

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ

Geotechnische Serie, Lieferung 45

Herausgegeben mit Subvention der Eidgenossenschaft von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft

Die Eignung von Splitten verschiedener schweizerischer Steinbrüche für den Bau von Straßenbelägen

ANWENDUNG AUSGEWÄHLTER PRÜFMETHODEN
UND DISKUSSION DER ABHÄNGIGKEIT DER SPLITTEIGENSCHAFTEN
VON DER PETROGRAPHIE

VON
ARNOLD STAHEL

KOMMISSIONSVERLAG: KÜMMERLY & FREY, GEOGRAPHISCHER VERLAG, BERN

1968

DRUCK VON ASCHMANN & SCHELLER AG, BUCHDRUCKEREI ZUR FROSCHAU, ZÜRICH

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

An der Sitzung der Geotechnischen Kommission vom 21. Januar 1967 legte Herr dipl. ing. petr. Arnold Stahel ein Manuskript vor «Die Eignung von Splitten verschiedener schweizerischer Steinbrüche für den Bau von Straßenbelägen». Es handelt sich um eine am Lehrstuhl für Technische Petrographie an der ETH beim Unterzeichneten durchgeführte Promotionsarbeit. Als Untersuchung an heute wichtigen Gesteinen für den Straßenbau entspricht sie einem langjährigen Programmpunkt der Kommission und war ihr deshalb für die Serie der «Beiträge» besonders willkommen.

Die Kommission möchte Herrn Stahel für die gründliche Studie an dem komplexen Thema den besten Dank aussprechen. An die Kosten der Drucklegung trugen bei:

Der Zentenarfonds der Eidgenössischen Technischen Hochschule, die Stiftung der Vereinigung schweizerischer Straßenfachmänner zur Förderung der Berufsausbildung im Straßenbau und in der Straßenverkehrstechnik, die Technische Stelle Holderbank und der Autor.

Ihnen sei auch seitens der Kommission vielmals gedankt.

Ihr Dank geht auch an die im Vorwort des Verfassers genannten, die Untersuchungsarbeit unterstützenden Stellen.

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

Zürich, November 1968

Für die Schweizerische Geotechnische Kommission
Der Präsident: Prof. F. de Quervain

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde auf Anregung von Herrn Professor Dr. F. de Quervain anfangs 1964 begonnen. Ich möchte meinem verehrten Lehrer für seine Hilfe und seine Bemühungen um den Fortgang der Arbeit ganz herzlich danken.

Herrn Professor Dr. E. Dal Vesco schulde ich großen Dank für die Übernahme des Korreferates und für verschiedene Anregungen.

Herr Professor H. Grob ermöglichte die Benützung von Einrichtungen des Institutes für Straßenbau. Die Erlaubnis zur Ausführung verschiedener Untersuchungen an der EMPA in Dübendorf verdanke ich Herrn Professor E. Amstutz.

Folgende Firmen gestatteten mir in zuvorkommender Weise die Entnahme von Splitt- und Gesteinsproben in ihren Steinbrüchen:

Lägern-Kalksteinbrüche AG, Regensburg;

Basaltstein AG, Buchs SG;

Hartsteinbruch und Hartschotterwerk Weesen;

Carrières d'Arvel S.A., Villeneuve;

Otto Scerri, Bellinzona (Castione);

A. Käppeli's Söhne AG, Schwyz.

Ich möchte den leitenden Herren dieser Firmen für ihre Aufgeschlossenheit und ihrem Personal für die Hilfsbereitschaft bei der Probenahme besonders danken, wie auch der Gemeinde Zernez, in deren Steinbruch La Serra ich die Amphibolitproben entnehmen konnte.

Bei der Ausführung verschiedener Versuche konnte ich mannigfaltige Hilfe beanspruchen; so für die Polierversuche durch Herrn S. Sulger Büel, Leiter des Institutes für Straßenbau, und Herrn A. Plagge; für die Druck- und Schlagversuche durch Herrn Professor P. Haller, Leiter der Abteilung für natürliche Bausteine und künstliche Baumaterialien der EMPA, Herrn D. Schüle und Herrn H. Platter; für die Versuche mit dem Betonprüfhammer durch Herrn R. Joosting, Leiter der Abteilung für Beton und Bindemittel der EMPA und Herrn A. Maurer. Herr H. Rutishauser, mineralogisch-petrographisches Institut der Universität Bern, half mir bei der Aufbereitung einer Probe. Die Dünnschliffe wurden von Herrn E. Schärli angefertigt. Herr Chapuis beriet mich bei der Aufstellung des ALGOL-Programmes und bei der Abfassung der französischen Zusammenfassung, Fräulein Dr. M. Corlett bei der englischen. All diesen Helfern sei an dieser Stelle bestens gedankt.

An dieser Stelle möchte ich der Schweiz. Geotechnischen Kommission für die Aufnahme der Arbeit in ihre Publikationsserie danken.

Die Finanzierung der Drucklegung wurde durch namhafte Beiträge folgender Stellen ermöglicht:

- Schweiz. Geotechnische Kommission;
- Zentenarfonds der Eidgenössischen Technischen Hochschule;
- Stiftung der Vereinigung schweizerischer Straßenfachmänner (VSS) zur Förderung der Berufsausbildung im Straßenbau und in der Straßenverkehrstechnik;
- Technische Stelle Holderbank.

Es ist mir ein großes Bedürfnis meinen besten Dank dafür auszusprechen.

Handstücke, Dünnschliffe, Splitt- und Polierproben sowie eine Kopie des ALGOL-Programmes zur Berechnung von Kornformkoeffizienten sind am Institut für Kristallographie und Petrographie der ETH deponiert.

Das Problem der Beurteilung von Straßenbaugesteinen führt naturgemäß zu einer Begegnung der Betrachtungsweisen von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern, was neben fruchtbaren Ergänzungen fast ebensooft Mißverständnisse zur Folge hat. Über diesen alten Gegensatz konnte ich mich früher gelegentlich mit meinem Vater unterhalten. Seinem Gedenken möchte ich diese Arbeit deshalb widmen.

Inhaltsverzeichnis

A. Die Prüfung von Straßenbausteinen	9
I. Allgemeines	9
II. Problemstellung	10
III. Übersicht über bekannte Methoden und Untersuchungsvorschläge	11
1. Anfänge der Gesteinsprüfung bis etwa 1914.	12
2. Gesteinsprüfung nach 1918	16
3. Moderne Gesteinsprüfung	18
4. Normen	20
5. Weiterentwicklung der Gesteinsprüfung im Straßenbau	22
6. Zusammenfassung der Literaturübersicht	23
IV. Ausgeführte Untersuchungen	23
1. Petrographische Methoden	23
a) Untersuchungen im Feld	23
b) Makroskopische Beurteilung	25
c) Mikroskopische Beurteilung	26
Quantitative Bestimmung des Mineralbestandes	26
Bestimmung der Mineralkorngröße	27
Bestimmung der Kornbindung	28
Kornform und Kornrundung	28
Porosität	28
2. Praktisch-physikalische Methoden	29
a) Kornformbestimmung	29
Entwicklung der Kornformbestimmungsmethoden	30
Messen von Kornformcharakteristiken	31
Beeinflussung der Kornform	33
Vergleich verschiedener Kornformindizes	34
Darstellungsarten	37
Kornformwerte idealer Kornformen	38
Messung und Auswertung	43
b) Raumgewicht, spezifisches Gewicht, Schüttraumgewicht	44
Definitionen	44
Angewandte Bestimmungsmethoden	45
Raumgewicht des Haufenwerkes (Raummetergewicht, Schüttraumgewicht)	45
c) Druck- und Schlagversuche an Splittproben	46
d) Polierversuche	47
Allgemeines	47
Polierverhalten und Petrographie	48
Versuche mit der englischen Poliermaschine am IStETH	48
e) Die Verwendung des Schmidtschen Betonprüfhammers	49
f) Tränkversuche mit Salzlösungen	51
3. Zusammenfassung und Vergleich der Methoden	52
a) Kurze Beschreibung der einzelnen Methoden	52
b) Vergleichende Betrachtungen	53
Abkürzungen und Signaturen	54

B. Die untersuchten Gesteine	55
I. Allgemeines	55
1. Auswahlkriterien	55
2. Probenahme	55
II. Beschreibung der Gesteine	56
1. Jurakalk	56
a) Großbereich	56
b) Kleinbereich	57
c) Mikrobereich	58
2. Glaukonitsandstein	58
a) Großbereich	58
b) Kleinbereich	60
c) Mikrobereich	61
3. Kieselkalk	62
a) Großbereich	62
b) Kleinbereich	63
c) Mikrobereich	63
4. Kieselkalk des Lias der Préalpen	64
a) Großbereich	64
b) Kleinbereich	65
c) Mikrobereich	65
5. Splitt aus Flußgewinnung Castione	66
a) Großbereich	66
b) Kleinbereich	66
c) Mikrobereich	67
6. Flyschsandstein	68
a) Großbereich	68
b) Kleinbereich	68
c) Mikrobereich	69
7. Amphibolit des Silvrettakristallins	70
a) Großbereich	70
b) Kleinbereich	71
c) Mikrobereich	72
C. Versuchsergebnisse	84
I. Petrographische Methoden	84
1. Qualitätsbeurteilung nach Literaturangaben	84
2. Qualitätsbeurteilung nach petrographischen Beschreibungen	85
Jurakalk	85
Glaukonitsandstein	86
Kieselkalk der Kreide	86
Kieselkalk der Préalpen	86
Tessiner Gneise	86
Flyschsandstein	87
Amphibolit	87

II. Technisch-physikalische Methoden	88
1. Kornformbestimmung	88
a) Kornformgruppen nach ZINGG (1935) und DE QUERVAIN (1950)	89
b) Abgrenzung nach $c/a < 0,40$	91
c) Häufigkeitsverteilungen	92
d) Korngrößenverteilungen	95
e) Beurteilung von Kornformkoeffizienten	95
f) Grenzwert des Koeffizienten $1,91 \sqrt{v/a^3}$	98
g) Vergleich von $1,91 \sqrt{v/a^3}$ mit theoretischen Formen.	99
h) Kornformbeurteilung von Auge	99
i) Schlußfolgerungen	100
2. Druck- und Schlagversuche	101
3. Raumgewichtsbestimmungen an Gesteins- und Splittproben.	102
a) Gesteinsproben.	102
b) Bestimmungen an Splittproben 10/16 mm	104
4. Poliersversuche	105
a) Auswahl der Proben	105
b) Meßergebnisse und petrographische Daten	105
c) Beurteilung der Meßergebnisse	106
d) Auswertung der Meßergebnisse durch einfache Statistik	107
5. Verwendung des Betonprüfhammers.	112
6. Tränkversuche mit Salzlösungen	112
III. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Beurteilung der Gesteinsqualität	113
1. Allgemeines	113
2. Qualitätseinteilung	114
3. Qualität der untersuchten Gesteine	114
4. Anwendung von Qualitätsvorschriften	117
D. Folgerungen	118
I. Bedeutung der petrographischen Beschreibung.	118
II. Bemerkungen zu den Prüfverfahren	118
1. Einzelne Methoden	118
a) Petrographische Methoden.	118
b) Kornformbestimmung.	119
c) Festigkeit	119
d) Raumgewicht und spezifisches Gewicht des Gesteins	119
e) Schüttraumgewicht	119
f) Poliersversuche	119
g) Sulfatversuch (Tränkversuch)	119
2. Prüfverfahren in der Praxis	120
III. Die Gesteins Härte	121
E. Zusammenfassung	122
Résumé	123
Summary	124
F. Literaturverzeichnis	126

A. Die Prüfung von Straßenbaugesteinen

I. Allgemeines

Straßenbeläge bestehen zu einem großen Teil aus dem Material Gestein in verschiedenen Ausbildungsformen. Gestein fällt in Steinbrüchen und Kiesgruben als Rohstoff an und wird in Aufbereitungsanlagen zum Werkstoff verarbeitet. Die Eigenschaften von Roh- und Werkstoff möchte man kennenlernen, die Qualität ist zu beurteilen, das Verhalten im Endprodukt, im Straßenbelag, sollte erklärt werden können. Es liegt ein Problem der Materialprüfung im weitesten Sinne vor.

Die Forderungen, die an den fertigen Belag gestellt werden, liegen auf der Hand. Er soll eine große Lebensdauer haben und eine hohe Verkehrssicherheit gewährleisten. Mit Hilfe der Gesteinsprüfung sollten Gesteinsvorkommen allgemein, das zum Werkstoff veredelte Rohmaterial, Materiallieferungen und fertige Bauwerke bezüglich dieser Eigenschaften begutachtet werden. Die Festlegung von Minimalanforderungen gehört ebenfalls zu den Aufgaben der Gesteinsprüfung.

Die Aufgabe ist auf diese Weise einleuchtend umschrieben. Die Frage ist nun, wie das Problem anzugehen ist und ob die bis heute benützten Methoden genügen. STÖCKE (1938) formuliert die Aufgabe wie folgt: «Die Materialprüfung hat das Ziel, durch Feststellen der Materialkonstanten unter genau festgelegten Bedingungen von einem Baustoff ein Bild über dessen Güte zu schaffen und dem Ingenieur unter Berücksichtigung des beabsichtigten Verwendungsgebietes Unterlagen für die Brauchbarkeit des Baustoffes zu geben». Die Festlegung der Prüfbedingungen ist ohne weiteres möglich. Schwierigkeiten bietet aber der zu prüfende Stoff. Was sind Materialkonstanten bei einem Material, das meistens gerade durch seine Heterogenität gekennzeichnet ist? Materialkonstanten sind wohl bestimmbar, gelten streng genommen aber nur für das betreffende Probestück. Es ist zu entscheiden, ob die Eigenschaften einer Einzelprobe für ein ganzes Vorkommen repräsentativ sind. Der Aussagewert einer Gesteinsprüfung hängt vor allem von der Qualität der Probenahme ab.

Setzt man eine perfekte Probenahme voraus, lassen sich ohne Zweifel verschiedene Charakteristiken bestimmen. Daraus ist aber ein direkter Schluß auf das Verhalten der Gesteine im Gebrauch in den wenigsten Fällen möglich. Stöckes Formulierung mag für Stoffe mit exakt definierbaren physikalischen Eigenschaften brauchbar sein. Auch dort werden die Ziele der Materialprüfung heute nicht mehr so genau umschrieben. Nach FUETER (1965) ist zu prüfen, ob ein Material als Rohmaterial für einen Werkstoff oder direkt als Werkstoff brauchbar ist, ob seine Qualität den gestellten Anforderungen genügt und wie es sich im Laufe der Zeit am Bauwerk verhält, wobei die entsprechenden Erfahrungen für spätere Prüfungen zu verwerten sind. Die Prüfungen haben an Stichproben des fraglichen Materials zu erfolgen, ferner an Proben, die dem fertigen Bauwerk entnommen werden (Bohrkerne usw.). In Modellversuchen wären nach Möglichkeit Annahmen verschiedener Materialeigenschaften zu berücksichtigen und schließlich kann am Bauwerk selber beobachtet werden, wie sein Verhalten von Eigenschaften einzelner Materialien beeinflusst wird. Daraus geht die Unterscheidung von Stoffprüfung und Gebrauchsprüfung hervor, die etwa auch schon von STINY (1935) getroffen wurde. In Gebrauchsprüfungen versucht man die auftretenden Beanspruchungen modellartig zu reproduzieren, während die Stoffprüfung keinen besonderen Zusammenhang mit der Beanspruchung zu haben braucht. Mit Stoffprüfungen werden kleine bis kleinste Bereiche des Materials untersucht. Da der Zusammenhang mit dem Verhalten im Gebrauch schwer zu finden ist, liegt der Schwerpunkt für die Gesteinsprüfung bei den Gebrauchsprüfungen. Dazu gehört beispielsweise die Beobachtung von Versuchsstrecken. Stoffprüfungen sind wohl dort von großer Bedeutung, wo die Bildungsbedingungen eines Stoffes kontrollierbar sind, was bei Gesteinen eben nicht möglich ist. Wir müssen den Zustand eines Gesteins als gegeben hinnehmen, sind aber wohl in der Lage, die Beanspruchungen nach eigenem Ermessen zu gestalten um in dieser Hinsicht exakte Prüfbedingungen zu erhalten.

In früheren Arbeiten wurde Gestein oft noch als homogener Stoff betrachtet. Als Beispiel sei BAUSCHINGER (1873/74/75/84) erwähnt. Moderne Gebrauchsprüfungen kamen in den dreißiger Jahren auf, parallel mit der Entwicklung des modernen Straßenbaues. ZELTER (1935) hat beispielsweise die Notwendigkeit von Gebrauchsprüfungen neben Stoffprüfungen unterstrichen. Die beiden Prüfungsarten ergänzen sich selbstverständlich,

eine vertiefte Kenntnis der Gesteinseigenschaften ist auf beide Arten angewiesen. Der umfassendste Beitrag dazu stammt von HIRSCHWALD (1912), damals natürlich unter fast ausschließlicher Berücksichtigung der Beanspruchungen an Hochbauten. Er versuchte Beziehungen zwischen sämtlichen bestimmbarsten Gesteinseigenschaften und Verhalten im Bauwerk in ein Formelsystem zu zwingen.

Weitere Schwierigkeiten entspringen dem Standpunkt des Gesteinsprüfers. Der Straßenbaufachmann als Ingenieur möchte Eigenschaften und Verhalten der Gesteine in einem Formelsystem erfassen. Der Petrograph hält sich mehr an die naturwissenschaftlichen, beschreibenden Methoden, was der Heterogenität der Gesteine weniger Zwang antut. Es sind somit Beziehungen zwischen beschreibbaren Gesteinseigenschaften und Verhalten im Gebrauch zu finden. In der Gesteinsprüfung kann man so petrographische und praktisch-physikalische Methoden einander gegenüberstellen. KNIGHT (1935), STINY (1935) und viele andere Autoren haben sich mit dieser Gegenüberstellung beschäftigt und versucht, die entsprechenden Eigenschaften zueinander in Beziehung zu setzen. Verschiedene Arbeiten zeigen, daß die ohne Zweifel bestehenden Beziehungen oft nur schwer aufzudecken sind. Ein Beispiel unter vielen gibt SABINE (1954). HIRSCHWALD (1912) verwendet zur Darstellung dieser Beziehungen Güteziffern. Es wird einer petrographischen Eigenschaft eine dem Verhalten, der Qualität entsprechende Ziffer oder Note zugeordnet. Wenn dies für verschiedene petrographische Charakteristiken durchgeführt werden kann, sollte es eigentlich möglich sein, eine Qualitätsformel aufzustellen. Derartige Formeln oder Ziffern sind bis heute in brauchbarer Form noch nicht aufgestellt worden. Ohne eine weitgehende Idealisierung der Annahmen, werden derartige Systeme viel zu kompliziert. Es ist ein vernünftiger Standpunkt einzunehmen, der vor allem die Erfahrung des Straßenbaufachmannes berücksichtigt (DANTINNE, 1965). SWEET (1948) weist darauf hin, daß die Erfahrungen den Laborbefunden oft widersprechen, ohne daß dabei unseriöse Prüfmethode im Spiele wären. Die sogenannte Erfahrung muß bei der Aufstellung von Normen, die dem Praktiker dienen sollen, unbedingt berücksichtigt werden. Dazu kommt, daß in Normen geforderte Prüfverfahren möglichst einfach sein müssen (DANTINNE, 1965).

Es ist nicht verwunderlich, daß eine sehr umfangreiche Literatur zur Gesteinsprüfung besteht und daß eine enorme Vielfalt von Methoden und Vorschriften vorliegt. Die Entwicklung hat sich in verschiedenen Ländern mehr oder weniger parallel vollzogen. Es haben sich grundsätzlich gleiche Anschauungen und Verfahren durchgesetzt, Vergleiche sind im Speziellen aber in den wenigsten Fällen möglich. Eine allgemeine Übereinstimmung der Ansichten dürfte genügen, da ein internationaler Handel mit Straßenbaugesteinen nicht im Vordergrund steht und lokalgeologische Gegebenheiten von Fall zu Fall unterschiedliche Methoden erfordern.

II. Problemstellung

Man kann sich nun fragen, worin das Ziel einer vermehrten Forschung auf dem Gebiet der Gesteinsprüfung noch bestehen kann. Allgemein gesagt sollte der Stoff Gestein so beherrscht werden, daß, je nach Verwendungszweck, Minimalanforderungen an seine Eigenschaften festgelegt werden können, da Gesteine von bester Qualität nicht in beliebiger Menge zur Verfügung stehen. SACHSE (1964) weist auf diesen Punkt hin. Bis jetzt ist es eher so, daß einfach das bestmögliche Gestein verwendet wird, um keine Risiken einzugehen. Wenn die Grenze zwischen guten und schlechten Straßenbaugesteinen genauer erfaßt werden kann, dürfte das sicher seine wirtschaftlichen Auswirkungen haben. Um diesem Ziel näher zu kommen, sollten die Beziehungen zwischen Eigenschaften und Verhalten, zwischen Petrographie und Prüfergebnissen gesucht werden, immer unter dem Gesichtspunkt, daß für die Praxis nur einfache Methoden sinnvoll sind. Die Gesteinsprüfung ist vielfach auf empirische Verfahren angewiesen, die nach Möglichkeit durch einfache, messende Methoden zu ersetzen wären. Oft geht es auch nur um die genaue Definition von Begriffen. Es sei da an den Begriff der Gesteins Härte erinnert, wofür eine Definition von DE QUERVAIN (1937, 1948, 1967) vorhanden ist, der aber auch heute noch für die verschiedensten Gesteinseigenschaften herhalten muß.

Es ist festzuhalten, daß nach den bestehenden Methoden eine Gesteinsbeurteilung durchaus möglich ist, nur sind viele Verfahren auf andern Gebieten, z. B. im Eisenbahnbau, entwickelt worden (DANTINNE, 1965). Es soll deshalb untersucht werden, ob sie der auf der Straße einwirkenden Beanspruchung noch entsprechen.

Die Gebrauchsprüfungen sind zu verbessern, trotzdem muß ihre Anwendung einfach und schnell möglich sein. Hier verspricht die Anwendung petrographischer Methoden am ehesten einen Fortschritt. Dies wird in vielen Arbeiten gefordert oder versucht, es sei dazu eine kleine Auswahl aufgeführt: NIGGLI (1928), KLEIN (1928), ZELTER (1927), SHERGOLD (1947), WOOLF (1948), TEMME (1963), SACHSE (1964), DANTINNE (1965) und viele andere mehr.

Um das angedeutete Ziel erreichen zu können, müßte ein großer Aufwand an Zeit und Mitteln eingesetzt werden können. Es wären die bestehenden Methoden in vergleichbaren Versuchsserien zu überprüfen, die Beanspruchungen des Gesteins im Straßenbelag zu beobachten und neu entwickelte Prüfverfahren ihrerseits in Versuchsserien auf ihre Tauglichkeit zu untersuchen. Für die vorliegende Arbeit war deshalb zum Vorneherein eine starke Einschränkung notwendig.

Es wird zuerst eine Übersicht über die bestehende Literatur mit einer vergleichenden Diskussion der darin enthaltenen Methoden gegeben. Dann werden verschiedene praktisch durchführbare Methoden auf sieben ausgewählte Arten Schweizerischer Straßenbaugesteine angewendet, wobei auf die petrographischen Methoden besonderes Gewicht gelegt wird. Für praktisch-physikalische Methoden konnten Einrichtungen in der EMPA und am Institut für Straßenbau der ETH (IStETH) benützt werden, eigene Apparaturen standen nicht zur Verfügung. Für die petrographischen Methoden waren am Institut für Kristallographie und Petrographie der ETH (IKPETH) mehr Möglichkeiten vorhanden.

Im Belagsbau spielt die Korngrößenverteilung des Gesteinsmaterials eine große Rolle. Damit zusammenhängende Probleme mußten weggelassen werden, ebenso Fragen, die mit dem Bindemittel zu tun haben. Wir beschränkten uns somit auf die Untersuchung einer bestimmten Splittfraktion gebrochenen Gesteins.

Anhand der Versuchsergebnisse wird der Aussagewert der verwendeten Verfahren diskutiert und werden, wenn möglich, Verbesserungsvorschläge angebracht. Weiter soll bestimmt werden, ob und wie die Versuchsergebnisse der praktisch-physikalischen Methoden auf petrographisch-geologische Ursachen allenfalls gesetzmäßig zurückgeführt werden können. Daraus ist zu entscheiden, ob bestimmte praktisch-physikalische Versuche durch petrographische Bestimmungen ersetzt oder vereinfacht werden können. Schlußendlich soll versucht werden, Vorschläge zur Untersuchungsmethodik zu formulieren, Qualitätsanforderungen genauer zu umschreiben und Begriffe besser zu definieren.

III. Übersicht über bekannte Methoden und Untersuchungsvorschläge

Die vorhandene Literatur ist sehr umfangreich. Eine Besprechung, vor allem auch älterer Arbeiten, ist notwendig, weil viele heute noch benützte Verfahren und Vorschriften zum Teil schon im letzten Jahrhundert entwickelt wurden. Teilweise sind noch die Originalversionen gebräuchlich, teilweise wurden viele Modifikationen eingeführt. Viele Methoden lassen sich auf einige wenige klassische Versuche zurückführen. Es werden an dieser Stelle Arbeiten von allgemeiner Bedeutung besprochen und diskutiert. Auf spezielle Verfahren ist bei den entsprechenden Kapiteln einzugehen.

Diese Übersicht läßt sich in vier Abschnitte aufteilen. Der erste umfaßt die Zeit von den Anfängen der Gesteinsprüfung im letzten Jahrhundert bis zum Erscheinen des Werkes von HIRSCHWALD (1912): «Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung.» Straßenbaugesteine werden in dieser Zeit noch nicht besonders hervorgehoben. Eine zweite Phase beginnt nach dem Ersten Weltkrieg. Die Bausteinprüfung wird spezialisiert, man prüft Straßenbaugesteine besonders, die in Form von grobem Schotter für wassergebundene Straßen und als Pflastersteine zur Anwendung gelangen.

Die Gesteinsprüfung hat sich in den zwanziger und dreißiger Jahren den Fortschritten im Belagsbau anzupassen. Pflastersteine werden durch Schotter und Splitt abgelöst. Neben Probeblöcken werden nun auch die Eigenschaften von Gesteinshaufenwerken, von Gesteinsaggregaten geprüft. In diese Zeit fällt auch ein großer Teil der Normierung der Prüfmethoden, die Entwicklung kommt um etwa 1950 zum Abschluß. Die vierte

Phase schließlich beginnt in den fünfziger Jahren, mit dem rasch zunehmenden Straßenbauvolumen verknüpft. Es wird versucht, die Methoden zu verfeinern und abzukürzen, Normen werden revidiert, neben Fragen der Lebensdauer von Straßenbelägen spielt auch die Verkehrssicherheit eine bedeutende Rolle. Prüfmethoden für Gesteine, die als Belagsmaterial Verwendung finden, weichen stark von denjenigen ab, die für den Unterbau der Straße von Bedeutung sind, wo sich bodenmechanische Probleme ergeben.

1. Anfänge der Gesteinsprüfung bis etwa 1914

Von moderner Gesteinsprüfung kann man seit dem Aufkommen staatlicher Prüfungsanstalten im letzten Jahrhundert sprechen. Eine Zusammenstellung älterer Arbeiten gibt SWEET (1948). Er nennt Arbeiten von HIGGINS (1780) über Mörtelprobleme und von BRARD und HERICART DE THURY (1828) über die Frostbeständigkeit von Bausteinen; es handelt sich dabei um eine erste Anwendung der Sulfatprüfung!

Ein Markstein in der Geschichte der Gesteinsprüfung ist der von DEVAL (1879) in den Annales des Ponts et Chaussées beschriebene Versuch, der offenbar schon 1869 in den Lab. d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris in Gebrauch war. Es handelt sich um den heute noch in der Originalversion und in Modifikationen gebräuchlichen Devalversuch:

Apparatur: Stahlzylinder von 20 cm Durchmesser und 34 cm Höhe, mit einer Neigung von 30° auf horizontaler Achse befestigt.

Prüfgut: 44 Steinstücke der Fraktion 40–70 mm von 5000 ± 10 g Gesamtgewicht.

Prüfvorgang: 5 Stunden mit 2000 U/Stunde drehen lassen, durch 1,6-mm-Sieb am Schlusse des Versuches.

Prüfergebnis: Q = Durchgang durch 1,6-mm-Sieb (in Gramm).

Devalkoeffizient = $400/Q$.

Der Versuch ist eine typische Gebrauchsprüfung. Die Schotterstücke werden einer kombinierten Beanspruchung unterworfen, die im Wesentlichen aus einem Verschleiß durch gegenseitigen Abrieb, durch Aneinanderschlagen und Schlagen an die Zylinderwandung besteht. Von Anfang an wurden damit Straßenbaugesteine geprüft, vorerst Schotter für wassergebundene Schotterdecken. Der Vorzug des Versuches liegt im vernünftigen Verhältnis von Prüfgutmenge zu möglicher Gesteinsvariabilität, der Aussagewert ist von der Qualität der Probenahme und nicht von zufällig vorhandenen Heterogenitäten der Schotterstücke abhängig, die bei Prüfungen an Einzelstücken viel stärker ins Gewicht fallen. Damit steht eine kombinierte Schlagfestigkeits- und Abriebprüfung zur Verfügung, wobei das Gestein einer Probe unter sich bleibt. Neben der Petrographie spielen auch die Kornformen der Schotterstücke eine Rolle.

Der Devalversuch wurde 1908 als ASTM-Vorschrift akzeptiert. Variationen des Versuches betreffen die Prüfdauer und die Zusammensetzung des Prüfgutes. Später wurden dem Prüfgut einheitliche Prüfkörper in Form von Stahlkugeln beifügt; damit wurde die Schlagwirkung verstärkt. Der Los-Angeles-Test genannte Versuch wurde 1916 in den USA eingeführt. Die Stahlzylinder liegen hier horizontal, für bestimmte Kornzusammensetzungen sind genormte Stahlkugeln zu verwenden. Im Innern der Trommel sorgt eine Stahlrippe für eine Verstärkung der Schlageffekte. Als Versuchsergebnis wird ebenfalls der Durchgang durch eine bestimmte Sieböffnung gewählt.

Sehr ähnlich ist der Versuch nach Amédée Mannheim, der 1952 in die französischen Vorschriften Eingang gefunden hat. Zur Auswertung werden die Flächen unter den Siebkurven vor und nach dem Versuch miteinander verglichen. Dies ergibt einen noch besseren Ausgleich zufälliger Inhomogenitäten im Prüfgut. Die Ergebnisse dieser Versuche sind alle recht anschaulich, verschiedene Gesteinsqualitäten sind deutlich zu unterscheiden.

In einem zweiten klassischen Versuch wird das Gestein auf seine Widerstandsfähigkeit gegen Abschleifen geprüft. Die von DORRY gebaute Maschine wurde 1878 auf der Weltausstellung in Paris gezeigt. BAUSCHINGER (1884) hat diesen Versuch übernommen und verbessert:

Apparatur: Gußeiserne, horizontale Schleifscheibe von 1,5 m Durchmesser.

Prüfgut: Prismatische Probekörper vorgeschriebener Grundfläche, genormtes Schleifmittel.

Prüfvorgang: 200 Umdrehungen, bestimmter Auflagedruck.

Prüfergebnis: Volumenverlust (aus Gewichtsverlust und spez. Gewicht).

DORRY hatte noch einen gewöhnlichen Schleifstein verwendet und als Schleifmittel Sand hinzugefügt. Er hat jeweils zwei Probekörper gleichzeitig geprüft, wovon einer aus einem Normgestein bekannter Eigenschaften stammte. Es handelte sich um die erstmalige Beurteilung der Gesteinseigenschaften im Vergleich zu einem Normgestein. Die Bauschinger-Prüfung ist heute noch in den Vorschriften zu finden, wird aber selten benutzt. Veränderungen betreffen Größe der Schleifscheibe, Drehzahl, Drehgeschwindigkeit, Schleifmittelszusammensetzung, Form der Prüfkörper usw. Die Beanspruchung ist viel spezieller als beim Devalversuch, wenn es sich auch noch um eine Gebrauchsprüfung handelt. Nach BAUSCHINGER soll die Abnützbarkeit mit zunehmender Druckfestigkeit abnehmen, doch dürfte diese Beziehung kaum allen Einflüssen gerecht werden.

GARY (1904) beschäftigte sich eingehend mit der Abnutzungsprüfung im Sandstrahlgebläse. Der Versuch hat sich seither kaum mehr verändert. Das Ergebnis ist von Sandkörnung, Druck, Düsenöffnung, Aufprallfläche und Versuchsdauer abhängig. GARY hat Zusammenhänge zwischen Gewichtsverlust und Druckfestigkeit nicht feststellen können, er hat eher einen Einfluß der Porosität postuliert. Er stellte ferner fest, daß bei nicht erheblich verfestigten Sedimentgesteinen Unterschiede besser herauskamen als bei sogenannten Hartgesteinen. Man trifft diese Tatsache oft auch bei vielen andern Versuchen an.

An den Anfang der Gesteinsprüfung gehört die Bestimmung der mechanischen Gesteinseigenschaften, die an allen Prüfanstalten mit dem Vorhandensein der entsprechenden Einrichtungen einsetzte. Am eingehendsten hat sich wohl BAUSCHINGER (1873, 1874, 1875, 1884) an der polytechnischen Schule in München damit beschäftigt. Er prüfte hauptsächlich an Gesteinswürfeln die Druckfestigkeit, die Bruchfestigkeit bei Übertragung der Druckkraft über eine Würfelkante, die Schubfestigkeit durch eine abscherende Krafteinwirkung, die Zugfestigkeit, das Biegungsverhalten. Ferner konstatiert er eine Festigkeitsabnahme nach Frosteinwirkung auf das Gestein. Er versucht das elastische und plastische Verhalten der Gesteine zu charakterisieren. Bauschinger berücksichtigt als einzige Inhomogenitäten Schichtungs- und Schieferungsflächen. In diesem Sinne betrachtet er Gesteine als homogene, anisotrope Stoffe. Die Probestücke werden nach spezifischem Gewicht, Korngröße der Komponenten und Farbe charakterisiert. Zusammenhänge zwischen petrographischen und mechanischen Eigenschaften werden aber nicht gesucht. Erst 1884 hat Bauschinger die Ursachen für starke Schwankungen der Versuchsergebnisse in den Gesteinen und weniger in den Versuchseinrichtungen gesucht und eine Beeinflussung der Prüfergebnisse durch die Probenherstellung vermutet. Seine Versuche sind hauptsächlich als Stoffprüfungen zu bezeichnen.

Von all diesen Bestimmungen hat die Druckfestigkeitsprüfung bis heute die größte Bedeutung beibehalten.

Apparatur: Druckpresse (Größenordnung 50 t)

Prüfgut: Würfel vorgeschriebener Seitenlänge, neuerdings auch Zylinder von vorgeschriebenem Durchmesser und vorgeschriebener Höhe.

Prüfvorgang: Kontinuierliche Druckzunahme innerhalb einer vorgeschriebenen Zeit bis zum Bruch.

Prüfergebnis: kg/cm^2 , Mittelwert aus mehreren Versuchen.

Druckfestigkeitswerte werden allgemein als die typische Gesteinseigenschaft betrachtet. Die Fragwürdigkeit dieser Ansicht wird noch zu diskutieren sein. Schon Bauschinger stellte fest, daß die von BOEHME in Berlin gefundenen Festigkeitswerte viel höher ausfielen, daß also Abweichungen in der Versuchsanordnung usw. von großer Bedeutung sind.

Damit sind die vier klassischen Gesteinsprüfungen kurz beschrieben worden. Für den Straßenbau hatte nur die Devalprüfung besondere Bedeutung. Bei all diesen frühen Arbeiten wird auf petrographische Besonderheiten sozusagen nie eingegangen, lokal- oder regionalgeologische Einflüsse werden nie erwähnt.

Über die zur Begutachtung von Bausteinen vorgenommenen Prüfungen geben die Berichte von GARY (1897, 1898, 1901) in den Mitteilungen der k.-techn. Versuchsanstalten Berlin Auskunft. Das Vorgehen dürfte an andern Anstalten ähnlich gewesen sein, Probleme der Vereinheitlichung wurden schon damals an internationalen Konferenzen diskutiert. So wurde in erster Linie die Druckfestigkeit geprüft, an je 10 Würfeln von 4–5 cm Kantenlänge nach Lufttrocknung, 125stündiger Wasserlagerung, nach vorerst einmaliger Frostbeanspruchung, später nach 25 Gefrierperioden zu 4 Stunden bei -12 bis -15 °C. Es waren also pro Gestein 30 möglichst gleiche Würfel herzustellen! Dazu kamen Bestimmungen des Abschleifwiderstandes, der Porosität, der Spaltbarkeit, Bruchflächenbeschaffenheit und Farbe, der Petrographie in besonderen Fällen, ohne Beachtung von Zusammenhängen mit den Prüfergebnissen. Es wurden für alle Bestimmungen große Streuungen festgestellt. Wasserlagerung und Frosteinwirkung setzten die Festigkeit jeweils herab. Die Probenahme wurde nicht von der Prüfanstalt, sondern vom Auftraggeber vorgenommen. Entsprechend wurden die schlech-

ten Vergleichsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Herkommen festgestellt. Straßenbaugesteine werden in diesen Berichten nie speziell erwähnt.

GARY berichtet hingegen von Vorschriften der Commission des Méthodes d'Essais des Matériaux de Construction in Frankreich. Dort sind Weisungen zur Probenahme enthalten. Für Straßenbaugesteine wird die Devalprobe verlangt. Die Steinbruchgeologie ist festzuhalten. Auch bestehen Angaben über die Korngrößenbestimmung an Schottern. Für Pflastersteine sind ebenfalls besondere Vorschriften vorhanden.

RUDELOFF (1897) untersucht Kies und gebrochenes Gestein auf ihre Eignung als Bahnschotter. Dazu stellte er eine richtige Gebrauchsprüfung auf, da er für den Schotter im Bahnkörper folgende Beanspruchungen beobachtet hat: Schlag beim Einbau mit der Stopfhacke, schwingende Beanspruchung bei Zugsdurchfahrt, reine Druckbeanspruchung und schließlich Einwirkung von Witterung und Frost. Diese Beanspruchungen werden wie folgt rekonstruiert:

Apparatur: Holzkasten, Fallwerk mit Fallbär und stumpfer Schneide.

Prüfgut: 5,6 kg des zu verwendenden Schotters.

Prüfvorgang: a) Schlageinwirkung über die fallende Schneide mit 9,5 kg schwerem Fallbär;

b) Schlagwirkung bei aufliegender Schneide mit 15,5 kg schwerem Fallbär.

Prüfergebnis: Kornzerkleinerung durch Siebung nach je 100, 300, 600 und 800 Schlägen im Fall a, und nach 300, 1000 und 1500 Schlägen im Fall b.

Für den reinen Druckversuch wurde der Schotter in einen Stahlzylinder eingefüllt und über einen Druckstempel ein stetig wachsender Druck ausgeübt. Als Maß für die Festigkeit diente bei allen drei Versuchen der Anteil unter 6 mm. Diese Gebrauchsprüfungen waren ihrer Zeit weit voraus, sie kamen erst nach dem Ersten Weltkrieg in größerem Maße auf und sind auch heute noch gebräuchlich. Rudeloff stellte eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Korngröße von Kies und Schotter fest; nur die Kornform hat er noch nicht berücksichtigt. Unterschiede zwischen verschiedenen Gesteinen kamen bei stärkeren Beanspruchungen und mit zunehmender Korngröße besser heraus. Diese für den Eisenbahnbau entwickelten Versuche erwiesen sich später auch für die Prüfung von Straßensplitt als bedeutsam.

In den bis jetzt genannten Arbeiten wurde die Petrographie jeweils nur nebenbei erwähnt. Es entstanden nun um die Jahrhundertwende auch Arbeiten, die bewußt mineralogisch-petrographische und geologische Gegebenheiten berücksichtigten. Als Beispiel sei ROSIHAL (1896, 1899) angeführt.

Er geht von der Bestimmung der bekannten Rosiwal-Härte an Mineralien aus, eine Mineralfläche wird mit einer bestimmten Schleifmittelmenge abgeschliffen, die eine wesentliche Verbesserung der Mohsschen Härteskala bedeutet, vor allem die wirklich vorhandenen Härteunterschiede besser berücksichtigt. Hier sei erwähnt, daß Rosiwal den Härtebegriff immer auf die Art der Bestimmung bezieht, also z. B. von Ritz- oder Schleifhärte spricht. Sein Schluß, daß die Gesteinshärte nun innerhalb der Mineralhärten der am betreffenden Gestein beteiligten Mineralien liegen soll, geht allerdings zu weit. Die Berechnung einer Gesteinshärte aus Art und Menge der Gesteinskomponenten läßt die Kornbindungsverhältnisse unberücksichtigt. Allerdings kann ein Abschleifversuch bei Gesteinen in gleicher Weise wie bei Mineralien ausgeführt werden, die Ergebnisse haben aber sehr wenig miteinander zu tun.

Rosiwal bezeichnet die aus den Komponenten berechnete Gesteinshärte als theoretische Härte, die durch Versuch bestimmte als effektive Härte. Die Frische des Gesteins wird definiert als Quotient von effektiver zu theoretischer Härte, der Verwitterungsgrad als Quotient von Härteverlust und theoretischer Härte. Aber auch in diesen Begriffen bleiben die Kornbindungsverhältnisse, mindestens bei einer allgemeinen Anwendung, unberücksichtigt. Bei der Beurteilung des Gesteinsbindemittels bietet zudem die Bestimmung der theoretischen Härte Schwierigkeiten. Die Beispiele Rosiwals fallen durch ihre großen Streuungen auf.

Schlußendlich versuchte er die Härte, wie auch Porosität, Wasseraufnahme usw. mit mechanischen Eigenschaften, wie der Druckfestigkeit, in Beziehung zu setzen. Er konnte daraus keine allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten herleiten. Demgegenüber hat er noch eine reine Gebrauchsprüfung, die Bestimmung einer Bohr- festigkeit, vorgeschlagen. Sie entspricht der Arbeit, die nötig ist, um 1 cm³ Gestein bei bestimmten Bohrergrößen auszubohren. Beziehungen zur Gesteinshärte hat Rosiwal selbst auch nicht herstellen können.

Das Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung von HIRSCHWALD (1912) ist das umfassendste Werk, das je über das Thema geschrieben wurde. Als wichtigstes Qualitätsmerkmal wird die Wetterbeständigkeit bezeichnet, was für die von Hirschwald allein berücksichtigten Bausteine für den Hochbau gerechtfertigt ist. Im Prinzip wird verlangt, daß vor einer Qualitätsbeurteilung alle bestimm- baren Gesteinseigenschaften und

Erkennungsmerkmale bestimmt werden. Dazu gehört die petrographische Beschreibung von der geologischen Lagerung bis zum Dünnschliff, die Bestimmung sämtlicher physikalischen Eigenschaften wie alle Arten der Festigkeit, Abnutzungsverhalten, Raumgewicht, spezifisches Gewicht, Porosität, Wasseraufnahme bei Normalbedingungen, im Vakuum und unter Druck. Folgende Methoden werden besonders hervorgehoben:

- Härteprüfung mit Präpariernadel, Beobachtung ob sich einzelne Mineralkörner aus dem Verband herauslösen lassen oder ob Bruch durch Mineralkörner hindurchgeht, Wirkung von Lösungsmitteln, quantitative Bestimmung des Mineralbestandes nach der Integrationsmethode, Anfärbmethoden zur Sichtbarmachung von Poren und Klüften, Bindemittelverteilung bei Sandsteinen zur Einteilung von Strukturtypen, Art der Kornbindung usw. Diese Bestimmungen können als petrographische Methoden betrachtet werden. Sie erfolgen zur Hauptsache an Handstücken und Dünnschliffen.
- Es ist die Kornbindungsfestigkeit zu bestimmen, d. h. ob die Festigkeit der Kornbindungen größer oder kleiner als die Mineralfestigkeit ist. Maßgebend ist dazu die Zugfestigkeit in Verbindung mit der Kornbindungsart. Hirschwald entwickelt ein Meßverfahren für die Kornbindung.
- Zur Bestimmung der Erweichbarkeit wird die Druckfestigkeit vor und nach 28tägiger Wasserlagerung gemessen.
- Als Maß für die Frostbeständigkeit gilt der Sättigungskoeffizient, das Verhältnis von Wasseraufnahme bei natürlichen Bedingungen zu Wasseraufnahme unter Druck (totale Wasseraufnahme). Hirschwald hat theoretisch einen Grenzwert beständig-unbeständig von 0,9 berechnet. Nach praktischen Erfahrungen liegt er bei 0,8. Besondere Porenformen ergeben teilweise Ausnahmen von der Regel. Die Frostbeständigkeit wird zudem noch durch Anwendung von 25 Gefrierzyklen (je 4 Stunden bei -15°C) bestimmt.
- Es wird die Wirkung der Verwitterungsagentien beschrieben. Frostbeständige Gesteine müssen noch nicht unbedingt wetterbeständig sein (was heute besonders aktuell ist).
- Zusammenfassend stellt Hirschwald fest, daß Menge und Art des Bindemittels und die Art der Kornbindung für die Wetterbeständigkeit ausschlaggebend sind.

