitative Schwermineralbestand der einzelnen Proben wurde ermittelt. Auf Grund der Ergebnisse kann das Einzugsgebiet in folgende sieben distributive Schwermineralprovinzen gegliedert werden, wobei sich der Einfluss provinzfremder Moränen oft sehr störend bemerkbar macht.

Helvetische Provinz

Sie ist durch eine Zirkon-Turmalin-Rutil-Schwermineralassoziation mit Granat als Nebenbestandteil gekennzeichnet (ZTR, g). Gebietsweise tritt als charakteristisches Mineral akzessorisch Chloritoid auf. Diese Assoziation ist typisch für Sande aus Tamina, dem Oberlauf der Frutz und einigen kleineren Zuflüssen von Rhein und Vorderrhein. Im Anstehenden finden sich die sedimentären Gesteine der helvetischen Zone.

Silvrettaprovinz

Sie ist durch eine Granat-Staurolith-Assoziation mit Zirkon, Turmalin und Disthen als Nebenbestandteilen (GS, ztd) und eine Hornblende-Epidot-Assoziation mit Granat (HE, g) gekennzeichnet. Beide Assoziationen sind oft miteinander vermischt. Sande dieser Art finden sich hauptsächlich in den Oberläufen von Ill, Landquart und Landwasser und deren Zuflüssen. Ausgangsgesteine sind mineralreiche Paragneise und Amphibolite des oberostalpinen Silvrettakristallins. Weitere charakteristische Minerale in den Sanden dieser Provinz sind in geringen Mengen Andalusit, Sillimanit, Topas und bestimmte Pyroxene.

Vorderrheinprovinz

Sie ist durch eine Epidot-Granat-Assoziation mit Zirkon, Turmalin und Hornblende als Nebenbestandteilen charakterisiert (EG, zth). Diese Assoziation ist kenn-

zeichnend für Sande des oberen Vorderrheins und seiner Zuflüsse. Unter den Hauptbestandteilen überwiegt Epidot sehr stark. Im Anstehenden finden sich die Gesteinsserien der Zentralmassive.

Hinterrheinprovinz

Sie ist durch eine Assoziation der stabilen Minerale Turmalin und Zirkon mit Rutil als Nebenbestandteil gekennzeichnet (TZ, r). Man findet sie in Sanden der Flüsse Rabiusa, Nolla, Gelgia, Plessur und Landquart und deren Zuflüssen. Ausgangsgesteine sind die der penninischen Schichtfolgen, die gebietsweise schon alpidisch metamorphe Mineralbildungen wie Granat, Hornblende u.a. führen. Diese Minerale finden sich auch in den Flussanden jener Gebiete, ihre Herkunft ist aber nicht eindeutig bestimmbar, da sie ausserdem alten Moränen entstammen können. In einigen Gebieten trifft man auf einige typische Minerale wie Glaukophan, monokline und rhombische Pyroxene, Aktinolith, Vesuvian u.a., die ebenfalls für diese Provinz kennzeichnend sind. Liefergesteine sind die den penninischen Schichtfolgen konkordant eingelagerten basischen Eruptiva, die alpidisch metamorphen Ophiolithe.

Rheinwaldprovinz

Sie ist durch eine Epidot-Granat-Hornblende-Assoziation mit Zirkon (EGH, z), eine Epidot-Assoziation mit Zirkon, Granat und Hornblende (E, zgh) und eine Granat-Epidot-Assoziation mit Turmalin (GE, t) charakterisiert. Sande dieser Art finden sich im oberen Valserrhein, oberen Hinterrhein, Averserrhein und deren Zuflüssen, ebenso in der oberen Gelgia und Albula. Im Anstehenden finden sich die kristallinen Serien der penninischen und der unterostalpinen Decken.

Ostalpine Provinz

Sie ist durch eine Assoziation der Minerale Zirkon, Rutil und Turmalin mit Granat als Nebenbestandteil gekennzeichnet (ZRT, g). Teile von Ill, Landwasser und Albula und deren Zuflüsse führen Sande solcher Art. Liefergesteine sind die der Schichtfolgen der ostalpinen Decken und Schubmassen.