Zur zahlenmäßigen Erfassung der Gesteinsqualität untersucht Hirschwald den Verwitterungszustand der Bausteine an vielen Bauwerken verschiedenen Alters. Er versucht den Einfluß sämtlicher Gesteinseigenschaften einzeln zu bestimmen und muß zur zahlenmäßigen Kennzeichnung von z. B. morphologischen Eigenschaften komplizierte Systeme von Struktur-, Porositäts-, Texturtypen usw. aufstellen. Je nach ihrer Bedeutung für die Wetterbeständigkeit werden prävalente Eigenschaften (z. B. Mineralbestand, Kornbindung), subvalente Eigenschaften wie Schichtung (!) oder Fe-Gehalt und schließlich noch akzessorische Eigenschaften unterschieden. Ziel dieser Bemühungen ist die Charakterisierung der Gesteinsqualität in einer einzigen, umfassenden und exakten Formel.

Das Hirschwaldsche System ist theoretisch denkbar, nimmt aber keine Rücksicht auf den zeitlichen Aufwand, weshalb es sich auch nicht eingebürgert hat. Das schließt die Brauchbarkeit einzelner Gedanken nicht aus.

Die wichtigsten Gruppen von Bausteinen werden dann besonders besprochen und je nach Bedarf spezielle Untersuchungsmethoden besonders erläutert. Als Beispiel sei die Messung der Kornbindung bei Sandsteinen genannt, auf die noch zurückzukommen sein wird. Die Resultate der systematisch ausgeführten Untersuchungen fallen durch ihre Unübersichtlichkeit auf, das Ziel einer umfassenden Beurteilung der Gesteinsqualität war offensichtlich zu hoch gesteckt.

Bei gewissen Gesteinsgruppen kann man annehmen, daß Hirschwalds System in einem kleinen geologischen Bereich funktioniert. Für eine allgemeine Anwendung wird bei wechselnden geologischen Verhältnissen das System von Ziffern und Signaturen immer mehr auszudehnen sein, die Übersichtlichkeit immer schlechter werden, besonders wenn Vergleichsmöglichkeiten mit bestehenden Bauten fehlen.

Im von der GEOTECHNISCHEN KOMMISSION (1915) herausgegebenen Werk «Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz» werden vorerst Steinbrüche und Gesteine nach regionaler Anordnung durch Beschreibung von Profilen usw. besprochen. Dann folgt die Beschreibung petrographischer Voruntersuchungen unter teilweiser Anwendung der Methoden von Hirschwald und Rosiwal (Kornbindung, Bindemittelverteilung, Porositätsverhältnisse usw.). Die Gesteinhärtebestimmung nach Rosiwal wird vereinfacht, unter Hinweis der auftretenden Problematik. Es wird nun einfach eine abgewogene Menge Schleifmittel mit dem Gestein eine bestimmte Zeit auf einer Glasplatte geschliffen und auf den Wert von Quarz = 1 bezogen. Bei Sandsteinen

ergeben sich gute Übereinstimmungen mit den Kornbindungsverhältnissen. An mechanischen und physikalischen Eigenschaften wurden das spez. Gewicht, das Raumgewicht, Wasseraufnahme, absolute und scheinbare Porosität, die Druckfestigkeit trocken und wassergesättigt, eventuell die Biegezugfestigkeit, die Abnutzbarkeit nach Bauschinger und im Sandstrahlgebläse und die Frostbeständigkeit durch 25 Gefrierzyklen bestimmt. Die tabellarische Darstellung der Versuchsergebnisse kann heute noch, mindestens zur allgemeinen Charakterisierung der Gesteine, verwendet werden. Die Genauigkeit der genannten Bestimmungen ist zum Teil etwas fragwürdig oder nicht nachgewiesen. Speziell wird im Bausteinband das erhebliche Schwanken der Werte für Raumgewicht, Porosität, Wasseraufnahme usw. festgestellt, auch innerhalb gleicher Probeblöcke. Beziehungen zwischen verschiedenen Eigenschaften, die bestenfalls theoretisch bestehen, werden nicht um jeden Preis gesucht. Bei Sandsteinen und Kalken kann teilweise eine gewisse Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Porosität festgestellt werden. Betont wird die Schwierigkeit der Beurteilung der Wetterbeständigkeit aus den petrographischen Eigenschaften.

Am Schlusse dieser ersten Phase stehen die wichtigsten Methoden der Gesteinsprüfung eigentlich alle schon zur Verfügung, ihre Brauchbarkeit ist aber nicht immer erwiesen. Die Methoden haben sich hinsichtlich des Verwendungszweckes noch stark zu differenzieren, wichtige und nebensächliche Gesteinseigenschaften sind noch besser auseinanderzuhalten. Petrographische Methoden werden eher zur allgemeinen Kennzeichnung der Gesteine benützt als auf Zusammenhänge mit technischen Eigenschaften hin betrachtet. Hirschwald ist da eine Ausnahme, dabei geht er sicher zu weit. Er behandelt petrographische Charakterisierungen wie Meßergebnisse physikalischer Prüfungen.

2. Gesteinsprüfung nach 1918

Es werden hier einige wenige, typische Arbeiten herausgegriffen. Viele Publikationen jener Zeit werden bei einzelnen Methoden zu verwenden sein. Für die Schweiz ist ein Bericht von STEINER (1922) über Beobachtungen an Versuchsstrecken von Schotterstraßen unter Berücksichtigung des Verkehrs von Bedeutung. Er enthält die für die Schweiz wesentliche Erkenntnis, daß alpine Kieselkalke und Flyschsandsteine mit Basalt, vielerorts der Inbegriff des guten Straßenbaugesteines, und verwandten Gesteinen qualitativ durchaus verglichen werden können.

Durch eine vernünftige Anwendung petrographischer Untersuchungsmethoden zeichnet sich eine Arbeit von ZELTER (1927) über die Eignung von Graniten als Pflasterungsmaterial aus. Zelter betont, daß eine Härte-einteilung der Gesteine auf Grund von Abnutzungswerten (nach Bauschinger, Böhme, Gary usw.) in keinem einfachen Zusammenhang mit Würfeldruckfestigkeiten steht, die Druckfestigkeit darf nicht überbewertet werden. Die Abnutzung soll absolut klein sein, ebenso gleichmäßig und die Rauigkeit der Oberfläche muß erhalten bleiben. Diese Anforderung wird von Zelter anhand petrographischer, insbesondere mikroskopischer Methoden, überprüft. Er kann mittels Versuchspflasterungen von Graniten und Syeniten zeigen, daß ein Zusammenhang zwischen Petrographie und Qualität durchaus besteht. Allgemein ist bei Graniten die Qualität bei grobem Korn und geringem Quarzgehalt schlecht. Das beste Mengenverhältnis Feldspat:Quarz:dunklen Gemengteilen liegt um 1,9:1:0,25. Ein größerer Quarzgehalt ist nicht von Nachteil. Die Korngrößen sollten in einem relativen Verhältnis von etwa 2:3 zueinander stehen. Allotriomorphe Struktur (stärkste Verzahnung der Komponenten) verbessert die Qualität. Der Zersetzungsgrad der Feldspäte und die Chloritisierung der Glimmer können zur Beurteilung der «Wassersöffigkeit» von Graniten verwendet werden.

Diese Feststellungen gelten wohl nur für herzynische, eventuell auch andere alpin nicht beeinflusste Granite. Im alpinen Bereich treten Phänomene wie z. B. Sandquarzbildungen auf, die eine Qualitätsverschlechterung bewirken.

KLEIN (1928) hat in gleicher Weise Basalte untersucht. Er kann ebenfalls eine Abhängigkeit der Qualität von Struktur und Textur, bestimmt nach üblichen Methoden, zeigen. So sind feinkörnige Basalte unbrauchbar, da sie schnell glatt werden. Kleinkörnige zeigen diese Tendenz auch, sind aber sehr hart und zähe, weniger spröde als die glasreicheren feinkörnigen Typen. Mittelkörnige Basalte sind am brauchbarsten, wenn genügend große Einsprenglinge vorhanden sind, die ein zu rasches Glattwerden verhindern. Grobkörnige Basalte schließlich haben gutes Rauigkeitsverhalten, brechen aber leichter. Ein zu großer Olivinegehalt auf Kosten des

Augites ist von Nachteil. Aus Resultaten von Druck- und Abnutzungsversuchen kann nicht ohne weiteres auf das praktische Verhalten geschlossen werden. Die Arbeit zeigt, wie auch diejenige von Zelter, daß mit relativ geringem Aufwand eine brauchbare Einteilung der Qualität bestimmter Gesteinsgruppen vorgenommen werden kann.

Die Berücksichtigung besonderer morphologischer und geologischer Verhältnisse einzelner Regionen fordert NIGGLI (1928) im Hinblick auf die besonderen tektonischen Beanspruchungen, die alpine Gesteine erfahren haben.

Eine eingehende Untersuchung von Aussagewert und Genauigkeit verschiedener mechanischer Prüfverfahren liefert HOFFGEN (1930). Für eine Prüfung soll als Bedingung die Beanspruchung des Gesteins auf der Straße wiedergegeben werden, die Größe und Form sowie die Bearbeitungsweise zum Ausdruck kommen, die Streuung der Ergebnisse klein sein, d. h. der Versuch, eine genaue Messung ermöglichen und schließlich das Prüfungsergebnis dem Durchschnitt der geprüften Lieferung oder des geprüften Steinbruches möglichst genau entsprechen. Hoeffgen lehnt die Druckfestigkeitsprüfung ab, die eine rein statische Beanspruchung berücksichtigt. Im Gegensatz dazu treten auf der Straße ausschließlich dynamische Beanspruchungen auf, die erst in vielfacher Wiederholung zerstörend wirken. Es werden die damals an der TH Karlsruhe eingeführten Prüfverfahren beschrieben: Ein aus dem Devalversuch abgeleitetes Trommelmühlverfahren, das mit erhöhter Drehzahl die dynamische Wirkung gegenüber der statischen stark überwiegen läßt, ein dem Bauschinger-versuch entsprechendes Schleifdrehverfahren für Pflastersteine, ein Schleifstoßverfahren, bei dem die Schleifscheibe durch zwei Halbkreisringe mit schraubenförmiger Oberfläche ersetzt wird, so daß zwei Absätze beim Drehen einen Schlageffekt erzeugen können und zuletzt eine Vorrichtung zur Ermittlung einer Dauerschlagfestigkeit. Wo Pflastersteine als Probekörper verwendet werden, hat die Schleiffläche an eine natürliche Kante zu grenzen, damit ein wirklichkeitsgetreues Resultat herauskommt. Grundsätzlich ist der Versuchskörper gleich wie der Gebrauchskörper beschaffen. Es werden nicht Materialkonstanten des Gesteins, sondern die Eigenschaften des daraus hergestellten Gebrauchskörpers als maßgebend betrachtet, man bestimmt so Einflüsse von Form, Größe, Bearbeitungsweise usw. Hier ist eine Bemerkung von RHOADES und MIELENZ (1948) zu erwähnen, wonach man nicht Gesteinseigenschaften, sondern das Verhalten unter bestimmten Bedingungen feststellt.

Hoeffgen hat die genannten Verfahren mittels der Methode der kleinsten Quadrate fehlertheoretisch untersucht. So bestimmte er den mittleren Fehler des Verfahrens; aus der Entnahme von Versuchskörpern von verschiedenen Stellen des Steinbruches oder der Lieferung resultiert die mittlere Abweichung der Gesteinseigenschaften, kombiniert mit den mittleren Verfahrensfehlern ergibt sich die mittlere Ungleichmäßigkeit. Die mittlere Unsicherheit des Ergebnismittels schließlich ist proportional der mittleren Abweichung und umgekehrt proportional der Wurzel aus der Zahl der Versuchskörper. Zwei Vorkommen sind verschieden, wenn die mittleren Ungleichmäßigkeiten um mehr als das Dreifache voneinander abweichen. Es wird versucht, die Verfahrensfehler zu verkleinern, indem verschiedene Fehlerursachen voneinander getrennt werden.

Mit einem möglichst homogenen Granit eines Vorkommens wurden Raumgewichtsbestimmung, Schleifdrehverfahren, Schleifstoßverfahren, Sandstrahlverfahren und Druckfestigkeitsbestimmung auf ihre Fehler untersucht. Es ergaben sich als mittlere Verfahrensfehler:

Raumgewichtsbestimmung an unregelmäßigen Stücken	± 0,15%
Raumgewichtsbestimmung an Würfeln	± 0,4 %
Schleifdrehverfahren	± 1,8 %
Sandstrahlverfahren	± 1,8 %
Schleifstoßverfahren	± 5,5 %
Würfeldruckfestigkeit	± 13,7 %

Es dürfte nun nicht zulässig sein, die Genauigkeit der Raumgewichtsbestimmung, wo an einem Probekörper beliebig viele Messungen durchführbar sind, mit derjenigen der Druckfestigkeitsbestimmung zu vergleichen, wo die Probe zerstört wird. Ein vom Material herrührender Fehler wird deshalb bei zerstörenden Prüfungen viel stärker ins Gewicht fallen. Die Fehler von Schleifdrehverfahren und Sandstrahlverfahren sind wohl deshalb so klein, weil es einfacher ist, Proben mit gleicher Flächenbeschaffenheit als gleichbeschaffene Würfel herzustellen. Daß die Verfahren an und für sich genau sind, ist durchaus zu erwarten, da man die Fehlereinflüsse der Apparatur weitgehend eliminieren kann.

Im Vergleich zu den mittleren Abweichungen der Gesteinseigenschaften über den ganzen Steinbruch kann Hoeffgen nun zeigen, daß die Verfahrensfehler vernachlässigt werden können. Er erhält für sein Beispiel wiederum für die Raumgewichtsbestimmungen die kleinsten Abweichungen, für Trommelabnützung und Sandstrahlverfahren sind sie ziemlich klein, für die schleifende Wirkung betragen sie 10–15% und für die Druckfestigkeit etwa 40%. Für irgendein anderes Vorkommen können hier nun ganz andere Werte herauskommen, es kann mit dieser mittleren Abweichung nicht viel angefangen werden. Hoeffgen betrachtet die Druckfestigkeitsprüfung wegen der großen mittleren Abweichung als minderwertig, andererseits kann man ebenso gut sagen, daß sie wegen der großen Abweichung dem Gesteinscharakter besser entspricht als die Raumgewichtsbestimmung.

Für die geringe mittlere Abweichung des Trommelmühlverfahrens sei auf die beim Devalversuch angebrachten Bemerkungen hingewiesen. Es ist dies wohl die einzige der genannten Prüfungen, die für ein ganzes Vorkommen oder für eine größere Lieferung einen vernünftigen, umfassenden Wert ergibt.

Gegen die Fehlerbetrachtungen ist natürlich nichts einzuwenden, wichtig ist aber die Beachtung der Inhomogenitäten im Gesteinsvorkommen, die nur durch geologisch-petrographische Beschreibungen erfaßt werden können. Es ist deshalb nicht einzusehen, weshalb Hoeffgen darauf verzichtet hat. Sein Beispiel paßt nur für ideal homogene Verhältnisse, wie sie bei Eruptivgesteinen allenfalls möglich sind. In tektonisch stark beeinflussten Gebieten und in sedimentären Abfolgen werden sich große Schwierigkeiten ergeben, vor allem mit der Probenahme.

In den Mitteilungen des Neuen Internationalen Verbandes für Materialprüfung finden sich neben allgemeinen Bemerkungen auch spezielle Methoden beschrieben. GRENGG (1930) berichtet darin über Probleme der Raumgewichtsbestimmung an Haufenwerken, BURCHARTZ (1930) über Druck- und Schlagversuche an Schotter unter Verwendung der primitiven Apparatur von Rudeloff. Dazu nimmt die Gesteinsprüfstelle der DRB in Kassel Stellung mit der Beschreibung ihrer Methode, die mehr oder weniger heutigem Gebrauch entspricht. Es werden nur noch Stahlzylinder verwendet, die mit gleichen Raummengen anstelle gleicher Gewichtsmengen zu füllen sind. Für die Auswertung wird nicht mehr der Durchgang durch eine Siebgröße allein betrachtet; es werden die vollständigen Sieblinien vor und nach dem Versuch miteinander verglichen und daraus ein Zertrümmerungsgrad ermittelt (Abramscher Feinheitsmodul). Die Kornform wird nach der Kornzahl pro Volumen nach Rothfuchs berücksichtigt, die Zertrümmerungsgrade sind entsprechend zu korrigieren. Derartige Prüfungen wurden ausschließlich für den Eisenbahnbau verwendet, konnten dann aber leicht für den Straßenbau übernommen werden.

3. Moderne Gesteinsprüfung

In diesem Abschnitt werden Arbeiten aufgeführt, die sich ausschließlich mit der Prüfung von Straßenbaugesteinen befassen. Vieles wird erst im Zusammenhang mit einzelnen Methoden berücksichtigt. Allgemeinere Behandlungen des Themas stammen von KRUEGER et al. (1932), KNIGHT (1935), STINY (1935) und VESPERMANN (1936). Alle diese Autoren betonen die Notwendigkeit geologisch-petrographischer Methoden, die auch schon eine erste Qualitätsbeurteilung ermöglichen. Nach KRUEGER et al. (1932) werden Hart- und Weichgesteine unterschieden. Diese Unterscheidung ist auch heute verbreitet. Druck- und Schlagversuche an Schotter und Splitt werden als Ersatz für die Trommelversuche angesehen (Deval usw.). Der Zertrümmerungsgrad wird aus dem graphischen Vergleich der Sieblinien vor und nach dem Versuch bestimmt. Schließlich wird eine Tabelle mit den wichtigsten Ergebnissen verschiedener Versuche aufgestellt und eine Abgrenzung von 7 Gesteinsgruppen vollzogen. Es muß hier bemerkt werden, daß derartige Tabellen nur geringen Wert haben. Die Resultate der verschiedenen Gruppen wie Granit, Sandstein, Basalt usw. überschneiden sich gegenseitig erheblich. Man kann auf eine exakte Gesteinsbeschreibung nicht verzichten.

KNIGHT (1935) bringt einen Vorschlag zur petrographischen Beschreibung vor, der auch für Praktiker ohne große petrographische Vorbildung brauchbar ist. Die normalen Prüfverfahren sucht er in einer Qualitätsformel zusammenzufassen, allerdings ohne besonderen Erfolg. Druck- und Schlagversuch werden abgelehnt, da sie wohl der Beanspruchung von Eisenbahnschotter, nicht aber der von Straßensplitt und -schotter entsprechen sollen. Wo Versuchsergebnisse und Gebrauchserfahrungen nicht übereinstimmen soll es möglich sein, die

Ursache in den meisten Fällen durch mikroskopische Untersuchungen herauszufinden. In der Arbeit sind brauchbare Bemerkungen zu einzelnen Gesteinsgruppen vorhanden. So soll beispielsweise die Qualität von Sandsteinen und Grauwacken mit zunehmendem geologischem Alter besser werden. Diese Behauptung ist in vielen Fällen gerechtfertigt. Knight kann schließlich auch Abhängigkeiten von praktischen Gesteinseigenschaften von petrographischen Merkmalen wie Korngröße, Anteil der Hauptgemengteile, Zersetzungsgrad usw. nachweisen.

In STINY (1935) ist ein ausführliches Literaturverzeichnis enthalten. Stiny trifft die Unterscheidung von Stoff- und Gebrauchsprüfungen, bei letzteren von statischen und dynamischen Beanspruchungen. Er diskutiert den Härtebegriff und hält vor allem fest, daß die Gesteins Härte mit der Mineralhärte nichts zu tun hat. Die Wichtigkeit der Probenahme wird betont. Auf die petrographischen Beobachtungen wird besonderes Gewicht gelegt. Mit einigen Faustregeln zur Gesteinsbeurteilung kann man in dieser Hinsicht schon recht viel anfangen. Laborversuche dienen dann nur noch der Verifizierung von erfahrungsmäßig vorgenommenen Beurteilungen.

VESPERMANN (1936) möchte die zahlenmäßige Beurteilung der Gesteinsqualität durchsetzen. Die relativen Prüfungsergebnisse sollen einem absoluten Maßstab zugeordnet werden, der aus den Erfahrungen im Gebrauch herzuleiten wäre. Nach den Erfahrungen wären Qualitätsgruppen auszuscheiden, die eine Unterscheidung von fest – nicht fest, sehr gut – gut – schlecht, hoch – nieder usw. ermöglichen könnten. Zuletzt sollten dann minimale Werte für bestimmte Eigenschaften angegeben werden können. Die bekannten Gesteine werden nach ihrer Qualität eingeordnet, z. B. Kalkstein = 1,5, Porphyr = 3,0, Basalt = 5,0. Es kommt hier die deutsche Wertschätzung für den Basalt zum Ausdruck. Vespermanns Forderung nach Ermittlung der Beziehungen zwischen petrographischen und technischen Eigenschaften ist man heute noch nicht viel näher gekommen.

Eine weitere Zusammenfassung der Prüfmethoden ist im Handbuch der Werkstoffprüfung (STOECKE et al., 1941) gegeben. Auf geologisch-petrographische Untersuchung in allen Größenbereichen wird großes Gewicht gelegt; dadurch kann oft eine Reduktion des Untersuchungsprogrammes vorgenommen werden. Der Zweck der physikalischen und mechanischen Prüfungen liegt im Schaffen zahlenmäßiger und vergleichbarer Unterlagen. Die Forderung der Vergleichbarkeit bleibt in vielen Fällen unerfüllt. Im einzelnen werden dargestellt: Raumgewichtsbestimmung, verschiedene Festigkeitsarten, Abnutzungswiderstand nach den hergebrachten Verfahren, Sandstrahlprüfung, Wasseraufnahme, -durchlässigkeit und -abgabe, Prüfung von Sand, Kies, Splitt und Schotter, insbesondere Kornverteilung, Kornform, Kornoberfläche, Schüttraumgewicht, Wasseraufnahme, stoffliche Beschaffenheit, Frostwirkung, Druck- und Schlagfestigkeit des Haufenwerkes. Damit sind mit Ausnahme der Prüfung der Polierfähigkeit alle heute gebräuchlichen Methoden für Straßengesteine vorhanden.

Die zweite Auflage des Handbuches (DE QUERVAIN et al., 1957) wurde nur wenig verändert. Der Prüfung von Haufenwerken wird größeres Gewicht beigemessen, es werden neuere Verfahren der Kornformbestimmung angeführt.

Als Beispiele für Arbeiten allgemeineren Inhalts seien der Vollständigkeit halber ZELTER (1935), BREYER (1935), DE QUERVAIN (1941) hier noch angegeben.

SHERGOLD (1947) hat nach den British Standards bestimmte Prüfungsergebnisse in 6 Gruppen eingeordnet: Basalt-, Porphyr-, Granit-, Sandstein/Grauwacke- und Kalkgruppe. Nur die Kalksteine heben sich von den übrigen ab, die Bereiche der übrigen Werte überschneiden sich gegenseitig. Als Tendenzen zeichnen sich für Porphyre höhere Schlagfestigkeiten, für Quarzite höhere Druckfestigkeiten und für Granite tiefere Wasseraufnahmewerte ab. Die 1950 auf 11 Gruppen erweiterte Einteilung genügt in keinem Fall, ein Gestein anzunehmen oder abzulehnen. Derartige Gruppeneinteilungen können nur regionale Gültigkeit haben, es ist nicht verwunderlich, daß BREYER (1950) Widersprüche zur Einteilung Shergolds findet.

SHERGOLD und GREYSMITH (1947) stellten Literatur über Faktoren, die Kornform und Kornzusammensetzung beeinflussen, zusammen. Die Meinungen über den Einfluß der Petrographie widersprechen sich dabei teilweise. Von Bedeutung ist der Brechvorgang, eine detaillierte Behandlung dazu stammt von ROESSLEIN (1941). SABINE, MOREY und SHERGOLD (1954) versuchten mit mäßigem Erfolg die mechanischen Eigenschaften und die Petrographie von Quarzdoleriten zu korrelieren. Sie kommen zum Schluß, daß von der Petrographie her nicht mehr als eine sehr allgemeine Voraussage des Verhaltens möglich ist. Dies mag bei erstmaliger Verwendung einer Gesteinsart zutreffen.

Aus den USA sind die Publikationen der ASTM zu beachten. SWEET (1948) gibt eine ausführliche Literaturübersicht und einen Überblick über die 1948 in den USA verwendeten Methoden. RHOADES und MIELENZ (1948) befassen sich eingehend mit geologisch-petrographischen Methoden zur Abschätzung der Einflüsse von Kaolinitisierungsgrad der Feldspäte, von Struktur, Oberflächenausbildung, Porengröße usw. Dies ist nötig, um eine Beurteilung der Eigenschaften unter beliebigen Bedingungen zu ermöglichen. Die Bedeutung der petrographischen Prüfungen für Routineuntersuchungen unterstreicht WOOLF (1948).

Über französische Erfahrungen berichten BOUCHAYER und AHU (1952). Neben Angaben über die Kornformbestimmungen wird vor allem über Verschleißversuche mit Deval-, Los-Angeles- und A.-Mannheim-Trommeln berichtet. Zwischen den verschiedenen Anordnungen können mehr oder weniger lineare Korrelationen gefunden werden, weshalb man ohne weiteres irgend einen dieser Verschleißversuche benützen kann.

4. Normen

Der allgemeinen Entwicklung der Gesteinsprüfung nachfolgend hat sich auch deren Normierung entwickelt, die in den meisten der genannten Arbeiten enthaltenen Methoden betreffend. Eine Zusammenstellung der heute gültigen Normen stammt von DANTINNE (1965) und betrifft Belgien, Holland, Frankreich, Großbritannien, Westdeutschland, Italien, USA, Polen und Spanien. Zu den Normen gehören auch behördliche Erlasse und von Fachvereinigungen aufgestellte Vorschriften wie der AASHO in den USA, der VSS in der Schweiz oder der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen in Deutschland. Aus einer Übersicht über die Fachausdrücke im Werk von Dantinne zeigt sich, daß gewisse Übersetzungsschwierigkeiten bestehen. Zusammengefaßt bestehen aber in den meisten Ländern Vorschriften über:

- Terminologie, Probenahme, Vorprüfungen (d. h. petrographische Beschreibung), Probenaufteilung;
- chemische Besonderheiten, Sauberkeit, Hydrophilie usw.;
- physikalische Eigenschaften wie spez. Gewicht, Raumgewicht, Porosität, Feuchtigkeitsgehalt;
- Kornzusammensetzung, Siebreihen und -methoden, Gehalt Feinmaterial;
- Kornform von Schotter und Splitt, Schüttraumgewicht;
- Sulfatversuch, Gefrierversuch;
- Druck- und Schlagversuch an Schotter und Splitt sowie an Probekörpern (Würfel und Zylinder);
- Verschleißversuche (Deval usw.), Abschleißversuche an Probekörpern, Griffigkeitsbestimmungen.

Diese Aufstellung betrifft Schotter und Splitt, sinngemäß ist sie auch für Sand oder Filler möglich. Die meisten Vorschriften sind in den SNV-Normen enthalten. Im großen und ganzen wird die Gesteinsprüfung überall mit ähnlichen Methoden vorgenommen, die im einzelnen aber so verschieden sind, daß direkte zahlenmäßige Vergleiche nicht möglich sind. Verschiedene Methoden werden im einzelnen noch zur Sprache kommen. Hier sind einige allgemeine Bemerkungen anzubringen.

Normen enthalten bewährte Prüfmethoden, die meistens von Fachvereinigungen aufgestellt werden, wo sich Praxis und Wissenschaft begegnen. Ferner werden sich lokale bis regionale Bedürfnisse darin spiegeln, eine Verschiedenheit zwischen einzelnen Ländern ist deshalb zu erwarten. Im Streben nach Vereinheitlichung muß sicher ein vernünftiger Standpunkt eingenommen werden (DANTINNE, 1965), da die Unterschiede oft geologische Ursachen haben. Man kann nicht ohne weiteres Verhältnisse aus Eruptivprovinzen auf Sedimente übertragen oder von geologisch alten Gebirgszonen auf junge übernehmen. Vorerst ist eine Vereinheitlichung der Terminologie wünschenswert, später dann auch der Versuchsmethodik. Mit Minimalanforderungen an bestimmte Gesteinsarten muß man schon sehr vorsichtig sein, da unter gleichen Gesteinsbezeichnungen sehr verschiedenartige Gesteine verstanden werden können.

Vergleichende Diskussionen von Normverfahren geben etwa VAN ELSEN (1956), PELTIER (1963), TEMME (1963), SACHSE (1964), ASTM-VERZEICHNIS (1964), HEIM et al. (1965), DANTINNE und LONGUEVILLE (1965).

TEMME (1963) unterscheidet die Normen nach folgenden, in dieser Reihenfolge anzuwendenden Gesichtspunkten: 1. allgemeine petrographische und mineralogische Eigenschaften, 2. mechanische und physikalische Merkmale und 3. weitere besondere Anforderungen für den Straßenbau. Unter chemischer Prüfung wird die Beurteilung des Verwitterungsgrades angeführt, dazu gehören Kristallisationsversuche mit Na- und Mg-Sulfat, wie sie etwa in amerikanischen und auch deutschen Vorschriften enthalten sind, in zweiter Linie auch ge-

wöhnliche Gefrierversuche. Festigkeitsprüfungen sind die üblichen an Würfeln und Splitt/Schotterproben zu vollziehenden. Abschleifversuche, Deval- und Los-Angeles-Prüfungen wurden in Deutschland offenbar aufgegeben. In Tabellen werden vorläufige Richtzahlen für verschiedene wichtige Gesteinsarten angegeben. Wie früher schon bemerkt, genügt die Bestimmung der Gesteinsart nicht, um die Qualität festzulegen. Temme bespricht dann die in den British Standards 812/1960 festgelegten Methoden, die zur Hauptsache üblichem Gebrauch entsprechen. Neu ist die Feststellung der Griffigkeit vor und nach Politur von Splittproben mit einem Gummireifen unter Mitwirkung eines Schleifmittels.

Anforderungen an die Gesteinseigenschaften werden in den DIN-Normen für Wasseraufnahme, Druck- und Schlagfestigkeit festgelegt, in ASTM-Vorschriften auch noch für Gehalt an Verwitterungsprodukten, spez. Gewicht, Abriebverluste im Deval- und Los-Angeles-Test, Verluste im Abschleifversuch und Zähigkeit (Schlagfestigkeit nach Page). Temme diskutiert unter besonderen Güteanforderungen Gesteinsdichte, Raumgewicht von Körnungsgemischen in verdichtetem Zustand, Kornform, Kornverteilung, Bindemittelhaftung. Bei der Festlegung von Anforderungen sollen wirtschaftliche Überlegungen gemacht werden. Die Bedeutung der Griffigkeitseigenschaften der Fahrbahndecke wurde allgemein erkannt. Genormt ist erst das aus Versuchen von SHERGOLD und MC LEAN hervorgegangene Verfahren. Temme hat ähnliche Versuche mit Kalksteinen und Gesteinsgemischen ausgeführt. Auch in den USA existiert eine Apparatur für derartige Untersuchungen, es wurden dort Beziehungen zwischen petrographischen Eigenschaften und Griffigkeitsverhalten gefunden. Neben der Griffigkeit spielt auch noch die Aufhellung der Fahrbahn eine gewisse Rolle. Helle Gesteine neigen in der Regel zu schlechteren Qualitäten (wie z. B. helle Kalksteine).

PELTIER (1963) beschreibt die im Laboratoire Central des Ponts et Chaussées benützten Verfahren. Es fällt der ausgiebige Gebrauch altbekannter Methoden auf. Eingehend werden Kornformbestimmungsmethoden, Versuche in Trommelmühlen, Toleranzen für Unter- und Überkorn usw. behandelt.

SACHSE (1964) gibt eine Zusammenstellung von Faustregeln zur Unterscheidung guter und minderwertiger Gesteine anhand frisch angeschlagener Bruchflächen. Für mechanische und physikalische Angaben folgt er Temme. Die Behandlung von Körnungsbezeichnungen, Unter- und Überkorntoleranzen geht über den Umfang unserer Arbeit hinaus. Für die Kornformbestimmung werden die abgekürzten Verfahren nach Schulze und Pös vorgeschlagen. Pflastersteine werden, ihrer heutigen Bedeutung entsprechend, nur nebenbei erwähnt.

Die in den USA verlangten Methoden können dem Book of ASTM Standards (ASTM, 1964) entnommen werden. Es fällt auch hier, wie in Frankreich, der Gebrauch alter Methoden auf, also Deval- und Los-Angeles-Test, auf deren Vorzüge man nicht verzichten wollte. Ein Vorzug ist nicht zuletzt der, daß man mit diesen Versuchen über langjährige Erfahrungen verfügt. Das Normblatt über die petrographischen Beschreibungsmethoden ist sehr allgemein gehalten, es wird dem Petrographen überlassen, die geeigneten Möglichkeiten anzuwenden. Normen können persönliche Erfahrungen noch nicht ersetzen.

Die Zusammenfassung von HEIM et al. (1965) verschiedener Autoren ist nochmals eine Bestätigung der in verschiedenen Staaten mehr oder weniger gleichen Handhabung der Gesteinsprüfung. Neuerungen betreffen eher Mischungen Gesteinskörnung-Bindemittel und gehen über das Ziel dieser Arbeit hinaus.

Eine letzte Übersicht wurde von DANTINNE und LONGUEVILLE (1965) zusammengestellt. Nach einer Aufzählung der bekannten Versuche an Probekörpern (Würfeln oder Zylindern) halten diese Autoren fest, daß die Empfindlichkeit auf die Gesteinsheterogenität eine große Anzahl von Proben erfordert. Da Abschleifversuche nur prinzipiell gleich ausgeführt werden, wird vorgeschlagen, einen neu konzipierten Abschleifversuch aufzustellen, anstatt die bisherigen Ergebnisse schlecht und recht zu vergleichen.

Die interessierenden Eigenschaften für gebrochenes Gestein sind Granulometrie, Kornform und Gesteinsqualität. Größentoleranzen dürfen nicht zu präzise aufgefaßt werden. Die Siebsätze sind zwar genormt, doch sind die Vorschriften für den Siebvorgang zu wenig ausführlich. Was die Kornform betrifft, so wird gesagt, daß die einfachste Methode die beste ist. Diese Folgerung wird zu beherzigen sein. Die Kornform ist wichtig für die Beläge wie auch wegen ihres Einflusses auf verschiedene andere Versuche. Beeinflußt wird sie durch die Gesteinsart, die Art des Gesteinsbrechers wie auch des Brechvorganges selber.

Von den Verschleißversuchen (Deval, Los Angeles, A. Mannheim) wird keinem der Vorzug gegeben. Betont wird, daß dabei mehrere Eigenschaften miteinander geprüft werden, was einzelne Autoren als Vorteil, andere wiederum als Nachteil bezeichnen. Als Spezialfall wird der polnische Druckversuch an einzelnen Splittkörnern genannt, der ein besseres Berücksichtigen der Petrographie ermöglicht. Der englische Schlagversuch nach BS 812:1960 kann mit einem transportablen Gerät ausgeführt werden, was seine Brauchbarkeit erhöht.

Auch in den USA besteht ein mobiler Schlagversuch für Kornaggregate. Neben dem englischen Politurversuch wird als Besonderheit der italienische Walzversuch noch erwähnt.

Als Schlußfolgerung gilt nach Dantine und Longueville, daß sich die Prüfergebnisse nicht auf einfache mechanische oder physikalische Grundbegriffe zurückführen lassen. Vorderhand sind die Versuche den praktisch auftretenden Beanspruchungen anzugleichen, weshalb viele normalisierte Prüfungen noch verbesserungsfähig sind. Das Prinzip, daß die Methoden einfach und, wenn möglich, im Steinbruch und auf der Baustelle anwendbar sein sollen, darf nicht außer acht gelassen werden.

5. Weiterentwicklung der Gesteinsprüfung im Straßenbau

Es sind hier einige wenige Arbeiten zu nennen, die sich mit grundsätzlich neuen Prüfungsmethoden oder mindestens mit neuen Lösungsmöglichkeiten bestehender Probleme befassen, wie sie durch veränderte Anforderungen, als Folge des modernen Straßenverkehrs, an die Eigenschaften einer Straßenoberfläche geschaffen wurden.

Das Problem der Griffigkeit hat so in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Die damit zusammenhängende Gesteinseigenschaft kann als Polierfähigkeit bezeichnet werden. Wie in TEMME (1963) erwähnt, hat die im British Road Research Laboratory in Harmondsworth von MC LEAN und SHERGOLD entwickelte Methode Eingang in die Britischen Vorschriften gefunden (BS 812:1960). Da in dieser Arbeit ebenfalls Polierversuche mit dem englischen Gerät ausgeführt werden, wird dort noch mehr darüber zu sagen sein. Weitere Arbeiten in ähnlicher Richtung befassen sich mit der Charakterisierung der Straßenoberfläche, mit der Bestimmung von Rauhigkeit und Griffigkeit. So versucht SCHULZE (1959) die Straßenoberfläche mit Stereoaufnahmen zu erfassen. VON WEINGRABER (1954) hat ein Abgußverfahren entwickelt, das die Bestimmung und Beschreibung einer Profillinie über die Straßenoberfläche erlaubt. VOGLER (1965) hält die Oberflächenausbildung ebenfalls mit einer Abdruckmasse fest, deren Reflexionsvermögen dann gemessen werden kann und für die Rauhigkeit maßgebend ist. Bekannt sind über die Fläche gleitende Pendel zur Bestimmung der Griffigkeit (z. B. Leroux). Der englische Polierversuch benötigt ein derartiges Gerät. Zu beachten ist, daß mit dem gleichen Gerät Messungen an Proben und am fertigen Objekt vorgenommen werden können.

PFEIFER (1951) und vor allem GOOD und OWINGS (1961) beschäftigten sich mit den Vorgängen, die sich im Haufenwerk während des Belageinbaues und im Gebrauch abspielen. Good und Owings begannen ihre Versuche 1947, indem sie von damals neuen Belägen Kornaufbau usw. festhielten und dann in bestimmten zeitlichen Abständen den Kornaufbau erneut feststellten. Gleichzeitig wurden die Verkehrsbelastungen aufgezeichnet. Sie konnten bei Verdichtung der Beläge mit Stahlradwalzen eine gewisse Entmischung feststellen, über starren Unterlagen etwas größer als über flexiblen, doch in den wenigsten Fällen signifikant im statistischen Sinne. Ein Zusammenhang von Entmischung zu Los-Angeles-Werten konnte ebenfalls nicht gefunden werden. Unter Verkehrsbelastung waren Entmischungsvorgänge ähnlich vorhanden, aber noch viel geringer als beim Verdichten. Weitere Studien über Vorgänge im Belag entfernen sich dann immer mehr von petrographischen Fragestellungen.

DANTINNE (1965) erwähnt ergänzend Versuche an Haufenwerken, die bi- und triaxiale Beanspruchungen zum Thema haben und wohl am ehesten auf praktisch benützte Korn-Bindemittelgemische anzuwenden wären. Um die Vorgänge im Haufenwerk besser beurteilen zu können, wären sicher noch mehr Versuche zur «Mechanik des Haufenwerkes» notwendig.

Als zeitgemäß sind Prüfverfahren zu bezeichnen, die sich moderner statistischer Methoden bedienen. Wir erwähnen hier MORGENBROD (1955, 1956, 1961), der Probenahme und Schüttraumgewichtsbestimmung vom Standpunkt der Statistik aus betrachtet. Vor allem aber verfeinert er die Kornformbestimmung durch Anwendung der Korrelationsrechnung, wovon noch genauer die Rede sein wird. Im übrigen ist auf statistischem Gebiet noch wenig versucht worden.

Weitere Möglichkeiten liegen schließlich auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. DANTINNE (1965) berichtet über belgische Versuche. Es handelt sich um die Bestimmung des Elastizitätsmoduls durch Messen der Geschwindigkeit von Ultraschall im Gestein, wobei offenbar eine Anwendbarkeit des Versuches im Feld angestrebt wird. Es bestände hier allenfalls die Möglichkeit, die alten Festigkeitsbestimmungen

an Würfeln und Zylindern zu ersetzen. Der große Aufwand, der mit der Einführung solcher Ersatzmethoden verbunden ist, dürfte aber vielerorts abschreckend wirken.

6. Zusammenfassung der Literaturübersicht

Diese Übersicht hat gezeigt, daß einige wenige Prüfmethode seit Beginn der technischen Gesteinsprüfung bestehen und benützt werden, meistens in verschiedenen Varianten und den wechselnden Bedingungen der Anforderungen angepaßt. Die meisten Änderungen ergaben sich aus dem Übergang von Pflastersteinen zu Schotter und Splitt. Anfänglich hat man das Gestein als einen mehr oder weniger homogenen Stoff betrachtet, später dann die für Gesteinsvorkommen charakteristischen Inhomogenitäten selber als Gesteinseigenschaft betrachtet. Hier liegt auch das Betätigungsfeld der Petrographen. Für die technischen Prüfmethode sind, trotz prinzipieller Gleichheit der Anordnungen, sehr verschiedene Ansichten und Empfehlungen gebräuchlich. Im Gegensatz dazu sind die petrographischen Methoden viel einheitlicher anwendbar, sofern sie von petrographisch gebildeten Leuten benützt werden.

Man ist sich nicht immer im klaren, welche Methoden im Minimum nötig sind, um eine Gesteinsbeurteilung durchzuführen. Oft werden nebensächliche Eigenschaften herausgestrichen oder zu komplizierte Verfahren vorgeschlagen, die dann aus zeitlichen Gründen gar nicht mehr ausgeführt werden. In der Literatur sind häufig Tabellen mit Zusammenstellungen von Gesteinseigenschaften zu finden, die mangels genügender Gesteinscharakterisierung sehr nichtssagend sind.

Mit den kurz angetönten Methoden kann die Qualitätsbeurteilung durchaus ausgeführt werden; die erhaltenen Zahlen dürfen aber nur relativ aufgefaßt werden. Von Vorteil ist es, wenn Gesteine von deutlich verschiedener Qualität miteinander geprüft werden. Absolute Bewertungen sind ungenau und widersprechen oft den Erfahrungen der Praxis. Aus diesem Grund werden die Probleme der Gesteinsprüfung offenbar immer wieder neu aufgegriffen. Es sind noch viele Verbesserungen an Einzelheiten möglich. Von einem einfachen, umfassenden und genauen Verfahren ist man noch weit entfernt.

IV. Ausgeführte Untersuchungen

1. Petrographische Methoden

a) Untersuchungen im Feld

Die im allgemeinen Fall sehr umfangreiche Aufgabe kann stark vereinfacht werden. Der Großbereich (DE QUERVAIN, 1963), wie er im Steinbruch oder in der Kiesgrube aufgeschlossen ist, muß im Hinblick auf die Gewinnung hochwertiger Splitt- und Schottermaterialien untersucht werden. Es liegt keine richtige Prospektionsaufgabe vor, die Geologie des Steinbruches darf als mehr oder weniger bekannt betrachtet werden, ebenso sind die Eigenschaften des darin gewonnenen Gesteins mindestens teilweise bekannt. Als Beispiel sei der Kieselkalk der helvetischen Kreide erwähnt, dessen Qualität für verschiedene Aufschlüsse im Längsprofil der Alpen ziemlich gleich bleibt.

Unsere Aufgabe besteht deshalb darin, Eigenschaften des Großbereiches zu untersuchen, die lokal verschieden ausgebildet sein können. Auch dies kann noch mehr eingeschränkt werden, indem für die Herstellung von Splitt und Schotter Großbereichseigenschaften nur von Interesse sind, sofern sie sich in der

Korngröße von Splitt und Schotter, im Kleinbereich, noch äußern. Im Betrieb eines modernen Steinbruches mit Großsprengungen und Baggereinsatz ist eine Ausscheidung von Einlagerungen schlechter Qualitäten in vielen Fällen nicht mehr möglich, was besonders zu beachten ist.

Großräumige Strukturen wie Falten, Brüche und Überschiebungen sind für den Splittbereich nicht bedeutungsvoll, wenn nicht stoffliche Veränderungen des Gesteins damit verbunden sind. Im einzelnen sind die folgenden Eigenschaften zu untersuchen:

Die Schichtung: Sie gibt uns die geologisch bedingten Gesteinsvariationen wieder. So spielen in sedimentären Straßenbaugesteinen Wechsellagerungen von z. B. Sandstein und sandigen Mergeln oder Kieselkalk und Kalkmergeln eine große Rolle. Variationen metamorpher Abfolgen können auf gleiche Weise betrachtet werden. Anhand der Schichtung können wir aussagen, welche Gesteine im gebrochenen Material anfallen. Die Anteile verschiedener Gesteinsarten am Steinbruchprofil lassen sich als Schätzungen auch zahlenmäßig angeben.

Die Schieferung: Sie kann beispielsweise durch ihre Intensität charakterisiert werden. Die beim Brechen entstehenden Kornformen dürften teilweise von ihr abhängen (ROESSLEIN, 1941; SHERGOLD und GREY-SMITH, 1947). Allerdings kann man die Schieferung fast ausnahmslos auch am Handstück beschreiben.