Alpenrheinprovinz

Die Alpenrheinprovinz – der alluviale Talboden des Rheins – ist eine Mischprovinz, die vorwiegend von Sanden der Vorderrhein-, der Silvretta- und der Rheinwaldprovinz geprägt wird. Der Einfluss der anderen Provinzen ist vergleichsweise gering. Die Alpenrheinprovinz ist, bedingt durch den Zufluss der Ill, durch zwei Assoziationen charakterisiert. Eine Epidot-Granat-Assoziation mit Hornblende, Turmalin und Zirkon kennzeichnet die Zone des Oberlaufes (EG, htz). Eine Epidot-Granat-Hornblende-Assoziation mit Staurolith, Turmalin und Zirkon ist für die Zone des Unterlaufes typisch (EGH, stz). Für den rezenten Abtrag im alpinen Rheingebiet ist ein epi- bis mesozonal geprägtes Schwermineralspektrum charakteristisch.

In Diagrammen wurden die Schwermineralführungen des Vorderrheins, des Hinterrheins und der Ill dargestellt. Vorderrhein und Hinterrheinsande enthalten als wesentliche Schwerminerale Epidot, Granat, stabile Minerale und Hornblende, während die Ill neben Granat, Hornblende, Epidot und stabilen Mineralen auch Staurolith und Disthen in grösseren Mengen führt.

LITERATURVERZEICHNIS

AMBÜHL, E. (1929): *Petrographie und Geologie des zentralen Gotthardmassivs südlich Andermatt.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *9*, 265–441.

ANDEL, TJ. H. VAN (1950): *Provenance, Transport and Deposition of Rhine Sediments.* Diss. Wageningen.

– (1951): *Petrology of Durance River Sands.* Proc. 3. Internat. Congr. Sedim., Groningen-Wageningen.

ANDREW, R. W., JACKSON, M. L., and K. WADA (1960): *Intersalation as a Technique for Differentiation of Kaolinite from Chloritic Minerals by X-ray Diffraction.* Soil Sci. Soc. Amer. Proc. *24*, 422–424.

BEARTH, P. (1932a): *Die Diabasgänge der Silvretta.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *12*, 147–179.

– (1932b): *Geologie und Petrographie der Keschgruppe.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *12*, 256–279.

BIK, J. J. M. (1960): *Zur Geomorphologie und Glazialgeologie des Fröhdischbach- und Mühltobeltals in Vorarlberg (Österreich).* Publicaties van het Fysisch-Geografisch Laboratorium van de Universiteit van Amsterdam, No. 3, 175 S.

BLANKENBURG, H. J. und JAGUSCH, K. H. (1964): *Mögliche Fehler bei Schwermineraluntersuchungen.* Z. angew. Geol. *10*, 640–650.

BRINDLEY, G. W. in BROWN, G. (1961): *The X-ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals.* Mineralogical Society, London, 544 S.

BURRI, C. (1929): *Sedimentpetrographische Untersuchungen an alpinen Flussanden,* I. *Die Sande des Tessin.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *9*, 205–241.

CADISCH, J. (1953): *Geologie der Schweizer Alpen.* Wepf & Co., Verlag, Basel, 480 S.

CORNELIUS, H. P. (1922): *Über Funde von Ägirin in Graubündner Gabbrogesteinen.* Zentralbl. Miner. 499–451.

– (1935): *Geologie der Err-Julier-Gruppe.* Beitr. Geol. K. Schweiz. N.F., *70*, I.

DEVERIN, L. (1948): *Minéralogie des fonds de la tourbière des Tenasses et de quelques dépôts glaciaires du canton de Vaud.* Bull. Soc. Vaud Sc. Nat. *64*, nr. 271.

DRIESEN-BUINING, J. R. (1956): *Geomorfologisch en glaciaalgeologisch onderzoek van het Laternsertal.* Nicht veröffentlichter Geländeuntersuchungsbericht. Geol. Instituut, Univ. Amsterdam.

ENGELHARDT, W. VON (1955): *Über die Möglichkeit der quantitativen Phasenanalyse von Tonen mit Röntgenstrahlen.* Z. Krist. *106*, 430–459.

– (1959): *Möglichkeiten der quantitativen Phasenanalyse von Tonen mit Röntgenstrahlen.* Geol. För. Förh. Stockholm *81*, 374–388.

ENGELHARDT, W. VON und HAUSSÜHL, S. (1960): *Röntgenographische Phasenanalyse grobkristalliner Gesteine.* Chemie der Erde *20*, 155–161.

EUGSTER, H. P. (1951): *Petrographische Untersuchungen im Gebiete der Val Russein (Aarmassiv-Ostende).* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *31*, 1–131.

FOLK, R. L. (1966): *A review of grain size parameters.* Sedimentology *6*, 73–93.

FOLK, R. L. and W. C. WARD (1957): *Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters.* J. sedim. Petrol. *27*, 3–26.

FRIEDMAN, G. M. (1961): *Distinction Between Dune, Beach and River Sands from their Textural Characteristics.* J. sedim. Petrol. *31*, 514–529.

– (1962): *On Sorting Coefficients and Lognormality of the Grain-size Distributions of Sandstones.* J. Geol. *70*, 737–753.

– (1967): *Dynamic Processes and Statistical Parameters Compared for Size Frequency Distribution of Beach and River Sands.* J. sedim. Petrol. *37*, 327–354.

FÜCHTBAUER, H. (1964): *Sedimentpetrographische Untersuchungen in der älteren Molasse nördlich der Alpen.* Eclogae geol. Helv. *57*, 157–298.

– (1967): *Die Sandsteine in der Molasse nördlich der Alpen.* Geol. Rdsch. *56*, 266–300.

GANSSER, A. (1937): *Der Nordrand der Tambodecke.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *17*, 291–522.

GEES, R. A. (1965): *Moment Measures in Relation to the Depositional Environments of Sands.* Eclogae geol. Helv. *58*, 209–213.

GOLDSMITH, J. R., GRAF, D. L., and JOENSUU, O. I. (1955): *The Occurrence of Magnesian Calcites in Nature.* Geochim. Cosmochim. Acta *7*, 212–230.

GRIMM, W. D. (1965): *Schwermineralgesellschaften in Sandschüttungen, erläutert am Beispiel der süddeutschen Molasse.* Bayer. Akad. Wiss., math. nat. Kl., Abh. n. F., Heft 21, 135 S.

GRÜNENFELDER, M. (1956): *Petrographie des Rofnakristallins in Mittelbünden und seine Eisenvererzungen.* Beitr. Geol. Schweiz. Geotechn. Serie 35.

HAAGSMA, K. (1958): *Geomorfologische en glaciaalgeologische onderzoekingen in het Inner Walgau, Vorarlberg (Oostenrijk).* Nicht veröffentlichter Geländeuntersuchungsbericht. Geol. Instituut, Univ. Amsterdam.

HAHN, CH. (1968): *Paragonit im Nollatonschiefer (Graubünden).* Naturwissenschaften (im Druck).

HEY, M. H. (1954): *New review of chlorites.* Miner. Mag. *30*, 277–292.

HOFMANN, F. (1966): *Vergleichende sedimentpetrographische Untersuchungen im Südtessin.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *46*, 97–110.

HUBER, H. M. (1943): *Physiographie und Genesis der Gesteine im südöstlichen Gotthardmassiv.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *23*, 72–260.

HÜGI, TH. (1941): *Zur Petrographie des östlichen Aarmassivs und des Kristallins von Tamins.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *21*, 1–120.

JÄCKLI, H. (1947): *Paläogeographische Studien im tiefpenninischen Flysch des Domleschg und des Schams.* Eclogae geol. Helv. *39*, 109–115.

– (1957): *Gegenwartsgeologie des bündnerischen Rheingebietes.* Beitr. Geol. Schweiz. Geotechn. Serien 36.