Die Klüftung: Diese Eigenschaft des Großbereiches ist bei alpinen Gesteinen von besonders großer Bedeutung und von vielfältigem Einfluß auf die Splitt- und Schottereigenschaften. Allgemein sind unter Klüften alle Unterbrüche im Gesteinsverband von flächenhafter Ausdehnung, also auch Schichtfugen usw. zu verstehen. Man kann in der Regel mehrere Kluftsysteme unterscheiden, die zahlenmäßig mit der Klüftigkeitsziffer nach STINY (1935) und MUELLER (1963), mit der Anzahl Klüfte pro Längeneinheit, je für ein Kluftsystem bestimmt, erfaßbar sind. Die Klüfte bestimmen die Größe des Grundkörpers (STINY, 1935) oder Kluftkörpers (MUELLER, 1963), der allseitig von Kluftflächen begrenzt und selber kluftfrei ist, mindestens bezogen auf eine bestimmte Kluftgrößenordnung. In kleineren Bereichen können immer noch weitere Kluftsysteme vorhanden sein, die vielleicht nur mikroskopisch erkennbar sind. Vom Standpunkt der Felsmechanik aus betrachtet muß eine intensive Klüftung als Nachteil gewertet werden. Im Steinbruch ist eher das Gegenteil der Fall, da die Größe des Kluftkörpers das Resultat einer Sprengung beeinflussen kann. Intensive Klüftung liefert ein für den Gesteinsbrecher leichter verarbeitbares Blockmaterial; bei weitständiger Klüftung müssen die anfallenden Blöcke durch Nachbohren und -sprengen zerkleinert werden. Mit der Klüftung sind aber auch Nachteile verbunden, die vom Kluftinhalt herrühren. So ist bei offenen Klüften die Wirkung der Verwitterung ausgeprägt, die Gesteinsoberflächen werden verändert und die Klüfte mit Verwitterungsprodukten angefüllt. Häufig sind Rutschharnische damit verbunden, die vielfach als minderwertige Gesteinsoberflächen ausgebildet sind. Auch wenn diese Einflüsse nur wenige Millimeter von der Kluftfläche her ins Gesteinsinnere wirksam sind, so ist im Splitt doch ein entsprechender Prozentsatz von Körnern verminderter Qualität zu erwarten, indem eine oder mehrere Kornoberflächen als Verwitterungsflächen ausgebildet sind. Es kann sich da um Tonhäute, Kalzitbeläge, Glimmerlagen oder Verwitterungsrinden handeln. Typisch sind z. B. die Limonitbeläge in den Glaukonitsandsteinen der helvetischen mittleren Kreide. Kluftfüllungen aus erdigem, mürbem Material werden beim Brechen und Sieben weitgehend aus der Splittfraktion entfernt, allerdings dann wiederum in feineren Fraktionen angereichert.

Zahlreich sind verheilte Klüfte, meistens mit Kalkspat gefüllt und als weiße Adern im Gestein hervortretend. Erwartungsgemäß sollte das Gestein parallel den verheilten Klüften brechen, was aber nur teilweise zutrifft. Der Bruch erfolgt ebenso oft quer zu den Kalzitklüften, er wird von jüngeren, unverheilten Kluftsystemen bestimmt. Dies kann in alpinen Sedimenten leicht beobachtet werden. In Gesteinen mit häufigen Kalzitklüften, z. B. helvetischer Kieselkalk, wäre der Gehalt an Splittkörnern mit Oberflächen aus Kluftkalzit groß, wenn der Bruch vorzugsweise kluftparallel erfolgen würde. Dies würde unter anderem vor allem die Griffigkeit nachteilig beeinflussen. Im allgemeinen, soweit dies beobachtet werden konnte, ist der Gehalt an derartigen Splittkörnern relativ gering, der damit verbundene Qualitätsverlust unbedeutend. Die Kalzitadern können meistens in kleineren Bereichen studiert werden, wo sie quer durch einzelne Splittkörner verlaufen, muß eine geringe Schwächung des betreffenden Kornes angenommen werden.

Ob Vor- oder Nachteile der Klüftung überwiegen, muß in jedem Fall entschieden werden. In bedeutenden Störungszonen sind es jedenfalls die Nachteile, da die Verwitterung dort den leichtesten Zugang hat und kleinste Bereiche von der Klüftung erfaßt werden können. Im Extremfall liegen Mylonitzonen vor.

Der Verwitterungszustand: Darauf wurde bei der Klüftung schon hingewiesen. Es geht darum, festzustellen, wie tief die Verwitterungsrinde reicht und wie schnell sie an frischen Aufschlüssen einsetzt. Damit ist eine Qualitätsbeurteilung schon in diesem Bereich möglich.

Die Überlagerung: Es wird darunter Material verstanden, das vor dem Abbau normalerweise wegzuräumen ist, also Moräne, Humusbedeckung usw. Es ist damit zu rechnen, daß solches Material unfreiwillig in den Abbau gelangt.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß aus der Beobachtung des Großbereiches eine Übersicht über die möglichen Gesteinsvarietäten eines Steinbruches gewonnen werden kann, wobei deren mengenmäßige Verteilung im Produkt, Splitt oder Schotter, nur ungenau vorausgesagt werden kann. Der Anteil sehr schlechter Qualitäten wie Mergel usw. dürfte durch den Verarbeitungsprozeß reduziert werden. Aus der Art der Klüftung ergeben sich Konsequenzen, mehr für den Steinbruchbetrieb als für die Splittqualität. Der Großbereich wird als Ganzes am besten durch Beschreibung erfaßt. Angaben über Vorräte, Betriebssicherheit usw. erfordern natürlich eine Ausdehnung der hier skizzierten Untersuchungen.

Hier ist noch eine Bemerkung zum Begriff Großbereich anzubringen: Es handelt sich um den Bereich, der bezüglich einer nur im Anstehenden feststellbaren Eigenschaft wie Schichtung oder Klüftung, homogen ist. Ungleichmäßigkeiten dieser Eigenschaften sind im statistischen Sinne ausgeglichen. MUELLER (1963) spricht von Homogenbereichen. Von GRENGG (1925) stammen ähnliche Überlegungen, die mehr für den Kleinbereich gelten. Zur Bestimmung der Elementarflächen bzw. -würfel verwendet er eine Schablone. Wenn das in der Schablone sichtbare Bild vom Bild des Gesteins ohne Schablone nicht unterscheidbar ist, dann ist ein Versuch am betreffenden Probestück sinnvoll. Diese Definition kann auf eine oder mehrere Eigenschaften oder Komponenten bezogen werden. Es hat nun beispielsweise keinen Sinn, Gesteinsproben einfach in statistischer Verteilung über den ganzen Steinbruch hinweg zu entnehmen und aus Prüfungen an diesen Proben, die ja im Kleinbereich stattfinden, auf die Eigenschaften des Großbereiches zu schließen. Für Straßenbaugesteine spielt dies, im Gegensatz zur Felsmechanik, sozusagen keine Rolle. Dort will man bekanntlich Versuche am Großbereich direkt ausführen. Es wurde auf diese Zusammenhänge hingewiesen, weil im Kleinbereich, der nun zur Sprache kommt, andersgeartete Bestimmungen auszuführen sind. Es sind Gesteinseigenschaften zu beschreiben, im Gegensatz zu den Felseigenschaften des Großbereiches.

b) Makroskopische Beurteilung

Nach VON MOOS und DE QUERVAIN (1948, 1967) kann da vom Kleinbereich gesprochen werden. Darunter fallen Größenbereiche, die etwa Probeblöcke, Werkstücke, Brechgut, Handstücke bis hinunter zum Splittkorn umfassen und von bloßem Auge, allenfalls mit einer Lupe, beobachtet werden können. Autoren, die die Bedeutung der petrographischen Beschreibung unterstreichen, sind in der allgemeinen Übersicht genannt. In erster Linie geht es um die Identifizierung des Gesteinsmaterials als Grundlage für den Vergleich verschiedener Gesteinsvorkommen und als Anhaltspunkt für die Probenahme, wie sie für die gewünschten physikalischen Prüfungen nötig ist. Meistens müssen die Handelsbezeichnung des Gesteins und die damit vorkommenden Varietäten näher beschrieben werden. Man bedient sich dabei der üblichen Bezeichnungen für Mineralbestand, Struktur und Textur in einer Weise, die auch dem Nichtpetrographen verständlich sein sollte.

Im Splitt erkennbare Gesteinsarten lassen sich im Handstück leichter beschreiben. Umgekehrt sollte man im Handstück erkannte schlechte Qualitäten auch im Splitt erkennen, was nicht immer einfach ist, wie z. B. bei einer feinen Schieferung, besonders, wenn die Splittkörner leicht verschmutzt sind.

Es sind nun Inhomogenitäten, die im Großbereich keine Rolle spielen, zu beachten, wie Feinklüfte, Haarrisse, Tonhäute, kleine Kalzitklüfte, Fossileinlagerungen. Handstückbeschreibungen sind dazu am besten geeignet. Weiter möchte man wissen, ob diese Inhomogenitäten auch im Splittbereich noch vorhanden sind, ob der darauf bezogene Homogenbereich größer oder kleiner als die Splittkorngröße ist, ferner, ob der Klüftkörper für die Feinklüftung die Splittkorngröße einschließt. Allgemein nimmt man an, daß derartige Inhomogenitäten eine Schwächung des Gesteins bedeuten, mit ihrer Beschreibung gelangt man also wiederum zu einer ersten Qualitätsaussage.

In einer ersten Beschreibung kann der Verwitterungszustand, die Frische des Gesteins, beurteilt werden. Die Mineralien sollen lebhaften Glanz und ihre normalen Farben zeigen, rostige Verfärbungen deuten auf

einen gewissen Verwitterungsgrad hin, bei einigen Gesteinsarten in frischem Zustand ist beim Anschlagen ein helles Klingen vernehmbar. Aus dem Verhalten beim Anschlagen und Ritzen kann die Festigkeit summarisch beurteilt werden. Die Kantenfestigkeit kann geprüft werden, indem man eine scharfe Kante von Hand abbrechen versucht. Die Bruchflächen sind auf eine gleichmäßige Rauigkeit zu untersuchen. Qualitätskriterien dieser Art sind in SACHSE (1964) zusammengestellt. Ähnliches kann von Splittproben ausgesagt werden, wo dann allerdings die prozentuale Zusammensetzung des Haufenwerkes (Verunreinigungen, Anteile minderwertiger Qualitäten, verschiedene Kornformen), bestimmt an Stichproben, im Vordergrund steht. Wenn die Splittkörner verunreinigt sind, soll untersucht werden, wie leicht die oft hartnäckig haftenden Schmutz- und Staubbeläge, meistens handelt es sich um Kalkstaub, der beim Brechen entsteht, abwaschbar sind.

Zahlenmäßige Angaben beschränken sich auf Schätzungen von Mineralbestand, Korngröße der Gemengteile, Kornformverhältnisse. Mit Lupe und Binokular läßt sich in der Regel nur wenig mehr aussagen, man erzielt eine gewisse Verfeinerung.

Die makroskopische Beschreibung liefert keine absolute Qualitätsaussage. Sie ist erst in Kombination mit persönlicher Erfahrung brauchbar. Dann kann aber oft entschieden werden, ob ein Gestein mit einem andern bekannter Eigenschaften vergleichbar ist, ob bestimmte Unterschiede neue Prüfungen notwendig erscheinen lassen. Wenn eine Reihe verschiedener Gesteine vorliegt, kann nach der petrographischen Beschreibung eine relative Qualitätseinteilung in fast allen Fällen vorgenommen werden. Insbesondere können schlechte Qualitäten wie Mergel oder Schiefer, ohne weiteres als solche erkannt werden.

c) Mikroskopische Beurteilung

Bei der Beobachtung des Mikrobereiches werden vorerst die makroskopischen Methoden verfeinert. Es sind Mineralbestand, Struktur, Textur genauer zu erfassen, wie dies etwa im HANDBUCH DER MATERIALPRÜFUNG (1957), bei HIRSCHWALD (1912), KNIGHT (1935), STINY (1935), KLEIN (1928), ZELTER (1927) gefordert wird. In unserem Fall kann der Mineralbestand als bekannt vorausgesetzt werden, das Mikroskop muß nicht mehr zur Diagnostizierung verwendet werden. Es sind spezielle Merkmale der Mineralien wie Zersetzungsgrad der Feldspäte, Verwachsungen, Formen usw. genauer zu bestimmen, ferner ist ihr Mengenanteil zu schätzen. Akzessorien sind nur wichtig, wenn sie chemisch aktiv sein können wie etwa Glas, Tonmineralien, Pyrit und andere Sulfide. Die Bestimmung eines Bindemittels oder einer Grundmasse bereitet Schwierigkeiten. Das Bindemittel wird häufig mit Bezeichnungen wie tonig, kalkig, limonitisch umschrieben, meist im Bewußtsein, daß eine genaue Bestimmung damit noch aussteht. Auf sekundäres Mineralwachstum ist zu achten, weil damit eine Beeinflussung der Festigkeit verbunden sein kann. Die Struktur ist zu beschreiben, die Korngrößen können geschätzt werden. An textuellen Merkmalen sind Einregelungen und Mikroklüfte von Bedeutung. Im übrigen ist von Fall zu Fall zu entscheiden, welche mikroskopischen Methoden anzuwenden sind.

Für die Beurteilung der Gesteinseigenschaften nach der mikroskopischen Beschreibung gilt, wie für die Handstückbeschreibung, daß persönliche Erfahrungen mit einigen Faustregeln zusammen anzuwenden sind. Als Bedingungen für gute Qualität können in zwangsloser Aufzählung gelten: Feldspäte nicht kaolinitisiert (Saussuritbildung kein Nachteil), Fehlen von tonigem Bindemittel und von limonitischen Einschlüssen, bei Sandsteinen ist direkte Kornbindung vorteilhaft, gut spaltbare Mineralien müssen klein sein, Glimmer dürfen nicht in Lagen durchgehend angeordnet sein. Auf weitere Regeln dieser Art wird man bei einzelnen Gesteinen stoßen.

Nun können mit dem Mikroskop auch genaue Messungen ausgeführt werden, die eine Bestimmung von Variablen erlauben, die bei verschiedenen Versuchen eine Rolle spielen können. Es handelt sich im wesentlichen um die folgenden Bestimmungen:

Quantitative Bestimmung des Mineralbestandes

Die gebräuchlichen Methoden können in MUELLER (1964) nachgelesen werden. Von der Verbesserung von Schätzungen mit Vergleichsbildern ist kein großer Vorteil zu erwarten. Häufig benützt werden die Integrationsmethoden nach Delesse-Rosiwal oder Shand und das Punktzählverfahren nach Chayes. Letzteres ist schnell durchführbar und wurde hier deshalb benützt. Mit «point-counter» und Zählgerät können die wichtigsten

Gesteinskomponenten gut erfaßt werden. 500 Zählpunkte lassen sich ohne weiteres in 10–15 Minuten auszählen. Diese Anzahl ergibt für die Hauptgemengteile eine gute Genauigkeit, für akzessorische Gemengteile muß natürlich mit einem großen Fehler gerechnet werden, was für unsere Zwecke aber belanglos ist. Es sei hier auf die Nomogramme zur Ermittlung von mittleren absoluten und relativen Fehlern in MUELLER (1964) hingewiesen.

Bindemittel bei Sandsteinen und Grundmasse bei kristallinen Gesteinen wurden jeweils als eine Komponente aufgefaßt. Stark zersetzte Mineralien wurden auch als Grundmasse ausgezählt. Hier spielen natürlich willkürliche Entscheidungen mit, was aber bei genügender Schliffzahl nicht ins Gewicht fiel. Gesteine mit schiefriger Textur wurden in der Regel parallel und senkrecht zur Schieferung ausgezählt, ohne daß dabei große Differenzen entstanden wären. Wieweit von einzelnen Dünnschliffen auf die Gesteinszusammensetzung geschlossen werden kann, hängt natürlich von der Auswahl der Schliffe ab.

Bestimmung der Mineralkorngröße

Hier treten nun schon größere Schwierigkeiten auf. Die Verfahren sind wiederum in MUELLER (1964) aufgeführt. Es haben verschiedene Autoren versucht, die Bestimmung der Korngröße im Dünnschliff theoretisch herzuleiten. Wir verweisen auf die Diskussion der Methoden in VUAGNAT (1949) und ROETHLISBERGER (1957). Röthlisberger hat unter Annahme einer bestimmten Verteilung kugeligter Komponenten einen mathematischen Lösungsvorschlag ausgearbeitet, der an Betonproben oder Proben von Konglomeraten mit gut gerundeten Komponenten angewendet werden kann, also im makroskopischen Bereich. Es werden die Durchmesser der Kornprojektionen längs einer bestimmten Linie gemessen. Unter gewissen Voraussetzungen dürfte auch eine Anwendung im Dünnschliffbereich möglich sein.

FRIEDMAN (1958) untersuchte Sandsteine mittels Sieb- und Schliffanalysen. Er mißt die scheinbar größten Durchmesser an 500 Körnern, die mit dem «point-counter» über den Schliff verteilt, ausgewählt werden und stellt das Ergebnis in Summationskurven dar. Für die Umrechnung auf das Ergebnis der Siebanalysen kann er einen konstanten Faktor ermitteln. Die Methode stimmt für gut sortierte Sandsteine mit lognormaler Kornverteilung und über 70% Quarzgehalt am besten, kann aber nicht ohne weiteres auf beliebige Gesteine übertragen werden.

Es ist nun durchaus möglich, in beliebigen Schliffen die größten scheinbaren Durchmesser einer bestimmten Anzahl von Körnern zu messen. Wir entfernen uns vom Ergebnis einer hypothetischen Siebanalyse um so mehr, je weiter die Kornformen von der Kugelform abweichen. Bei stengligen Mineralien mißt man in allen Schnittlagen nicht senkrecht zur Längsachse mit dem scheinbar größten Durchmesser eine Größe, die über dem mittleren Durchmesser, über der Breite liegt. Ein direkter Vergleich mit einer angenommenen Siebanalyse müßte sich aber auf die Breite stützen. Wenn angenommen wird, daß die Häufigkeit beliebiger Schnitte stengliger Mineralien größer ist als die Häufigkeit der Schnitte senkrecht zur Längsachse, werden die Korngrößen zur Hauptsache als zu groß bestimmt. Es wird hier deshalb besser von relativer Korngröße gesprochen. Es darf angenommen werden, daß nur starke Größenunterschiede von bedeutendem Einfluß auf die technischen Eigenschaften sind. Quarzkörner und Körner im Bindemittel, Feldspateinsprenglinge und Sandquarzkörner bei Gneisen, Hornblenden und Grundmasse bei Amphiboliten sind jeweils um Größenordnungen voneinander verschieden. Diese Größenunterschiede werden durch die verschiedenen Schnittlagen nicht verwischt. Summationskurven, aus Messungen an 500 Körnern gewonnen, können für verschiedene Gesteine durch Parameter wie Quartilmaße, Median, Sortierungskoeffizienten usw. charakterisiert werden. Es wird nun vermutet, daß die Korngrößenverhältnisse für die Griffigkeit von Bedeutung sind. So wie die Messungen an Schnittflächen ausgeführt werden, spielt für die Griffigkeit ebenfalls nur die Anordnung der Mineralien in einer Ebene eine Rolle. Es ist deshalb gerechtfertigt, von Messungen am Dünnschliff direkt auf die Beschaffenheit einer Gesteinsfläche zu schließen.

Praktisch wurde wie folgt vorgegangen: Über den Schliff wurden wiederum 500 Punkte mittels des «point-counters» gezählt. Zur Bestimmung des größten Korndurchmessers wurde ein Okular mit Strichteilung verwendet; bei stärkster Vergrößerung entspricht ein Teilstrich etwa 0,01 mm. Die Mineralkörner werden Klassen von weniger als 1, 1–3, 3–10, 10–30 Teilstrichen zugeordnet. Unter Verwendung der drei üblichen Objektive, vorteilhaft auf einem Objektivrevolver, ergibt sich so ein logarithmischer Maßstab über einen großen Bereich. Aus der Summationskurve kann dann Median und Sortierungskoeffizient herausgelesen werden. Der

Median, der Korndurchmesser der Ordinate 50%, kann als mittlere scheinbare Korngröße bezeichnet werden. Wiederholte Messungen am gleichen Schliff ergaben gute Übereinstimmung der Sieblinien, das gleiche traf auch für äußerlich gleiche Gesteine zu. Unterschiede im makroskopischen Befund ergaben verschiedene Summationskurven.

Bestimmung der Kornbindung

Nach HIRSCHWALD (1912) ist die Festigkeit der Sandsteine von der Art der Kornbindung abhängig und besonders groß, wenn die Quarzkörner durch sekundäres Wachstum direkt miteinander verwachsen sind. Er hat versucht, die Verwachsungsfläche zu bestimmen. Dazu hat er die Strecke gemessen, mit der die Komponenten auf eine bestimmte Meßlänge bezogen aneinander grenzen und daraus ein Bindungsmaß bestimmt. Die Methode ist ziemlich zeitraubend.

Man kann nun ein Bindungsmaß auch aus dem Gehalt an Bindemittel oder Grundmasse ableiten. Wenn direkte Kornverwachsungen häufig sind, wird der Bindemittelanteil kleiner, ebenso der Anteil feiner Korngrößen. Beide Größen kann man der Mineral- und Korngrößenanalyse entnehmen, das Messen der Kornbindung fällt weg. Der Zusammenhang mit der Festigkeit ist schon für Sandsteine nicht allgemein gültig; für andere Gesteinsarten kann mit direkter Kornverwachsung oft eine Festigkeitsabnahme verbunden sein. Deshalb wurde dieser Bestimmung kein allzu großes Gewicht beigemessen.

Kornform und Kornrundung

Die Bestimmungsmethoden sind recht kompliziert und zeitraubend. Da bedeutende Aussagen aus der Mineralkornform nicht zu erwarten sind, begnügen wir uns mit einer allgemeinen Charakterisierung, die zusammen mit der allgemeinen Strukturbeschreibung vorgenommen werden kann.

Die Porosität

Da die im Straßenbau verwendeten Gesteine im allgemeinen kompakt sind, kann man mit dieser Eigenschaft nicht viel anfangen und wird eine Bestimmung von Poren sehr schwierig. Wo sie zufällig in größerem Maße auftreten, können sie immer noch bei der Auszählung des Mineralbestandes berücksichtigt werden.

Abschließend ist zu bemerken, daß die mikroskopische Untersuchung oft überbewertet wird. Meistens kann doch die Qualitätsbeurteilung makroskopisch sehr weitgehend durchgeführt werden; die Untersuchung im Mikroskop liefert meistens nur noch die Bestätigung der Aussagen und die erwähnte Bestimmung von Mineralbestand und Korngröße.

Für die Untersuchung von Produkten, die bei Versuchen entstehen, können Pulverpräparate verwendet werden. Neue Methoden treten gegenüber dem Dünnschliff nicht auf.

Man gelangt bald an die Grenzen normal mikroskopischer Verfahren. So ist bei Kieselkalken die Kieselmasse durch Anätzen eines Handstückes mit HCl besser sichtbar zu machen. Im Dünnschliff kann der Kieselgehalt wegen der hohen Doppelbrechung des Kalkspates der Beobachtung ohne weiteres entgehen. In der Literatur sind deshalb auch verschiedene Fehlbestimmungen zu finden.

Es wurde auf die Schwierigkeiten in der Bestimmung von Bindemittel oder Grundmasse hingewiesen. Genauere Aussagen über die Bindemittelzusammensetzung von Sedimenten sind im Mikroskop kaum möglich. So kann nicht entschieden werden, ob ein Tonmineral, es müßte sich vor allem um Illit handeln, oder schon Serizit vorliegt. Wo man mehr gefühlsmäßig von toniger Zusammensetzung spricht, dürfte besonders in alpinen Sedimenten vor allem Serizit vorhanden sein.

Die Diagnose kann röntgenographisch vervollständigt werden, wobei die Struktur der Tonmineralien auch diesen Methoden Grenzen setzt. Es wurde zu entscheiden versucht, ob Illit oder Serizit vorkommt. Angaben über diese Mineralien können BROWN (1961) entnommen werden.

Illit steht nicht für ein exakt definiertes Mineral, sondern allgemeiner für die Gruppe der glimmerartigen Tonmineralien mit wechselhafter Schichtanordnung. Muskowit oder Serizit ist genauer umschrieben, wenn auch im Detail immer noch verschiedene Strukturen möglich sind. Als Formel kann für Muskowit bzw. Serizit $\text{KA}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ angegeben werden. In einer Formel für Illit müßten weitere Kationen wie Na, Ca, Mg, Mn, Fe auftreten; wichtigster Unterschied zum Serizit ist aber der Gehalt von 4 bis 5 H_2O Molekülen.

Nach BROWN (1961) liegen zwischen Muskowit und Illit die sogenannten Hydromuskowite; unter Serizit wird manchmal auch Hydromuskowit verstanden. Es kommen offenbar alle möglichen Übergänge vor.

Die Pulverdiagramme von Muskowit oder Serizit und von Illit sehen sehr ähnlich aus. So fallen besonders die stärksten Linien zusammen. Unterscheiden kann man die Diagramme daran, daß Muskowit und Serizit mehr Linien aufweisen als die Illite. Neben dem bei Muskowit und Illit starken Reflex 202, 131 liegt beim Muskowit der deutlich erkennbare Reflex 200 ($d = 2,56$ und $2,585$). Diese Doppellinie ist offenbar charakteristisch. Dann sind ferner verschiedene Linien für den Muskowit von größerer Intensität als für den Illit. Die Anwesenheit von Glaukonit wirkt sehr erschwerend, da dieser ein sehr ähnliches Pulverdiagramm liefert, weil er der gleichen Mineralgruppe angehört.

Die Aufnahmen erfolgten zuerst am pulverisierten Gestein; ein zweites Mal nach Herauslösen des Kalkspates mit HCl, wodurch die fraglichen Linien deutlicher herauskamen. Die Proben stammten hauptsächlich aus Kieselkalken und Sandsteinen, Quarzlinien waren in den Pulverdiagrammen deshalb nicht zu vermeiden. Der Quarzgehalt hat aber offenbar auch eine stärkere Einregelung der Ton- oder Glimmerpartikel im Präparat verhindert, die für Pulveraufnahmen von Nachteil wäre. Für genauere Untersuchungen hätten allerdings auch Texturpräparate hergestellt werden müssen, die der Bestimmung des für Tonminerale charakteristischen 001-Reflexes dienen.

Die Bestimmungen mit der de Wolff-Kamera (Fe-K α -Strahlung) ergaben kein endgültiges Resultat. Die Aufnahmen zeigen aber eine bessere Übereinstimmung mit bekannten Serizitdiagrammen als mit jenen von Illit und lassen schließen, daß in alpinen Kalken, Kieselkalken, Sandsteinen und damit vorkommenden schieferigen Zwischenlagen in Grundmasse oder Bindemittel Serizit vorhanden ist. Ob dieser Serizit allenfalls noch als Hydromuskowit bezeichnet werden muß und ob trotzdem noch Illite oder andere Tonminerale vorhanden sind, kann nicht ausgesagt werden. Eine abschließende Untersuchung der optisch nicht bestimmbaren Gemengteile alpiner Sedimente, die sehr wünschenswert wäre, würde einen sehr großen Aufwand erfordern, da nur die Anwendung verschiedener Methoden erfolgversprechend ist. In gewöhnlichen Pulveraufnahmen lassen sich die Linien und Intensitäten zu wenig genau ausmessen; es sind Goniometeraufnahmen von Texturpräparaten, wenn möglich auch von texturfreien, notwendig. Weiter müßte die Ionentauschfähigkeit untersucht und zu Elektronenmikroskopie und DTA-Methoden gegriffen werden. Dies wäre für unsere Zwecke zu weit gegangen.

2. Praktisch-physikalische Methoden

a) Kornformbestimmung

Auf die Bedeutung der Kornform von Splitt- und Schotterkörnern haben wohl alle Autoren, die sich mit der Prüfung von gebrochenem Gestein befaßt haben, hingewiesen. Deshalb sind viele verschiedene Verfahren und Lösungsmöglichkeiten vorgeschlagen worden. Ausgegangen wurde in den meisten Fällen von der Beurteilung von Bahnschotter.

Die Kornform hat einen unmittelbaren Einfluß auf die Belagsqualität. Die erzielbare Verdichtung, der Hohlraumgehalt des Haufenwerkes hängt davon ab, damit der Bedarf an Filler und Bindemittel, was wirtschaftliche Konsequenzen hat. Weiter wird angenommen, daß kubische Splittkörner im Belagsverband größeren Belastungen widerstehen können. In den Qualitätsanforderungen wird deswegen ein möglichst kubischer Splitt verlangt. Die Prüfverfahren müssen rasch ausführbar sein, die Begutachtung der Formen nach Augenschein erfüllt diese Bedingung am besten. Durch Verwendung von speziellen Schublehren, Meßscheren, Schablonen und Spaltsieben wird die direkte Bestimmung von Kornabmessungen, denn diese nimmt vor allem Zeit in Anspruch, umgangen.

Die Kornform tritt bei verschiedenen Prüfverfahren als Variable auf, so bei der Schüttraumgewichtsbestimmung, bei Druck- und Schlagversuchen und bei Deval- und ähnlichen Prüfungen. Hier sollte man auch wenig verschiedene Kornformen auseinanderhalten können, die Verfahren müssen genauer sein. Es werden die Hauptdurchmesser, das Gewicht, Volumen gemessen. Die Form wird dann zum Beispiel als Verhältnis des Kornvolumens zu einer Idealform (Würfel, Kugel, Prisma, Ellipsoid) ausgedrückt. Für Stichproben werden zusammenfassende Ausdrücke (Summen, Durchschnitte usw.) verwendet. Für die Praxis kommen alle diese genaueren Methoden nicht in Frage, sondern nur für die Beurteilung anderer Prüfmethoden.

Entwicklung der Kornformbestimmungsmethoden

Frühe Arbeiten beschäftigen sich, ausgehend von geologischen Fragestellungen, mit Geröllformen. KATHREIN (1927) diskutiert den Einfluß der Kornform auf Siebanalysen. Um 1930 herum wird die Kornform auch direkt als Qualitätsmerkmal begutachtet. ROTHFUCHS (1931) hat die Anzahl Körner pro Volumen, später pro Gewicht, als Maß für die Kornformgüte ausgewählt. Kubische Körner sollen schwerer sein als schlecht geformte. Langstenglige Körner werden aber genau so gut wie kubische beurteilt. KRUEGER (1932) hat die Methode trotzdem übernommen, dazu aber die Beurteilung nach Augenschein verlangt. Nach KNIGHT (1935) sind messende Verfahren in Großbritannien noch nicht gebräuchlich.

WALZ (1936, 1939, 1941) erläutert die Kornformbestimmung im Handbuch der Materialprüfung. Die gleiche Methode ist auch in den DIN-Normen festgehalten. Vorerst wird an der Beurteilung nach Augenschein festgehalten, in zweifelhaften Fällen soll aber zu messenden Verfahren gegriffen werden. Es sind drei aufeinander senkrecht stehende Korndurchmesser zu bestimmen, die dem kleinsten umschriebenen Prisma entsprechen. Die Form wird dann durch die Verhältnisse von Dicke zu Breite und von Länge zu Breite ausgedrückt. Grenzwerte dieser Verhältnisse sind in den Normen festgelegt.

ROESSLEIN (1941) verzichtet zur Beschleunigung der Methode auf direkte Messungen, er verwendet eine verstellbare Grenzlehre oder Meßschere, die ein Bestimmen der Achsenverhältnisse erlaubt. Die Meßschere beruht auf dem Prinzip des Strahlensatzes.

SHERGOLD (1951) beschreibt die in den British Standards 812: 1951 enthaltenen Verfahren. Für eine erste Beurteilung wird die Bedeutung der Betrachtung durch Augenschein unterstrichen. Das Prüfgut wird durch Siebung auf Sieben benachbarter Öffnungsweite in Fraktionen gleicher Breite zerlegt. Mit Schablonen, die ovale, langgestreckte Öffnungen enthalten, oder auch mit entsprechenden Sieben können die Körner nach ihrer Dicke weiter aufgeteilt werden, derart, daß die Dicke drei Fünftel der Breite beträgt. Eine analoge Überprüfung des Verhältnisses von Länge zu Breite = 9:5 kann mit Röhrchen von rundem Querschnitt vorgenommen werden.

Zum Vergleich verschiedener Proben sind graphische Darstellungen erwünscht. DE QUERVAIN (1950) verwendet dazu die bekannte Darstellungsart von ZINGG (1935), die für Gerölle entwickelt wurde. Als Koordinatenachsen sind die Verhältnisse Breite zu Länge und Dicke zu Breite zu verwenden. Die Proben können so leicht in ihre Anteile von kubischen, stengligen, flachen und flachstengligen Körnern aufgeteilt werden. Diese Abgrenzungen sind natürlich vorher zu definieren.

Nach französischen Vorschriften (BOUCHAYER, 1952) muß die Kornbreite größer sein als ein Sechstel der Summe von Dicke und Länge. Mit Spaltsieben soll eine Fraktionierung nach der Dicke auch an größeren Proben durchgeführt werden können. Dazu ist zu bemerken, daß Spaltsiebe nur für Proben mit Körnern gleicher Breite brauchbar sind. Eine Splittprobe müßte deshalb zuerst mit gewöhnlichen Lochsieben in möglichst kleine Fraktionsbereiche (benachbarte Siebe im Siebsatz) aufgeteilt werden.

AHU (1952) benützt das Verhältnis des Volumens des kleinsten eingeschriebenen Würfels, bestimmt aus der Dicke, zum Kornvolumen, ferner auch das Quadrat des Verhältnisses von Dicke zu Breite. Zwischen beiden Ausdrücken soll eine lineare Korrelation bestehen.

SCHULZ (1952, 1954) bemüht sich um die Kombination der Methoden von Rothfuchs (Körnerzahl) und Walz (Messung der Hauptachsen). Beim Vergleich der Methoden soll darauf noch eingegangen werden.

Ein Schnellverfahren wird von SCHULZE (1953) vorgeschlagen. Er mißt nur noch Dicke und Länge eines Kornes. Mittels einer speziellen Schublehre, die bei einer eingestellten Länge die dazu in einem bestimmten Verhältnis stehende Dicke angibt, kann eine rasche Unterteilung des Prüfgutes in kubische und nichtkubische Körner vorgenommen werden. Das Verfahren ist für die Praxis bestens geeignet und hat Aufnahme in die meisten Vorschriften gefunden.

Grundsätzlich neue Gesichtspunkte wurden von MORGENBROD (1955, 1956, 1961) angeführt. Zur Beurteilung der Kornformgüte spielt neben den Abmessungen auch der Grad der Raumauffüllung eine Rolle. Morgenbrod vergleicht das Kornvolumen mit dem umschriebenen Prisma, das Kornvolumen wird aus dem Korngewicht und dem spezifischen Gewicht des Gesteins bestimmt. Mit Hilfe der Korrelationsrechnung untersucht er die Beziehungen zwischen Achsenverhältnissen und Raumauffüllung; es wird darauf noch eingegangen. Ferner schlägt er ein Darstellungssystem vor, in dem die absolute Größe der Körner zum Ausdruck kommt, was bei der Zingg'schen Darstellung nicht möglich ist. Allerdings muß er dazu die Fraktionsbreite stark eingengen. Er hat aber erstmals moderne statistische Methoden zur Anwendung gebracht.

In Belgien ist nach VAN ELSSEN (1956) ein Quotient der Summe der kleinsten und der Summe der größten Durchmesser einer Probe als Formindex gebräuchlich.

Für die praktische Anwendung wird in einem Merkblatt der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen verlangt, daß maximal 20% der Körner einer Probe ein Verhältnis von größtem zu kleinstem Durchmesser größer als 3:1 haben. Dies soll nach Augenschein festgestellt werden, erst in Zweifelsfällen mit der Schiebellehre nach Schulze. Die ASTM-Vorschrift verlangt für gebrochenes Material einfach, daß kein Überschuß von dünnen und länglichen Stücken vorhanden sein soll. (ASTM-Designation D 693 – 54). WALZ (1957) beschreibt schließlich in der zweiten Auflage des Handbuches der Materialprüfung ein Gerät, das die Bestimmung der Achsverhältnisse erlaubt.

Eine letzte Zusammenfassung bestehender Verfahren geben DANTINNE und LONGUEVILLE (1965). Sie erwähnen besonders die französische Methode mit Spaltsieben (siehe dazu PELTIER [1963]). Ferner besteht in Frankreich ein Formkoeffizient für das Einzelkorn, der auf das Volumen der kornumschriebenen Kugel bezogen wird. Die Schweiz. Normen definieren die Kornform durch die drei Hauptdurchmesser. Als Qualitätskriterium wird das Verhältnis von kürzestem zu längstem Durchmesser benützt, es kann die Schiebellehre von Schulze verwendet werden.

LEES (1964) zeigt, daß geübte Beobachter von Auge eine genügende Klassifizierung zustande bringen, sonst genügt die Anwendung von Meßscheren und Schiebellehren vollauf. Als beste Darstellungsmethode empfiehlt er die Zinggsche Darstellung.

Heute sind wir soweit, daß für den praktischen Gebrauch einfache Bestimmungsmethoden eingeführt sind, die eine schnelle Beurteilung von Lieferungen usw. erlauben. Für wissenschaftliche Ansprüche stehen verschiedene Möglichkeiten offen, die aber durchaus noch verbesserungsfähig sind. Bevor die Methoden verglichen werden, sind einige Gedanken über das Messen der Kornformgrößen anzubringen.

Messen von Kornformcharakteristiken

Das Problem, Länge, Breite und Dicke eines Splittkorns zu messen, scheint einfach zu sein. Diese drei Größen, fortan mit a , b und c bezeichnet, sind bei den unregelmäßigen Formen der Splittkörner nicht immer auf den ersten Blick genau zu ermitteln, ihre Lage ist oft mehrdeutig. Es wird meistens verlangt, daß die drei Abmessungen senkrecht aufeinander stehen, von verschiedenen Autoren werden sie deshalb als Kantenlängen des kleinsten, dem Korn zu umschreibenden Prismas aufgefaßt. Das Prismenvolumen wird dann in verschiedenen Formindizes als Bezugsgröße verwendet. Diese Definition führt aber zu Widersprüchen, wenn man mit der Messung auch die absolute Korngröße festhalten will, um sie mit der durch Siebung bestimmten Korngröße vergleichen zu können. Als maßgebend für den Siebdurchgang bezeichnet man die Breite b . Im Splittbereich werden nun heute ausschließlich Rundlochsiebe verwendet. Das bedeutet für Körner mit quadratischen oder rechteckigen Querschnitten, daß nicht die Seitenlänge, sondern die längste Diagonale dieser Querschnitte für den Siebdurchgang maßgebend ist. Das derart bestimmte b entspricht dann nicht mehr dem b des kleinsten umschriebenen Prismas. Die Definition des Prismas wird somit mehrdeutig. Man könnte den Schwierigkeiten ausweichen, wenn man an Stelle des Prismas das umschriebene Ellipsoid verwenden würde. Wenn die Anforderung fallen gelassen wird, daß die Hauptachsen senkrecht aufeinander stehen müssen, kann beim Ausmessen eines Kornes nach LEES (1964) und VSS-Normen (1966) wie folgt vorgegangen werden:

Man stellt sich zuerst vor, in welcher Lage ein Korn durch eine runde Öffnung durchgehen würde und bestimmt so b . Für c stellt man die gleiche Überlegung auf den Durchgang durch eine Spaltöffnung an. Die größte Länge wäre dann als Durchgang durch ein hypothetisches dreidimensionales Sieb zu verstehen. Man erhält so beispielsweise für einen Würfel als Länge, Breite und Dicke die Raumdiagonale, die Flächendiagonale und die Seitenlänge. Als bestmögliche kubische Form bleibt dann nur noch die Kugel übrig. Derartige Messungen werden nicht allzu genau sein und zwar trifft das für mehr oder weniger isometrische Körner besonders zu. Aus Meßfehlern ergeben sich dort aber nicht schwerwiegende Fehlbeurteilungen. Bei extrem flachen oder stengligen Formen sind die Abmessungen für den Beobachter viel genauer definiert, die Gefahr, schlechte Formen zu gut zu beurteilen, ist deshalb gering. Ein Prismawert als Produkt $a \cdot b \cdot c$ kann natürlich immer noch berechnet werden, doch entspricht er nicht mehr dem kleinsten umschriebenen Prisma, was bei der Festlegung von Minimalanforderungen zu berücksichtigen ist.

Im Gegensatz zu den Ausmaßen läßt sich nun das Gewicht eines Kornes viel genauer bestimmen. Mit modernen Waagen zudem auch sehr rasch. Wenn das Gesteinsraumgewicht genügend genau bekannt ist, kann das Kornvolumen zuverlässig bestimmt werden.

Die Meßfehler wurden an einem Beispiel überprüft. Eine Serie von 10 Splittkörnern wurde fünfmal nacheinander ausgemessen und gewogen. Der wahrscheinlichste Wert einer Größe ist dann das arithmetische

Mittel, der mittlere Fehler einer Beobachtung berechnet sich aus $m = \sqrt{\frac{(vv)}{n-1}}$ mit (vv) = Summe der Abweichungsquadrate vom arithmetischen Mittel und n = Zahl der Messungen. Daraus kann der mittlere

Fehler am Mittel zu $m_x = \frac{m}{\sqrt{n}}$ bestimmt werden. Aus zeitlichen Gründen führt man allerdings in praktischer Anwendung eine Messung nur einmal durch, weshalb hier die Berechnung des m_x weggelassen wurde. Die in diesem Beispiel berechneten Beobachtungsfehler ergeben trotzdem einen Überblick über die Verhältnisse. (a, b, c mit Schublehre gemessen mit Ablesung der Zehntelmillimeter am Nonius; Wägung auf Mettlerwaage mit zulässiger Belastung 800 g, Hundertstelgramme geschätzt.)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a (Millimeter, Mittel)	17,7	15,4	19,0	20,9	17,3	21,7	20,5	16,9	18,3	18,9
Mittl. Beob.fehler	0,17	0,07	0,07	0,27	0,07	0,27	0,23	0,23	0,16	0,42
In Prozent	0,98	0,46	0,37	1,30	0,40	1,25	1,15	1,35	0,88	2,23
b (Millimeter, Mittel)	15,1	12,1	14,1	9,8	15,2	15,4	14,1	12,6	10,0	15,4
Mittl. Beob.fehler	0,20	0,12	1,03	1,34	0,15	0,50	0,46	0,54	0,00	0,46
In Prozent	1,06	0,99	7,30	13,5	0,99	3,25	3,30	4,28	0,00	3,00
c (Millimeter, Mittel)	4,8	8,9	9,9	9,1	9,2	7,8	9,1	10,0	5,1	8,7
Mittl. Beob.fehler	0,07	0,32	0,36	0,52	0,24	0,28	0,36	0,07	1,16	0,21
In Prozent	1,46	3,60	3,65	5,70	2,61	3,60	3,95	0,70	3,15	2,41
g (Gramm, Mittel)	1,38	1,40	2,60	2,78	2,30	2,49	2,64	2,02	1,18	2,70
Mittl. Beob.fehler	0,007	0,000	0,000	0,002	0,007	0,007	0,007	0,002	0,007	0,007
In Prozent	0,50	0,00	0,00	0,07	0,30	0,28	0,27	0,01	0,59	0,26

Aus der Tabelle ist sofort zu sehen, daß die Meßfehler für g bedeutend geringer sind als für die Achsenabmessungen. Ferner ist a eindeutig genauer meßbar als b oder c.

Die b-Werte sind am unregelmäßigsten ausgefallen, die Breite b erscheint dem Auge weniger gut definierbar als a und c, wo sich die Fehler besser um einen Mittelwert gruppieren lassen. Für c kommen die prozentualen Fehler wegen der kleineren Distanz natürlicherweise größer heraus.

Es ist nun noch zu untersuchen, wie sich Beobachtungsfehler auf Größen auswirken, die aus den gemessenen Werten zu berechnen sind. Wir können die Einflüsse mit Hilfe des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes abschätzen. Als Beispiele wählen wir den Prismawert, das Produkt abc aus und das aus Korngewicht und Gesteinsraumgewicht bestimmte Volumen g/γ .

Es sind m_a , m_b , m_c , m_g , und m_γ die mittleren Fehler am Mittel der Größen a, b, c (Kornabmessungen), Gewicht g und Raumgewicht γ . Wir erhalten für den mittleren Fehler m_p^2 des Produktes abc:

$$m_p^2 = (bc)^2 \cdot m_a^2 + (ac)^2 \cdot m_b^2 + (ab)^2 \cdot m_c^2$$

und für den mittleren Fehler m_v^2 des Volumens:

$$m_v^2 = \left(\frac{1}{\gamma}\right)^2 \cdot m_g^2 + \left(-\frac{g}{\gamma^2}\right)^2 \cdot m_\gamma^2$$

Die Fehlerfortpflanzung ist für den Prismawert ungünstiger, da in allen Gliedern der Gleichung die Produkte von je zwei Abmessungen auftreten. Der Fehler vergrößert sich so mit zunehmenden Kornabmessungen. Andererseits werden die Fehler an den einzelnen Abmessungen für große Abmessungen kleiner, da die Handhabung der Schublehre mit großen Splittkörnern erheblich einfacher ist. Für ein Splittkorn der Abmessung $a = 15$, $b = 10$ und $c = 8$ mm ergibt sich mit der optimistischen Annahme $m_a = \pm 0,2$, $m_b = \pm 0,5$ und $m_c = \pm 0,3$ mm am Prismawert ein Fehler von etwa 7%. Dieser Fehler wäre noch angängig, wenn nicht mit

großen systematischen Fehlern zu rechnen wäre, die aber gerade für die Größen a , b und c nicht leicht zu vermeiden sind.

Für den mittleren Fehler am Volumen liegen die Verhältnisse günstiger, da das Raumgewicht in der ersten oder zweiten Potenz im Nenner auftritt. Gleichzeitig können auch kleine Gewichte g sehr genau bestimmt werden, was sich im zweiten Glied der Gleichung vorteilhaft auswirkt. Da der Fehler am Gewicht sehr klein ist, spielt das erste Glied eine unwesentliche Rolle. Für ein Splittkorn mit einem Raumgewicht von $2,5 \text{ g/cm}^3$ und einem Gewicht von $2,5 \text{ g}$ wird der Fehler am Volumen etwa 4% betragen, wenn m_γ zu $-0,1 \text{ g/cm}^3$ und m_g zu $\pm 0,005 \text{ g}$ angenommen werden. Im Kapitel Raumgewichtsbestimmung kann gezeigt werden, daß der Fehler für das Raumgewicht leicht kleiner gehalten werden kann. Zudem sind systematische Fehler beim Wägen leichter zu vermeiden als beim Messen mit der Schublehre. Die Volumenbestimmung ist wesentlich genauer als die Bestimmung des Prismawertes. Formindizes, die Gewicht oder Volumen verwenden, sind deshalb vorzuziehen.

Unter dem Gesichtspunkt der Genauigkeit ist deshalb auch die Verwendung der kornumschriebenen Kugel vorteilhaft, da nur a mit dem kleinsten Fehler der drei Achsen auftritt. Der Vollständigkeit halber sei ergänzt, daß auch die Verhältnisse b/a , c/b , c/a eine günstigere Fehlerausbreitung ergeben. Ein Vermindern der Fehler durch wiederholtes Messen, der Beobachtungsfehler kann durch die Wurzel aus der Zahl der Messungen dividiert werden, kommt aus zeitlichen Gründen nicht in Frage.

Beeinflussung der Kornform

ROESSLEIN (1941) hat die Wirkung verschiedener Gesteinsbrecher (Backenbrecher) miteinander verglichen. Der Anfall kubischer Körner überschritt in keinem Fall 57% des Brechproduktes mit einem größten Anteil in den Fraktionen im Größenbereich der mittleren Brecheröffnung. Die größten gerade noch durchgehenden Körner hatten, wie auch die feinkörnigen Fraktionen, die schlechtesten Formen. Brecherart, Drehzahl, Zustand der Brecherbacken usw. haben wohl einen Einfluß auf die Kornform, diese wird zur Hauptsache doch von der Gesteinsart bestimmt.

In einer Übersicht von SHERGOLD und GREYSMITH (1947) wird aber festgestellt, daß die Meinungen über den Einfluß der Petrographie geteilt sind. Harte Gesteine liefern eher splittiges Material. (Splittig können Körner mit schlechten Formen und besonders scharfen Kanten und Ecken, Glassplintern vergleichbar, bezeichnet werden.) Schlechte Formen können durch nochmaliges Brechen verbessert werden («Edelsplitt»). Die besten Formen sollen in Schlagbrechern erzeugt werden können. Andere Arten liefern bei günstiger Einstellung von Vor-, Hauptbrecher und Granulator ebenfalls gute Resultate. Die Größe des Brechgutes muß zur Korngröße des Produktes in einem gewissen Verhältnis stehen. Die Brecheröffnung darf nicht zu klein sein, man darf keine extreme Zerkleinerung bewerkstelligen wollen, es muß einen optimalen Reduktionsfaktor geben. PAULS und CARPENTER (1948) weisen auf die Beeinflussung der Kornform durch die Brechereinstellung hin; nach RHOADES und MIELENZ (1948) ist wiederum die Gesteinsart, vor allem die Gesteinstextur der bestimmende Faktor.

MORGENBROD (1961) hält fest, daß sich der Bruch dort vollzieht, wo dazu eine minimale Arbeit nötig ist. Bei homogenen, gesunden Gesteinen soll deshalb ein Brechen nach gewissen Gesetzmäßigkeiten zu erwarten sein. Ein massiges Gestein muß aber nicht unbedingt einen kubischen Splitt ergeben und ein lagiges Gestein nicht unbedingt einen plattigen oder stengligen. Die Beeinflussung ist wiederum mit der Brechereinstellung möglich.

Es soll hier eine einfache Beobachtung beigelegt werden. Langgestreckte Splittkörner lassen sich, oft von Hand, leicht zerbrechen. Der Bruch erfolgt vor allem quer zur Längsachse. Die entstehenden, meist fast gleich großen Bruchstücke, haben entsprechend besser kubische Formen. Aus diesem Grund lassen sich schlechte Kornformen durch erneutes Brechen verbessern. Umgekehrt dürften aus kubischen Körnern teilweise schlechtere Formen entstehen. Es kann deshalb angenommen werden, daß die Kornformen des Brechgutes eine größere Rolle spielen als etwa die petrographische Beschaffenheit. So bricht beispielsweise ein Gneiskorn größerer Längserstreckung mit Glimmerregelung parallel der Längsachse immer noch quer zur Schieferung.

Vergleich verschiedener Kornformindizes

Hier werden einander die Werte gegenübergestellt, die im Rahmen der Auswertung der Messungen von a , b und c (Hauptachsen), Gewicht g und spez.- oder Raumgewicht an Stichproben berechnet werden können. Es handelt sich um die Kornformwerte nach:

ROTHFUCHS (1931):

Es wird die Körnerzahl pro bestimmtes Volumen als Maß für die Kornformqualität gewählt. Bei gleichen Volumina spielt das spezifische Gewicht keine Rolle. Für prismatische Körner der Länge a , der Breite b und der Dicke c kann leicht gezeigt werden, daß für flache Körner kleinere Kornvolumen entstehen als für den Würfel der Seitenlänge b . Für stenglige Körner ist das Volumen größer als das Würfelvolumen, für flachstenglige Körner unter bestimmten Annahmen ebenfalls.

Flache Form: $0 < c \leq b = a$ $v = b^2c < v = b^3$

Stenglige Form: $c = b < a$ $v = b^2a > v = b^3$

Flachstenglige Form: $0 < c < b = \text{konstant} < a$, $v < b^3$, wenn $ac < b^2$

Die Anwendung der Körnerzahl ist somit nur in besonderen Fällen möglich.

Weiter können nur Körner von gleichem b beurteilt werden. Praktisch ist es unmöglich, derartige Fraktionen durch Sieben zu gewinnen. Wenn b über einen bestimmten Bereich variiert, können sich nun auch die Werte von Würfeln mit kleinem b mit Werten flacher Körner mit größerem b überschneiden.

Als Drittes kommt hinzu, daß die Packungsdichte für schlechte Kornformen geringer ist als für kubische, was die Körnerzahl ebenfalls verfälscht.

Schulz (SCHULZ 1952, SCHULZ und STELZER 1954):

Schulz versuchte die Schwierigkeiten der Körnerzahl zu umgehen, indem er den Einfluß der Länge besonders berücksichtigte. Es kann hier nicht die ganze Herleitung seines Kornformwertes wiederholt werden.

Im wesentlichen wird der Wert $Z = 1/v$ von Rothfuchs zu einem Wert K_s entwickelt, derart, daß $K_s = Z \left(\frac{a}{b} \right)^2$,

wobei von Prismen mit $c = b$ und zunehmendem a ausgegangen wird. Für den Würfel beträgt $K_s = 1/b^3$. Der endgültige Kornformwert wird nun als prozentuale Abweichung vom Kornformwert des Würfels bestimmt. Für die Abweichung erhält man:

$$nKe = b^3 K_s - 1 \text{ und da } K_s = Z \left(\frac{a}{b} \right)^2 \text{ ist, auch } nKe = Z a^2 b - 1$$

Zur Vereinfachung setzt man

$nKe' = nKe + 1$ und da $Z = 1/v$ ist, erhält man schlußendlich als Kornformwert

$nKe' = a^2 b / v$ oder $nKe' = a^2 b s / g$, wenn das Volumen durch Gewicht und spez. Gewicht ausgedrückt wird.

Mit schlechter werdenden Kornformen nehmen die Werte zu. Der Ausdruck ist von der Korngröße, von b unabhängig. Flache und stenglige Formen können nicht voneinander unterschieden werden. Für ein Prisma wird der Ausdruck $a^2 b / v = a^2 b / abc = a/c$. Die gleiche Beurteilung flacher und stengliger Körner ist vom Standpunkt der Praxis aus sinnvoll. Wenn die wirklichen Kornformen verschiedener Proben zu vergleichen sind, kann der Ausdruck allerdings nicht verwendet werden. Die Bestimmung ist für die Praxis leider zu kompliziert und hat sich deshalb auch nicht eingebürgert.

Der wichtigste Einwand, der schon von SCHULZE (1953, 1954) erhoben wurde, betrifft die unterschiedliche Bewertung von Würfel und Kugel. Der Würfel hat den Wert 1, die Kugel den Wert 1,91, schon einem deutlich stengligen Prisma entsprechend. Ein stengliges prismatisches Korn wird viel besser als ein gedrungenes ellipsoidisches Korn beurteilt. Diese unterschiedliche Bewertung besteht auch bei andern Kornformwerten und kann nicht vermieden werden.

Wenn die Packungsdichte eines Kornaggregates als qualitätsbestimmend betrachtet wird, so ist der Würfel die beste Kornform, da mit ihm eine hohlraumfreie Packung erzeugt werden kann. Dasselbe ist auch für ein Haufenwerk von Prismen oder auch von Tetraedern denkbar. Die mögliche Packungsdichte wird nun kaum erreicht werden und gerade dann spielt die Festigkeit der Einzelkörner eine größere Rolle. Bei mechanischen Beanspruchungen treten in Körnern, die Hohlräume überbrücken, Druck- und Zugbeanspruchungen auf. Die Körner zerbrechen leichter und besonders Kanten oder Ecken können leichter absplittern. Vom Stand-

punkt der Festigkeit des Einzelkornes aus betrachtet ist die Kugel die beste Kornform, sind auch Ellipsoide besser als Prismen ähnlicher Ausdehnung.

Zusammen mit dem Bindemittel werden die Verhältnisse komplizierter. Es spielen neue Eigenschaften, wie die Bindemittelhaftung am Gestein, eine Rolle. Die oben für Würfel und Prismen angeführten Nachteile werden vermutlich weitgehend wettgemacht. Scharfe Ecken und Kanten sind, neben Inhomogenitäten, trotzdem noch Schwachstellen im Splittkorn. Eine qualitativ optimale Kornform dürfte zwischen Würfel und Kugel bzw. Prisma und Ellipsoid liegen. Charakterisierungen, die als beste Kornform den Würfel oder die Kugel zugrunde legen, sind zu einseitig.

französischem Vorschlag (DANTINNE und LONGUEVILLE 1965):

Es handelt sich um das Verhältnis von Kornvolumen zu Volumen der kornumschriebenen Kugel mit a als Kugeldurchmesser.

$$C = \frac{\frac{v}{\pi a^3}}{6}$$

Hier wird nun die Kugel überbewertet, sie erhält den Wert 1. Für den dieser Kugel eingeschriebenen Würfel erhält man den Wert 0,37, wenn der Kugeldurchmesser der Raumdiagonale des Würfels entspricht. Auf den Vorteil, nur Messung der am genauesten bestimmbar Hauptachse, wurde schon hingewiesen. Die absolute Korngröße spielt wiederum keine Rolle.

Ahu (BOUCHAYER und AHU, 1952):

Berechnet wird das Verhältnis des Volumens des größten, dem Korn einschreibbaren Würfels zum Volumen des Splittkornes, nämlich

$$I = c^3/v$$

Es handelt sich um die Umkehrung des obigen Falles, der Würfel erhält den Wert 1, der Kugel mit der Seitenlänge dieses Würfels als Durchmesser kann nur ein Würfel der Seitenlänge $1/\sqrt{3}$ eingeschrieben werden, der Wert wird 0,37. Die Problematik ist gleich wie bei den andern Beispielen, zudem ist die Meßgenauigkeit für c geringer als für a .

dem Verhältnis c/a :

Dies ist der heute am meisten verwendete Wert, der in der Kornformschublehre von SCHULZE (1953) und ähnlichen Geräten verwendet wird. Verschiedene Normen benützen den Wert als Qualitätsanforderung. Der Vorteil liegt darin, daß mit der Schublehre eine wirkliche Schnellmethode möglich ist, die in der Praxis leicht anwendbar ist. Feinere Kornformunterschiede gehen natürlich verloren. Dafür arbeitet man nicht mit allenfalls nur theoretisch sinnvollen Methoden, mit Scheingenauigkeiten. Würfel und Kugel erhalten den gleichen Wert, nämlich 1, Ellipsoide und Prismen gleicher Abmessungen werden gleich beurteilt. Die Verhältnisse ändern allerdings, wenn anstatt der längsten Prismenseite, die längste Raumdiagonale als a bezeichnet wird. Es wurde schon bemerkt, daß der Unterschied zwischen Raumdiagonale und längster Seite bei extrem stengligen Formen gering ist, was Fehlbeurteilungen ausschließt. Für die Verhältnisse b/a und c/b können ähnliche Überlegungen angestellt werden.

Vorschlag von MORGENBROD (1956, 1961):

Morgenbrod hat an doppelt gebrochenem Splitt der Fraktion 6/7 mm aus homogenem Basalt die üblichen Größen a , b , c , g und γ_s gemessen und daraus die Werte a/b , c/b , abc und g gebildet. Mit den Methoden der Mehrfachkorrelation hat er die zwischen diesen vier Werten bestehenden Korrelationsverhältnisse überprüft. Die beste Korrelation ergab sich nicht unerwartet zwischen dem Produkt abc , dem Prismawert und dem Gewicht g . Dies wurde bis dahin noch zuwenig berücksichtigt. In Werten zur Kornformcharakterisierung sollten diese Größen verwendet werden.

Morgenbrod führt für jedes Korn den Begriff der prozentualen Raumauffüllung ein, der auf das umschriebene Prisma bezogen wird. Dies ist prinzipiell nicht neu. Als Formel ergibt sich

$$y = 100 g/abc\gamma_s,$$

wenn $g/\gamma_s = a^*$, wird

$$y = 100 a^*/abc$$

In graphischen Darstellungen sind dies Hyperbelscharen mit a^* als Parameter, die sich auf doppelt logarithmischem Papier als Geraden darstellen lassen. In die gleiche Darstellung können die Werte einzelner Körner eingetragen werden.

Für eine Probe von normalerweise 200 Körnern berechnet Morgenbrod nun den Mittelwert der Raumauffüllung zu $\bar{y} = \sum y/n$ und die Streuung S . Für eine Probe von 200 Stück mit dem Gesamtgewicht G ergibt sich für den Gesamtwert der Raumauffüllung

$$\bar{y} = 0,5 G/\overline{abc} \gamma_s$$

mit $\overline{abc} = \sum abc/200$ und dem spez. Gewicht $= \gamma_s$.

Dieser Gesamtwert kann für petrographisch homogene Proben von konstantem spezifischem Gewicht bestimmt werden.

Nach Definition wird das Verhältnis von Kornvolumen zum Volumen des umschriebenen Prismas gebildet, für jedes Prisma kommt der Wert 1 heraus. Damit werden natürlich flache und stenglige Prismen zu gut beurteilt. Da reine Prismen in gebrochenem Gestein selten auftreten, kann diese Tatsache sehr wahrscheinlich vernachlässigt werden. Wenn a , b , c im Sinne von LEES aufgefaßt werden, kann auch für Prismen der Wert 1 nicht mehr erreicht werden, da nicht mehr das kleinste umschriebene Prisma berechnet wird. Für die Mittelwertbildung hat dies keine Folgen, der Absolutbetrag der Mittelwerte wird einfach kleiner.

Zur Berechnung von Mittelwert und Streuung ist zu bemerken: Die y -Werte sollten normal verteilt sein. Nach Morgenbrod trifft dies für vollkommen homogene Gesteine zu. Der Bruch des Gesteins soll eine bevorzugte Kornform ergeben. Ob diese gesetzmäßige Verteilung für unsere Gesteine auch zutrifft, ist bei den vorhandenen Inhomogenitäten und Texturen zumindest zweifelhaft. Aus der Häufigkeitsverteilung unserer Proben ist ein erster Hinweis auf den Verteilungscharakter zu entnehmen. Wenn die Voraussetzungen von Morgenbrod nicht erfüllt sind, wird sich auch eine zu große Standard-Streuung ergeben. Möglicherweise ist schlußendlich eine andere Verteilungsart anzutreffen.

Da mit einem Verhältnis gearbeitet wird, spielt die absolute Korngröße keine Rolle, es können auch größere Fraktionsbereiche ausgewertet werden. Nun ist es möglich, daß die Kornformen für verschiedene Größenbereiche verschieden ausfallen. (Siehe hiezu Bemerkungen von ROESSLEIN, 1941.) Ob die Raumauffüllung wirklich eine gute Unterscheidung verschiedener Kornformqualitäten erlaubt, kann bei gleichzeitiger Anwendung anderer Verfahren am besten ausgesagt werden. Es werden deshalb, soweit möglich, mehrere der besprochenen Verfahren angewendet. Zu diesem Gesamtkornformwert kommen nun noch weitere:

AHU (1952) hat einen Zusammenhang zwischen dem Wert c^3/v und dem Wert c^2/b^2 vermutet und die Gleichung $c^3/v = 1,8 (c^2/b^2)$ aufgestellt. Dies wurde von PELTIER (1963) aufgegriffen und zu einer vereinfachten Kornformbestimmungsmethode entwickelt. Eine Vereinfachung kann erzielt werden, wenn nicht mehr jedes Korn einzeln ausgemessen werden muß. So kann die Messung von c und b durch Sieben mit Spalt- oder Lochsieben ersetzt werden. Man erhält Fraktionen bestimmter Breite und Dicke. Es ist mit größeren Proben zu arbeiten, um dem statistischen Charakter einer Siebung gerecht zu werden. Es handelt sich hier um ein prinzipiell anderes Vorgehen als beim Messen einzelner Größen. Nach Peltier wird $F = v/c^3 = K (b^2/c^2)$ gesetzt. Unter Verwendung obengenannter Fraktionen ergibt sich für F die Formel:

$$F = K \frac{\sum \left[p \left(\frac{b}{c} \right)^2 \right]}{P}$$

wobei b und c die mittlere Loch- bzw. Spaltweite einer Fraktion, p das Gewicht einer einzelnen Fraktion und $P = \sum p$ das Gesamtgewicht der Probe bedeuten. Es handelt sich um ein gewogenes Mittel; es wird angenommen, das Einzelkorngewicht liege nahe beim mittleren Einzelgewicht innerhalb der betreffenden Fraktion. F ließe sich auch an Einzelkörnern an kleineren Proben bestimmen, doch könnte dann ebensogut wieder auf den Wert $1/F = c^3/v$ nach AHU zurückgegriffen werden, da der Vorteil der Siebung nicht mehr vorhanden ist.

Als Gesamtkornformwerte werden etwa auch die Summen der vorstehend erwähnten Indizes verwendet (AHU, 1952; VAN ELSSEN, 1956; PELTIER, 1963). Sie können im Rahmen der Auswertung unserer Messungen ebenfalls verwendet werden.

Darstellungsarten

Serien von Einzelwerten können in Häufigkeitsdarstellungen aufgezeichnet werden und für eine erste Beurteilung rein graphisch verglichen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die einfache Unterteilung genügen- ungenügend für bestimmte Qualitätsanforderungen.

Verbreitet ist die für Schotteranalysen entwickelte Zingg'sche Darstellung der Verhältnisse c/b gegen b/a , die eine gute Unterscheidung kubisch/flach/stenglig/flachstenglig erlaubt (ZINGG, 1935). Sie wurde vor allem von DE QUERVAIN (1950, 1953, 1967) und neuerdings wieder von LEES (1964) für die Formbeurteilung von Splitt benützt. Die gebräuchlichen Abgrenzungen zwischen den verschiedenen Formkategorien sind Seite 89 angegeben. DE QUERVAIN (1953) schlägt noch eine weitere Unterteilung vor. Im Zingg'schen Diagramm wird die Kurve eingetragen, die der Bedingung $bc = ka^2$ gehorcht, wobei k ein konstanter Faktor, normalerweise $1/3$, ist. Die Kurve dient wiederum der Abgrenzung von kubischen und nichtkubischen Körnern. Die Resultate sind mit den andern Unterteilungen gut vergleichbar. Nach de Quervain haben Körner, die auf dieser Kurve liegen, bei gleicher Länge gleiche Querschnitte und wären deshalb mit gleichem Kraftaufwand zu zerbrechen. Man kann der Kornformbeurteilung durchaus einen logischen Sachverhalt zugrunde legen, muß sich aber im klaren sein, daß dieser nur im Idealfall zutrifft. Hier geht es im Speziellen um das Festigkeitsverhalten der Splittkörner. Die Abweichung vom Idealfall dürfte bei den meisten Gesteinen die Regel sein, weshalb wir von derartigen Beurteilungen absehen möchten. Die Formbeurteilung sollte sich nur auf objektiv meßbare Größen stützen müssen. Die Resultate der Beurteilung nach Morgenbrod (S. 98) zeigen, daß von der theoretischen Grundlage schlußendlich nicht mehr viel übrig bleibt, indem dort für alle Stichproben ganz verschiedener Gesteine die Unterscheidungsmöglichkeiten verwischt werden.

Im Zingg'schen Verfahren kommt die absolute Korngröße nicht zum Ausdruck; deshalb hat MORGENBROD (1956) eine Darstellungsart, die dies ermöglicht, entwickelt. Sie kann aber nur auf nahe beieinander liegende Fraktionsgrenzen, z. B. 10/11 mm, angewendet werden. Sie sei hier andeutungsweise beschrieben:

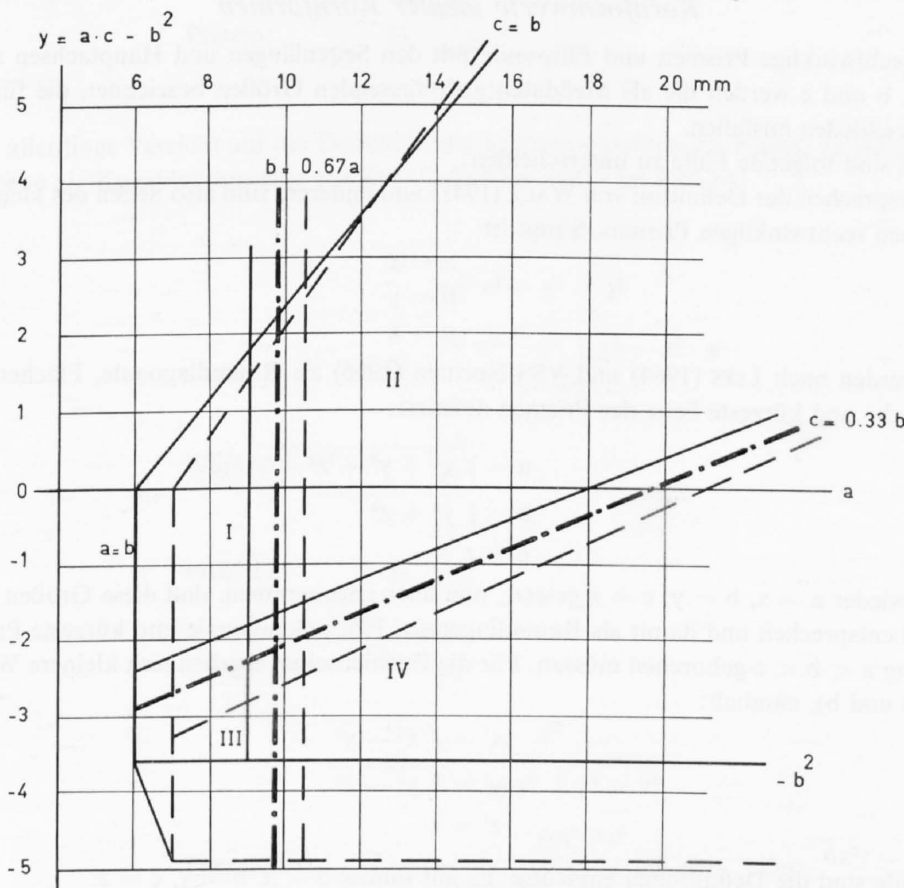


Abb. 1. Kornformdarstellung nach MORGENBROD (1956, 1961) für die Körnung 6/7 mm. Ausgezogen: Formbereiche für Korngröße 6 mm, gestrichelt: Formbereiche für Korngröße 7 mm, strichpunktiert: Achsenkreuz für Korngröße 6,5 mm, gültig für die ganze Fraktion.

Feld I: kubische Körner; Feld II: stenglige Körner; Feld III: flache Körner; Feld IV: flachstenglige Körner.

Mit dem Ausdruck y als Ordinate und der Länge a als Abszisse steht eine Darstellung zur Verfügung, die absolute Korngrößen zum Ausdruck bringt. Für eine Körnung von z. B. 6 mm, die nur theoretisch möglich ist, gilt die obige Gleichung nur in einem bestimmten, durch die Definitionen von a , b und c gegebenen Bereich, der durch einen gegen größere a hin offenen Linienzug abgegrenzt wird, da a theoretisch beliebig groß werden kann.

Morgenbrod geht von den Verhältnissen a/b und b/c der DIN-Normen aus, die für eine mittlere Kornform gleichzusetzen sind. Die Gleichung $a/b = b/c$ kann als $ac - b^2 = 0$ geschrieben werden oder für eine beliebige Kornform als $ac - b^2 = y$.

In diesen Bereich sind die Geltungsbereiche für die vier Kornformgruppen einzutragen, die die in den DIN-Normen geltenden Anforderungen, $a : b : c = 1 : 0,67 : 0,33$, berücksichtigen. Diese Bereiche werden durch ein Achsenkreuz getrennt, wobei die Achsen nicht senkrecht aufeinander stehen. Sie ergeben sich durch Einsetzen der genannten Bedingungen in die Gleichung für y .

Die Lage des Achsenkreuzes ist nun für verschiedene Korngrößen verschieden, bei benachbarten Fraktionsgrenzen kann eine mittlere Lage, ohne große Fehler zu verursachen, gewählt werden. Bei breiteren Fraktionen überlappen sich die Kornformbereiche zu stark, die Darstellung kann dann nicht mehr verwendet werden (Abb. 1).

Das ganze Verfahren ist nur brauchbar, wenn die Probenahme in der von Morgenbrod angegebenen Weise geschieht. Danach wird eine Splittprobe in Fraktionen von 1 mm zerlegt (5/6, 6/7 mm usw.) und diejenige Fraktion, deren Gewicht dem mittleren Gewicht der Fraktionen am nächsten liegt, auf ihre Kornformen untersucht. Die Prüfung wird so recht kompliziert, zumal das Eintragen der Punkte im Diagramm zeitraubend ist. Eine Anwendung kommt nur in besonderen Fällen in Frage, die Methode hat sich wenig verbreitet, obwohl sie einwandfrei ist.

Kornformwerte idealer Kornformen

Es werden rechtwinklige Prismen und Ellipsoide mit den Seitenlängen und Hauptachsen x , y und z betrachtet. Mit a , b und c werden die als Meßdaten aufzufassenden Größen bezeichnet, die für verschiedene Definitionen verschieden ausfallen.

Für Prismen sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- a) a , b , c entsprechen der Definition von WALZ (1941) und anderen, sind also Seiten des kleinsten kornumschriebenen rechtwinkligen Prismas. Somit ist

$$a = x$$

$$b = y$$

$$c = z$$

- b) a , b , c werden nach LEES (1964) und VSS-Normen (1966) als Raumdiagonale, Flächendiagonale der Grundfläche und kürzeste Seite der Prismen definiert:

$$a = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$b = \sqrt{y^2 + z^2}$$

$$c = z$$

- c) Es wird wieder $a = x$, $b = y$, $c = z$ gesetzt, nun aber angenommen, daß diese Größen der Definition von LEES entsprechen und damit als Raumdiagonale, Flächendiagonale und kürzeste Prismenseite der Bedingung $a < b < c$ gehorchen müssen. Für die Prismenseiten ergeben sich kleinere Werte als in den Fällen a) und b), nämlich:

$$x' = \sqrt{x^2 - y^2}$$

$$y' = \sqrt{y^2 - z^2}$$

$$z' = z$$

Für Ellipsoide sind die Definitionen eindeutig. Es gilt immer $a = x$, $b = y$, $c = z$.

In der folgenden Zusammenstellung wird zuerst der allgemeine Ausdruck für die diskutierten Kornformkoeffizienten gegeben. Darin bedeuten a , b , c Meßgrößen; v ist das Kornvolumen. Für die verschiedenen Möglichkeiten ergeben sich Formeln mit den Größen x , y , z als Veränderlichen.

$$1. \frac{1}{v}$$

Prisma:

$$a) \frac{1}{xyz}$$

$$b) \frac{1}{xyz}$$

$$c) \frac{1}{\sqrt{x^2 - y^2} \sqrt{y^2 - z^2} \cdot z}$$

Ellipsoid:

$$\frac{6}{\pi xyz}$$

$$2. \frac{a^2 b}{v}$$

Prisma:

$$a) \frac{x}{z}$$

$$b) \frac{(x^2 + y^2 + z^2) \sqrt{y^2 + z^2}}{xyz}$$

$$c) \frac{x^2 y}{\sqrt{x^2 - y^2} \sqrt{y^2 - z^2} \cdot z}$$

Ellipsoid:

$$\frac{6x}{\pi z}$$

$$3. \frac{v}{\pi a^3}$$

Prisma:

$$a) \frac{6yz}{\pi x^2}$$

Hier allerdings Verzicht auf die Definition der kornumschreibenden Kugel, da einfach längste Prismenseite als Kugeldurchmesser gewählt. Definition erfüllt im Fall b).

$$b) \frac{6xyz}{\pi \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \cdot 3}$$

$$c) \frac{6 \sqrt{x^2 - y^2} \sqrt{y^2 - z^2} \cdot z}{\pi x^3}$$

Ellipsoid:

$$\frac{yz}{x^2}$$

$$4. \frac{c^3}{v}$$

Prisma:

$$a) \frac{z^2}{xy}$$

$$b) \frac{z^2}{xy}$$

$$c) \frac{z^2}{\sqrt{x^2 - y^2} \sqrt{y^2 - z^2}}$$

Ellipsoid:

$$\frac{6x^2 y^2 z^2}{\pi \sqrt{x^2 y^2 + x^2 z^2 + y^2 z^2} \cdot 3} \text{ oder } \frac{6z^2}{\pi xy}$$

Unter Verzicht auf Definition des eingeschriebenen Würfels einfach kürzeste Hauptachse als Würfel-seite gewählt; damit Vereinfachung.

$$5. \frac{c}{a}$$

Prisma:

$$a) \frac{z}{x}$$

$$b) \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

$$c) \frac{z}{x}$$

Kann aber nicht gleich 1 werden, verhält sich wie b)

Ellipsoid:

$$\frac{z}{x}$$

$$6. \frac{v}{abc}$$

Prisma:

$$a) 1$$

$$b) \frac{xy}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \sqrt{y^2 + z^2}}$$

$$c) \frac{\sqrt{x^2 - y^2} \sqrt{y^2 - z^2}}{xy}$$

Ellipsoid:

$$\frac{\pi}{6}$$

Diese Formeln können, unter Annahme ausgewählter Werte, mit der Breite y als Abszisse und dem jeweiligen Koeffizienten als Ordinate dargestellt werden. In den Fällen 1, 3, 4 und 5 erhält man Kurven, die von den besten Werten für den Würfel oder die Kugel hyperbelartig abnehmen. Sie nähern sich mit zunehmend schlechteren Kornformen asymptotisch der Horizontalen. Im Fall 6 ergeben sich einerseits konstante Werte (!), andererseits für die Annahmen b) und c) ansteigende hyperbelartige Kurven, die für schlechte Formen auch in die Horizontale umbiegen. Für den Fall 2 schlußendlich erhält man Geraden verschiedener Neigungen. Damit können verschieden gute Kornformen immer unterschieden werden, was ein Vorzug dieser Darstellung ist.

Die Grenzfälle der Formen, Prisma und Ellipsoid, unterscheiden sich in den meisten Fällen um den Faktor $1,91 = 6/\pi$. Werte natürlicher Kornformen werden irgendwo zwischen beiden Kurven liegen, da weder die eine noch die andere Form in reiner Ausbildung vorkommt. Einzig für den Koeffizienten c/a fällt diese von den Definitionen herrührende Unsicherheit weg, was für seine Anwendung spricht.

Die verschiedenen Annahmen im Falle der Prismen ergeben relativ nahe beieinander und ungefähr parallel verlaufende Kurven. Das heißt, daß sich in der praktischen Anwendung offenbar nur bei der Festlegung von Grenzwerten für Qualitätsklassen Unsicherheiten ergeben. Keine der Definitionen, die zu den verschiedenen Kurven führen, wird im praktischen Fall erfüllt werden können, was zum Teil eine Folge der Unsicherheit beim Messen der Größen a , b , c ist. Die Kornformwerte werden den theoretischen Kurven nur ungefähr folgen. Es gilt aber auch hier, daß die Unterschiede verschiedener Definitionen im Bereich schlechter Formen viel kleiner ausfallen als im Bereich gut kubischer Formen. Schwerwiegende Fehlbeurteilungen sind damit wohl ausgeschlossen. Andererseits ist man aber auch dem Ziel einer genaueren Kornformbeurteilung nicht wesentlich näher gekommen. Keiner der Koeffizienten bringt gegenüber dem Verhältnis c/a (oder b/a und c/b) erhebliche Vorteile, die den Mehraufwand an Arbeit rechtfertigen würden. Es drängt sich der Schluß auf, daß die theoretisch von Idealformen aus entwickelten Kornformkoeffizienten für gebrochenes Gesteinsmaterial nur beschränkt brauchbare Ergebnisse liefern. Dies gilt beispielsweise besonders für den Koeffizienten nach Morgenbrod mit gleicher Beurteilung sämtlicher Prismen oder Ellipsoide von Würfel oder Kugel bis zu den längsten Stengeln.

Damit kann man ebensogut bei den einfachsten Definitionen bleiben, in erster Linie also beim Verhältnis c/a , ferner auch bei den Verhältnissen b/a und c/b , die offenbar die objektivste Formbeurteilung erlauben.

Es muß beigefügt werden, daß für natürliche Rundungsformen an Schottern und Geröllen gewisse Koeffizienten ein durchaus passendes Ergebnis liefern dürften.

Die nach verschiedenen Definitionen möglichen Kurven werden hier am Beispiel des Koeffizienten $v/\pi a^3/6$ dargestellt. Es wurden Werte für eine flachstenglige Form mit

$$z = \text{konstant} \leq y = 2x/3 < x$$

und für eine flache Form mit

$$z = \text{konstant} \leq y = x$$

berechnet.

(Abb. 2 und 2a, Tabelle 1.)

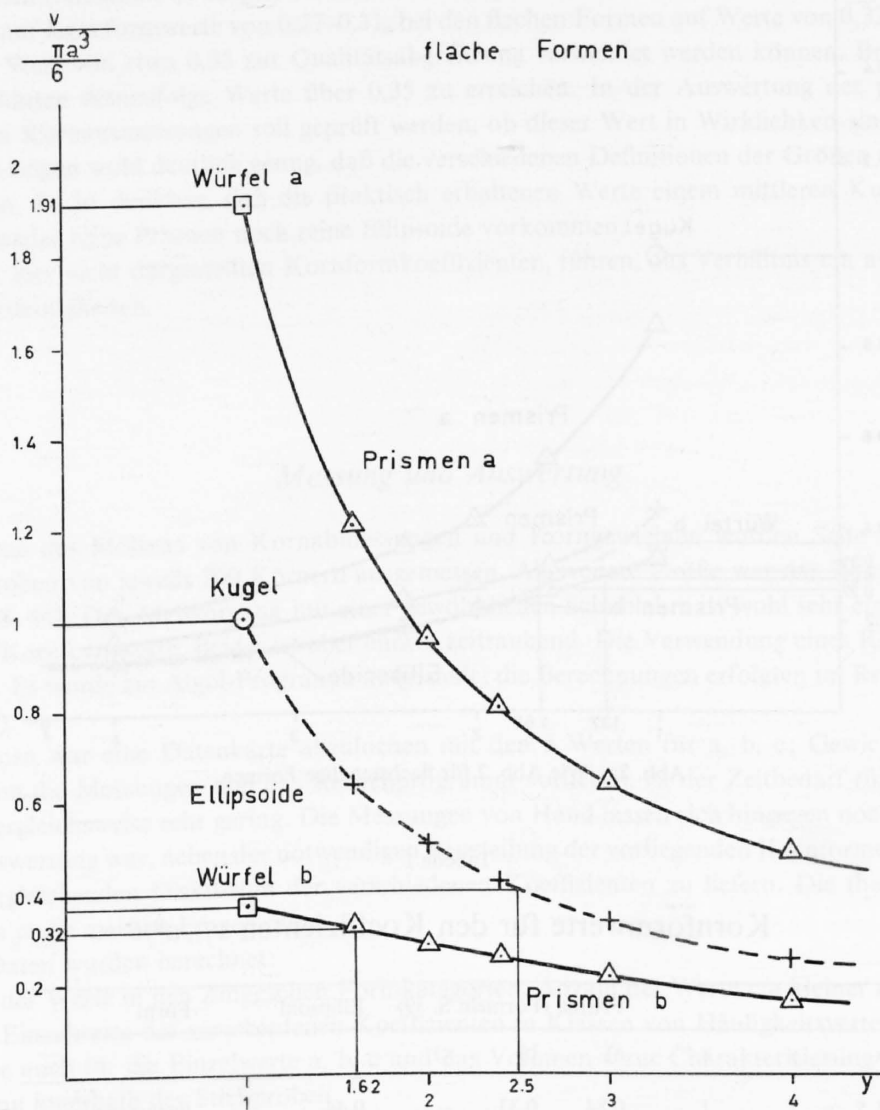


Abb. 2. Veränderung des Koeffizienten $v/\pi a^3/6$ in Abhängigkeit der Kornbreite für verschiedene Definitionen der Kornabmessungen (S. 38), flache Kornformen.

Die beiden Darstellungen zeigen die Änderung des Koeffizienten $\frac{v}{\pi a^3/6}$ in Abhängigkeit von der Größe y (vergleiche hierzu Definitionen auf Seite 38). Aus den Figuren ist folgendes zu entnehmen:

- völlig unterschiedliche Bewertung von Würfel und Kugel; besonders im Fall a) entsteht ein viel zu hoher Wert für den Würfel;

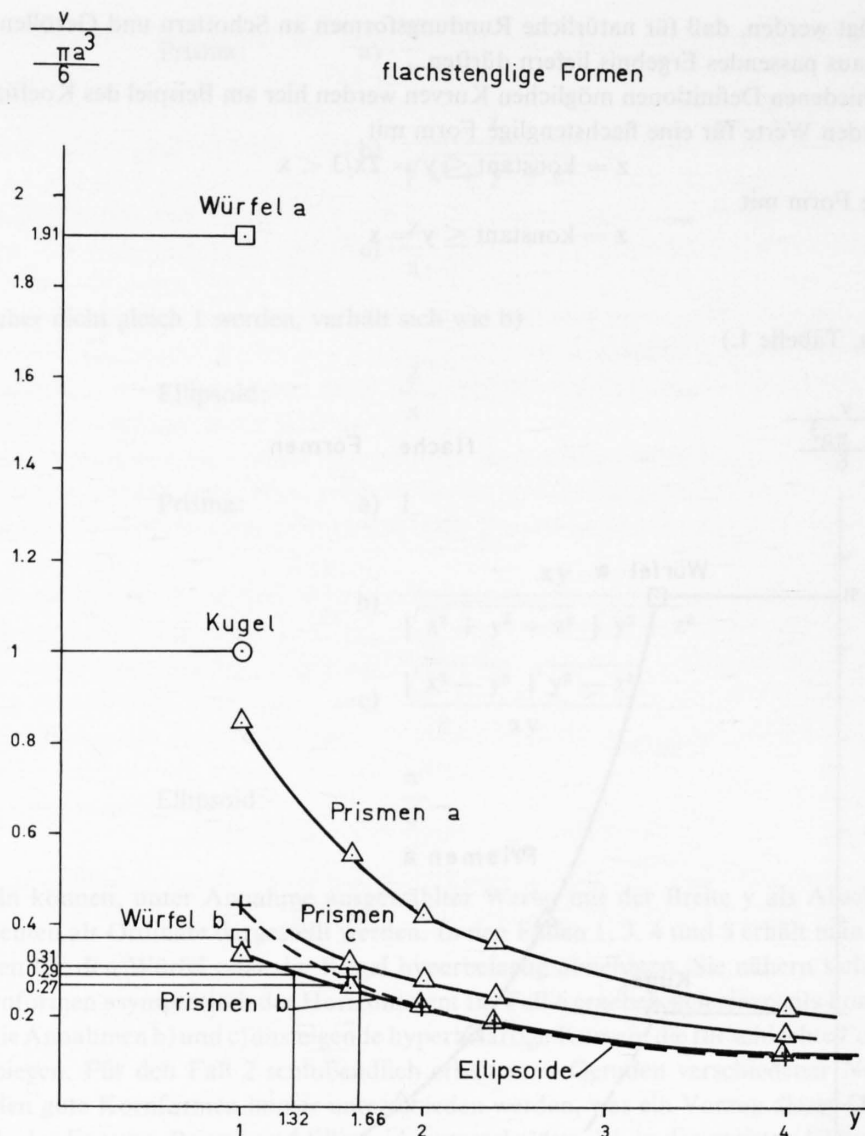


Abb. 2a. Wie Abb. 2 für flachstenglige Formen.

Tabelle 1

Kornformwerte für den Koeffizienten $v/\pi a^3/6$

			Prisma (Formeln S. 39)			Ellipsoid	Form
x	y	z	a)	b)	c)		
1,5	1	1	0,84	0,33	—	0,44	flachstenglig
2,4	1,6	1	0,55	0,26	0,31	0,28	
3	2	1	0,42	0,22	0,275	0,22	
3,6	2,4	1	0,36	0,19	0,24	0,185	
6	4	1	0,21	0,12	0,15	0,11	
1	1	1	1,91	0,37	—	1	flach
1,6	1,6	1	1,20	0,32	—	0,63	
2	2	1	0,95	0,28	—	0,50	
2,4	2,4	1	0,80	0,25	—	0,42	
3	3	1	0,63	0,21	—	0,33	
4	4	1	0,48	0,16	—	0,25	

- Kornformwerte im Fall a) allgemein zu hoch, damit auch stark verschiedene Kurven für Prismen und Ellipsoide;
- im Fall b), wo die Definition der umschreibenden Kugel erfüllt ist, verlaufen die Kurven für flachstenglige Prismen und Ellipsoide fast gleich, der Koeffizient könnte hier also benützt werden. Für die flachen Formen werden die Unterschiede wieder zu groß. Der Würfel hat dort z. B. den gleichen Kornformwert wie ein Ellipsoid mit einem Verhältnis $c/a \approx 1:2,7!$
- die Annahme c) ergibt für flachstenglige Formen eine von den andern Annahmen wenig abweichende Kurve. Für flache Formen liefert die Formel keine reellen Werte, da nicht gleich große Raum- und Flächendiagonalen gemessen werden können.
- es wurden die Abszissen eingetragen, die jeweils für jede der Annahmen dem Verhältnis $c/a = 0,4$ entsprechen (Annahme a) ausgenommen). Die dazugehörigen Ordinaten führen bei den flachstengligen Formen auf Kornformwerte von 0,27–0,31, bei den flachen Formen auf Werte von 0,32–0,40. Es müßte also der Wert von etwa 0,35 zur Qualitätsabgrenzung verwendet werden können. Brauchbare Kornformen hätten demzufolge Werte über 0,35 zu erreichen. In der Auswertung der praktisch durchgeführten Kornausmessungen soll geprüft werden, ob dieser Wert in Wirklichkeit sinnvoll ist.

Die Figuren zeigen wohl deutlich genug, daß die verschiedenen Definitionen der Größen a , b , c zu Widersprüchen führen. Es ist denkbar, daß die praktisch erhaltenen Werte einem mittleren Kurvenverlauf entsprechen, weil weder reine Prismen noch reine Ellipsoide vorkommen.

Die andern, hier nicht dargestellten Kornformkoeffizienten, führen, das Verhältnis c/a ausgenommen, zu ähnlichen Mehrdeutigkeiten.

Messung und Auswertung

Die Probleme des Messens von Kornabmessungen und Korngewichten wurden Seite 31 diskutiert. Es wurden Stichproben von jeweils 200 Körnern ausgemessen. Als weitere Größe war das Raumgewicht zu verwenden (siehe S. 44). Der Meßvorgang mit einer gewöhnlichen Schublehre ist wohl sehr einfach, ebenso das Berechnen der Kornformwerte. Beides ist aber enorm zeitraubend. Die Verwendung eines Rechenprogramms lag daher nahe. Es wurde ein Algol-Programm aufgestellt; die Berechnungen erfolgten im Rechenzentrum der ETH (RZETH).