– (1958): *Der rezente Abtrag der Alpen im Spiegel der Vorlandsedimentation.* Eclogae geol. Helv. *51*, 354–365.

JERZ, H. (1964): *Zur Paläogeographie der Raiblerschichten in den westlichen Nordalpen.* Z. dtsch. geol. Ges. *116*, 427–439.

JUNG, W. (1963): *Die mesozoischen Sedimente am Südostrand des Gotthardmassivs (zwischen Plaun la Greina und Versam).* Eclogae geol. Helv. *56*, 653–754.

KRUMBEIN, W. C. (1934): *The Probable Error of Sampling Sediments for Mechanical Analysis.* J. sedim. Petrol. *2*, 89–124.

LÜTHY, H., MATTER, A. und NABHOLZ, K. (1963): *Sedimentologische Untersuchungen eines temporären Quartäraufschlusses bei der Neubrügg nördlich Bern.* Eclogae geol. Helv. *56*, 119–145.

MOOS, A. VON (1935): *Sedimentpetrographische Untersuchungen an Molassesandsteinen.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *15*, 169–265.

MÜLLER, A. (1938): *Die mechanische und mineralogische Konstitution der Saane-Sande.* Ber. Schweiz. Naturf. Ges. *2*, 1936/38.

MÜLLER, G. (1963): *Die rezenten Sedimente im Obersee des Bodensees.* Naturwissenschaften *50*, 350.

– (1964a): *Nicht-mineralische Abfallstoffe in den Ufersanden des Bodensees.* Umschau *1964*, 117–119.

– (1964b): *Methoden der Sedimentuntersuchung.* Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 303 S.

– (1965): *Ergebnisse einjähriger systematischer Untersuchungen über die Hydrochemie von Alpen- und Seerhein (mit Einzeluntersuchungen an weiteren Bodenseezuflüssen).* Fortschr. Wasserchemie *2*, 33–99.

– (1966a): *Die Verteilung von Eisenmonosulfid ($FeS\ n\ H_2O$) und organischer Substanz in den Bodensedimenten des Bodensees – ein Beitrag zur Frage der Eutrophierung des Bodensees.* GWF *107*, 364–368.

– (1966b): *Die Sedimentbildung im Bodensee.* Naturwissenschaften *53*, 237–247.

– (1967a): *The New Rhine Delta in Lake Constance.* in «Deltas in Their Geologic Framework», Houston Geological Society, 107–124.

– (1967b): *Beziehungen zwischen Wasserkörper, Bodensediment und Organismen im Bodensee.* Naturwissenschaften *54*, 454–466.

MÜLLER, G. und HAHN, CH. (1964): *Schwermineral- und Karbonatführung der Flussande im Einzugsbereich des Alpenrheins.* N. Jb. Miner. Mh. *12*, 371–375.

MÜLLER, G. und SCHÖTTLE, M. (1965): *Schwermineral- und Karbonatführung der Flussande im Gebiet des Bodensees.* N. Jb. Miner. Mh. *1*, 26–29.

MÜLLER, G. und TIETZ, G. (1966): *Der Phosphorgehalt der Bodenseesedimente, seine Beziehung zur Herkunft des Sedimentmaterials sowie zum Wasserkörper des Bodensees.* N. Jb. Miner. Mh. *1*, 41–62.

MÜLLER, R. O. (1958): *Petrographische Untersuchungen in der nördlichen Adula.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *38*, 403–474.

NABHOLZ, W. K. (1945): *Geologie der Bündnerschiefergebirge zwischen Rheinwald, Valser- und Safiental.* Eclogae geol. Helv. *38*, 1–209.

NIGGLI, E. (1944): *Das westliche Tavetscher Zwischenmassiv und der angrenzende Nordrand des Gotthardmassivs.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *24*, 58–301.

NIGGLI, E. und NIGGLI, C. R. (1965): *Karten der Verbreitung einiger Mineralien der alpidischen Metamorphose in der Schweizer Alpen.* Eclogae geol. Helv. *58*, 335–368.

PETERS, TJ. (1963): *Mineralogie und Petrographie des Totalpserpentins bei Davos.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *43*, 529–685.

PLAS, L. VAN DER (1959): *Petrology of the Northern Adula Region, Switzerland.* Leidse Geol. Meded. *24*, 415–602.

PORTMANN, J. P. (1956): *Pétrographie des formations glaciaires.* Diss. Neuchâtel.

QUERVAIN, F. DE (1931): *Sandsteine und Echinodermenbreccien der Gargasienstufe (mittlere Kreide) der helvetischen Kalkvoralpen.* Beitr. Geol. K. Schweiz. Geotechn. Serie, Kl. Mitt. *8*.

RAD, U. VON (1964): *Mineralbestand und Ablagerungsbedingungen der Flyschsedimente im Allgäu.* Diss. München.

SCHAFFER, F. X. (1951): *Geologie von Österreich.* 2. Aufl., Franz Deuticke, Wien, 810 S.

SCHÖTTLE, M. (1968): *Die Sedimente des Gnadensees – ein Beitrag zur Sedimentbildung im Bodensee.* Arch. Hydrobiol. (im Druck).

SHIROZOU, H. (1958): *X-ray Patterns and Cell Dimensions of Chlorites.* Miner. J. *2*, 125–145.

SMITH, J. V. and GAY, P. (1958): *The Powder Patterns and Lattice Parameters of Plagioclase Feldspars.* Miner. Mag. *31*, 744–762.

SMIT SIBINGA-LOKKER, C. (1965): *Beiträge zur Geomorphologie und Glazialgeologie des Einzugsgebietes der Dornbirner Ache.* Publicaties van het Fysisch-Geografisch Laboratorium van de Universiteit van Amsterdam, No. 7.

SPAENHAUER, F. (1932): *Geologie und Petrographie der Grialetsch-Vadret-Sursura-Gruppe.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *12*, 27–146.

STAUB, R. (1924): *Über ein neues Vorkommen von Glaukophangesteinen in Graubünden.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *4*, 361–363.

STRECKEISEN, A. (1928): *Geologie und Petrographie der Flüelagruppe (Graubünden).* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *8*, 87–239.

VUAGNET, M. (1948): *Remarques sur trois diabases en coussins de l'Oberhalbstein.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *28*, 263–273.

WAGNER, G. (1968): *Petrographische, mineralogische und chemische Untersuchungen an Sedimenten in den Deltabereichen von Argen und Schussen. Ein Beitrag zur Kenntnis der Bodenseesedimente.* Schweiz. Z. Hydrol. *30*, 75–137

WAIBEL, F. (1962): *Das Rheindelta im Bodensee.* Bericht des österreichischen Rheinbauleiters, Seegrundaufnahme 1961, 15 S.

WEBER, J. N. and SMITH, F. G. (1961): *Rapid Determination of Calcite-Dolomite Ratios in Sedimentary Rocks.* J. sedim. petrol. *31*, 130–131.

WEHRLI, L. (1896): *Das Dioritgebiet von Schlans bis Disentis.* Beitr. Geol. K. Schweiz, N. F. *6*.

WENK, E. (1934): *Beiträge zur Petrographie und Geologie des Silvrettakristallins.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *14*, 196–278.

WEYL, R. (1952): *Schwermineraluntersuchungen an eiszeitlichen Ablagerungen der Riss–Lechplatte.* Geol. Bavarica *14*, 107–123.

WINTERHALTER, R. U. (1930): *Zur Petrographie und Geologie des östlichen Gotthardmassivs.* Schweiz. miner. petrogr. Mitt. *10*, 38–116.

WOLETZ, G. (1963): *Charakteristische Abfolgen der Schwermineralgehalte in Kreide- und Alttertiär-Schichten der nördlichen Ostalpen.* Jb. Geol. Bundesanst. *106*, 89–119.

VERWENDETE KARTEN

Landeskarte der Schweiz 1:100000 (Blatt 28/33/34/38/39/43/44).
Geologische Generalkarte der Schweiz 1:200000 (Blatt 3/4/7/8).

Manuskript eingegangen am 10. September 1968