Pro Splittkorn war eine Datenkarte abzulochen mit den 5 Werten für a , b , c ; Gewicht g und Raumgewicht γ . Wenn die Messungen und das Rechenprogramm vorliegen, ist der Zeitbedarf für das Locher der Datenkarten vergleichsweise sehr gering. Die Messungen von Hand lassen sich hingegen noch nicht umgehen.

Ziel der Auswertung war, neben der notwendigen Beurteilung der vorliegenden Kornformen, einen weiteren Beitrag zur vergleichenden Diskussion der verschiedenen Koeffizienten zu liefern. Die theoretischen Überlegungen ließen ja die meisten Fragen offen.

Folgende Daten wurden berechnet:

- Anzahl der Werte in den Zingg'schen Formkategorien, Anzahl der Werte c/a kleiner als 0,40.
- Anzahl Einzelwerte der verschiedenen Koeffizienten in Klassen von Häufigkeitsverteilungen.
- Dasselbe auch für die Einzelwerte a , b , c und das Volumen v zur Charakterisierung der Korngrößenverteilung innerhalb der Stichproben.
- Summe, Durchschnitt und Streuung der Einzelwerte jeder Stichprobe, da diese Größen von verschiedenen Autoren zur Kornformcharakterisierung verwendet werden. Ob dies überhaupt zulässig ist, wird bei den Ergebnissen noch zu diskutieren sein. Von weiteren statistischen Methoden wie Korrelationsrechnungen usw. wurde abgesehen, da über den Charakter der Verteilungen der Einzelwerte nichts bekannt war. Derartige statistische Methoden sind wohl eher bei natürlichen Geröllen und Schottern angebracht, wo genetische Schlüsse daraus gezogen werden können, oder doch mindestens angestrebt werden.

Am Schluß der Kornformuntersuchungen wird die Beurteilung nach Augenschein angeführt. Es sollte dann entschieden werden können, ob sie in der Praxis zulässig ist.

b) Raumgewicht, spezifisches Gewicht, Schüttraumgewicht

Definitionen

Da es nicht einfach um die Bestimmung der klar definierten physikalischen Größen von Dichte und spezifischem Gewicht, Masse und Gewicht pro Volumen, geht, müssen hier verschiedene Ausdrücke speziell erläutert werden. Durch Vergleich der Bestimmungsmethoden können die Bedeutungen der oft ziemlich verschieden verstandenen Ausdrücke einander gegenübergestellt werden. Die meisten Angaben wurden den in der Übersicht erwähnten Zusammenstellungen entnommen.

An Gesteinsstücken können auf einfache Weise die folgenden Bestimmungen vorgenommen werden:

G1: Gewicht des vollständig trockenen Gesteins

G2: Gewicht der 24 Stunden in Wasser gelagerten Probe unter Wasser

G3: Gewicht der 24 Stunden in Wasser gelagerten Probe in oberflächlich gerade noch feuchtem Zustand

γ_w : spez. Gewicht des Wassers, ist bekannt

Daraus können verschiedene Größen berechnet werden:

1. Das scheinbare spezifische Gewicht γ_a :

$$\gamma_a = \frac{G1 \gamma_w}{G1 - G2}$$

Der Ausdruck wird vor allem in den USA und in Belgien verwendet. Man spricht dort von apparent specific gravity bzw. densité apparent (sèche). Es spielen nur geschlossene Poren eine Rolle. Wenn ausschließlich offene, mit Wasser füllbare Poren vorhanden sind, kommt das spezifische Gewicht γ_s heraus.

2. Das Raumgewicht γ oder γ_d :

$$\gamma = \frac{G1 \gamma_w}{G3 - G2}$$

Es ist dies das Raumgewicht des vollständig trockenen Gesteins, in der Schweiz und in Deutschland als Trockenraumgewicht oder Rohwichte bezeichnet. Die Größe heißt in den belgischen Normen densité réelle sèche, in den französischen densité apparente, in den britischen specific gravity (dry density) und in den amerikanischen schließlich bulk specific gravity. Viel mehr Möglichkeiten verschiedener Bezeichnungen gibt es nicht! Hier wird am Ausdruck Raumgewicht festgehalten. Im Probenvolumen sind nun offene und geschlossene Poren berücksichtigt. Bei absolut porenfreien Stoffen kommt das spezifische Gewicht heraus.

Die Bezeichnung γ_d ist für Bodenproben und Lockergestein gebräuchlich, wo zusätzlich noch dem Raumgewicht der feuchten Probe im Anlieferungszustand (γ_h) größere Bedeutung zukommt. Für Festgesteine genügt die Bezeichnung γ .

Früher hat man das Gestein mit Paraffin umhüllt, was aber unnötig ist und nur bei Gesteinen, die im Wasser zerfallen oder verändert werden, anzuwenden wäre, z. B. bei Lockergesteinen.

3. Das Raumgewicht des gesättigten Gesteins γ_g .

$$\gamma_g = \frac{G3 \gamma_w}{G3 - G2}$$

Der Nenner ist derselbe wie für γ , wird aber auf das Gewicht des gesättigten Gesteins bezogen. In Belgien und den USA ist die Größe in den Normen mit densité réelle humide bzw. bulk specific gravity, saturated surface dry basis bezeichnet.

Zur Eliminierung der Poren wird das Gestein pulverisiert: die Korngröße unter 0,2 mm wird als porenfrei betrachtet. Mit dem Gesteinspulver wird im Pyknometer nach bewährtem Verfahren das spezifische Gewicht γ_s bestimmt, in Deutschland auch Reinwichte genannt. Französische und belgische Normen sprechen von densité absolue oder poids spécifique absolue, britische und amerikanische von absolute specific gravity.

5. Eine Splitt- oder Schotterprobe, ein Haufenwerk, wird in ein bestimmtes Volumen eingefüllt und gewogen, man erhält ein Gewicht pro Volumen, das durch Verdichtungsvorgänge noch verändert werden kann. Die belgischen Normen verwenden die Ausdrücke poids volumique sec non tassé für das lose

eingefüllte Haufenwerk, poids volumique sec damé für die eingestampfte Probe und poids volumique sec offenbar für die durch Schütteln verdichtete Probe. Die Französischen sprechen von densité apparente (poids volumétrique) allein für das lose Material, deutsche von Raummetergewicht und schweizerische von Raumgewicht, ohne spezielle Bezeichnung der Verdichtungszustände. Der Vollständigkeit halber nennen wir hier die englischen und amerikanischen Bezeichnungen, nämlich bulk density (loose weight), bulk density (rodded weight) und bulk density (compacted weight) bzw. unit weight – shoveling procedure, unit weight – rodding procedure und unit weight – jiggling procedure für je drei verschiedene Verdichtungszustände.

Die schweizerische Bezeichnung ist ungenügend; wir werden die Ausdrücke Raummetergewicht oder Schüttraumgewicht verwenden, die Verdichtungszustände sind dabei besonders anzugeben. Bei losem Einfüllen kann das Symbol γ_l , nach Verdichten das Symbol γ_v verwendet werden, wobei die Definition des Verdichtungszustandes aussteht und vorläufig durch Beschreibung genauer zu bezeichnen ist.

Gewisse Ausdrücke sind also nicht immer direkt übersetzbar. Ihre Bedeutung wird aber jeweils klar, wenn man sich die Bestimmungsmethoden der betreffenden Größen vor Augen hält.

Angewandte Bestimmungsmethoden

Die Methoden sind in Lehrbüchern der Sedimentpetrographie und auch in Normblättern beschrieben, siehe dazu z. B. MILNER (1962) oder MUELLER (1964). Die Genauigkeit der Resultate hängt hauptsächlich vom Geschick des Prüfenden, vom sorgfältigen Arbeiten ab. Die Wägung der Probe kann an und für sich sehr genau ausgeführt werden. Schwierigkeiten treten hingegen bei Wägungen eines Probekörpers unter Wasser auf, da an der Probe haftende Luftbläschen nur mühsam zu entfernen sind. Wir machten gute Erfahrungen mit Köchen der Proben in destilliertem Wasser, wenn möglich im Gefäß, in dem die Tauchwägung vorgenommen wurde. Dies war mit Einzelstücken und Splittproben, wie auch mit dem Gesteinspulver im Pyknometer möglich. Die Bestimmung der Temperatur ist wichtig, stellt aber wiederum keine Probleme. Die Wassersättigung wurde durch 24 Stunden Wasserlagerung erreicht, bei einigen Proben auch noch durch Anlegen eines Vakuums, was aber keine Unterschiede im Resultat zur Folge hatte. Der oberflächenfeuchte Zustand konnte durch Abtrocknen mit einem feuchten Tuch hergestellt werden. Für die Trockengewichtsbestimmung schließlich wurde die Probe bei 105–110 °C 24 Stunden getrocknet und im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt.

In MUELLER (1964) wird die Verwendung von Tetrachlorkohlenstoff empfohlen. Damit ist die Bildung von Luftbläschen weitgehend zu vermeiden. Hingegen ist die Dichte der Flüssigkeit viel stärker temperaturabhängig. Die Flüchtigkeit des CCl_4 macht besonders bei der Wägung im Pyknometer Mühe. Der oberflächenfeuchte Zustand kann erhalten werden, indem man soviel Flüssigkeit verdunsten läßt, daß die Probe gerade noch feucht erscheint. Die Probe wird dann in ein dichtes Wägeglaß gelegt. Die Verdunstung geht aber so schnell vor sich, daß die Probe bald einmal zu trocken ist. Solche Probleme lassen sich durch entsprechenden Zeitaufwand durchaus bewältigen. Mit Wasser konnte aber eine genügende Genauigkeit erreicht werden. Bei den Auftriebsverfahren war der Aufhängevorrichtung Beachtung zu schenken, auf einer modernen Mettlerwaage ist dies sehr einfach zu bewerkstelligen.

Wenn die sehr geringe Porosität der vorliegenden kompakten Gesteine berechnet werden soll, muß die zweite Stelle nach dem Komma genau sein. Diese Genauigkeit zu erreichen, ist nur unter sehr großem Aufwand möglich, der in keinem Verhältnis zum Aussagewert der Porosität bei sehr kompakten Gesteinen steht. Bei der Kornform wurde gezeigt, daß es genügt, die erste Stelle von Raumgewicht oder spezifischem Gewicht genau zu erhalten, um etwa das Kornvolumen zu berechnen. Nach unsern Erfahrungen ist eine Genauigkeit von $\frac{5}{100}$ auch bei raschem Arbeiten ohne weiteres zu erreichen und zwar auch an Splittproben, wo dies nicht unbedingt vermutet wird.

Raumgewicht des Haufenwerkes (Raummetergewicht, Schüttraumgewicht)

Das Raummetergewicht wurde im Zusammenhang mit der Bestimmung von Druck- und Schlagfestigkeit von der EMPA im würfelförmigen 4-Liter-Gefäß vor und nach den Versuchen bestimmt. Die erhaltene Größe hatten wir als gegeben hinzunehmen. Das Einfüllen wurde bei diesen Bestimmungen von Hand besorgt, man wird deshalb nicht zu hohe Ansprüche an die Genauigkeit stellen dürfen. Die Werte dienen vor allem

einer ersten Beurteilung des Haufenwerkes, die Bestimmung kann in dieser Art gut im Steinbruch oder auf der Baustelle ausgeführt werden, wenn man etwa wissen will, ob an verschiedenen Stellen entnommene Stichproben gleiche Raummetergewichte haben. Die Bestimmung ist zu ungenau, wenn feine Unterschiede in der Kornform oder stofflichen Zusammensetzung festgestellt werden möchten.

Was eigentlich gesucht wird, ist das Raummetergewicht des unendlich ausgedehnten Haufenwerkes. Gefäßwandungen oder Abstrichflächen sind darin Störungsflächen. Daraus geht hervor, daß die Korngrößen und die Größen der Meßgefäße die Resultate beeinflussen. Weiter ist der Verdichtungsgrad durch den Einfüllvorgang zu beeinflussen. Da sich das Einfüllen von Hand nur beschränkt normieren läßt, hat MORGENBROD (1956, 1961) einen Einfülltrichter konstruiert, der ein einheitliches Einfüllen gewährleistet und verschiedenen Gefäßen angepaßt werden kann.

Die Bestimmung des Raummetergewichtes des unendlich ausgedehnten Haufenwerkes auf rechnerischem Wege wurde von GRENGG (1930) und MORGENBROD (1956, 1961) versucht. Es wurde zu weit führen, die Methoden hier im Detail anzuführen. Beide gehen davon aus, daß das Raummetergewicht an der Gefäßwandung Null beträgt und mit zunehmendem Abstand davon dem Raummetergewicht des unendlich ausgedehnten Haufenwerkes zustrebt. Die Verfälschung des Raummetergewichtes ist bestimmt durch die Tiefe der Zone zwischen dem Wert Null und dem Raummetergewicht des unendlich ausgedehnten Haufenwerkes. Man spricht von der Tiefenwirkung der Gefäßwandung. Sie ist bei konstanter Korngröße für verschiedene Gefäßgrößen gleich und kann somit bestimmt werden. Sie nimmt mit zunehmend schlechteren Kornformen übrigens zu. Aus verschiedenen großen Meßgefäßen kann das Raummetergewicht für das unendlich ausgedehnte Haufenwerk extrapoliert werden. Der Vorteil des Verfahrens ist, daß man mit geeichten kleinen Meßgefäßen, damit kleineren Probemengen, arbeiten kann. Der wahre Grenzwert für das Haufenwerk kann dann rechnerisch ermittelt werden.

c) Druck- und Schlagversuche an Splittproben

Die Entwicklung dieser Versuchsart ist in der Literaturübersicht festgehalten worden. Die Proben wurden dem an der EMPA entwickelten Druck- und Schlagversuch unterworfen. Versuchsanordnung und -durchführung waren also wie bei der Raummetergewichtsbestimmung als gegeben hinzunehmen. Der Versuch kann nach HALLER (1959) und DE QUERVAIN (1959) zusammengefaßt werden.

Apparatur: Zylindrischer Stahltopf von 220 mm Innendurchmesser und 280 mm Höhe, Stahlstempel von 210 mm Durchmesser und 23,8 kg Gewicht zur Kraftübertragung; Druckpresse für 50 t Belastung, Fallwerk mit Fallbär von 50 kg Gewicht.

Prüfgut: Splittprobe von 10 kg bei einer Korngröße 10/16 mm.

Prüfvorgang: Druckversuch: Druck stetig bis 50 t steigern und 2 Minuten auf dieser Höhe wirken lassen. Schlagversuch: drei Schläge aus 10 cm Höhe zur Verdichtung, dann 50 Schläge aus 2 m Höhe.

Prüfergebnis: Kornverteilungskurven vor und nach Versuch sind aufzutragen, die Kurven werden bei $\frac{1}{32}$ der max. Korngröße abgeschnitten (geometr. Progr. $x_n = 2x_{n-1}$). Zertrümmerungsgrad gleich Differenz der Flächen unter den Siebkurven (fallende) vor und nach Versuch dividiert durch Fläche unter der Siebkurve nach dem Versuch.

Inhomogene Kornverteilungen innerhalb der Fraktion 10/16 mm fallen infolge des geometrischen Maßstabes bei der Berechnung des Zertrümmerungsgrades nicht störend auf. Die entstehenden Feinfraktionen erhalten für die Auswertung stärkeres Gewicht, da erfahrungsgemäß schlechte Qualitäten einen großen Anfall feiner Korngrößen liefern. In amerikanischen und englischen Vorschriften wird als Maß für die Festigkeit der Durchgang durch eine Siebgröße gewählt. Diese Werte werden durch zufällige Einflüsse viel stärker verändert.

In den zitierten Arbeiten werden die wichtigsten Variablen des Versuches diskutiert. So nehmen die Zertrümmerungsgrade mit zunehmenden Korngrößen zu, was damit zusammenhängt, daß die Kräfte zwischen den Körnern über weniger Punkte übertragen werden, aber auch durch die Größe des Stahltopfes bestimmt wird. Mit verschiedenen großen Prüfgefäßen könnte der Einfluß der Korngröße vermutlich eliminiert werden. Ein Haufenwerk mit vielen Hohlräumen wird stärker zertrümmert als ein verdichtetes. Deshalb ist die Kornform eine ausschlaggebende Größe des Versuchs. Die Oberflächenbeschaffenheit der Splittkörner spielt demgegenüber eine geringere Rolle. Da sich das Raummetergewicht mit der Kornform verändert, kann es als Richtwert für die Druck-/Schlagversuche benützt werden. Der Formeinfluß ist so groß, daß qualitativ gute

Gesteine mit schlechten Formen größere Zertrümmerungsgrade ergeben als schlechte Gesteine mit guten Kornformen.

Wesentlich ist natürlich der Einfluß der Petrographie. Zusammenhänge mit einzelnen petrographischen Eigenschaften wie Kornbindung, Mineralkornform, Textur usw. zu finden, dürfte wesentlich schwieriger sein als bei Versuchen an Würfeln.

Mischungen guter und schlechter Gesteine oder von guten und schlechten Kornformen können mehr oder weniger linear zwischen den Werten der Endglieder der Mischungsreihen interpoliert werden. HALLER (1959) hat eine Formel aufgestellt, die eine Abschätzung der verschiedenen Einflüsse der Prüfung erlauben soll. Als allgemeiner Sammelwert mag die Formel verwendbar sein. Haller gibt weiter eine Beschreibung der Vorgänge im Haufenwerk. Es genügt hier festzustellen, daß sie komplizierter Natur sind, daß verschiedene Beanspruchungsarten auftreten und daß sie wenig mit Versuchen an Gesteinswürfeln zu tun haben. Der wichtigste Vorteil der Splittprüfung ist der, daß ähnliche Beanspruchungen wie im Gebrauch auftreten und daß zufällig verteilte Gesteinsinhomogenitäten einen viel geringeren Einfluß haben als bei der Würfelprüfung.

Die Ausführung des Versuches an der EMPA hat den Nachteil, daß eine recht große Materialmenge verwendet werden muß. Da im Minimum zwei Versuche pro Gesteinsprobe nötig sind, ist die Aufbereitung spezieller Proben mühsam. Es ist dadurch nicht möglich, besondere Gesteinsvarietäten aus einer Splittprobe herauszulesen und ihre Druck- und Schlagfestigkeit zu bestimmen, derart, daß später an ähnlichen Proben der Einfluß dieser besonderen Varietät einfach durch Auszählung einer Stichprobe abgeschätzt werden könnte. Damit soll aber kein Einwand gegen den Wert der Druck- und Schlagversuche als Gebrauchsprüfungen gemacht werden. Wir haben diesen Versuch für unsere Proben ausgewählt, damit deren Verhalten in einer richtigen Gebrauchsprüfung mit mehr theoretischen Prüfverfahren verglichen werden kann.

Eine Bemerkung ist noch anzubringen. Die Prüfung wird mit gleichen Gewichtsmengen vorgenommen. Man muß sich fragen, ob dadurch nicht ein systematischer Fehler entsteht, wenn Gesteine von unterschiedlichen Raumgewichten miteinander verglichen werden. Die Praxis arbeitet schließlich auch mit gleichen Raummengen; ein Belag hat eine vorgeschriebene Dicke, nicht ein vorgeschriebenes Gewicht. Andererseits liegen die Raumgewichte vieler Gesteine aus schweizerischen Brüchen und Gruben innerhalb eines engen Bereiches, der Fehler dürfte nur in Ausnahmefällen bedeutungsvoll werden.

d) Polierversuche

Allgemeines

Die Bedeutung der Griffigkeit des Straßenbelages ist mit zunehmendem Verkehr immer mehr in den Vordergrund getreten. Man kennt verschiedene Möglichkeiten, die Griffigkeit eines Belages zu untersuchen. Da der Anteil an Gesteinskornflächen in den Oberflächen der meisten Belagsarten bedeutend ist, liegt es nahe, Gesteine zum voraus auf die Eigenschaft der Griffigkeit zu prüfen.

Berühmt-berüchtigt ist die Glätte von Basaltplästerungen geworden. Nach ZELTER (1935) tritt sie besonders bei feinkörnigen Basalten auf. Wenn sämtliche Eigenschaften eines Gesteins hervorragend sind, ist damit eine Neigung zur Glätte nicht ausgeschlossen, eine besondere Griffigkeitsprüfung ist deshalb nötig. Rauhe Oberflächen wurden früher auch schon für Pflastersteine verlangt. STINY (1935) beschreibt eine Bestimmungsmethode; die Gesteinsfläche wird mit einer Abdruckmasse übergossen, aus der dann beliebige Schnitte herausgeschnitten werden, an denen die Profillinie genauer ausgemessen werden kann. Ähnliches wurde wiederum durch VON WEINGRABER (1954) vorgeschlagen (siehe hierzu Seite 22). Eine Oberfläche ist rauh, wenn zwischen Erhöhungen und Vertiefungen genügend große Abstände bestehen. Eine Politur kann sich nun auf die erhöhten Stellen beschränken, die Fläche ist dann trotz vorhandener Rauhigkeit wenig griffig. Es sind darum auch keine Beziehungen zwischen Gestalt der Profillinie und Griffigkeitsmessungen an Objekten in befriedigender Form gefunden worden.

Wie Seite 22 erwähnt, sind die Arbeiten des Road Research Laboratory in Harmondsworth bahnbrechend gewesen. Nach SHERGOLD (1950/51) wurden etwa noch Splittstücke in flache Metallformen gegossen und einem Dory-Abschleifversuch unterworfen, also einem Abschleif- und nicht einem Polierversuch. Dieser wurde dann von MC LEAN und SHERGOLD entwickelt und in die British Standards 812:1960/34 aufgenommen.

Das Verfahren ist in MAC LEAN und SHERGOLD (1961) und in TEMME (1963) beschrieben. Die neu entwickelte Poliermaschine steht heute auch im IStETH zur Verfügung. Im wesentlichen wird der Poliervorgang, wie er auf der Straße stattfindet, rekonstruiert. Die Beanspruchung wird durch einen Gummireifen erzeugt, der mit einem Schleifmittel zusammen die Politur der Proben bewirkt. Man konnte feststellen, daß auf der Straße ein Schleifmittel in der Form feinen Staubes immer vorhanden ist.

Weitere Autoren zum Thema Griffigkeit wurden Seite 22 genannt. Hinzu kommen noch FREDSTED (1965), der sich mit der Lichtreflexion von Belägen abgegeben hat, dabei auf die leichte Polierbarkeit vieler heller Gesteine gestoßen ist, und WEHNER (1965). Wehner vergleicht verschiedene Geräte. So läßt sich das Ergebnis der Messung mit dem blockierten Schlepprad gut mit den Resultaten des englischen Pendelgerätes zur Messung der Griffigkeit vergleichen. Beim Pendelgerät spielt die Geschwindigkeit keine Rolle. In den SNV-Normen 40440 und 40441 der VSS werden Mindestwerte angegeben, die mit dem Pendelgerät auf Belägen erzielt werden müssen. Der Polierversuch steht in engem Zusammenhang mit der Praxis. Die Griffigkeit des ganzen Belages geht über unser Thema hinaus, wir haben uns vor allem dem Einfluß der Petrographie auf das Polierverhalten zu widmen. In den genannten Arbeiten sind weitere Literaturangaben zu finden.

Polierverhalten und Petrographie

Es sollte möglich sein, das Polierverhalten auf petrographische Eigenschaften zurückzuführen. In VON MOOS und DE QUERVAIN (1948, 1967) ist festgehalten, daß große Härteunterschiede der Hauptgemengteile bei hoher Gesteinsfestigkeit eine gute Rauigkeit auch noch nach längerer Beanspruchung gewährleisten. Wenn die Verbandsfestigkeit klein ist, wird der allgemeine Verschleiß zu groß; die Rauigkeit kann, da einzelne Mineralkörner leicht aus dem Verband herausbrechen, bestehen bleiben. Wenn harte Gemengteile vorherrschen, kann angenommen werden, sofern die Verbandsfestigkeit groß ist, daß die Politur erst nach längerer Beanspruchung, trotzdem aber vollständig, erreicht wird. In englischen Arbeiten wird auf diesen Punkt hingewiesen. Von den Handelsgruppen der Gesteine nach SHERGOLD (1947) zeigen die Kalksteine schlechte, die Sandsteine gute Werte. Die andern Gesteinsarten erhalten mittlere Werte, allerdings mit großen Streuungen, da die Gruppierung der Gesteine sehr weit gefaßt wurde. Wichtig ist, daß alle Gesteine nach einer bestimmten Beanspruchungsdauer einen Grenzwert der Politur oder Glätte erreichen.

Amerikanische Untersuchungen betreffen das Polierverhalten von Kalksteinen, die nur dann gute Werte ergeben, wenn mindestens zwei verschieden harte Mineralien anwesend sind, wie das für Kieselkalke, Sandkalke usw. zutrifft. Kalksteine sollen eine gewisse Regenerationsfähigkeit unter Einfluß der Verwitterung besitzen. Bei großer und regelmäßiger Verkehrsbelastung spielt diese mögliche Eigenschaft aber keine Rolle. Die Struktur der Kalksteine ist bedeutungslos, wichtig ist nur die Beimengung harter Mineralien, wofür Quarz hauptsächlich in Frage kommt. Es wird noch erwähnt, daß schlechte Gesteine bezüglich Griffigkeit, in Mischung mit guten Qualitäten teilweise verwendet werden können. Dies wurde an Messungen fertiger Beläge bestätigt, wobei dort Art und Menge feinkörniger Anteile eine Rolle spielen.

Aus den Versuchen von VOGLER (1965) sind noch keine Schlüsse zu ziehen, da die Lichtdurchlässigkeitsmessungen seiner Folienabdrücke mit Griffigkeitswerten in Beziehung gesetzt werden müssen. Mehr als allgemeine Angaben über die Einflüsse der Petrographie stehen noch nicht zur Verfügung. Es soll hier versucht werden, derartige Abhängigkeiten darzustellen, falls sie überhaupt bestehen.

Versuche mit der englischen Poliermaschine am IStETH

Nachstehende Angaben sind hauptsächlich der internen Betriebsanleitung des IStETH entnommen worden; weitere Angaben stammen aus ZUBERBUEHLER (1964) und TEMME (1963).

Apparatur: Poliermaschine: Probenrad zur Aufnahme von 14 Proben, Polierrad = Gummireifen von bestimmtem Profil, Reifendruck 3,20–3,30 kg/cm², Polierrad wird mit Hebelarm an Probenrad gepreßt. Zuflußeinrichtung für Poliersand und Schmirgelpuder, Tropfvorrichtung für Wasserzugabe.

Pendelgerät SRT (skid resistance tester) mit besonderen Gleitkörpern und Zusatzskala, da Gerät normalerweise auf Straße verwendet.

Prüfkörper: Pro Gesteinsprobe 4 Prüfkörper, von denen pro Serie zwei geprüft werden. Aus drei Kilogramm Splitt 6/10 mm sind Körner der Fraktion 8/10 mm der prozentualen Verteilung der

Varietäten im Splitt entsprechend auf die Formen zu montieren. Die Probenfläche beträgt $88,9 \times 44$ mm, sie hat die Form eines Zylinderoberflächenausschnittes und enthält etwa 60–80 Splittkörner, die mit Zementmörtel zusammengehalten werden, zur Herstellung sind Formen vorhanden. Die Prüfung erfolgt an wassergesättigten Proben.

Prüfvorgang: Je zwei Proben des gleichen Splittmusters werden einander gegenüber auf das Probenrad befestigt. Dann wird das Polierrad mit dem Hebelgewicht von 88 lbs (etwa 40 kg) angesetzt.

1. 3 Stunden mit 315–325 Touren/Minute = total 56600–58500 Umdrehungen unter Zugabe von 12 g Poliersand und 500 Tropfen Wasser pro Minute laufen lassen.
2. Wie oben mit 2–4 g Schmirgelpuder und 100–200 Wassertropfen pro Minute ebenfalls 3 Stunden.

Nach Versuch Proben in Wasser lagern bis zur Pendelmessung.

Griffigkeitsmessungen: bei $20 \pm 2^\circ$, Pendel bei freiem Durchschwingen auf Null einstellen, Gummigleitkörper zuerst 5mal trocken, dann 25mal naß über Normkörper gleiten lassen, Pendellänge so einstellen, daß Berührungslänge $76,2 \pm 1,3$ mm beträgt. 14 Proben einer Serie nacheinander messen (je 5 Messungen pro Probekörper). Dann wird Gummigleitkörper um 180° gedreht, wiederum konditioniert und die Serie in umgekehrter Reihenfolge nochmals gemessen.

Dasselbe mit zweiter Serie und neuem Gleitkörper.

Prüfergebnis: Die Zusatzskala trägt der kleineren Probefläche Rechnung, auf der Straße wird mit größtem Gleitkörper gearbeitet.

Von den 5 Messungen pro Probekörper und Seriedurchgang werden die letzten drei, die in der Regel gleich sind, verwendet. Für einen Probekörper stehen zwei Werte zur Verfügung, die gemittelt werden. Für den endgültigen Griffigkeitswert stehen dann für ein Splittmuster 4 Werte zur Verfügung, die zu mitteln sind. Sie entsprechen dem theoretischen Reibungskoeffizienten μ .

Die Probekörper konnten wir selber herstellen, die Poliermaschine wurde vom IStETH bedient und die Pendelmessungen führten wir schließlich wieder selber aus.

Das Herstellen der Proben ist eine Sache der Kunstfertigkeit und Geduld, im ganzen recht zeitraubend. Die Mörtelbettung wird durch eine leichte Armierung verstärkt. Die Splittkörner müssen mit möglichst ebenen Bruchflächen in die Stahlformen zu liegen kommen, damit die Meßfläche möglichst immer gleich herauskommt und damit sie beim Einbetten nicht seitlich umkippen. Für praktische Begutachtungen müssen die Splittkörner der Proben der prozentualen Splittzusammensetzung entsprechen. Für unsere Zwecke haben wir Proben nach Mineralbestand und Mineralkorngröße bewußt ausgelesen. Normalerweise wird die Griffigkeit nur nach dem Polieren bestimmt, wir haben die Bestimmung auch vor dem Versuch ausgeführt, um Einflüsse petrographischer Eigenschaften besser beurteilen zu können.

Die Übernahme des Versuches aus dem englischen Forschungsinstitut stellt einige Probleme, da der Versuch dort immer wieder Modifikationen erfährt. Es stellt sich dann die Frage, ob man diese sogleich übernehmen soll oder nach eigenen Erfahrungen den Versuch weiter ausbauen kann. Für die Beschaffung von Ersatzteilen wäre es angenehmer, in dieser Beziehung selbständig vorzugehen. Der Verlust der Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse ist nicht schwerwiegend, da hier andere Gesteine als in England verwendet werden. Man kann auch aus heutigen Mitteilungen von Meßergebnissen die Versuchsbedingungen nicht genau entnehmen. Allgemeine Tendenzen werden sich für weit gefaßte Gruppen von Gesteinsvarietäten stark gleichen, auch wenn man in einigen Punkten eigene Wege geht.

Das hat keinen Einfluß auf die Nützlichkeit der Prüfung, bei der es sich um eine Gebrauchsprüfung handelt. Andere Gebrauchsprüfungen zeichnen sich meistens durch die Vielfalt der gleichzeitig wirkenden Beanspruchungen aus, während hier die Beanspruchung, die Polierung, ziemlich klar umschrieben werden kann. Die Ergebnisse zeichnen sich durch ihre Anschaulichkeit aus.

e) Die Verwendung des Schmidtschen Betonprüfhammers

Das Verlangen nach einer einfachen und schnellen Methode zur Bestimmung der Gesteinsfestigkeit bleibt nach wie vor bestehen. In diesem Sinne wurde an die Verwendung des Betonprüfhammers nach Schmidt ge-

dacht, der in kurzer Zeit das Erfassen vieler Meßpunkte an Probestücken oder am Anstehenden erlauben würde. Es wurden schon verschiedene Vorschläge zur «Härtebestimmung» an Gesteinen vorgebracht (HIRSCHWALD, 1912). KIESLINGER (1935) hat so beispielsweise eine Kugeldruckhärte bestimmt, wozu eine Kugel mit einem gewissen Druck auf die Gesteinsfläche zu pressen war, mit der erzeugten Eindruckfläche als Maß für die «Gesteinshärte». Diese Methode geht auf die Härtebestimmung nach BRINELL (1900) zurück. Der Begriff der «Gesteinshärte» wird noch zu diskutieren sein.

Die Verwendung des Betonhammers wird offenbar auch von DANTINNE und LONGUEVILLE (1965) ohne genauere Erläuterungen vorgeschlagen. BACKHAUS (1962) prüft Bohrkern aus dem Buntsandstein mit dem Betonprüfhammer und kann damit Profile feinstratigraphisch genauer unterteilen und korrelieren. Er verwendet die erhaltenen Werte direkt als Maßzahlen. Der Versuch scheint erfolgversprechend zu sein, allerdings handelt es sich beim Buntsandstein um ein nicht sehr festes Gestein. Die Anwendung auf feste Straßenbaugesteine ist deshalb nicht notwendigerweise möglich.

Der vorne leicht gewölbte Schlagbolzen des Prüfhammers wird gegen die zu messende Fläche gedrückt. Bei einem bestimmten Druck löst sich der federgespannte Hammer aus, je nach Elastizität und Plastizität des Gesteins prallt der Hammer um ein bestimmtes Maß zurück. Die Skala gibt den Rückprall in Prozenten des Vorwärtsweges an. Die Schlagenergie beträgt 22,5 cmkg. Man kann in kurzer Zeit eine große Anzahl Messungen am selben Probestück ausführen. Beim Beton werden die erhaltenen Werte anhand einer Kurve mit Druckfestigkeiten in Beziehung gebracht, ähnliches müßte für Gesteine möglich sein, auch in der Anwendung im Steinbruch. Dazu sind vorerst Messungen an Würfeln bekannter Druckfestigkeit auszuführen. Es wären sehr viele verschiedene Gesteine zu prüfen, um die Kurve möglichst genau zu erhalten. Wir haben uns damit begnügt, die Prüfungen an einigen Gesteinswürfeln von ungefähr bekannter Druckfestigkeit, aus Überschußbeständen früherer Untersuchungen, vorzunehmen. Die Resultate seien hier vorläufig mitgeteilt. Die Prüfungen konnten wiederum an der EMPA vorgenommen werden, wo neben dem Prüfhammer auch eine Presse zum Festhalten der Würfel zur Verfügung stand.

Tabelle 2

Bestimmungen mit dem Betonprüfhammer

Gestein	Würfelseite	Lage und Beschaffenheit der Meßfläche	Druckfestigkeit β_d	10 Meßwerte		
				Min.	Max.	Mittel
Granitischer. Sandstein 10 cm Buchberg		Lager nicht erkennbar, flach gesägt glatt geschliffen behauen, mäßig rau	1800 kg/cm ²	50	56	53
				51	59	55
				50	60	56
Bernersandstein	10	eben geschliffen Gegenseite aufgerauht	350	29	40	36
				32	40	37
				30	36	35
Jurakalk	10	senkr. Lager, glatt geschliffen parall. Lager, mäßig rau	1500	44	53	48,5
				38	50	45
Sandstein Buchberg	7	glatt geschliffen	1800	68	69	68
Jurakalk	7	parall. Lager, glatt geschliffen senkr. Lager, glatt geschliffen	1500	54	65	58,3
				50	57	53,6
Gneis, Lodrino, feinkörnig	7	parall. Lager, poliert senkr. Lager, poliert senkr. Lager, rau	2100	71	75	73,6
				71	74	72,6
				69	74	71,1
Gneis, Bodio, grobkörnig	7	senkr. Lager, poliert parall. Lager, geschliffen senkr. Lager, geschliffen	2000	70	74	71,8
				65	69	67,8
				68	72	70,2
Glaukonitsandstein, Buchserberg	7	senkr. Lager, glatt geschliffen parall. Lager, glatt geschliffen senkr. Lager, glatt geschliffen	2500	71	74	73,1
				72	73	72,6
				72	74	73,2
Bernersandstein	7	eben geschliffen	350	41	44	42,3

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 und Abb. 3 zusammengestellt. Aus den gemittelten Werten ergibt sich folgendes: Die verschiedenen Gesteinsarten können auseinandergehalten werden. Die Streubereiche der Meßwerte sind manchmal bemerkenswert klein, wo dies nicht der Fall ist, können aber zur Erklärung nicht immer Inhomogenitäten als Ursache angenommen werden (am ehesten beim Jurakalk).

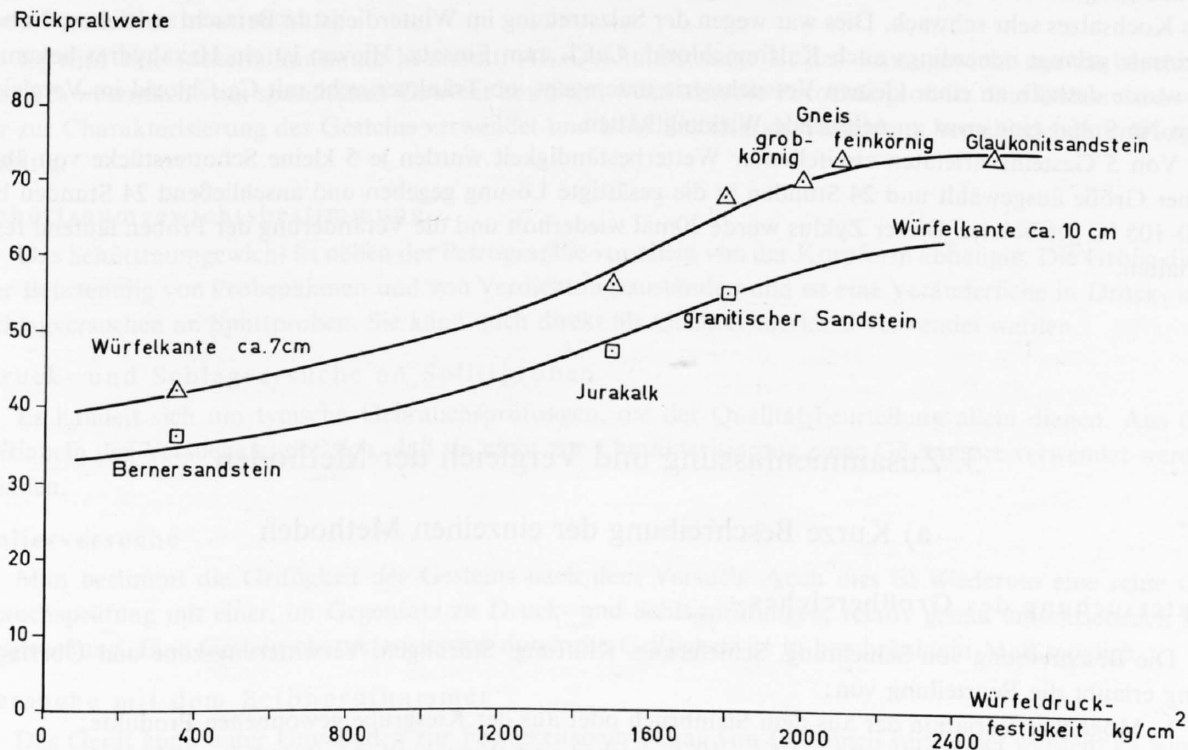


Abb. 3. Beziehung zwischen Würfeldruckfestigkeit und Rückprallwerten für zwei verschiedene Würfelgrößen.

Messungen senkrecht und parallel zum Lager ergeben nicht unbedingt verschiedene Werte. Aufgerauhte Flächen haben ähnliche Werte wie glatt geschliffene mit etwa gleichen Streubereichen. Dies ist für eine Anwendung im Feld von Bedeutung. Mit den erhaltenen Werten kann eine reichlich hypothetische Kurve mit Rückprallwerten in Funktion der Druckfestigkeit aufgezeichnet werden. Die Würfelgröße spielt offensichtlich eine Rolle wie vermutlich auch der Druck, mit dem die Würfel festgehalten werden. Die Kurve scheint bis Druckfestigkeiten um 2000 kg/cm² herum regelmäßig anzusteigen. Gegen hohe Druckfestigkeiten hin dürfte die Kurve immer mehr verflachen. Immerhin ist im Bereich mittlerer Druckfestigkeiten, wo qualitativ zweifelhafte Fälle möglich sind, eine Brauchbarkeit der Kurve zu erwarten.

Es wäre nun notwendig, durch sehr viele Messungen von Rückprallwerten und Druckfestigkeiten an vorerst gleichgroßen Würfeln der verschiedensten Gesteine diese vermutete Kurve zu bestätigen. Weiter könnte dann der Einfluß variabler Würfelgrößen und schließlich die Anwendung an rohen Blöcken im Steinbruch und die Prüfung direkt am Anstehenden untersucht werden. Auch eine Anwendung an Bohrkernen müßte studiert werden, schließlich ist auch eine geologische Anwendung denkbar. All dies wäre aber eine Arbeit für sich. Sie ist im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar, zumal die Anwendungen über das Beurteilen von Straßenbaugesteinen hinaus führen würde.

f) Tränkversuche an Salzlösungen

Den Arbeiten von DE QUERVAIN (1945, 1967) und DE QUERVAIN und JENNY (1951, 1953), ferner dem EMPA-Bericht Nr. 9922 von DE QUERVAIN (1955) konnte entnommen werden, daß die normalen Ausbildungen der untersuchten Gesteine in Tränk- und Aufsaugversuchen mit Salzlösungen, besonders mit Na-Sulfat, gute Versuchsergebnisse liefern und als wetterbeständig angesehen werden können. Zu beachten sind hingegen verschiedene Varietäten wie Tonschiefer, Mergel usw. oder Gesteine mit Inhomogenitäten wie Ton- und

Schieferhäuten, Kluftfüllungen usw. Dort kann in diesen Kristallisierungsversuchen ein Gesteinszerfall leicht erzeugt werden. Der Gehalt derartiger Gesteine im Splitt darf ein gewisses, geringes Maß nicht übersteigen.

Nach den genannten und auch anderen Autoren lassen sich mit Na- und Mg-Sulfat die stärksten Wirkungen erzeugen; hauptsächlich wegen der Existenz verschiedener Hydrate in Temperaturbereichen, die auf der Straße möglich sind. (Glaubersalz und Thenardit beim Na-Sulfat). Dementsprechend sind die Wirkungen des Kochsalzes sehr schwach. Dies war wegen der Salzstreuung im Winterdienst in Betracht zu ziehen. Neben Steinsalz gelangt neuerdings auch Kalziumchlorid, CaCl_2 zum Einsatz. Hievon ist ein Hexahydrat bekannt. Es wurde deshalb an einer kleinen Versuchsserie untersucht, ob Tränkversuche mit Ca-Chlorid im Vergleich zum Na-Sulfat eine ernst zu nehmende Wirkung hätten.

Von 5 Gesteinsvarietäten zweifelhafter Wetterbeständigkeit wurden je 5 kleine Schotterstücke von ähnlicher Größe ausgewählt und 24 Stunden in die gesättigte Lösung gegeben und anschließend 24 Stunden bei 100–105 °C getrocknet. Dieser Zyklus wurde 20mal wiederholt und die Veränderung der Proben laufend festgehalten.

3. Zusammenfassung und Vergleich der Methoden

a) Kurze Beschreibung der einzelnen Methoden

Untersuchung des Großbereiches

Die Beschreibung von Schichtung, Schieferung, Klüftung, Störungen, Verwitterungszone und Überlagerung erlaubt die Beurteilung von:

1. Möglicher Variation der aus dem Steinbruch oder aus der Kiesgrube gewonnenen Produkte;
2. Problemen des Steinbruchbetriebes, der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit und der Abbaureserven.

Untersuchung des Kleinbereiches

Sie hat zwei wesentliche Aufgaben:

1. Genaue Charakterisierung eines Gesteins durch Beschreibung von Mineralbestand, Struktur, Textur, von Inhomogenitäten wie Tonhäuten, Fein- und Kalzitklüften, Fossilinlagerungen an Handstücken und Stichproben von Splitt oder Schotter. Dann ist auch die Größe von Homogenbereichen für verschiedene Eigenschaften zu bestimmen, ob sie über oder unter dem Splittkorngrößenbereich liegen.
2. Erste Qualitätsbeurteilung nach Faustregeln und persönlicher Erfahrung unter Verwendung der obigen Beschreibungen und zusätzlich der Beschreibung von Verwitterungszustand, Oberflächen- und Kantenbeschaffenheit, Bruch- und Schlagfestigkeit, Anwesenheit leicht verwitterbarer Mineralien; dann für Splittstichproben prozentuale Zusammensetzung durch Auszählen der verschiedenen Varietäten, Kornform der Splittkörner, Gehalt an feinen Körnungen (Staub), organische Verunreinigungen und Festigkeit einzelner Splittkörner.

Untersuchung des Mikrobereiches

Hier werden die Bestimmungen des Kleinbereiches erweitert und verfeinert. Die Auswahl der Dünnschliffe wird nach den Untersuchungen am Kleinbereich vorgenommen. Die Probleme entsprechen denjenigen des Kleinbereiches:

1. Das Gestein ist durch Bestimmen von Mineralbestand, Korngröße, Textur, Kornbindungsverhältnissen und Ausbildung des Bindemittels zu charakterisieren.
2. Nach Erfahrungen und Faustregeln ist eine Qualitätsbeurteilung teilweise möglich.
3. Mineralbestand, Korngröße, Bindemittelanteil, Kornbindung und allenfalls auch Porosität können zahlenmäßig durch Messen festgelegt werden. Damit können Größen bestimmt werden, die in verschiedenen Prüfungen als Veränderliche auftreten. Die Messungen können aber auch unter 1 und 2 verwendet werden.

Kornformbestimmung

Sie erfolgt an Stichproben von Splittlieferungen. Für die praktische Qualitätsbeurteilung kann sie nach Augenschein oder mit einfachen Schnellmethoden vorgenommen werden. Wo der Einfluß der Kornform auf praktisch-physikalische Prüfmethoden zu beurteilen ist, sind genauere Meßverfahren anzuwenden.

Raumgewichtsbestimmung

Es wird eine Materialkonstante bestimmt. Als Qualitätsaussage ist das Raumgewicht nur zu beachten, wenn es wesentlich vom spezifischen Gewicht abweicht, wenn also die Porosität groß ist. Die Größe wird weiter zur Charakterisierung des Gesteins verwendet und ist schließlich als Variable in verschiedenen Prüfungen wichtig.

Schüttraumgewichtsbestimmung

Das Schüttraumgewicht ist neben der Petrographie vor allem von der Kornform abhängig. Die Größe dient der Beurteilung von Probenahmen und von Verdichtungszuständen und ist eine Veränderliche in Druck- und Schlagversuchen an Splittproben. Sie kann auch direkt als Qualitätsmerkmal verwendet werden.

Druck- und Schlagversuche an Splittproben

Es handelt sich um typische Gebrauchsprüfungen, die der Qualitätsbeurteilung allein dienen. Aus den Variablen der Versuche ergibt sich, daß sie nicht zur Charakterisierung einer Gesteinsart verwendet werden können.

Polierversuche

Man bestimmt die Griffigkeit des Gesteins nach dem Versuch. Auch dies ist wiederum eine reine Gebrauchsprüfung mit einer, im Gegensatz zu Druck- und Schlagprüfungen, relativ genau umschriebenen Beanspruchung. Eine Gesteinscharakterisierung durch die Griffigkeit ist in beschränktem Maß möglich.

Versuche mit dem Betonprüfhammer

Das Gerät kann unter Umständen zur Festigkeitsbeurteilung von Gesteinen verwendet werden. Es würde dadurch eine Gesteinscharakterisierung und eine Qualitätsaussage ermöglichen.

Tränkversuche

Sie erlauben eine Bestimmung der Wetterbeständigkeit der Gesteine und sind als Gebrauchsprüfungen zu bezeichnen.

b) Vergleichende Betrachtungen

Wir haben es immer mit zwei grundsätzlich verschiedenen Prüfungsmethoden zu tun. Die petrographischen dienen der Gesteinscharakterisierung, es werden Eigenschaften bestimmt; zur Qualitätsbeurteilung können sie nur als Faustregeln, zusammen mit persönlicher Erfahrung, verwendet werden. Was dabei vollzogen wird, ist ein bewußter oder unbewußter Vergleich mit einem Gestein bekannter Qualität. Die praktisch-physikalischen Methoden ergeben nicht mehr Eigenschaften, sondern Verhaltensweisen unter bestimmten Beanspruchungen. Nach dieser Unterscheidung gehören nun Stoffprüfungen eher zu den petrographischen Methoden, da sie auch der Bestimmung von Eigenschaften dienen. Es ist klar, daß Übergänge zwischen den Prüfungsarten bestehen. Auch Gebrauchsprüfungen sind auf persönliche Erfahrungen angewiesen.

Erwünscht wäre es, von der Petrographie auf die Qualität schließen zu können, aus der Kenntnis der Eigenschaften das Verhalten unter bestimmten Beanspruchungen vorauszusagen. Dies ist nun mit Schwierigkeiten verbunden. Wo die Beanspruchungen in Gebrauchsprüfungen einfacher, definierbarer Natur sind, wie das beim Polierversuch der Fall ist, ist eine direkte Korrelation zwischen Eigenschaften und Verhalten bzw. Qualität denkbar. Bei der kombinierten Beanspruchung im Druck- und Schlagversuch sind die Zusammenhänge schon viel unklarer. Es muß trotzdem nach möglichen Abhängigkeiten gesucht werden, damit entschieden werden kann, ob einzelne Prüfungen durch andere ersetzt werden können oder ob sie ganz aufgegeben werden können, um die Qualitätsbeurteilung der Straßenbaugesteine zu vereinfachen. Aus den hier gewonnenen Ergebnissen können unter Umständen Vorschläge in dieser Richtung formuliert werden. Vorerst geben wir nur eine kurze Übersicht der denkbaren Zusammenhänge.

Tabelle 3

Qualitätsmerkmal:	Abhängig von:
Splittkornform	Petrographie, System und Einstellung des oder der Gesteinsbrecher
Raumgewicht	Petrographie (speziell Porosität)
Schüttraumgewicht	Splittkornform und -größe der Meßbehälter, Verdichtungsgrad, Petrographie
Zertrümmerungsgrad	Petrographie, Splittkornform und -größe, Schüttraumgewicht, Raumgewicht
Griffigkeit	Petrographie
Betonprüfhammer	Petrographie, Größe Probekörper
Tränkversuche	Petrographie

Je mehr variable Größen zum Qualitätsmerkmal beitragen, um so verschwommener werden die Zusammenhänge. Zu den aufgeführten, ganz allgemein gehaltenen Variablen, kommen natürlich die von den Versuchsaapparaturen bestimmten Größen, die man als Versuchsbedingungen bezeichnen kann.

Die unklaren Abhängigkeiten ergeben den Schluß, daß die Prüfung einzelner Gesteine sehr viel schwieriger ist, als die Prüfung ganzer Serien verschiedenartiger Qualitäten. Ebenso sind absolute Meßergebnisse mit Vorsicht aufzufassen. Eine relative Anordnung von Versuchsergebnissen ganzer Prüfserien erlaubt eine zuverlässigere Beurteilung.

Abkürzungen und Signaturen:

Gesteine:

- A × Jurakalk
- B ▲ Glaukonitsandstein
- C △ Kieselkalk der helvetischen Kreide
- D □ Kieselkalk des préalpinen Lias
- E ○ Gneise aus Flußausbeutung
- F ■ Flyschsandstein
- G ● Amphibolit
- a & b Splittstichproben aus Anlieferungszustand
- c Splittstichproben aus Fraktion 10/16 mm
- Zahlen Handstück- und Schliffbezeichnungen (z. B. A16)

Größen:

- a Länge
 - b Breite
 - c Dicke
- } (Hauptdurchmesser oder -abmessungen von Splittkörnern in Millimeter)
- g Gewicht eines Splittkorns in Gramm
 - v Volumen eines Splittkorns in Kubikzentimetern
 - γ_s spezifisches Gewicht des Gesteins in Gramm pro Kubikzentimeter
 - γ Raumgewicht des Gesteins in Gramm pro Kubikzentimeter
 - γ_a scheinbares spezifisches Gewicht in Gramm pro Kubikzentimeter
 - γ_g Raumgewicht des wassergesättigten Gesteins in Gramm pro Kubikzentimeter
 - γ_l Raummeter- oder Schüttraumgewicht des Haufenwerkes, lose, in Kilogramm pro Kubikdezimeter
 - γ_v Raummeter- oder Schüttraumgewicht des Haufenwerkes, verdichtet, in Kilogramm pro Kubikdezim.
 - μ Reibungskoeffizient
 - β_d Würfeldruckfestigkeit in Kilogramm pro Quadratzentimeter
 - Md Median aus Summationskurven, der Ordinate 50% entsprechender Korndurchmesser
 - S Standard-Streuung
 - Zd Zertrümmerungsgrad Druckversuch
 - Zs Zertrümmerungsgrad Schlagversuch
 - Zd/Zs Zähigkeit

B. Die untersuchten Gesteine

I. Allgemeines

1. Auswahlkriterien

Für die Untersuchungen wurden in erster Linie typische Straßenbaugesteine ausgewählt. In zweiter Linie wurde auf die Variation verschiedener petrographischer Eigenschaften geachtet, weshalb auch minderwertige, für Straßenbauzwecke nicht in Frage kommende Gesteine, mit in die Prüfungen einbezogen wurden.

So wurden Proben entnommen von:

- Kieselkalk des Hauterivian der helvetischen Kreide,
- Glaukonitsandstein des Gault der helvetischen Kreide,
- Flyschsandstein (Altdorfersandstein),
- Kieselkalk des Lias der Préalpen,

als hochwertige Straßenbaugesteine; weiter von:

- Tessiner Gneise aus Flußausbeutung,
- Amphibolit der Silvrettadecke,

als Gesteine, die unter gewissen Bedingungen oder nur lokal als Straßenbaugesteine verwendet werden, und schließlich:

- Jurakalk aus dem Malm der Lägern,

der als Straßenbaugestein nicht verwendet wird, aber als Vergleichsmaterial in verschiedenen Prüfungen dienen konnte.

Damit konnten Veränderungen folgender petrographischer Eigenschaften berücksichtigt werden:

- Mineralkorngröße vom sehr feinkörnigen Jurakalk über den Kieselkalk des Lias, den helvetischen Kieselkalk, den Glaukonitsandstein, den Flyschsandstein und den Amphibolit bis zu den Tessiner Gneisen. Aus dem Lias-Kieselkalk konnte für einige Versuche eine Fraktion von feinspätigem Kalk, gewonnen werden, womit die Korngröße auch für reinen Kalkstein variierte.
- Mineralbestand; vor allem das Kalzit-Quarzverhältnis vom reinen Jurakalk über den Lias-Kieselkalk, den helvetischen Kieselkalk, den Flyschsandstein zum Glaukonitsandstein oder vom monomineralischen Jurakalk bis zum polymineralischen Amphibolit.
- Textur mit massigen bis leicht geschichteten Sedimenten, feinschiefrigen Sedimenten und deutlich bis stark geschieferten metamorphen Gesteinen.
- Struktur mit sedimentären und kristallinen Implikationsgefügen und granoklastischen Sedimentstrukturen mit verschiedenartiger Bindemittelausbildung.

Bei den einzelnen Gesteinen ist dann die eine oder andere Eigenschaft besonders entwickelt, worauf bei der petrographischen Beschreibung eingegangen wird. Mit dieser Auswahl konnte angenommen werden, den Einfluß der Petrographie bei verschiedenen Versuchen genauer ermitteln zu können. In den häufig verwendeten Grubenmaterialien des Schweiz. Mittellandes sind die ausgewählten Gesteine in den meisten Fällen die wichtigsten Komponenten, womit die Untersuchungen auch für jene Gesteine einen Wert haben, wenn auch das Verhalten von Mischungen nicht in diese Arbeit miteinbezogen wurde. Es stehen aber dazu verschiedene Untersuchungen der Geotechnischen Kommission und der EMPA zu Verfügung.

2. Probenahme

Die Probenahme ist ausschlaggebend für die Qualität einer Gesteinsprüfung. Dies ist in den heutigen Normen, wie z. B. in Normblatt SNV 70 800 der VSS (1966), gebührend berücksichtigt. Es geht um die Dar-

stellung einer Grundgesamtheit durch Stichproben. Zur Beurteilung einer Lieferung von Gesteinsmaterial sind Stichproben derart zu entnehmen, daß sie der Zusammensetzung des Materials, so wie es zur Anwendung gelangt, entsprechen und daß die Reproduzierbarkeit der Probenahme gewährleistet ist. Um diese Bedingungen zu erfüllen, erfordert die Probenahme große Sorgfalt und großen Zeit- und Arbeitsaufwand.

In unserem Fall war das Problem erheblich einfacher. Es galt nicht, die Qualität einer bestimmten Splittlieferung oder gar einer ganzen Steinbruchproduktion zu beurteilen. Zu ermitteln waren nur die Eigenschaften des entnommenen Probematerials, es war daraus kein Schluß auf die Eigenschaften der Grundgesamtheit zu ziehen. Damit konnte die Probenahme auf eine einzige Stelle des Splittdepots beschränkt werden. Für die entnommene Probe mußte die Forderung nach vollkommener Homogenität erfüllt sein, bevor sie für die verschiedenen Versuche aufgeteilt wurde. Dies wurde durch mehrmaliges Umschaukeln der etwa 100 kg Splitt bewerkstelligt. Das Unter- und Überkorn wurde vorerst im Steinbruch von Hand mit Rundlochsieben 10 und 16 mm abgetrennt. Es konnte aber bald festgestellt werden, daß damit keine vollständige Siebung zu erzielen war. Die Siebung wurde in der EMPA maschinell wiederholt; Stichproben für die Splittpetrographie und für die Kornformen konnten vor und nach der maschinellen Siebung entnommen werden. Die Gewinnung der für die verschiedenen Prüfungen notwendigen Materialmengen geschah durch das übliche Teilungsverfahren, die größte Menge wurde natürlich für Druck- und Schlagversuche sowie die Schüttraumgewichtsbestimmung benötigt.

Im Steinbruch waren Handstücke zu entnehmen. Hier ist zu sagen, daß es praktisch unmöglich ist, durch statistisch angeordnete Entnahme von Handstücken eine auch mengenmäßig für den Steinbruch repräsentative Probe zu entnehmen, wenn dies theoretisch auch denkbar ist und etwa auch verlangt wird. Praktisch wird wie folgt vorgegangen:

Die verschiedenen Varietäten des Gesteins werden nach Augenschein festgestellt; für jede dieser Varietäten sind mehrere Handstücke zu entnehmen, die es ermöglichen sollen, jede im Splitt vorkommende Gesteinsart an größeren Stücken, aus denen auch Dünnschliffe hergestellt werden können, genauer zu beschreiben. Dazu werden noch Handstücke von Stellen mit besonderen Erscheinungen entnommen. Man findet diese Varietäten ebensogut nach Sprengungen im Blockmaterial als direkt an der Steinbruchwand. Diese ist wichtiger zur Abschätzung der mengenmäßigen Anteile der wichtigsten Gesteinsarten am Abbauprofil.

Die beschriebene Art der Probenahme und -aufteilung war wichtig für Druck- und Schlagversuch, für Schüttraumgewichtsbestimmung, für Kornformbestimmung und Bestimmung der petrographischen Splittzusammensetzung, nicht aber für Gesteinsraumgewichtsbestimmung und Poliersversuche, wo bewußt ausgelesene Stücke verwendet wurden. Abschließend muß nochmals darauf hingewiesen werden, daß die Versuchsergebnisse nicht repräsentativ für die gesamte Steinbruchproduktion oder für zur Zeit der Probenahme gelieferte Steinbruchprodukte sind, sondern nur für die entnommenen Proben allein Geltung haben. Das will nicht heißen, daß man nicht gewisse Schlüsse auf die Qualität des gewonnenen Splittes oder des Gesteines allgemein ziehen kann. Es kommt ihnen aber kein rechtliches Gewicht zu. Die Beurteilung effektiv benützter Lieferungen stand nicht zur Diskussion.

II. Beschreibung der Gesteine

1. Jurakalk

a) Großbereich

Unser Material wurde den Steinbrüchen von Dielsdorf entnommen, die im oberen Malm, im Kimmeridgian der östlichen Lägernkette angelegt sind. Das Kimmeridgian umfaßt hier die Wangener-, Badener- und Wettingerschichten. Das Splittmaterial stammt aus dem Bruch I, der ganz in den Wettingerschichten liegt. Es sind gelbliche, reine, schlecht gebankte Kalke mit starker und unregelmäßiger Klüftung. Charakteristisch sind Feuersteinknollen und Bolustaschen an der Oberfläche. (SUTER und HANTKE, 1962). Ein genauer beschriebenes

Profil findet sich in NOTZ (1924), vereinfacht auch in DE QUERVAIN und GSCHWIND (1949). Danach umfassen die Wettingerschichten von oben nach unten:

1. reinen, massigen, gelblich-weißen Kalkstein mit Bolustaschen,
2. Kalkbänke, zum Teil etwas mergelig und schiefrig,
3. schlecht gebankte, zum Teil knollige Kalksteine von meist dunkler Farbe und
4. gut, gebankte, knollige Kalke der oberen Badenerschichten.

Zur Zeit der Probenahme waren die massigen und die gebankten Wettingerschichten aufgeschlossen, die gebankten, unteren mehr gegen den Antiklinalscheitel hin, der den Steinbruch auf der nordwestlichen Seite abgrenzt. Vom Scheitel her fallen die Schichten mit etwa 15° gegen Osten ein, weshalb die gebankten Wettingerschichten gegen Südosten bald unter die Steinbruchsohle tauchen.

Am Profil der Abbauwand sind die massigen Wettingerschichten zu etwa 75–80% vertreten, die gebankten zu etwa 20%. Dazu kommt ein Anteil von erdigem Material aus den Bolustaschen. Kluftfüllungen und Mergelzwischenlagen spielen keine Rolle.

Im Blockmaterial, nach Sprengungen anfallend, nimmt der massige Kalk einen noch größeren Prozentsatz ein. Blöcke mit Mergellagen sind spärlich vertreten. Das Blockmaterial ist mit Erde aus den Bolustaschen vermischt, bei trockener Witterung bleibt das Gestein sauber. Die Trennung von Erde und Gestein scheint beim Brech- und Siebvorgang keine Schwierigkeiten zu bieten.

Das Gestein ist von der Verwitterung sehr wenig beeinflusst worden. Die obersten Schichten sind etwas ausgebleicht, was auf die Festigkeit keinen Einfluß hat.

Gesteinsarten, die durch die Beschreibung von Handstücken und Dünnschliffen genauer zu untersuchen sind, wären die folgenden:

- normale Ausbildung der ungebankten Wettingerschichten,
- etwas mehr mergelige Kalke der unteren, gebankten Wettingerschichten,
- Mergel aus Zwischenlagen,
- zerklüftete Kalke,
- verwitterte Kalke.

b) Kleinbereich

Das Gestein kann makroskopisch beschrieben werden als dichter, sehr feinkörniger, reiner Kalkstein von hellgelblicher bis fast weißer Färbung. Die Farbe kann leicht variieren, sie ist auf Spuren von diffus verteiltem Limonit zurückzuführen. Die Körnung kann auch mit starker Binokularlupe nicht sichtbar gemacht werden. Der Mergelgehalt ist minimal. Folgende Inhomogenitäten sind charakteristisch: Tonhäute, als Oberflächenbeläge rostig erscheinend, Suturen und unregelmäßig geformte Feinklüfte, die oft mit mergelig-limonitischem Material angefüllt sind, Haarrisse, richtige mit Kalzit verheilte Klüfte von größerem Ausmaß. All diese Erscheinungen sind im Handstückbereich gut beobachtbar, im Splittkornbereich treten nur noch Haarrisse und Feinklüfte, allenfalls noch Tonhäute auf, dann auch Oberflächen, die mit den genannten Inhomogenitäten zusammenfallen. Im allgemeinen werden keine Richtungen bevorzugt, doch findet man parallel größeren Klüften gerne Scharungen von Feinklüften.

Auch die Mergellagen werden im angrenzenden Kalk von Feinklüften begleitet, die Schichtungsebene ist da bevorzugt.

Beim Anschlagenerweist sich der Kalk als fest. Die Bruchflächen sind nur bei fehlenden Haarrissen und Tonhäuten flach, sonst aber höckrig und rau ausgebildet. Glatte Flächen entstehen auch beim Bruch längs Tonhäuten und Klüften und sind meistens durch eine rostige Verfärbung gekennzeichnet. Beim Zerschlagen entstehen splittrige Bruchstücke, weshalb das Gestein etwa als spröde bezeichnet wird. Reine Mergel sind im Handstückbereich nicht vorhanden, man findet höchstens Stücke mit mergeligen Oberflächen. Der Übergang Kalk–Mergel ist scharf ausgebildet. Kalke aus den unteren Wettingerschichten unterscheiden sich im Handstück kaum mehr von den massigen Kalken, sie sind etwas dunkler gefärbt, dürften einen wenig höheren Mergelgehalt aufweisen. Tiefgreifende Verwitterungserscheinungen fehlen durchwegs.

Der Grundkörper bezüglich grober Inhomogenitäten (Klüfte, Rutschharnische usw.) liegt weit über dem Splittkorngrößenbereich, bezogen auf Tonhäute, Haarrisse und Feinklüfte häufig darunter. Wo Klüfte parallel angeordnet sind, muß mit einer Beeinflussung der Splittkornformen gerechnet werden. Mergelige Lagen dürften beim Brechen und Sieben zur Hauptsache eliminiert werden.

Im Splitt lassen sich folgende Gesteinsvarietäten ausscheiden:

- Kalk mit wenigen Inhomogenitäten,
- Kalk mit vielen Inhomogenitäten (Haarrisse, Suturen, Tonhäute usw.),
- Grobkristalliner Kluftkalzit vorwiegend,
- Oberflächen vorwiegend als Kalzitbeläge, Mergellagen, gestriemte Rutschharnische, limonitisierte Flächen usw. ausgebildet,
- Mergel, mergeliger Kalk, stark verwitterte Stücke,
- Fossil
- Feuersteinknollen (Silex).

Die Untersuchung an Stichproben von je 200 Splittkörnern (siehe S. 73) hat gezeigt, daß nur die ersten beiden Varietäten wichtig sind. Grobkristalliner Kalzit ist immer vorhanden, wenn auch sehr spärlich. Aus der Zusammensetzung des Großbereiches war diese Verteilung zu erwarten. Die Unterscheidung der beiden Hauptvarietäten ist sehr willkürlich, da vollkommen homogene Stücke fast nie vorhanden sind, die beiden Gruppen qualitativ deshalb kaum wesentlich verschieden sind. Zusammen erhält man für beide Gruppen Anteile von über 95%, die restlichen knapp 5% verteilen sich auf Kalzit, Silexknollen, Mergelstücke, dürften auf die Splittqualität aber von sehr geringem Einfluß sein. Die Splittformen sind schlecht. Es ergeben sich scharfe Kanten und Spitzen; die Formen können als splittrig bezeichnet werden. Der Splitt ist im übrigen sauber.

c) Mikrobereich

Das Dünnschliffbild eines normalen Wettingerkalkes zeigt eine sehr feinkörnige Grundmasse. Die Schliffe sind kaum durchsichtig, da die Mineralkorngröße weit unter der Schliffdicke liegt. Am Schlifftrand kann der Korndurchmesser geschätzt werden; er beträgt etwa 0,005–0,01 mm. Die Kalzitkörner der Grundmasse grenzen unmittelbar aneinander. Sie bilden ein dichtes Implikationsgefüge. Die Struktur kann als krypto- bis mikrokristallin bezeichnet werden. In der Grundmasse befinden sich regelmäßig verteilt größere Kalzitaggregate, die meistens Fossilschnitten angehören. Die Korngrößen des Kalzites nehmen dabei bis etwa 0,1 mm zu, eine Festigkeitsverminderung ist deswegen nicht zu befürchten, da das Implikationsgefüge bestehen bleibt. Diese Aggregate äußern sich in der Korngrößenauszahlung. Akzessorisch tritt Limonit auf.

Dieses Bild ist für alle Schliffe gleich, ausnahmsweise wird die Grundmasse etwas grobkörniger. Von Fall zu Fall kommen die schon im Handstückbereich beschriebenen Inhomogenitäten hinzu. Der Kluftkalzit hat Korngrößen um 0,5–1 mm. Die Feinklüfte, oft mit limonitischem Material gefüllt, haben in Kluftscharungen gegenseitige Abstände von weniger als 1 mm. Sie sind als Schwachstellen unter Umständen zu beachten, die Beschreibung im Überblick am Handstück ist einfacher.

Für die Schliffzählungen wurden mikrokristalliner Kalk, rundliche Einschlüsse, langgestreckte Einschlüsse, Limonit und offene Klüfte oder Risse unterschieden. Bei den Einschlüssen handelt es sich meist um Fossilschnitte, seltener auch um Kluftkalzit im Bereich der Schliffdicke oder darüber. Damit können die Schliffe etwas unterschieden werden. Wenn einfach Kalzit ausgezählt wird, erhält man dafür fast 100%. Der Limonit spielt keine Rolle. Der Prozentsatz der feinsten Korngrößen entspricht ziemlich genau demjenigen des mikrokristallinen Kalkspates. Wenn die Fraktionen unter 0,03 mm zusammengefaßt werden, ergeben alle Schliffe ähnliche Gehalte (96,4; 96,4 und 92,8%), die groben Fraktionen sind unwichtig. Für weitere Überlegungen wird man besser die zusammengefaßten Werte benutzen, da die Abgrenzung benachbarter Fraktionen hier wegen der starken Vergrößerung ungenau ist.

Meßwerte der Schliffe A 16, A 25a und b siehe S: 79/80.

2. Glaukonitsandstein

a) Großbereich

Der Steinbruch Buchserberg liegt in der mittleren Kreide der Säntis- oder Churfürsten/Alvier-Decke. Nach CADISCH (1953) umfaßt die mittlere Kreide (Gargasian und Albien) neben den abgebauten Gamser- und Brisi-

schichten als Liegendes noch Luiterezug-Fossilschicht, Luitere mergel und glaukonitische Basisschichten und als Hangendes Durchschlägi- und Niederischichten.

Detailprofile wurden von Arnold HEIM (1913) beschrieben; dem Steinbruch am nächsten dasjenige von Räfis im Rheintal, ferner die Profile Sisizalp-Roßwies und Hurst am Alvier weiter südwestlich. Wichtig ist, daß die Gamserschichten im Rheintal ihre maximale Mächtigkeit erreichen.

Der ganze Komplex der Säntisdecke fällt etwa gegen Osten zum Rheintal hin ein. Das Fallen entspricht ungefähr der Hangneigung. SW-NE verlaufende Brüche zerlegen den Komplex in einzelne Schollen. Quer dazu verlaufende Kluftsysteme verursachen eine intensive Zerklüftung.

Lithologische Beschreibungen können der Arbeit von ARN. HEIM (1913) entnommen werden. Eine weitere Untersuchung, nun schon im Hinblick auf die technische Verwendung der Gesteine, stammt von DE QUERVAIN (1931). Danach wären die Gamserschichten im Profil Räfis in drei Abschnitte zu unterteilen:

- etwa 40 m gebankte, schwarze Glaukonitsandsteine mit wellig-flaserigen Schieferschmitzen und -lagen, matt schwarzer Bruch, große Zähigkeit,
- 1–2 m feinkörnige, geschieferte kalkreiche Sandsteine von schwarzer Farbe,
- schwarze Sandsteine, weniger Schieferflaser, nach oben quarzreicher und fettglänzend, in Brisisandstein übergehend.

Der Brisisandstein, nach ARN. HEIM (1913) etwa 10–15 m mächtig, ist heller und läßt im Millimeter-Bereich manchmal eine Feinschichtung erkennen; die Schieferlagen und -schmitzen fehlen, es kommt eine fast weiße quarzitisches Varietät vor, die sehr wenig Glaukonit enthält, daneben aber auch fast schwarzes glaukonitreiches Gestein, durch den Fettglanz und muscheligen Bruch von den Gamserschichten zu unterscheiden. Die ähnlichen Sandsteine der Niederischichten sind feinkörniger.

Der Steinbruch der Basaltstein AG, Buchs, liegt am unteren Buchserberg und erstreckt sich vom untersten Niveau auf 670 m bis 780–800 m hinauf. Der Bruch liegt fast vollständig in der mittleren Kreide. Gegen Norden und Nordwesten wird er durch eine der erwähnten SW-NE Verwerfungen abgeschnitten; nördlich der Verwerfung steht Schrattenkalk an.

Über die Verhältnisse im Steinbruch gibt ein Gutachten von DE QUERVAIN (EMPA-Bericht No. 9922/4a, 1954) Auskunft, worin für die damalige Bruchwand von oben nach unten folgende Schichten unterschieden werden:

- etwa 15–20 m dunkle, massige, quarzreiche Sandsteine mit vereinzelten Schieferschmitzen,
- 3–4 m kalkreiche Gesteine, z. T. Sand- bis Kieselkalke, z. T. stark geschieferte Sandsteine,
- 20–25 m schwärzliche, fleckige Sandsteine mit mattem Bruch, mehr oder weniger schieferig,
- wenige Meter Mergelschiefer, darunter Schrattenkalk.

Auf der untersten Sohle, in isolierter Lage von der Verwerfung abgeschnitten, wird eine Partie wie folgt beschrieben: etwa 20 m quarzreiche, massige Sandsteine, teilweise arm an Glaukonit, von grauer Farbe, nach unten übergehend in ähnliche, dunkle Sandsteine (glaukonitreicher). Zuunterst folgen leicht geschieferte Sandsteine mit dunkeln Schmitzen.

Zur Zeit der Probenahme wurde der Abbau auf dem obersten Niveau betrieben. Die Lagerungsverhältnisse sind infolge der enormen Klüftung nicht klar ersichtlich. Auffallend ist eine etwa 70 cm mächtige Bank, aus einem tiefschwarzen, matten, sehr feinkörnigen, glaukonithaltigen und kalkreichen schiefrigen Sandstein bestehend, die mit etwa 25° gegen Südosten einfällt. Dieses Gestein darf nicht verwendet werden. Die Bank entspricht der schiefrigen kalkreichen Zone im Bericht von DE QUERVAIN (1954). Die schiefrigen Gesteine an der Basis der Gamserschichten sind deutlich verschieden und enthalten auch Fossilien, die oben nicht zu finden waren. Auch aus dem Schichtfallen kann geschlossen werden, daß die beiden Schichten nicht identisch sind.

Über den schiefrigen Sandsteinen liegt massiger, sehr dunkler Glaukonitsandstein mit Schieferschmitzen und -häuten, der zur Splittherstellung benützt wird. Er ist quarzreich und leicht fettglänzend. Die Mächtigkeit bis zur Oberfläche beträgt etwa 10–15 m; weitere Schichten treten keine mehr auf. Die Klüftung wird gegen die Verwerfung zu immer stärker; es entstehen Kluftkörper von Handstückgröße, größere Blöcke sind seltener. Die Klüfte sind zum Teil offen und mit erdigem, limonitischem Material gefüllt, die Kluftbegrenzungsflächen sind deshalb fast durchwegs verrostet oder mit schmutzigen Belägen versehen. Es treten weiter viele mit Kalzit verheilte Klüfte auf, oft in parallelen Scharen mehr oder weniger engständig angeordnet. Sie ergeben flache, mit grobkörnigem Kalzit belegte Kluftflächen. Rutschharnische sind recht häufig.

Am nördlichen Ende der untersten Sohle stehen sehr quarzreiche Sandsteine an, die der von DE QUERVAIN (1954) beschriebenen isolierten Partie angehören. Da hier kein großer Abbau stattfand, ist die Situation wenig verändert. Die Gesteine lassen sich als enorm feste, massige, fast quarzitische Sandsteine bezeichnen. Sie sind meistens glaukonitarm und dann von hellgrauer Farbe; es kommen aber auch dunkle, glaukonitreiche, stark fettglänzende und muschelrig brechende Sandsteine vor. Die Einreihung ist unklar, da Liegendes und Hangendes von Sprengschutt überdeckt ist oder ganz fehlt. Die Klüftung ist wegen der nahen Hauptverwerfung sehr stark.

Die Frage der Abgrenzung von Gamser- und Brisischichten wird zur Zeit im Rahmen einer allgemein geologischen Untersuchung des Gebietes durch U. BRIEGEL (Geol. Inst. ETH) behandelt. Nach bisherigen Arbeiten enthalten typische Gamserschichten viele Schieferschmitzen und -lagen, sind eher von matter, dunkler Farbe und leicht geschiefert. Die Brisсандsteine zeigen dagegen Fettglanz wegen des großen Quarzgehaltes, sind oft heller und haben typisch muscheligen Bruch; sie sind massig. Der Übergang von Gamser- zu Brisischichten ist kontinuierlich; Gesteine mit wenigen Schieferlagen sind als Übergangstypen zu bezeichnen.

Die isolierte Partie würde demnach den Brisischichten angehören, was nur möglich ist, wenn im Zusammenhang mit der Hauptverwerfung eine bedeutende Verstellung dieses Schichtpaketes stattgefunden hat. Die Gesteine der obersten, im Abbau begriffenen Sohle würden als Übergangsschichten zu betrachten sein, die schwarzen Schiefer und tiefer liegenden Schichten als Gamserschichten. Eine genauere Unterteilung ist für unsere Zwecke nicht brauchbar. Im Bereich der Splittkorngröße ist auch diese grobe Unterteilung nur schwierig zu befolgen. An Splittvarietäten sind zu erwarten:

- massige, dunkle, glaukonitreiche Sandsteine;
- helle, glaukonitarme, quarzitische Sandsteine;
- dunkle bis schwarze, matte, feinkörnige, kalkreiche schiefrige Sandsteine; Splittkörner, die einen großen Gehalt an Schieferlagen oder -schmitzen aufweisen;
- Körner mit Kluftkalzit belegt;
- verwitterte Gesteine (starke Limonitisierung, vor allem des Glaukonites).

b) Kleinbereich

DE QUERVAIN (1931) unterscheidet im Hinblick auf die technische Verwendung der Gesteine verschiedene «Strukturtypen». Unterscheidungsmerkmale sind der Quarzgehalt, der Bindemittelgehalt und der Anteil direkter Kornbindungen der Quarzkörner, wie sie durch sekundäres Quarzwachstum entstehen (Typen I, II, III). Einen eigenen Typus bilden die schiefrigen Sandsteine (VI).

Für die Splittgewinnung sind in unserem Falle vor allem drei Gesteinsvarietäten zu beachten. In größter Menge sind die Übergangsschichten vertreten, wo an typischen Handstücken etwa folgendes beobachtet werden kann:

Die Gesteine haben leicht fettglänzende, höckrige, unregelmäßige Bruchflächen von dunkelgrüner bis fast schwarzer Farbe, die Kanten sind hart und scharf. Wichtigste Komponente ist Quarz von etwa 0,1 mm Durchmesser, Glaukonit ist ziemlich häufig, das Bindemittel ist kalkhaltig, da HCl noch deutlich aufbraust; es dürften wenig organische Beimengungen vorhanden sein. Auf Schnittflächen sind wellenförmige bis flaserige bindemittelreichere Lagen und linsenförmige, quarzreichere Zonen zu unterscheiden, die eine mehr oder weniger schichtparallele Textur ergeben. Ausgeprägte Schieferhäute sind relativ selten. Dann treten Kalzitklüfte auf, oft mehrere Millimeter dick, häufig aber auch dünner als 1 mm. Auf Handstückoberflächen bilden sie ebene, kalzitbelegte Flächen. Die Begrenzungsflächen offener Klüfte sind limonitisiert und verschmutzt. Von derartigen Flächen aus dringt die Verwitterung nur einige Millimeter tief ins Gestein, was an der Braunfärbung des Glaukonites erkannt werden kann. Das Gestein kann als Glaukonitsandstein mit kalkreichem Bindemittel und Glaukonit als Porenzement bezeichnet werden, etwa dem Typ III von DE QUERVAIN (1931) entsprechend.

Im weiteren ist im Splitt ein Anteil von quarzreichen Brisischichten zu erwarten. Sie enthalten weniger Bindemittel, HCl braust nicht mehr auf. Die Handstücke können als feinkörnige, quarzreiche bis quarzitische Sandsteine beschrieben werden. Die Bruchflächen sind flach, muschelrig, fettig glänzend. Auf Schnittflächen sind aber immer noch mehr oder weniger bindemittelreiche Lagen erkennbar. Kalzitklüfte sind häufig, hingegen fehlen rostige Verwitterungsflächen. Das Gestein ist bei fehlendem Glaukonit hellgrau, sonst kann es aber auch dunkelgrün werden. Der hohe Quarzgehalt verursacht den fettigen Glanz und die enorme Kanten-

schärfe und -härte. Nach der Einteilung von DE QUERVAIN (1931) würde ein Übergang zwischen Typ I und II vorliegen.

Als letztes sind die kalkreichen, schwarzen, schiefrigen Sandsteine zu beschreiben. Es handelt sich um tief-schwarze, feinkörnige Gesteine, die mit HCl stark aufbrausen. Der Ton- oder Serizitgehalt ist groß, Quarz ist vorhanden. Die Korngrößen liegen weit unter 0,1 mm. Infolge der feinen Schieferung sind die Bruchflächen rau und die Kanten scharf, sie stumpfen aber leicht ab. Die Klüftung ist unwesentlich. Es handelt sich um einen sandig-kalkigen Mergelschiefer. Beim Anschlagen erweist sich das Gestein als zähe, weshalb man gefühlsmäßig eine hohe Festigkeit erwartet. Das Gestein hat sich in Kristallisierungsversuchen (DE QUERVAIN und JENNY, 1953, Bericht der Geotechn. Kommission) als völlig unbrauchbar erwiesen. Wo Klüfte vorhanden sind, zeigt sich ein rasches Fortschreiten der Verwitterung. Im Bereich der Splittkörnung ist es nicht immer leicht, den Schiefer von normalen Sandsteinen zu unterscheiden, vor allem wenn eine leichte Verschmutzung vorhanden ist.

Die Zusammensetzung von Splittstichproben ist S. 73 wiedergegeben. Der Glaukonitsandstein der Übergangsschichten bildet den Hauptanteil, die wenigen hellen Sandsteine können dazu geschlagen werden. Der Anteil der rasch zerfallenden schwarzen Schiefer sollte möglichst gering bleiben, worauf schon beim Abbau zu achten ist. Da sie von relativ großer Zähigkeit sind, kann nicht angenommen werden, daß sie während des Brechvorganges zu Feinmaterial zerrieben und bei der Siebung eliminiert werden können.

c) Mikrobereich

Die Übergangsschichten zeigen in vielen Fällen etwa folgendes Dünnschliffbild:

Der Mineralbestand umfaßt Quarz, Glaukonit, Kalzit, limonitisierten Pyrit, Bindemittel.

Quarz ist vorherrschend detritische Komponente, er bildet mehr oder weniger isometrische, mäßig gerundete Körner von etwa 0,1–0,3 mm Durchmesser. Sekundärer Quarz als Porenzement fehlt.

Der Glaukonit tritt in grünen Körnern auf, etwa in der Größenordnung des Quarzes, oft als Porenzement (Zwickelfüllungen). Er kann als sekundäre Bildung bezeichnet werden.

Kalzit ist nicht sehr häufig und tritt teils in einzelnen Körnern, teils als Porenzement auf, Quarzkörner umwachsend.

Das Bindemittel ist sehr feinkörnig, Kalzit darin manchmal gerade noch zu erkennen. Organische Beimengungen bewirken Trübung und Pigmentierung, der Limonitgehalt zudem noch eine Braunfärbung. Die Limonitisierung folgt vor allem Feinklüften oder geht von diesen aus. Das Bindemittel entspricht ungefähr der Tonsubstanz I nach DE QUERVAIN (1931). Nach den vorliegenden Röntgenaufnahmen ist aber vor allem Serizit am Aufbau des Bindemittels beteiligt.

Direkte Verwachsungen von Quarzkörnern fehlen fast durchwegs. Die Verwachsungen zwischen Glaukonit und Quarz, bzw. Kalzit und Quarz, sind aber sehr intensiv.

Eine Schichtung ist angedeutet, wird sich in den Gesteinseigenschaften aber kaum äußern. Schichtparallele Feinklüfte sind selten, fallen aber durch die Limonitisierung auf, da sie das Vordringen der Verwitterung erleichtern.

Das Gestein kann als leicht kalkiger Glaukonitsandstein bezeichnet werden, das Bindemittel ist pelitisch. (Schliffe B10, B5)

Die Übergangsschichten können bei gleichbleibendem Quarzgehalt mehr Kalzit enthalten, vor allem als Porenzement. Die Mengenverhältnisse der beiden Mineralien gewährleisten gute Eigenschaften. Im speziell untersuchten Schliff sind viele Feinklüfte vorhanden, die wellig, flaserig in Abständen von 3–5 mm stellenweise auch unter 0,5 mm, ungefähr schichtparallel durchziehen und den Eindruck einer Schieferung erwecken. Sie sind mit einer limonitisierten Substanz angefüllt. Die erhebliche Limonitisierung ist auf die relative Oberflächen-nähe zurückzuführen, aus der das Gestein stammt. Es muß ein erheblicher Einfluß der Verwitterung berücksichtigt werden.

Für die Brisischichten führen wir den folgenden Schliff an: Auffallend ist der hohe Quarzgehalt, der Quarz weist nun häufig direkte Verwachsungen auf. Um den primären detritischen Quarz hat sich sekundärer Quarz angelagert, der als Porenzement wirkt. Die Orientierung ist meistens gleich wie für den primären Quarz. Die alten Kornbegrenzungen können teilweise noch beobachtet werden. Feinkörniges Bindemittel, meist limonitisiert, ist stets vorhanden, in geringerer Menge als bei den Gamserschichten. Feine Risse, mit limonitisiertem Binde-

mittel gefüllt, sind selten. Der Glaukonit ist relativ selten und durchwegs limonitisiert. Die Textur ist massig, Haarrisse sind nie über längere Strecken ausgedehnt. Die Verwachsungsverhältnisse lassen eine hohe Festigkeit erwarten. Das Gestein kann als Sandstein mit pelitischem bis quarzitischem Bindemittel bezeichnet werden. Für einen quarzitischen Sandstein müßte der Quarzgehalt, vor allem der sekundäre, noch größer sein. (Schliffe B22, B28)

Aus den Schliffauszählungen ergibt sich wieder der Zusammenhang zwischen dem Bindemittelanteil und dem Anteil feiner Fraktionen und zwischen Quarzgehalt und Anteil der gröberen Fraktionen, eine zusätzliche Bestätigung der Auswertung mit Auszählmethoden.

Dünnschliffe der schwarzen Schiefer schlußendlich zeichnen sich durch den vorherrschenden Bindemittelgehalt aus. Das Bindemittel ist pelitisch, am Schlifftrand können mühsam Kalzit und Quarz erkannt werden, dazu faserige Mineralien, die auf Grund der Röntgenaufnahmen mit größter Wahrscheinlichkeit Serizit sind. Das Bindemittel ist durch Limonitierung bräunlich gefärbt und durch organische Beimengungen pigmentiert worden, stellenweise sind die Schliffe fast opak. Im Bindemittel schwimmen Körner von Quarz von etwa 0,03–0,01 mm Durchmesser, spärlich Glaukonit- und Kalzitkörner, ferner limonitisierte Pyritkörner. Direkte Kornverbindungen dieser Komponenten treten nicht auf. Die Schieferungstextur ist auch im Dünnschliff deutlich. Das Gestein kann als sandiger bis kalkiger Mergelschiefer bezeichnet werden. Seine Eigenschaften sind durchwegs ungünstig, der Gehalt im Splitt sollte möglichst minimal bleiben (Schliffe B15, B20).

3. Kieselkalk

a) Großbereich

Die Geologie des Steinbruches Sitenwald bei Weesen ist relativ einfach zu deuten. Der Bruch liegt im Kieselkalk des Nordschenkels der Amdenermulde in der Säntis- bzw. Churfirsten/Alvier-Decke. Das Gebiet wurde von ARN. HEIM (1916) bearbeitet, neuerdings spezieller, vor allem den Flysch betreffend, von HERB (1962), der die Richtigkeit der Beobachtungen von Arn. Heim, was die uns interessierenden Profile betrifft, bestätigen konnte. Über den Steinbruch selber existiert ein Gutachten von DE QUERVAIN (EMPA-Bericht No. 9922/2a, 1954).

Der Kieselkalk bildet, mit wenigen Echinodermenbrekzien oben, die Hauterivianstufe der helvetischen Unterkreide; das Hangende wird durch die glaukonitreichen Kalke der Altmannschichten gebildet, denen die Drusbergschichten und der untere Schrattenkalk folgen. Das Liegende besteht aus Valanginiakalken. Die Mächtigkeit des Kieselkalkes nimmt gegen S unter gleichzeitiger Vermergelung zu (CADISCH, 1953). In der Säntisdecke findet gegen S und E eine Verschiebung statt.

HERB (1962) gibt für die Churfirsten-Decke ein detailliertes Sammelprofil: Es folgen über dem oberen Valanginiakalk direkt unterer Kieselkalk, die Horizonte der Pygurus- und Rahbergschichten fehlen, Liderenschichten und oberer Kieselkalk mit den hangenden Altmannschichten. Der gesamte Kieselkalk ist gut 100 m mächtig, speziell am Häderenberg 70 m, am Mattstock 110 m und in der Churfirstendecke selber 140 m. Nach HERB handelt es sich beim Kieselkalk allgemein um einen Sandkalk, der außer detritischem Quarz in wechselnden Mengen Kieselsäurenester enthält, bei Anhäufung derselben noch einen geringen Anteil scharf umrissener Dolomitrhomboeder. Der Kieselkalk ist gut gebankt mit dezimeter- bis meterdicken Bänken, verschiedene Bänke führen Glaukonit, besonders aber die Lidernen- und Altmannschichten.

Es muß hier gleich betont werden, daß die Bezeichnung Sandkalk, die man auch in ARN. HEIM (1916) und im BAUSTEINBAND (1915) findet, falsch ist. Man soll den Kieselkalk Kieselkalk sein lassen.

Vom Steinbruch Starkenbach des nördlichen Häderenberges beschreibt HERB (1962) ein Profil, das von der Amdenermulde allerdings etwas abweicht, mit Varietäten von Sandkalke, glaukonitischen und leicht spätigen Sandkalke, von schiefrigen und sandigen Kalke, grobspätigem Kalk (Echinodermenbrekzie), stark glaukonitischem Sandkalk und stark glaukonitischen Altmannschichten. Auch da dürfte Kieselkalk vorliegen.

DE QUERVAIN (1954) unterscheidet drei Abschnitte; unten typischen Kieselkalk, relativ grobgebankt, in der Mitte ebenfalls typischen Kieselkalk, aber dünnbankig, feinkörnig bis leicht spätig und oben grobbankige, stark spätige Kieselkalke, die dann in eigentliche Echinodermenbrekzien übergehen; oben stellen sich außer-

dem, abgesehen von den Altmannschichten, glaukonitführende Lagen ein. Zu beachten sind die Schieferlagen und -bänke, die mit dem normalen Kieselkalk wechsellagern.

Handstücke wurden dem Blockmaterial entnommen, das damals offenbar aus dem oberen Teil des Kieselkalkes stammte.

Die Schichten fallen mit etwa 30° gegen SE bis ESE ein. Ein Hauptkluftsystem verläuft ungefähr senkrecht zur Bankungsklüftung. Die Klüfte sind meistens mit Kalzit verheilt und variieren von einigen Millimetern bis zu einigen Zentimetern in der Breite. Der Kalzit ist rein weiß und grobkörnig ausgebildet.

Die Verwitterungseinwirkungen sind gering, was natürlich auch mit der großen Abbauleistung zusammenhängt. Aus der Bruchanlage ist zu schließen, daß auch etwas Material aus der Überlagerung, Gehängeschutt und Moräne, ins Blockmaterial gelangt.

Im Splitt sind zu erwarten: massige, dichte Kieselkalke, schiefrige Kalke bis Kieselkalke, Kieselkalk mit Glaukonit, stark zerklüfteter Kieselkalk, die verschiedenen Kalke des Hangenden.

b) Kleinbereich

Typischer Kieselkalk ist auf Bruchflächen von grauer bis dunkelgrauer Farbe. Meistens können Kalzit-spaltflächen gerade noch erkannt werden. Das Gestein ist sehr feinspätig. Beim Anätzen mit HCl wird der Kalzit weggelöst und bleibt ein Kieselskelett zurück, das prozentual einen großen Anteil ausmacht. Der Kieselgehalt ermöglicht auch das Ritzen von Stahl. Der detritische Quarz ist makroskopisch nicht feststellbar. Wo Glaukonit vorhanden ist, kann er leicht erkannt werden. Die Bruchflächen der Handstücke sind gleichmäßig rau, die Bruchkanten hart und scharf.

Im Bereich der Oberflächenverwitterung ist eine leichte Braunfärbung typisch, sie wird durch das herausgewitterte Kieselskelett verursacht. Die Klüftung kann nun das Gestein wesentlich verändern. Die Klüfte sind meistens mit Kalzit verheilt, können bis mehrere Zentimeter breit werden und sich über längere Strecken hinziehen mit gegenseitigen Abständen im Zentimeter-Bereich. Die verschiedenen Kluftsysteme, meist quer zur Schichtung verlaufend, ergeben stellenweise ziemlich kleine Kluftkörper. In kluftfreien Zonen sind nun immer noch feine Haarrisse und Tonschieferhäute vorhanden, die vorwiegend schichtparallel angeordnet sind. Wenn Kalzitklüfte, Haarrisse und Tonschieferhäute sich anhäufen, wird die Qualität erheblich vermindert.

Mengenmäßig unwichtig sind spätige Varietäten des Kieselkalkes, die in Echinodermenbrekzien übergehen können. Ihre Verkieselung ist geringer.

Gesteine aus schiefrigen Bänken sind mattschwarz, sehr feinkörnig, fein geschiefert und wenig geklüftet. Mit HCl kann ein Kieselskelett sichtbar gemacht werden. Dazu dürfte ein bedeutender Ton- oder Serizitgehalt vorhanden sein. Die Schieferung ist vor allem eine Folge der sehr vielen parallel angeordneten Tonschieferhäute und -lagen. Die Bruchflächen sind anfänglich rau, stumpfen aber rasch ab. Die Rauigkeit wird durch die Textur verursacht. Das Gestein wird am besten als sehr feinkörniger, schiefriger Kieselkalk bezeichnet.

Aus der Auszählung der Stichproben (S. 73) geht hervor, daß rund ein Drittel des Splittes aus Gesteinen verminderter Qualität zusammengesetzt ist. Häufungen von Tonschieferhäuten und Haarrissen werden beim Brechvorgang aber zur Hauptsache ausgemerzt.

c) Mikrobereich

Im Dünnschliff des normalen Kieselkalkes ist Kalzit, Quarz, etwas Erz (limonitisierter Pyrit) und manchmal etwas Glaukonit sichtbar. Nach Röntgenaufnahmen ist die Anwesenheit von Serizit wahrscheinlich. Der Kalzit kommt einmal in grobkristalliner Form mit Körnern von etwa 0,3 mm Durchmesser vor, die über kleinere Bereiche eng miteinander verwachsen sind und wie Einsprenglinge in einer Grundmasse erscheinen. Es sind zur Hauptsache umkristallisierte Fossiltrümmer. Wenn derartige Kalzit überwiegt, liegt ein Spatkalk vor. In ähnlicher Korngröße sind detritische Quarzkörner vorhanden, ihr Anteil beträgt nur wenige Prozente. Limonit bzw. Pyrit und Glaukonit sind spärlich vertreten.

Die feinkörnige Grundmasse enthält Korngrößen im Schliffdickenbereich, Kalzit ist am Schlifftrand gerade noch erkennbar. Die Grundmasse besteht aber zu 40–50% aus Quarz, was nur beim Anätzen mit HCl am Handstück oder durch Auflösen von Gesteinspulver erkannt werden kann. Stellenweise wird das Korn der Grundmasse gröber. Dann kann sofort auch Quarz bestimmt werden, der mit dem Kalzit zusammen ein dichtes Implikationsgefüge bildet. In ARN. HEIM (1916) und teilweise auch in HERB (1962) wird dies als ver-

einzel auftretende Kieselkonkretionen bezeichnet und der Kieselkalk nach dem detritischen Quarz Sandkalk genannt, weil die Grundmasse nur stellenweise verkieselt sein soll. Das Kieselskelett konnte bei allen von uns untersuchten Handstücken sichtbar gemacht werden (S. 83). Die Pulveraufnahmen ergaben außerdem sehr starke Quarzlinien. Der Name Kieselkalk besteht zu Recht. Es käme höchstens noch die Bezeichnung sandiger Kieselkalk in Frage. Die Bezeichnung Sandkalk ist falsch. Die gleiche Feststellung wurde schon in DE QUERVAIN und GSCHWIND (1949) gemacht, aus unerfindlichen Gründen aber nicht beachtet.

In der Grundmasse sind Haarrisse zu erkennen, von denen eine Braunfärbung der Grundmasse ausgeht. Dies ist ein Hinweis, daß die Verwitterung hier leichteren Zugang hat. (Schliffe C19, C16)

Die Auszählungen dieser Schliffe ergeben verschiedene Resultate, weil stellenweise der Quarz der Grundmasse erkennbar ist, was sich auch in der Korngrößenbestimmung äußert. Die Kornverteilungskurven sind weniger eindeutig zu bestimmen als etwa bei Sandsteinen, lassen aber doch eine Unterscheidung von geschiefertem Kieselkalk zu.

Im Dünnschliff der geschieferten Kieselkalke finden wir vorherrschend feinkörnige Grundmasse, die immer noch einen erheblichen Kieselgehalt aufweist. Dazu kommt ein recht hoher Serizitgehalt. Grobkörniger Kalzit tritt zurück, detritischer Quarz ist vorhanden, der Glaukonit ist stellenweise häufig. Texturelles Merkmal sind die mehr oder weniger schichtparallelen Haarrisse und Tonschieferhäute in Abständen von oft weniger als 1 mm. Sie sind alle mit limonitisierter Substanz erfüllt und bewirken eine Braunfärbung der umliegenden Grundmasse. (Schliff C3)

4. Kieselkalk des Lias der Préalpen

a) Großbereich

Der Spatkalk der Carrières d'Arvel S.A. wird seit langem als Baustein verwendet, nach DE QUERVAIN und GSCHWIND (1949) auch als Schotter für Bahn und Straße. Er besitzt eine für Kalksteine hohe Festigkeit, die aber für hochwertigen Splitt nicht genügt. Es ist deshalb südlich der bekannten Steinbrüche ein neuer Bruch eröffnet worden, wo ein feinkörniger Kieselkalk abgebaut wird.

Die Steinbrüche befinden sich alle im mächtig entwickelten Lias der Klippendecke. Die detaillierteste Beschreibung der Geologie stammt von JEANNET (1912/13). Nach BADOUX (1965) wird der Lias unterteilt in:

- mittleren spätigen Lias, graue bis braune mittelkörnige Spatkalke, Silex führend;
- oberen spätigen Lias, unten mit einigen Metern Kalk und dunkeln Schiefern beginnend;
- 10 m grobspätigen Kalk mit dolomitischer Brekzie;
- 70 m Echinodermenkalke, grauweiß bis rosa in dicken Bänken; diese Schicht wird vor allem als Baustein ausgebeutet. Das Profil stimmt mit dem in DE QUERVAIN und GSCHWIND (1949) gegebenen überein;
- es folgt der Lias supérieur à Cancellophycus. Es handelt sich um eine Wechsellagerung von mehr oder weniger kieseligen, grau-beigen bis sehr dunkeln dichten Kalken in Bänken von 20–40 cm Dicke mit mergelreicheren Schichten;
- Übergang in hauptsächlich mergelige Schichten des Aalénian.

Links der Rhone scheidet Badoix speziell einen kieseligen oberen Lias mit häufigen Silexeinlagerungen aus. Er besteht aus einer Wechsellagerung dunkler, kieseliger Kalke mit braunen Schiefern. Die Grundmasse des Kalkes ist dort leicht spätig ausgebildet und enthält auch Dolomitkörner.

Im jetzigen Splittsteinbruch ist gut gebankter, kieseliger Kalk aufgeschlossen (Bankungsdicke bis 50 cm). Die Schichtflächen sind gewellt, höckerig und meistens mit einer schiefrigen Lage belegt. Dazu kommen auch Lagen von Mergelschiefern von rund 10 cm Mächtigkeit, die über die ganze Abbauhöhe mit den schwarzen KieselkalKBänken wechsellagern. Es können häufig Hornsteineinlagerungen erkannt werden. Eine grobe Klüftung ist vorhanden, die Klüfte sind meistens mit Kalzit verheilt. Die Kluftkörper sind relativ groß, der Sprengschutt ist ziemlich grobblockig. Der Profilanteil des schwarzen Kieselkalkes beträgt etwa 80–90%

Die Beschreibung stimmt nicht ganz mit derjenigen des Lias supérieur à Cancellophycus nach Badoix überein. Sie entspricht eher der Beschreibung des kieseligen oberen Lias mit Silexeinlagerungen auf der andern Talseite. Nach zwei Gutachten von DE QUERVAIN (EMPA Bericht No. 9922/7a, 1955; 1961) besteht das Lie-

gende des mittleren spätigen Lias aus kieseligen Kalken von feinem Korn, stellenweise etwas spätig und mit häufigen Tonschieferhäuten. Da im Schichtpaket des Mont d'Arvel, das mit 45° gegen SSE einfällt, bedeutende Störungen nicht beobachtet werden können und auch von BADOUX (1965) nicht angegeben wurden, kommt für den Splittsteinbruch dieser untere Mittellias nicht in Frage. Es wäre dazu eine bedeutende vertikale Versetzung notwendig.

b) Kleinbereich

Das typische Splittgestein besteht aus feinkörnigen, dichten, grauen bis schwarzen kieseligen Kalken. Beim Anätzen mit HCl wird ein feines Kieselskelett sichtbar (S. 93); der Kieselgehalt ist ziemlich groß. Zonenweise erkennt man Kalzitspaltflächen, das Gestein kann dann als feinspätiger Kalk bezeichnet werden, da der Kieselgehalt dabei abnimmt. Ton- und glimmerartige Mineralien sind vorhanden.

Das Gestein erscheint auf den ersten Blick massig, bei näherem Zusehen läßt sich eine feine Schieferung erkennen, die teils durch Tonschieferschmitzen, teils durch Haarrisse hervorgerufen wird. Beim Brechen entstehen sehr scharfe Kanten, mit denen Stahl geritzt werden kann. Die Bruchflächen sind, als Folge der Schieferungstextur, von großer Rauigkeit, die sich als Rillung oder Striemung äußert.

Mit Kluftkalzit belegte Handstück- oder Splittkornoberflächen sind viel weniger häufig als im helvetischen Kieselkalk. Die Handstückflächen fallen ziemlich oft mit Tonschieferhäuten zusammen und erhalten dann ein glänzendes, kohliges Aussehen. Tiefschwarze, sehr harte und glänzende Silex- oder Hornsteinknollen und -lagen sind recht häufig, im Splitt aber ohne Bedeutung. Die normalen Kieselkalke können in schiefrige Varietäten und eigentliche Mergelschiefer übergehen.

Diese sind im Mineralbestand wenig von den normalen Kieselkalken verschieden. Sie enthalten offenbar weniger Kieselmasse, da Stahl mit Kanten nicht mehr geritzt werden kann. Der höhere Gehalt an glimmerartigen Mineralien und an organischer Substanz gibt ihnen ein schwarzes, mattes Aussehen. Die Schieferungstextur ist ausgeprägter, Haarrisse und Tonschieferhäute, oft mit Limonitisierung einhergehend, sind viel häufiger. Verheilte Klüfte treten hingegen spärlich auf. Die Gesteine sind etwas feinkörniger als die Kieselkalke und sehr kompakt.

Der Vollständigkeit halber seien die Gesteine aus dem Liegenden kurz erwähnt. Es sind dies die Spatkalke aus dem mittleren Lias. Sie sind deutlich spätig, die Korngrößen liegen um 0,5–1 mm. Neben dem vorherrschenden Kalzit ist noch etwas Kieselsubstanz vorhanden. Die Spatkalke sind dicht und fest, die Bruchflächen rau. Klüfte und Tonschieferhäute sind selten. Es kommen Hornsteinlagerungen vor. Die tiefer liegenden Spatkalke sind noch grobkörniger, im Splittmaterial aber nicht mehr anzutreffen.

In den Splittstichproben (S. 73) nehmen die normalen Kieselkalke einen großen Prozentsatz ein. Daneben sind noch feinspätige, schwach kieselige Kalke vertreten, dazu verschieferte Kieselkalke und Mergelschiefer. Zerklüftete Körner und Hornsteine sind selten.

c) Mikrobereich

Der normale Kieselkalk zeigt im Dünnschliff mesokristallinen Kalzit, vermutlich umkristallisierte Echinodermenreste, der in Lagen angereichert ist, daneben auch in Einzelkörnern auftritt. Ferner sind noch Körner von detritischem Quarz und von Erz zu erkennen. Den Hauptanteil bildet das mikrokristalline Gefüge von Kalzit und Quarz, der stellenweise am Schlifftrand gerade noch zu erkennen ist. Der Quarzgehalt wird vor allem beim Anätzen von Handstücken gut sichtbar und kommt auch in Pulveraufnahmen sehr klar heraus, wo mit großer Wahrscheinlichkeit auch Serizit nachgewiesen werden kann.

Die Lagen des mesokristallinen Kalzites ergeben eine Schichtungstextur, dazu kommen schichtparallele Haarrisse und Tonschieferhäute. Die Haarrisse sind meistens mit opaker, limonitischer Substanz erfüllt. Das Gestein kann als mikrokristalliner, leicht verschieferter Kieselkalk bezeichnet werden.

Bei weiteren Schliffen wird die Schieferungstextur durch vermehrte Haarrisse noch deutlicher. Der mesokristalline Kalzit kann der Grundmasse gegenüber zunehmen. Oft treten Lagen mit sehr vielen Seeigelstacheln auf, die stellenweise eine Verkieselung erkennen lassen. Wo der mesokristalline Kalk angereichert ist, zeigt er unmittelbare Kornbindungen. Als Besonderheit sind die Hornsteinkonkretionen zu nennen, die im Dünnschliff feinkörnigen, klaren Quarz zeigen. Die Konkretionen sind frei von Rissen oder Tonhäuten. Mengemäßig spielen sie keine Rolle.

Zwei Schliffe aus ähnlichen Handstücken zeigen die im Kleinen recht wechselhafte Ausbildung dieser Kieselkalke (D1, D15).

Dünnschliffbilder der Mergelschiefer sind sehr ähnlich. Offenbar sind mehr glimmerartige Mineralien vorhanden, die Grundmasse ist auch stärker limonitisiert, sie kann stellenweise fast opak werden. Seeigeltacheln sind neben weiteren Echinodermenresten häufig, oft in Lagen angereichert. Der auffallendste Unterschied zu den Kieselkalken besteht in der größeren Zahl von Haarklüften. Sie fallen durch ihre limonitischen Füllungen auf. Zwischen Kieselkalken und Schiefern scheinen Übergänge möglich zu sein. Dünnschliffe erlauben keine eindeutige Unterscheidung. (Auszahlungen an Schliffen D9, D11.)

Die normalen Spatkalke schließlich bestehen aus einem makrokristallinen Mosaikgefüge von Kalzit mit Korngrößen um 0,3 mm herum. Es ist ein geringer Anteil an feinkörniger Grundmasse vorhanden, dazu etwas Limonit, Glaukonit und wenige Quarzkörner. Der Kalzit zeigt sekundäre Anwachsungen und deshalb intensive Kornverwachsungen. Haarrisse sind selten, die Textur ist massig. (Schliff D3.)

5. Splitt aus Flußgewinnung Castione

a) Großbereich

Es liegt eine grundsätzlich andere Problemstellung vor. Die Lagerungsverhältnisse an Ort und Stelle spielen keine Rolle. Die ungefähre Zusammensetzung und Blockgröße des Flußmaterials ergibt sich aus der Geologie und den Erosionsverhältnissen im Einzugsgebiet des Flusses. Die Abschätzung der zu erwartenden Gesteine aus der regionalen Geologie kann aber nur sehr allgemein vorgenommen werden. Angaben können den Arbeiten von NIGGLI, PREISWERK, GRUETTER, BOSSARD und KUENDIG (1936) samt Karte der Tessiner Alpen entnommen werden. Wertvolle Angaben liefern DE QUERVAIN und GSCHWIND (1949) und der BAUSTEINBAND (1915).

Die Gesteine stammen zur Hauptsache aus der Leventina-, zu einem kleineren Teil aus der Lucomagno-decke. Es kommen alle möglichen Gneise, Granitgneise, Schiefer, Amphibolite usw. in Frage.

Im Vergleich zu Steinbruchmaterial sind einige Besonderheiten zu erwähnen. So wird durch die Transportverhältnisse im Geschiebe eine Selektion des Materials stattfinden. Sehr schlechte Gesteinsqualitäten werden eliminiert. Aus Bergsturzmaterial, Gehängeschutt, Murgängen usw. wird dem Flußsystem Material zugeführt, das vorwiegend aus Grundkörpern besteht. Das Flußmaterial wird so schlußendlich kluftfreie Blöcke oder Gerölle enthalten. Verwitterungsflächen werden während des Transportes durch abschleifende Beanspruchungen auf natürliche Weise ausgeschieden.

Die Splittkörner sind kleiner als der Homogenbereich bezogen auf Struktur und Textur. Viele Struktur- und Texturmerkmale können in Splittkörnern nicht mehr erkannt werden. Für die Gesteinsbeschreibung wurde zusätzlich noch eine Schotterprobe entnommen. Die Bestimmung der Herkunft der verschiedenen Gesteine ist sehr schwierig und im Splittbereich fast unmöglich. Die Abgrenzung verschiedener Varietäten erfolgt deshalb ohne Rücksicht auf die Geologie des Einzugsgebietes des Ticino.

b) Kleinbereich

Unter den Schotterstücken sind mittel- bis grobkörnige Gneise mit dem normalen Mineralbestand von Quarz, Feldspat, Biotit, Muskowit, auch grünem Glimmer, am häufigsten vertreten. Ihre Struktur ist homöoblastisch bis porphyroblastisch, der Glimmer ist recht grobkörnig (bis mehrere Millimeter Durchmesser), Quarz und Feldspat sind eher mittelkörnig. Charakteristisch sind richtige Feldspat-Augen und spindelförmige Feldspataggregate, die Ausdehnungen bis Zentimeterbereich erreichen können. Die Textur kann als schiefrig oder lentikular-flaserig bezeichnet werden. Wichtigstes Texturmerkmal sind die Glimmer und ihre Anordnung. Varietäten dieser Gneise sind oft nur Biotitgneise oder Muskowitgneise, letztere sind dann viel heller und können auch Chlorit oder Phengit enthalten. Die Textur kann noch mehr gestreckt-flaserig erscheinen. Dann kommen auch Übergänge zu feinkörnigen Gneisen vor. Die Unterscheidung der Gesteine ist am einfachsten durch Art und Menge der Glimmer zu treffen. Alle diese Gneise haben sehr rauhe, von der Korngröße bestimmte Bruchflächen, die allerdings auch mit Glimmerlagen zusammenfallen können. Die Bruchkanten sind

wohl scharf, es können aber leicht Kornteile abgebrochen werden. Auf Kornflächen sind einzelne Mineralien, besonders Glimmer, leicht herauszubereiten. Die Schotter- und Splittstücke fühlen sich sandig an.

Eine weitere Gruppe besteht aus feinkörnigen Gneisen mit Mineralkorngrößen von Millimeterbruchteilen. Sie sind auch anhand der Glimmer feiner unterteilbar. Diese Gneise erscheinen homogener, in kleinen Bereichen fast massig. Die Struktur kann als homöoblastisch, die Textur als schiefrig-lentikular bezeichnet werden. Neben Biotitgneisen finden sich in dieser Gruppe auch Zweiglimmer- und Muskowitgneise, dann sehr quarzreiche, helle Gesteine, die fast in Quarzite übergehen und auch noch feinkörnige, deshalb etwas massigere Kalkglimmerschiefer, die aber selten sind. Das Bruchverhalten ist ähnlich wie bei grobkörnigen Gneisen. Allgemein können die Mineralien weniger leicht aus dem Verband heraus gelöst werden und sind die Glimmerlagen weniger ausgeprägt.

In einer dritten Gruppe wurden sehr glimmerreiche Gneise und typische Glimmerschiefer zusammengefaßt. Die Korngröße der Mineralien variiert von fein- bis mittelkörnig, der Glimmer ist häufig grobblättrig und vorzugsweise in Lagen konzentriert. Im Splitt hat man viele Körner mit Glimmerlagen als Oberflächen zu erwarten. Die Splittkörner können oft sehr leicht zerbrochen werden. Zwischen den drei beschriebenen Gruppen bestehen alle möglichen Übergänge.

Weiter wurden noch Amphibolite ausgeschieden, die nur untergeordnet vorkommen. Es sind in der Regel feinkörnige Gesteine von lentikular-flaseriger Textur. Die Hornblenden sind nie streng parallel eingeregelt, das Gestein macht unter anderem auch aus diesem Grund einen zähen Eindruck.

Ebenso waren Gangquarze auszuscheiden, bei denen festzuhalten ist, daß es sich um spröde Gesteine handelt.

(Auszählung der Stichproben siehe Seite 74.) Die unterschiedlichen Resultate der Stichproben sind mehr in der Unsicherheit der Abgrenzung der Gesteinsgruppen als in der Probenahme begründet. Diese Unsicherheit tritt eben auf, weil, wie erwähnt, die Homogenbereiche für Struktur und Textur über der Größenordnung der Splittkörner liegen. Der gleiche Gneis kann Splittkörner mit viel Glimmer und solche mit fehlendem Glimmer liefern. In der Auszählung können Augengneise und helle mittelkörnige Gneise z. B. zusammengefaßt werden.

c) Mikrobereich

Dünnschliffe der grobkörnigen Gneise zeigen im allgemeinen, der Menge ihres Auftretens nach, Plagioklas (Albit-Oligoklas), Kalifeldspat, Quarz, Biotit, Muskowit und Akzessorien. Die Feldspäte sind ziemlich frisch, nur leicht bestäubt. Es liegt ein Gefüge von Feldspatgranoblasten vor, größere Quarzindividuen sind selten. Der Quarz tritt meistens in völlig xenomorpher Ausbildung auf, oft feinkörnig in Mörtelkränzen. Im Feldspat ist Myrmekitbildung verbreitet. Die Struktur kann als granoblastisch bezeichnet werden, stellenweise auch poikiloblastisch. Die Glimmer sind meist in Lagen angereichert. Die Kornbindung ist direkt und intensiv, doch kann diese Erscheinung noch weniger als bei gewissen Sedimenten als maßgebend für die Festigkeit betrachtet werden. Für das Festigkeitsverhalten ist die Spaltfähigkeit der einzelnen Mineralien viel wichtiger. Im Vergleich zu den Sedimenten fehlt bei den Gneisen auch eine Grundmasse oder ein Bindemittel und zwar auch bei porphyroblastischen Typen. Die Gneistextur wird vor allem durch orientierte Glimmer hervorgehoben, denen oft Aggregate von Sandquarz folgen. Diese Lagen sind Schwächezonen, sie entsprechen den Tonschieferhäuten in Sedimenten.

In weiteren Schliffen ist der Glimmer in Form von chloritisiertem Biotit vorhanden und ist die Feldspatzersetzung weiter fortgeschritten. Die Schieferung kann deutlicher ausgebildet sein. Dann sind Übergänge in lepidoblastische Struktur festzustellen. Wenn der Glimmer zurücktritt, erscheinen gewisse Gneise im Dünnschliff fast massig. Kataklyse ist manchmal verbreitet. Die Struktur kann ausgesprochen granoblastisch werden, was sich dann im völligen Fehlen von Mörtelkränzen bzw. Sandquarz äußert (Schliffe E1, E10). Zur Auszählung muß bemerkt werden, daß bei schnellem Arbeiten in der Feldspatbestimmung gerne Fehler unterlaufen, was für die Qualitätsbeurteilung aber keine nachteiligen Folgen hat. Die Korngrößenverteilungen sind völlig verschieden von jenen in den Sedimenten.

Die feinkörnigen Gneise unterscheiden sich von den grobkörnigen, außer der Korngröße natürlich, nur wenig. Es sind wiederum Zweiglimmer-, Biotit- oder Muskowitgneise, von granoblastischer bis lepidoblastischer, bei großem Glimmergehalt völlig lepidoblastischer Struktur, alle mehr oder weniger geschiefert. Die Feldspäte sind im allgemeinen frisch, Mörtelkränze kommen vor, können aber auch fehlen.

Auch die feinkörnigen Gneise sind, verglichen mit Sedimenten, noch grobkörnige Gesteine (E12, E13, E15).

Die Schiefer und allenfalls die schiefrigen Gneise zeichnen sich durch ihre Textur aus. Im Mineralbestand tritt mehr Glimmer auf, der Feldspat nimmt ab, wenn er auch selten ganz fehlt. Es sind Glimmerlagen vorhanden, der Quarz tritt oft in schnurartiger Anordnung auf. Zersetzungsprodukte sind häufiger als bei Gneisen. An zusätzlichen Mineralien kann etwa noch Granat auftreten. Die Struktur ist vorwiegend lepidoblastisch ausgebildet. Die Schieferungstextur ist aber die dominierende Eigenschaft, sie ist auch in kleinen Bereichen noch deutlich.

Ein Schliff eines Amphibolites zeigt neben 70–80% Hornblende, 15–20% Plagioklas und etwa 10% Quarz, ferner etwas Erz. Die Hornblenden sind wohl eingeregelt, aber nicht genau in einer Ebene, was offenbar eine Ursache für die große Zähigkeit der Amphibolite ist. Da sie im Splitt selten sind, kann auf ihre nähere Beschreibung verzichtet werden.

Zusammenfassend ist zu bemerken, daß bei all diesen Gesteinen mit sehr ähnlichen Mineralbeständen zu rechnen ist. Für die Qualitätsbeurteilung ist der Glimmer wesentlich. In zweiter Linie ist der Zersetzungsgrad der Feldspäte zu beachten, der hier aber nirgends erheblich ist.

6. Flyschsandstein

a) Großbereich

Die Steinbrüche von Attinghausen liegen im Altdorfersandstein des nordhelvetischen Flysch (HANTKE, 1961), der hier eine Mächtigkeit von 1000–2000 m hat. Liegendes (Dachschiefer, Taveyannazsandsteine) und Hangendes (wildflyschartige Gesteine) treten im Bereich der Steinbrüche nicht auf. STAUB (1911) beschreibt den Altdorfersandstein als kompakten, klingend harten, zähen, im Bruch blaugrauen, bräunlich bis dunkelfleckig anwitternden, fein- bis grobkörnigen Quarzsandstein mit frischen Feldspatkörnern und milchigem Quarz. Es treten dachschieferartige Einlagerungen auf, vor allem im unteren Teil. Nach OBERHOLZER (1933) handelt es sich beim Altdorfersandstein im Glarnerland um einen zähen, fein- bis grobkörnigen, düster braunanwitternden, im Bruch blaugrauen bis grüngrauen Sandstein, reich an Quarz- und Feldspatkörnern, stets mit Glimmer und kalkhaltig. Häufig sind kleine Splitter oder größere wellige Schmitzen von schwarzen Tonschiefern. Weitere Gesteinstrümmer treten als Komponenten des Sandsteines auf. Zwischen die Sandsteinbänke sind stets, in unregelmäßiger Weise, Lagen von dunkelgrauem Tonschiefer eingeschaltet. Die Ausbildung im Glarnerland ist von derjenigen bei Altdorf wenig verschieden.

Im südlichen Steinbruch von Attinghausen steht typischer Altdorfersandstein an. Er bildet eine Wechselagerung von harten bis 2 m mächtigen Sandsteinbänken mit schwarzen Tonschiefern, die oft nur als dünne Beläge die Schichtflächen der Sandsteinbänke bedecken, manchmal bis einige Dezimeter mächtig werden können. Innerhalb der Sandsteinbänke tritt graded bedding auf. Die ganze Abfolge bildet ein Paket übereinanderliegender, teilweise zerbrochener Falten. Die Sandsteine nehmen etwa 80–90% des Profils ein. Es sind, wegen der intensiven Faltung, viele mit Kalzit verheilte Klüfte vorhanden. Offene Klüfte sind weniger häufig.

Die Eindringtiefe der Verwitterung ist gering. Sie äußert sich in einer leichten Braunfärbung des Gesteins, wobei die Festigkeit nicht vermindert wird.

b) Kleinbereich

Der Steinbruch Attinghausen liefert Gesteine, die nach DE QUERVAIN und GSCHWIND (1949) als Sandsteine mit kalkigem Bindemittel oder kalkige Sandsteine zu bezeichnen sind. Sie werden dort als Gesteine von hell- bis dunkelgrauer Farbe und stark wechselnder Korngröße beschrieben. Neben Quarz, Feldspat und Glimmer ist auch Hornstein vorhanden. Das kalkige Bindemittel ist gut kristallisiert, teilweise grobkristallin; der Gehalt kann 10–40% betragen. Der Quarzgehalt ist variabel.

Unter den Splittkörnern sind Sandsteine verschiedener Korngröße zu unterscheiden, dazu weitere mit relativ hohem Glimmergehalt. Die schwarzen Tonschiefer sind leicht als Gruppe für sich abzutrennen.

In Handstücken der normalen Sandsteinausbildung sind deutlich Quarz, Feldspat, Glimmer und Gesteins-trümmer in kalkigem Bindemittel zu erkennen. Das Gestein ist feinkörnig, das Korn von Auge aber noch sichtbar mit einer Korngröße vorzugsweise um 0,5 mm herum. Die Quarzkörner sind nicht direkt miteinander verwachsen. Im Handstück ist ein graded bedding nicht zu erkennen. Der Glimmer hat eine bevorzugte Orientierung, ist aber zu wenig häufig, um den Eindruck einer Schieferung zu erwecken. Es sind verheilte Kalzitklüfte vorhanden, spärlich auch Haarrisse. Für beide Erscheinungen liegen die gegenseitigen Abstände über dem Splittkornbereich. Die Bruchflächen sind von hellgrauer Farbe, sie sind flach, trotzdem aber rau. Die Rauigkeit wird durch die Korngröße bestimmt. Verwitterungsflächen sind hellbraun, die Verfärbung dringt etwa 1 cm weit ins Gestein ohne die Festigkeitsverhältnisse zu beeinflussen. Im Bindemittel dürfte ein geringer Gehalt an glimmerartigen Tonmineralien oder Serizit vorhanden sein.

Eine weitere feinkörnige Varietät zeichnet sich durch eine schichtparallele Schieferung mit deutlich orientierten Glimmern aus. Dazu kommen viele Haarrisse und Tonschieferhäute vor. Die Bruchflächen sind dunkelgrau, offenbar ist der Gehalt an Ton- oder Serizitmineralien größer. Die feine Schieferung kann durch Einschaltungen von richtigen dünnen Tonschieferlagen stärker betont werden. Auf Handstückoberflächen erscheinen diese Lagen schwarz. Sie sind fast vollkommen glatt. Das Gestein ist ein schiefriger Kalksandstein mit Tonschieferhäuten.

Verschiedene Handstücke zeigen das graded bedding sehr deutlich. Die Größe der Komponenten (Quarz, Feldspat, Kalksteine, Quarzite, kristalline Gesteine) nimmt bis 5 mm zu. Die Matrix der grobkörnigen Zonen sieht, für sich allein betrachtet, wie feinkörniger Sandstein aus. Im Splittkornbereich kann das bedding in der Regel nicht beobachtet werden. Typisch sind Einlagerungen von Tonschieferschmitzen. Klüftung, Bruchflächenbeschaffenheit usw. sind wie bei feinkörnigen Typen ausgebildet. Die Eigenschaften hängen somit nur von den verschiedenen Korngrößen ab. Mineralbestand und Bindungsverhältnisse bleiben sich gleich.

Zur besseren Kennzeichnung des Kalkgehaltes wurde eine Schnittfläche mit Alizarinrot (MUELLER, 1964) angefärbt. Der Kalkgehalt konnte so auf etwa 20% geschätzt werden. Für die meisten Kalksandsteine dürfte dies ein guter Näherungswert sein.

Reine schwarze Tonschiefer schließlich kommen selten in größeren Handstücken vor. Meistens finden sie sich als Lagen von ein bis mehreren Zentimeter Mächtigkeit zwischen den Sandsteinbänken. Es sind schwarze, graphitisch glänzende, sehr feinkörnige Tonschiefer, die aus mehr oder weniger parallelen, gewellten Lagen aufgebaut sind und sich absolut glatt anfühlen. Neben einem hohen Ton- oder Serizitgehalt wird auch organische Substanz vorhanden sein.

Der Anteil an Splittkörnern mit Kalzitklüften ist ziemlich groß. Es handelt sich aber immer um die normalen Sandsteine. Die glimmerreichen Splittkörner haben parallel Kornbegrenzungsflächen.

c) Mikrobereich

Im feinkörnigen Sandstein sind als häufigste Komponenten schlecht gerundete Quarzkörner von max. 0,5 mm Durchmesser, meist um 0,2 mm, teilweise zersetzte Feldspäte, Muskowit, wenig Erz und akzessorische Mineralien wie Turmalin oder Zirkon vertreten. Ferner treten Trümmer von Kalksteinen und von quarzreichen Gesteinen auf. Das Bindemittel besteht zur Hauptsache aus grobkristallinem Kalzit, der um Komponenten herumwachsend oder in Zwickeln als Porenzement auftritt. Auch ein feinkörniges Bindemittel ist vorhanden, das hauptsächlich aus Kalzit besteht, daneben Ton oder Serizit und limonitisierte Substanzen enthält. Direkte Verwachsungen von Quarzkörnern kommen nur sehr selten vor. Da die Verwachsungen mit dem Kalzit intensiv sind, ist trotzdem ein sehr kompaktes Gefüge ausgebildet. Die Textur ist massig, eine Glimmerregelung ganz schwach angedeutet. Haarrisse fehlen im Schlißbereich. Die Sortierung ist schlecht, die Korngrößen schwanken über einen recht großen Bereich. Das Gestein kann als kalkiger Sandstein bezeichnet werden, für eine Arkose ist zu wenig Feldspat vorhanden.

Ein zweiter Schliß dieser Varietät weist einen höheren Quarzgehalt auf, dafür tritt das feinkörnige Bindemittel zurück. Der etwas häufigere Glimmer macht die Schieferungs- bzw. Schichtungstextur deutlicher. (Auszahlungen F1, F10 siehe Seite 79 und 80.)

Ein etwas anderes Bild ergeben die dunkelgrauen feinkörnigen Sandsteine, die im Handstück oft deutlich geschiefert sind und glimmerreiche Lagen enthalten. Der Mineralbestand ist ähnlich, der Gehalt an feinkörnigem Bindemittel aber größer. Die Komponenten schwimmen richtig darin. Verwachsungen zwischen Kom-

ponenten oder von Komponenten mit grobkristallinem Kalzit des Bindemittels kommen nur noch untergeordnet vor. Häufiger treten leicht gewellte, ungefähr parallele Tonschieferhäute auf. Der Glimmer ist besser eingeregelt, sein Anteil aber nur wenig größer (Schliff E3).

Die grob- bis mittelkörnigen Sandsteine zeigen wiederum denselben Mineralbestand, wenn auch in mengenmäßig abweichenden Verteilungen. So kommen unter den Komponenten mehr Gesteinsfragmente vor. Das feinkörnige Bindemittel tritt zurück. Man kann drei Gruppen verschiedener Korngrößen unterscheiden. Es treten große Komponenten im Bereich 1–5 mm auf, Trümmer von Kalken, Quarziten, Schiefern machen dabei den Hauptanteil aus. Eine Fraktion im Bereich 0,1–0,3 mm erscheint als Matrix und besteht hauptsächlich aus Quarzkörnern neben Feldspat usw. Für sich betrachtet besteht diese Matrix aus den Komponenten der feinkörnigen Sandsteine, die Bezeichnung gilt nur für den optischen Eindruck, da es sich keineswegs um eine Grundmasse handelt. Die dritte Fraktion besteht dann aus gewöhnlichem Bindemittel, wie dies für die andern Sandsteine beschrieben wurde, tritt mengenmäßig aber zurück.

Stellenweise können direkte Verwachsungen von Quarzkörnern beobachtet werden. An ausgewählten Schliffen ist das graded bedding sichtbar, sonst sind die Gesteine massig. Haarklüfte treten nur vereinzelt auf. (Auszahlungen F9, F5 siehe Seite 79/80.)

Ein Dünnschliff mit großem Anteil an schwarzem Tonschiefer läßt diesen als sehr feinkörniges Gestein erkennen. Scharungen von limonitisierten Tonschieferhäuten und Haarrissen ergeben eine deutliche Schieferung. In der feinkörnigen Grundmasse, die meistens aus Kalzit besteht, schwimmen vereinzelte Quarz- und Limonitkörner. Die Schieferung wird ferner noch durch den eingeregelten Glimmer betont. Die Korngröße der Grundmasse ist immer kleiner als 0,01 mm. Der geringe Anteil der Tonschiefer im Splitt erübrigt eine weitere Beschreibung.

7. Amphibolit des Silvrettakristallins

a) Großbereich

Die zum Verständnis der regionalen Geologie nötigen Informationen können wir der Arbeit von WENK (1934) über die Nunagruppe und den Erläuterungen zum Atlasblatt Zernez von BOESCH, CADISCH und WENK (1953) entnehmen. Der kleine, im Amphibolit angelegte Steinbruch liegt am Beginn der Ofenpaßstraße oberhalb Zernez. Das Silvrettakristallin bildet hier einen Komplex von Amphiboliten, Ortho- und Mischgneisen, der steil mit etwa 70–80° gegen NW einfällt. Der uns interessierende Amphibolit bildet mit Paragneisen zusammen die ältesten Serien des Silvrettakristallins. Die angrenzenden Mischgneise sind unter der Einwirkung von später intrudiertem Orthomaterial entstanden. Die jüngsten altkristallinen Bildungen, Diabasgänge, spielen im Bereich des Steinbruchs keine Rolle.

Im Steinbruch ist nun der Übergang von Mischgneis zu Amphibolit freigelegt. Von Südosten her, der Paßstraße entlang, kommt man von den hellen, mittelkörnigen Mischgneisen (Zweiglimmergneise) über eine Übergangszone von einigen Metern Mächtigkeit in die Masse des Amphibolites hinein, den man allgemein als Granatamphibolit bezeichnen kann. In der Übergangszone lassen sich unterscheiden: Mischgneis, grobkörniger Gneis mit Hornblendenestern, Hornblendegneise, die gegen den Amphibolit zu in grobkörnige Hornblendeamphibolite übergehen, aber noch keinen Granat enthalten. Die verschiedenen Gesteinsarten bilden Bänder von einigen Dezimetern bis wenigen Zentimetern Breite. Die Bänderung wird gegen den Amphibolit hin feiner. Der Granatamphibolit ist bei näherem Zusehen ebenfalls gebändert durch Variation in Gehalt und Korngröße der Hornblende und des Granatgehaltes, der manchmal sehr groß werden kann. Vereinzelt schalten sich dünne, helle Bänder ein mit Anreicherungen von weißem Plagioklas.

Der Plagioklas ist sonst immer saussuritisiert, die Amphibolite sind immer intensiv grün gefärbt.

Gegen NW geht der Amphibolitkomplex wieder in Mischgneise über. Im Steinbruch ist dieser Übergang aber nicht mehr aufgeschlossen.

Am Steilhang über dem Bruch liegt Moräne, die hauptsächlich Kalke und Dolomite der Unterengadiner Dolomiten enthält. Es gelangt immer wieder Moränenmaterial in den Abbau, ebenso etwas Gneis aus der Übergangszone.

Die ganze Zone ist stark zerklüftet, die Kluftkörper haben Ausmaße im Dezimeter-Bereich, große Blöcke sind relativ selten. Längs Kluftflächen, die oft epidotisiert, oft auch nur von erdigem Material bedeckt sind, vermag die Verwitterung eine gut sichtbare Ausbleichung oder Verrostung der frischen Gesteinsfarbe zu erzeugen. Ein Verwitterungseinfluß ist deutlich, vor allem auch wegen des Pyritgehaltes der Amphibolite. Das kompakte Gestein selber macht aber einen beständigen Eindruck. Die Verwitterungseinwirkung längs offener Klüfte dürfte sich über längere Zeitspannen erstreckt haben.

b) Kleinbereich

Die Einteilung der Splittproben in einige klar definierte Gruppen bereitet hier einige Schwierigkeiten. Zwischen den petrographischen Haupttypen bestehen kontinuierliche Übergänge.

In den wichtigsten Arbeiten über die Amphibolite des Silvrettakristallins von STRECKEISEN (1928), SPAENHAUER (1932) und WENK (1934) werden folgende Gesteinstypen unterschieden:

- Plagioklasamphibolite, dunkelgrüne, schiefrige Gesteine;
- Granatamphibolite, mit Granat als Hauptgemengteil;
- Epidotamphibolite, gelbgrün bis dunkelgrün gebänderte Gesteine;
- Biotitamphibolite, durch Auftreten von Biotit als Hauptgemengteil aus Plagioklasamphiboliten hervorgehend;
- Eklogitamphibolite, dichte hell-dunkelgrüne Grundmasse, viele rote Granate, mikrodiablastisches Grundgewebe von Hornblende und Plagioklas.

Diese Unterscheidung ist auf die mikroskopische Beobachtung angewiesen. Für die Splittbeurteilung müssen wir eine Unterscheidung makroskopisch treffen können. Dies kann nach dem Gehalt an Granat und Hornblende geschehen, ferner nach der Korngröße der Hornblenden und schließlich auch nach der Bänderstruktur. Aus Dünnschliffbeschreibungen der so erhaltenen Gruppen kann dann eine Zuordnung zu den Typen im Sinne der genannten Autoren vollzogen werden.

In einer ersten Varietät ist Quarz, Hornblende, saussuritisierte Plagioklas, sehr feinkörniger Granat und Pyrit zu erkennen. Die Hornblenden sind feinkörnig, ihre Längserstreckung beträgt selten mehr als 2–3 mm, die Korngrößen der übrigen Mineralien betragen max. 1 mm. Die Struktur kann als homöoblastisch bezeichnet werden. Das Gestein ist ziemlich massig, da die vorhandene Parallelorientierung der Hornblenden auf Bruchflächen schlecht zum Ausdruck kommt, etwas deutlicher auf geglätteten Kluftflächen. Die Klüftung ist deutlich ausgebildet. Die Handstücke sind oft allseitig von Kluftflächen begrenzt, entsprechen also etwa dem Kluftkörper, drei Kluftsysteme wiedergebend. Dazu kommen vereinzelt auch verheilte Klüfte. Die Kluftflächen sind teilweise mit dünnen Kalzitlagen bedeckt, teilweise auch nur mit erdigem, losem Material. In diesem Fall entsprechen sie offenbar jüngsten Bildungen. Auch saubere Flächen sind vorhanden, die leicht rostig verfärbt aussehen und dabei ziemlich glatt geworden sind. Rutschharnische sind meistens mit epidotisierten und chloritisierten Belägen versehen, die auch recht glatt werden können.

Normale Bruchflächen zeigen eine helle grau-grüne Färbung, ihre Rauigkeit ist gut, die Kanten sind sehr hart. Im Splitt kann das Gestein als heller, feinkörniger und massiger Amphibolit mit wenig Granat bezeichnet werden.

Eine zweite Ausscheidung zeigt nun, neben saussuritisiertem Plagioklas, Quarz, Hornblende, besonders häufig roten Granat mit Korngrößen bis max. 3 mm. Als Übergemengteil ist wiederum Pyrit zu nennen. Das Gestein ist etwas grobkörniger als der erste Typ. Die Struktur kann eher schon als heteroblastisch bezeichnet werden. Im großen und ganzen ist das Gestein massig. Lagen verschiedener Granatkorngröße erzeugen eine leichte Bänderung. Die Hornblenden sind wohl eingeregelt, doch laufen ihre Längsachsen nie streng parallel zueinander. Es zeigen sich am Handstück wieder drei Kluftsysteme, die aber keine stofflichen Veränderungen von Bedeutung zur Folge haben, sondern nur eine Glättung der Kluftflächen bewirken. Die Bruchflächen sind rau, die Kanten scharf und hart. Die Farbe der Bruchflächen ist dunkel- bis hellgrün und grüngrau. Im Splitt wird dieser Typ als feinkörniger, massiger, relativ heller, granatreicher Amphibolit ausgeschieden.

Ähnliche Handstücke zeigen manchmal eine durch Konzentration von Hornblende erzeugte Bänderung. Dann kann die Hornblende mengenmäßig zurücktreten oder das Korn etwas gröber werden. Es handelt sich um Übergänge zu den grobkörnigen Amphiboliten.

Die grobkörnigen Amphibolite schließlich enthalten wiederum saussuritisierten Plagioklas, Quarz, stenglige Hornblende, mehr oder weniger Granat, Pyrit in wechselnden Mengenverhältnissen auch im gleichen

Handstück. Die Struktur kann als heteroblastisch bezeichnet werden. Außer der Hornblende, die bis 10 mm lange Stengel bilden kann, sind die Gemengteile doch größtenteils feinkörnig. Die Textur ist nun deutlich gebändert. Zonen von relativ hellem Amphibolit gehen unmittelbar in dunkle Lagen mit angereicherter Hornblende über. Dann schalten sich auch Zonen mit vorwiegendem Quarz oder mit grobkörnigem, nicht umgewandeltem Plagioklas ein. Diese Zonen sind einige Millimeter bis Zentimeter breit. Die Klüftung ist hier unbedeutend.

Die Farbe ist hauptsächlich dunkelgrün, wenn auch mit hellen Streifen durchsetzt. Im Splitt bezeichnen wir diese Varietät als Amphibolit mit grobkörniger Hornblende, mit oder ohne Granat, stellenweise mit grobkörnigem Plagioklas, von lagiger Textur, die im Splittbereich aber übersehen werden kann.

In Handstücken aus der Nähe des Überganges in den Mischgneis wird die Bänderung gröber und tritt der Granat zurück. Nicht saussuritierter Plagioklas nimmt zu. Die Hornblende ist innerhalb der Schieferungsebene gerne büschelartig angeordnet. Weiter fallen schnurartige Quarzeinlagerungen auf. Im Splittbereich sind diese Erscheinungen nebensächlich.

Der etwa noch vorkommende Gneis ist im Vergleich zum Amphibolit als sehr grobkörnig zu bezeichnen. Schließlich treten im Splitt Kalk und Dolomit aus der Moräne auf.

Splittstichproben siehe Seite 74.

Der Gehalt an minderwertigen Gesteinen (Gneis, Kalk und Dolomit, verschiedene Gesteine) ist ziemlich groß. Die Splittproben waren übrigens stark verschmutzt, was bei gewissen Versuchen zu berücksichtigen ist. Die Ursache der Verschmutzung ist eine Folge der Lagerung des gebrochenen Materials und hat nichts mit der Amphibolitpetrographie zu tun.

c) Mikrobereich

Für Dünnschliffbeschreibungen der wichtigsten Amphibolitvarietäten ist auf die Arbeiten von STRECKEISEN (1928) und SPAENHAUER (1932) zu verweisen. Die Beobachtungen dieser Autoren können an den Gesteinen des Steinbruches bestätigt werden. Es fällt noch schwerer als bei anderen Gesteinen, aus den mikroskopischen Befunden auf die Eigenschaften zu schließen. Die Auszählverfahren bereiten mehr Mühe, weil die Kornumrisse in Umwandlungsstadien oft verwischt sind; die Korngrößenbestimmung wird mehrdeutig. Man gelangt an die Grenzen dieser Methoden.

Der helle, massige und relativ granatarme Amphibolit enthält im Dünnschliffbild eine mikrodiablastische Grundmasse, eine Durchwachsung von sehr kleinen Hornblende- und Plagioklasindividuen mit gleicher Auslöschung über größere Bereiche. Dazu kann auch Epidot erkannt werden. Der Eindruck einer Grundmasse wird sich auch in den Eigenschaften auswirken.

In dieser Grundmasse finden sich nun Granate bis etwa 0,3 mm Durchmesser, durch Risse meistens in kleine Teilkörner zerlegt. Die Granatstruktur ist nicht eigentlich poikilitisch. Hie und da können Kelyphitränder beobachtet werden. Weiter sind in der Grundmasse Hornblendestengel vorhanden, sie sind etwa 1 mm lang und von poikilitischer Struktur. Weitere Einsprenglinge sind bis zu einigen Millimeter lange stenglige Epidotkörner. Quarz bildet einige schnurartige Aggregate. Häufiger Nebengemengteil ist Ilmenit mit Leukoxenrändern von Titanit.

Die Struktur kann als porphyroblastisch bezeichnet werden. Die Anordnung der stengligen Einsprenglinge und der Quarzaggregate ergibt eine gerichtete, schiefrige Textur. Ungefähr senkrecht zur Schieferung verlaufen dünne, mit Kalzit, Epidot oder Hornblende gefüllte Klüfte und auch die meisten Risse in den Granaten drin. Das Gestein muß als Eklogit- bis Granat- oder Granat-Epidotamphibolit bezeichnet werden. Auszähl-ergebnisse von Mineralbestand und Korngrößen sind vergleichbar. Es geht daraus das feine Korn des Granats hervor, weshalb makroskopisch der Eindruck eines relativ granatarmen Amphibolites entsteht (Schliff G1).

Für die makroskopisch granatreichen, noch relativ feinkörnigen Amphibolite ergibt sich im Mikroskop folgendes Bild:

Ein fast opakes, diablastisches Grundgewebe umgibt netzwerkartig die sehr häufigen Granate, die nun Korngrößen um 1 mm herum oder darüber aufweisen. Der Granatgehalt variiert ein wenig, was eine Bänderung ergibt. Feinkörnige Hornblende ist häufig (max. 1 mm lang) und immer gut in die Schieferungsebene eingeregelt. Ähnlich ausgebildeter Epidot ist seltener. Die Struktur kann als nematoblastisch bezeichnet werden. In ähnlichen Gesteinen ist die mikrodiablastische Grundmasse mit Bereichen gleicher Auslöschung wieder häufiger. Der dort sehr grobkörnige Granat weist meistens einen Kelyphitrand auf. Wie die Hornblende- und Epidoteinsprenglinge ist er von poikiloblastischer Struktur. Quarz ist ebenfalls vorhanden, dazu ziemlich viel

Ilmenit mit Titaniträndern. Die Struktur ist mehr porphyroblastisch bis lepidoblastisch, die Textur fast massig. Es liegt schon eher ein Eklogitamphibolit vor (Schliff G25).

Zwischen grob- und feinkörnigen Amphiboliten bestehen verschiedene Übergangstypen, von denen einzelne reich an Epidot sind, andere überwiegend Granat führen. Auch der Hornblendegehalt kann variieren (Schliff G7, hornblendereiche Varietät).

Die grobkörnigen Amphibolite zeichnen sich makroskopisch mehr durch ihre Bänderung als durch ihre Korngröße aus. In einem typischen Schliff ist die Hornblende wichtigster Bestandteil mit Längen von über 1 mm. Epidot und Quarz sind ziemlich häufig, der Quarz ist in Lagen angereichert. Granat kommt vereinzelt vor, manchmal auch in Lagen, Vorherrschend ist aber das diablastische Grundgewebe worin Hornblende, Plagioklas und Epidot erkennbar sind. Neben Pseudomorphosen nach Augit und Olivin haben offenbar auch Plagioklasumwandlungen zur Bildung der Grundmasse beigetragen. Die Struktur kann nematoblastisch bis porphyroblastisch bezeichnet werden. Wichtige Nebengemengteile sind Orthit und Ilmenit mit Titaniträndern. Das Gestein ist ein granatarmer Amphibolit bis Epidotamphibolit.

Ein makroskopisch ähnliches Beispiel enthält im Dünnschliff mehr Granat und weniger Hornblende und einen größeren Gehalt an Grundmasse. Die Auszählungen zeigen, daß recht verschiedenartige Gesteine zusammengefaßt wurden. Die Kornverteilungskurven ergeben ähnliche Anteile an Korngrößen über 0,1 mm (Schliffe G15, G13). In einem weiteren Schliff dieser Gruppe ist relativ frischer Plagioklas vorhanden, der Granat fehlt, die Hornblenden sind in Lagen als Idioblasten angereichert. Weiterer heller Gemengteil ist Quarz. Der Schliff stammt aus einem Handstück, das eine Bänderung von hornblendereichen Streifen mit fast weißen Plagioklasanreicherungen zeigt, wie sie im Steinbruch gegen den Gneis hin häufiger auftreten.

Tabelle 4

Petrographie der Splittproben

(je 200 Körner, in Prozent)

	Stichproben		
	a	b	c
Jurakalk			
Homogener, dichter Kalk	81,5	77,5	81,0
Kalk mit feinen Inhomogenitäten	17,0	19,5	15,0
Vorwiegend grobkristalliner Kluftkalzit	1,5	2,0	4,0
Verschiedene Gesteine	—	1,0	—
Glaukonitsandstein			
Glaukonitsandstein, dunkel bis schwarz	68,0	66,5	65,5
Heller Sandstein, quarzitisch	4,5	4,0	5,0
Kalkreiche schiefrige Sandsteine bis Mergelschiefer	9,0	8,0	9,0
Kalzitbeläge und limonitisierte Beläge auf Splittkornoberflächen, Rutschharnische	10,5	14,5	15,5
Kalzitklüfte innerhalb Splittkorn	6,0	6,0	2,5
Verschiedene Gesteine	2,0	1,0	2,5
Kieselkalk			
Massiger, homogener Kieselkalk	62,0	60,5	73,0
Schiefriger Kieselkalk bis Mergelschiefer	7,0	6,5	3,5
Kalzitklüfte innerhalb Kieselkalk	13,5	19,0	12,0
Kieselkalk mit Kalzitoberflächen	12,5	12,0	10,5
Verschiedene Gesteine	5,0	2,0	1,0
Kieselkalk des Lias der Préalpen			
Schwarze, feinkörnige Kieselkalke	73,5	73,0	75,5
Feinspätiger, leicht kieseliger Kalk	6,5	6,5	7,5
Schiefrige Kieselkalke bis Mergelschiefer	11,0	11,5	10,0
Kalzitklüfte innerhalb Kieselkalk	1,5	3,0	2,0
Kieselkalk mit Kalzitbelägen, Rutschharnischen usw.	5,0	4,0	4,0
Hornsteine	2,5	2,0	1,0

Tabelle 4 (Fortsetzung)

	Stichproben		
	a	b	c
Gneise aus Flußgewinnung			
Augengneise, spindelige Textur, mittelkörnig.	10,0	10,5	27,0
Helle, relativ glimmerarme, mittelkörnige Gneise	45,0	35,0	22,0
Feinkörnige Gneise.	10,0	4,5	19,5
Verschiefterte Gneise, Glimmerschiefer	25,0	37,0	21,5
Amphibolite	0,5	0,5	0,5
Kalkschiefer	5,0	9,0	2,5
Quarzite, Gangquarze	4,5	3,5	7,0
Flyschsandstein			
Feinkörnige, massige Sandsteine	46,0	48,0	42,0
Mittel bis grobkörnige, massige Sandsteine	16,0	14,0	16,5
Relativ glimmerreiche Sandsteine, geschichtet oder geschiefert	14,0	12,5	17,0
Kalzitklüfte innerhalb Splittkorn	6,5	11,0	7,0
Kalzitbeläge aus Splittkornoberflächen	13,5	11,5	13,5
Schwarze Tonschiefer	4,0	3,0	4,0
Amphibolit des Silvrettakristallins			
Feinkörniger, massiger Amphibolit, relativ hell, wenig makroskopisch sichtbarer Granat	25,0	28,5	40,5
Feinkörniger, massiger Amphibolit, relativ hell, Granat häufig	30,5	32,0	15,5
Amphibolit, Hornblende grobkörnig und eingeregelt, oft grobkörniger Plagioklas überwiegend, mit oder ohne Granat, gebändert.	27,0	29,0	21,0
Gneis.	5,5	3,0	5,5
Kalk und Dolomit	6,0	3,0	7,0
Verschiedene Gesteine, Kluftlagen, Rutschharnische, stark verwitterte Splittkörner	6,0	4,5	10,5

Eine deutliche Bänderung im Dünnschliffbereich kann auch durch Verteilung und Korngröße des Granats erzeugt werden. So enthält eine erste Zone vorwiegend Granat von etwa 0,5 mm Durchmesser. Kelyphitränder fehlen, die Körner sind immer zerbrochen. Das Grundgewebe bildet ein fast opakes Netzwerk. Relativ häufig ist Quarz, Hornblende und Epidot hingegen sind spärlich vertreten. In einer zweiten Zone tritt der Granat gegenüber dem Grundgewebe zurück. Gleichzeitig treten parallel der Bänderung größere Idioblasten von Hornblende und Epidot, einige Millimeter lang, auf. In der dritten Zone schließlich herrscht grobkörnige, poikilitische Hornblende vor, die oft Längen über 3 mm erreicht; dazu ist auch Epidot häufig. Die vorhandenen Granate weisen meistens einen Kelyphitrant auf. Diese drei beschriebenen Zonen können sich an gleichen Handstücken mehrfach wiederholen.

Schliffe der Gneise zeigen nichts Besonderes. Es liegen relativ grobkörnige Hornblendegneise und feinkörnigere Zweiglimmergneise mit nur leicht zersetzten Feldspäten vor. Beide sind von granoblastischer Struktur. Vom Dünnschliff aus kann ihre Qualität nicht beurteilt werden.

Die Schliffbeschreibungen haben für den Amphibolit ein vielfältiges Bild ergeben. Den verschiedenen Varietäten ist aber vieles gemeinsam. So ist immer eine «Grundmasse» vorhanden, in der Körner verschiedener Mineralien schwimmen. Die Hornblendestengel sind nie vollkommen parallel eingelagert, ihre Längsachsen sind immer um einige Grade gegeneinander verdreht. Das hat eine Verfilzung zur Folge, die offenbar nicht wenig zur Festigkeit der Amphibolite beiträgt. Im Schliffbereich sind die meisten Beispiele ziemlich massig. Der Gehalt an leicht verwitterbaren Mineralien (z. B. Pyrit) ist nirgends besonders groß. Es ist deshalb zu erwarten, daß die meisten Splittkörner von ähnlicher Qualität sein werden.



Abb. 4. Jurakalk: homogener Kalk; Kalk mit feinen Inhomogenitäten; grobkristalliner Kluftkalzit.



Abb. 5. Glaukonitsandstein: normale, dunkle Varietät; heller quarzitischer Sandstein; kalkreicher, schiefriger Sandstein.



Abb. 6. Glaukonitsandstein: Kalzit- und Limonitbeläge; Kalzitklüfte innerhalb Splittkorn.



Abb. 7. Kieselkalk: massiger, homogener Kieselkalk; schiefriger Kieselkalk bis Mergelschiefer.



Abb. 8. Kieselkalk: Kalzitklüfte innerhalb Splittkorn; Kalzitoberflächen.



Abb. 9. Kieselkalk Lias: schwarzer, feinkörniger Kieselkalk; feinspätiger, leicht kieseligter Kalk; schiefriger Kieselkalk bis Mergelschiefer.



Abb. 10. Gneise: mittelkörnige Gneise, Augengneistextur; mittelkörnige, relativ glimmerarme Gneise; feinkörnige Gneise.



Abb. 11. Gneise: verschieferde Gneise, Glimmerschiefer; Quarzite, Gangquarze.



Abb. 12. Flyschsandstein: feinkörniger, massiger Sandstein; mittel- bis grobkörniger, massiger Sandstein.



Abb. 13. Flyschsandstein: relativ glimmerreicher Sandstein; Schwarze Tonschiefer.



Abb. 14. Amphibolit: feinkörniger Amphibolit, wenig Granat; feinkörniger Amphibolit, Granat häufig (dunkle Punkte).



Abb. 15. Amphibolit: Amphibolit mit grobkörniger Hornblende; Gneise; verwitterte Stücke (Oberflächen geglättet).

Tabelle 5

Mineralbestand

Durch Auszählen bestimmt an Dünnschliffen, in Prozent: Schliffbezeichnungen siehe Tabelle Mineralkorngröße

Jurakalk	A16	A25	A25			
Dichter, mikrokristalliner Kalk	82,6	68,6	72,3			
Rundliche Einschlüsse (Kalzit)	9,4	17,0	14,6			
Langgestreckte Einschlüsse	8,0	12,2	11,4			
Limonit		2,2	0,8			
Glaukonitsandstein	B 10	B5	B22	B28	B15	B20
Quarzkomponenten	44,6	50,0	68,2	69,0	13,6	15,0
Glaukonit	17,6	13,2	—	—	5,4	3,2
Kalzit (einzelne Körner)	1,6	3,0	9,0	2,6	7,2	7,0
Bindemittel	35,0	32,4	21,4	25,0	69,2	73,2
Pyrit oder Limonit	1,2	1,4	1,4	3,4	4,6	1,6
Kieselkalk, Kreide	C19	C16	C3			
Kalzit, grobkörnig	40,0	22,8	10,8			
Quarz, grobkörnig	4,0	1,0	3,4			
Grundmasse, mikrokristallin	54,8	19,6	83,2			
Grundmasse, Quarz	—	53,2	—			
Glaukonit, Limonit	1,2	3,4	2,6			
Kieselkalk, Lias	D1	D15	D9	D11	D3	
Kalzit, feinspätig	27,4	39,6	45,0	32,4	—	
Kalzit, grobspätig	—	—	—	—	82,4	
Quarzkörner	7,0	1,8	—	3,6	—	
Limonitkörner	3,8	2,4	7,8	3,8	2,8	
Grundmasse, mikrokristallin	61,2	56,2	47,2	60,2	14,8	
Gneise, Tessin	E1	E10	E12	E13	E15	
Quarz	31,4	33,4	26,4	28,8	46,8	
Feldspat	57,2	59,0	64,4	45,8	45,2	
Biotit	8,2	4,4	9,0	25,0	0,4	
Muskowit	1,6	2,8	—	—	5,8	
Akzessorien	—	0,4	0,2	0,4	—	
Zersetzungsprodukte	1,6	—	—	—	1,8	
Flyschsandstein	F1	F10	F3	F9	F5	
Quarz	54,8	70,2	40,6	48,0	47,2	
Feldspat	5,2	8,2	3,6	7,8	12,6	
Glimmer	4,0	7,4	3,6	2,0	1,4	
Gesteinstrümmer	7,2	3,2	6,0	35,2	24,0	
Grobkristalliner Kalzit	20,0	5,2	3,0	3,8	10,0	
Bindemittel	8,2	5,2	42,0	2,6	4,8	
Limonit	0,6	0,6	1,2	0,6	—	
Amphibolit	G1	G25	G7	G15	G13	
Granat	15,8	36,6	7,2	5,4	17,0	
Hornblende	6,6	32,0	45,6	29,2	17,4	
Epidot	8,6	9,0	18,4	17,2	15,6	
Diablastisches Grundgewebe und saussuritierter Plagioklas	62,8	18,8	24,8	36,0	45,6	
Quarz	5,6	3,0	2,6	8,8	4,0	
Frischer Pagioklas	—	—	0,2	—	—	
Ilmenit und Titanit	0,2	0,6	1,0	2,8	0,4	
Übrige Akzessorien	0,4	—	0,2	0,6	—	

Tabelle 6

Mineralkorngrößen

durch Auszählen bestimmt an Dünnschliffen, in Prozent. (Graphische Darstellungen Abb. 16–22)

Schliff	Gestein	< 0,01	0,01–0,03	0,03–0,1	0,1–0,3	0,3–1	1–3 mm
A16	Jurakalk	84,8	11,6	1,0	0,6	–	2,0
A25	Jurakalk, senkrecht Lager	77,2	19,2	2,2	1,2	0,2	–
A25	Jurakalk, parallel Lager	76,0	16,8	3,6	2,8	0,8	–
B10	Glaukonitsandstein	17,2	16,8	34,0	32,0	–	–
B5		15,6	10,6	37,2	36,6	–	–
B22	Sandstein, hell, mit quarzitischem Binde-	4,2	13,0	29,0	53,8	–	–
B28	mittel	2,0	19,2	27,8	51,0	–	–
B15	schwarze Tonschiefer	47,2	20,4	26,0	5,0	5,0	–
B20		52,6	18,4	23,6	5,2	0,2	–
C19	Kieselkalk	47,2	12,6	16,4	20,6	3,2	–
C16		33,0	42,4	9,2	11,4	4,0	–
C3	mergeliger Kieselkalk	60,8	30,0	7,0	1,6	0,6	–
D1	Kieselkalk	48,4	39,0	10,6	1,8	0,2	–
D15	Lias der Préalpen	50,2	17,2	19,0	12,8	0,8	–
D9	dto., leicht schiefrig oder mergelig	56,0	15,2	17,4	9,6	1,8	–
D11		51,6	25,8	16,8	5,2	0,6	–
D3	Spatkalk (Echinodermenbrekzie)	11,0	6,8	9,4	55,4	17,4	–
E1	Gneis, grobkörnig	–	1,8	10,2	30,0	36,0	22,0
E10		–	–	0,4	12,4	62,8	24,4
E12	Gneis, feinkörnig	–	–	1,4	22,8	70,0	5,8
E13		–	2,0	12,8	36,0	49,2	–
E15		–	0,4	9,2	46,8	34,6	9,0
F1	Sandstein, feinkörnig	6,6	8,8	34,2	46,8	3,6	–
F10		5,0	8,8	37,6	43,0	5,6	–
F3	dto., schiefrig	45,4	6,4	18,6	25,8	3,8	–
F9	dto., grob/mittelkörnig	3,0	6,6	16,6	42,2	22,2	9,4
F5		4,0	4,2	17,2	47,8	25,0	1,8
G1	Amphibolit granatarm	49,2	14,8	11,2	21,4	3,4	–
G25	Amphibolit granatreich	12,0	1,4	9,0	39,2	28,2	10,2
G7	Amphibolit grobkörnig	9,8	15,6	6,4	12,8	36,6	18,8
G15	Amphibolit gebändert	10,6	27,2	19,6	19,8	17,6	5,2
G13		47,4	4,4	2,8	13,4	22,2	9,8

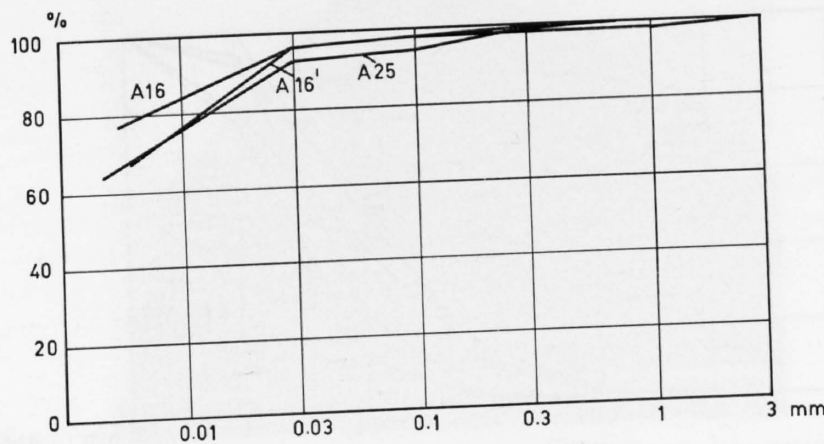


Abb. 16–22. Summationskurven der Mineralkorngrößen. Schliffbezeichnungen und Auszählergebnisse in Tabelle 6.

Abb. 16

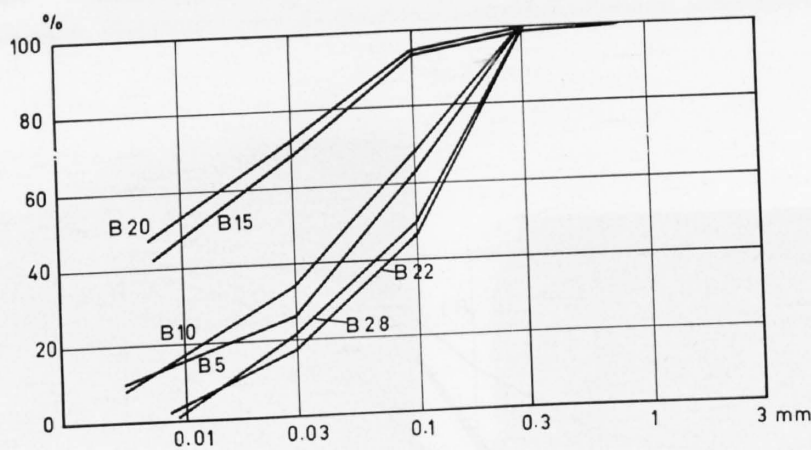


Abb. 17

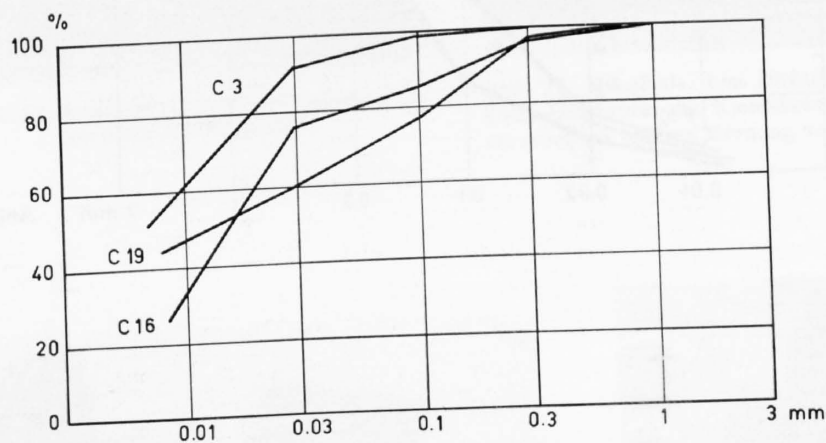


Abb. 18

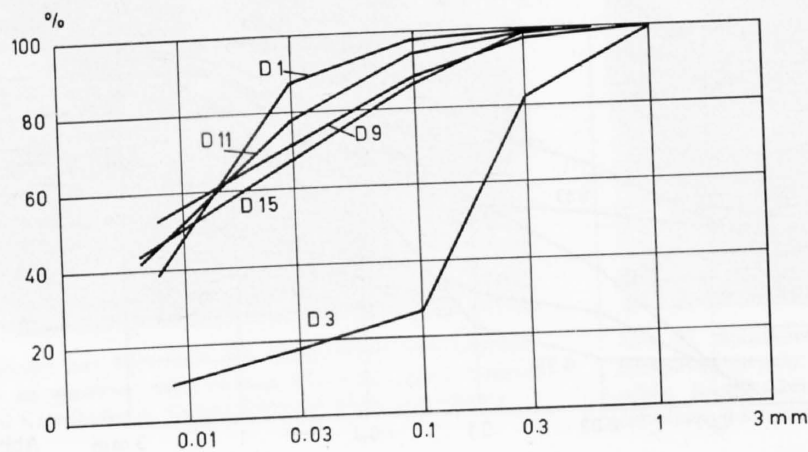


Abb. 19

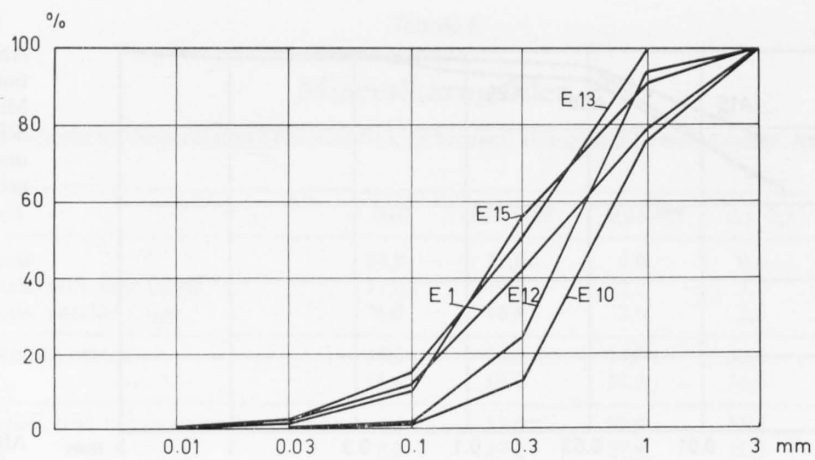


Abb. 20

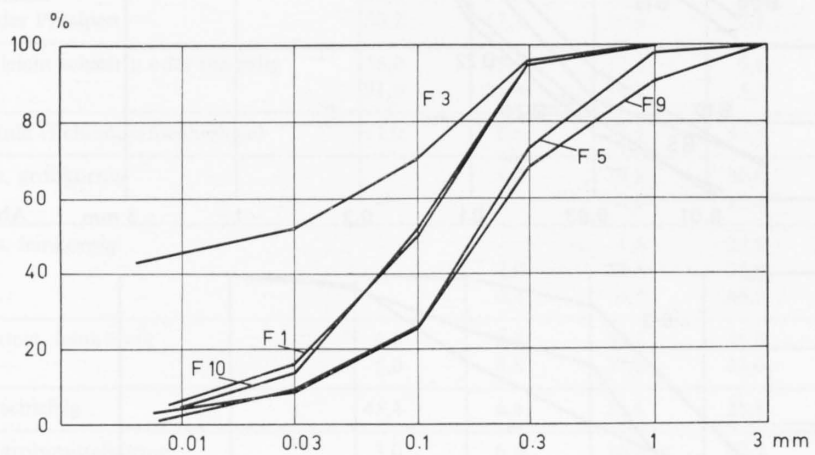


Abb. 21

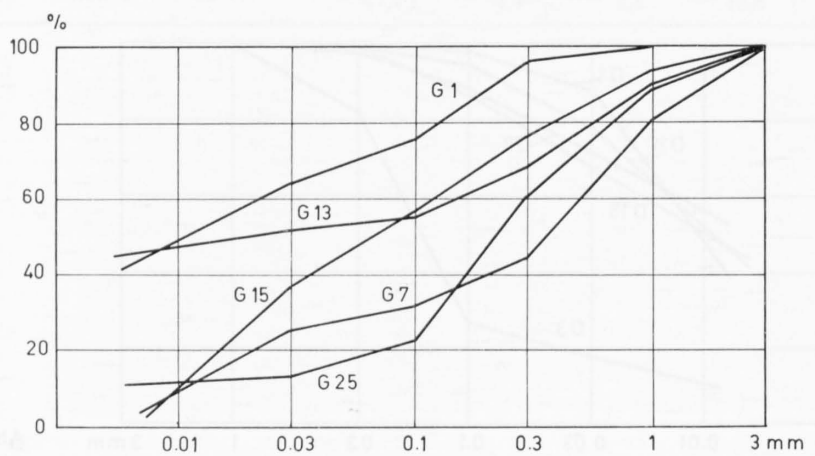


Abb. 22



Abb. 23. Kieselkalk, Hauterivian: angeätztes Handstück mit deutlich sichtbarem, schwammartigem Kieselskelett.

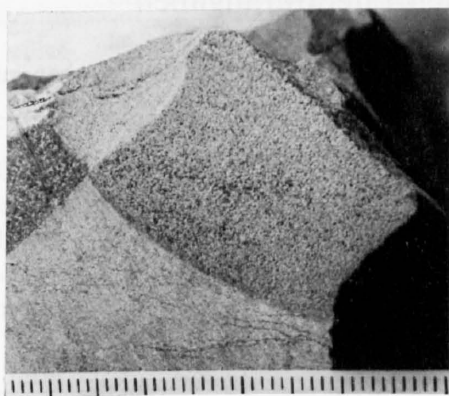


Abb. 24. Kieselkalk, Hauterivian: gleiche Erscheinung auf Schnittfläche.



Abb. 25. Kieselkalk, Lias (Préalpen): angeätztes Handstück, das Kieselskelett ist wegen der erheblich feineren Körnung weniger deutlich.



Abb. 26. Splittkörner aus Kieselkalk des Hauterivian: links angeätzt, das Kieselskelett ist wiederum sehr deutlich erkennbar, durch Anätzen mit HCl sind Kieselkalke in Splittmischungen leicht bestimmbar.



Abb. 27. Splittkörner aus Kieselkalk des Lias, feinspätige Varietät; links angeätzt. Hier kommen neben Kieselkalcken auch Sandkalke vor, die einzelnen Quarzkörner sind nicht zu übersehen.

C. Versuchsergebnisse

I. Petrographische Methoden

Die petrographischen Methoden wurden vor allem zur Materialcharakterisierung verwendet. Sie liefern deshalb nicht eigentliche «Versuchsergebnisse». Da bei der Besprechung der technisch-physikalischen Methoden immer wieder auf vermutete und vorhandene Zusammenhänge zwischen Petrographie und Gesteinsqualität oder, genauer gesagt, technischem Verhalten hingewiesen wurde, soll an dieser Stelle eine Qualitätsbeurteilung versucht werden, die dann durch die Ergebnisse der technisch-physikalischen Versuche durchaus nicht bestätigt werden muß.

In der Literatur sind ferner Qualitätsbeurteilungen und Mitteilungen von Versuchsergebnissen zu finden. Mit der nötigen Vorsicht aufgefaßt, können sie durchaus als erste Hinweise auf das technische Verhalten der Gesteinsmaterialien verwendet werden. Sie werden deshalb in aller Kürze hier aufgeführt.

1. Qualitätsbeurteilung nach Literaturangaben

In den folgenden Tabellen bedeuten die am Schluß aufgeführten Zahlen Literaturangaben, nämlich:

- 1 Bausteinband (1915).
- 2 DE QUERVAIN und GSCHWIND (1949).
- 3 DE QUERVAIN und JENNY (1945, 1951).
- 4 Gutachten der EMPA, der Geotechnischen Kommission usw.

Tabelle 7

Physikalische Gesteinseigenschaften nach Literaturangaben

Gestein	Würfeldruckfestigkeit	spez. Gewicht	Raumgewicht	absolute Porosität	Wasseraufnahme	Literatur
Jurakalk	ca. 1600	2,72	2,66	2,2%	0,26%	1
Glaukonitsandstein	2400–3400	2,72–2,77	2,66–2,70	1–3%	unbedeutend	2
Kieselkalk, Kreide	2300–2600	2,66–2,72	2,62–2,67	1–2%	sehr gering	2
Kieselkalk, Préalpen	keine Angaben vorhanden, möglicherweise aber ähnlich wie für schwarzen, kryptokristallinen Kalkstein des Dogger bei Roche, Druckfestigkeit vermutlich besser als für den gewöhnlichen Spatkalk von Villeneuve:					
Dogger bei Roche	ca. 2200	–	–	sehr gering	sehr gering	1
Spatkalk, Villeneuve	ca. 1800	2,79	2,73	sehr gering	sehr gering	2, 4
Tessiner Gneise	1300–2100	2,62–2,71	2,55–2,64	gering	kleiner, 0,6%	2
Flyschsandstein	2000–2400	2,66–2,72	2,60–2,69	1,5–3%	0,1–0,2%	2
Amphibolit	keine Zahlen vorhanden					

Die in den Tabellen zusammengestellten Angaben sind nicht sehr aufschlußreich. Im wesentlichen ergibt sich, daß die normalen Ausbildungen von Glaukonitsandstein, Kieselkalken, Flyschsandstein und Amphibolit gute Straßenbaumaterialien ergeben und daß der Jurakalk und die Tessiner Gneise dafür weniger bis gar nicht geeignet sind.

Zu den Zahlen ist zu bemerken, daß sie nur die bestmöglichen Varietäten betreffen. Spezifisches Gewicht, Raumgewicht, Porosität und Wasseraufnahme lassen keine Differenzierung der verschiedenen Gesteinsarten in qualitativer Hinsicht zu. Ebenso ist die Wetterbeständigkeit dieser Gesteine durchwegs gut. Einzig die Würfeldruckfestigkeit ergibt eine, wenn auch sehr weitzufassende, Unterscheidungsmöglichkeit. So können gute bis sehr gute Qualitäten mit Druckfestigkeitswerten von deutlich über 2000 kg/cm², von mittleren im

Tabelle 8

Allgemeine Beurteilung der Gesteinsqualität nach Literaturangaben

Jurakalk:	Guter Baustein für Hochbau, früher auch etwa als Steinbettstein oder Schotter verwendet	2
	Wetterbeständigkeit gut, Mergellagen und Tonhüfte ausgenommen	3
Glaukonitsandstein:	Sehr gutes Splitt- und Schottermaterial, mit Einschaltungen von unbrauchbaren schiefrigen Sandsteinen. Braunfärbung durch Verwitterung von Glaukonit und Pyrit allgemein von geringem Einfluß	2, 4
	Wetterbeständigkeit gut, mit Ausnahme der schiefrigen Sandsteine, die rasch zerfallen	3
Kieselkalk, Kreide:	Sehr gutes Splitt- und Schottermaterial, Anteil unbrauchbarer Einschaltungen relativ gering	2, 4
	Wetterbeständigkeit gut	3
Kieselkalk, Préalpen:	Andere Eigenschaften als die Spatkalke von Villeneuve, als Splittmaterial denkbar	4
Tessiner Gneise:	Für Splittmaterial ungenügend bis knapp genügend	2, 4
	Ausgezeichnete Wetterbeständigkeit mit Ausnahme von Glimmeranhäufungen	3
Flyschsandstein:	Sehr gutes Splittmaterial, wenn die Einschaltungen von ungenügenden Qualitäten (Schieferlagen) ausgeschieden werden können. Rauigkeit der Gesteinsflächen ist gewährleistet	2, 4
	Gute Wetterbeständigkeit, ausgenommen Schiefer	2
Amphibolit:	Im Speziellen keine Angaben vorhanden. Im Ausland wegen hoher Druckfestigkeit und Zähigkeit, Wetterbeständigkeit und Griffigkeit usw. geschätzt. Ist Graniten vorzuziehen. (Siehe z. B. TEMME, 1963).	

Bereich 1500–2000 und schlechten mit Werten unter 1500 kg/cm² abgetrennt werden, wobei mit dieser Unterscheidung verschiedene Aspekte der Qualität von Straßenbaugesteinen aber noch nicht berücksichtigt sind.

Vergleichbare Ergebnisse von Gebrauchsprüfungen, also z. B. Zertrümmerungsgrade aus Druck- und Schlagversuchen, sind sehr spärlich vorhanden. Sie stimmen aber mit den obigen allgemeinen Feststellungen durchaus überein.

2. Qualitätsbeurteilung nach petrographischen Beschreibungen

Es sind im wesentlichen drei Eigenschaften, die für eine derartige Qualitätsbeurteilung nach «Erfahrung» in Frage kommen: Die allgemeine Festigkeit der Gesteine, die Wetterbeständigkeit und die Griffigkeit der Gesteinsflächen. Die Beurteilung ist nun im Hinblick auf die Verwendung als Splitt vorzunehmen. So lassen sich die Splittstichproben in verschiedene Qualitätskategorien aufteilen. Gestützt auf die petrographische Zusammensetzung der Stichproben sollen deren drei unterschieden werden.

Für eine gute Splittqualität sind die drei genannten Eigenschaften möglichst optimal ausgebildet, für eine schlechte Qualität muß eine der drei Eigenschaften völlig ungenügend ausgebildet sein. Die Anwesenheit solcher Gesteine im Straßenbaumaterial wäre nach Möglichkeit zu vermeiden. Wo die Eigenschaften nicht eindeutig als gut oder schlecht bezeichnet werden können, wird man eine mittlere Qualität ausscheiden. Ihre Anwesenheit im Splitt ist bis zu einem gewissen Prozentsatz durchaus zu tolerieren. Derartiger Splitt kann auf Nebenstraßen als vorherrschendes Belagsmaterial benützt werden.

In diesem Zusammenhang soll eine weitere Einteilungsmöglichkeit angewendet werden, die die Einordnung der Gesteine in Härtegruppen nach DE QUERVAIN (1948, 1967) verwendet, worin die Gesteins Härte als Kombination von Würfeldruckfestigkeit und Mineralbestand definiert wird. Wesentlich ist der Gehalt an Mineralien, die härter als Stahl sind. Als Vereinfachung werden auch hier nur drei Klassen: hart, mittelhart, weich, unterschieden. Weiche Gesteine würden dabei einer schlechten Qualität entsprechen.

Es folgen kurze Qualitätscharakterisierungen für jedes der sieben untersuchten Vorkommen:

Jurakalk

Es ist eine für einen Kalkstein recht hohe Festigkeit festzustellen, besonders beim Anschlagen von Handstücken. Dazu paßt die mikroskopische Struktur, die als dichtes Implikationsgefüge bezeichnet werden kann.

Offenbar trifft hier zu, daß die Festigkeit mit abnehmender Mineralkorngröße zunimmt. Klüfte und andere Inhomogenitäten, die die Festigkeit vermindern könnten, spielen eine geringe Rolle, vor allem im Splittbereich.

Das Gestein ist wetterbeständig. Auch in Oberflächennähe bewirkt die Verwitterung nur ein schwaches Ausbleichen, was auf die Festigkeit keinen Einfluß haben dürfte. Limonitbildungen längs Feinklüften spielen im Splittmaterial keine Rolle.

Die Griffigkeit ist wegen der Mineralkorngröße ziemlich gering. Da diese Eigenschaft durch die Kornzusammensetzung des Belagsgutes beeinflußt werden könnte, kann der normale Jurakalk wohl gerade noch einer mittleren Qualität zugeordnet werden. Körner mit vielen Feinklüften und solche, die vorwiegend grobkristallinen Kalzit enthalten, wird man gefühlsmäßig als schlechte Qualität bezeichnen.

Mineralbestand und Druckfestigkeit von etwa 1600 kg/cm² ergeben nach DE QUERVAIN (1967) ein mittelhartes Gestein. Entsprechend sind Gesteine aus grobkristallinem Kalzit weich.

Glaukonitsandstein

Normale Brisi- und Gamsersandsteine zeichnen sich durch ihre enorme Festigkeit aus. Dieser Sachverhalt kann kaum in einfacher Weise auf die mikroskopische Struktur zurückgeführt werden.

Die Wetterbeständigkeit ist gut, wenn auch der Glaukonit durchaus verwittern kann, was sich jeweils in einer mehr oder weniger starken Braunfärbung äußert. Die Festigkeit scheint darunter nicht zu leiden. Die Beständigkeit der schiefrigen Sandsteine ist nun extrem schlecht, was an frisch gebrochenem Gestein aber nicht ersichtlich wird. Der Festigkeit nach würden diese schiefrigen Varietäten durchaus noch genügen.

Für die Griffigkeit dürfte die Kombination harter und weicher Mineralien ziemlich optimal sein, auch die Mineralkorngröße ist genügend.

Im Splitt sind die normalen Glaukonitsandsteine als gute, von Körnern mit Kalzitklüften und -belägen als mittlere und den schwarzen schiefrigen Sandsteinen als schlechte Qualitäten zu unterscheiden.

Die Härteeinteilung ergibt die Bezeichnung hart für die normalen Sandsteine und in den meisten Fällen wohl auch für die schiefrigen Sandsteine, die geklüfteten Stücke wären eher als mittelhart zu bezeichnen. Die Verwitterungsanfälligkeit der Schiefer kann in dieser Einteilung übersehen werden.

Kieselkalk der Kreide

Der normale Kieselkalk ist wiederum sehr fest, verwitterungsbeständig und griffig, da harte und weiche Komponenten vorhanden sind. Damit kann er der guten Qualitätsgruppe zugeordnet werden.

Ebenso sind die Stücke mit Kalzitklüften von mittlerer Qualität, da ihre Festigkeit wohl etwas geringer sein wird. Die übrigen Eigenschaften bleiben bestehen. Schlußendlich wird man Stücke aus Schieferlagen als schlecht bezeichnen.

Die Härteeinteilung verläuft hier parallel der Qualitätseinteilung.

Kieselkalk der Préalpen

Es ergibt sich eine gleichartige Einteilung wie für den helvetischen Kieselkalk. Wegen der feineren Mineralkorngröße ist allerdings eine etwas verminderte Griffigkeit denkbar.

Tessiner Gneise

Hier ist nun die Festigkeit stark reduziert, was auf die Mineralkorngröße und Spaltbarkeit vieler Gemengteile, ferner auch auf die Textur der Gneise zurückzuführen ist.

In der Regel sind die Gneise wetterbeständig, ausgenommen sind Glimmeranhäufungen. Die Verwitterung der Feldspäte, die im anfallenden Material mehr oder weniger frisch sind, spielt keine Rolle, da sie sich über sehr große Zeiträume abspielen würde.

Die Griffigkeit ist hingegen sehr gut. Sie kommt teilweise aber dadurch zustande, daß einzelne Mineralbruchstücke aus dem Verband herausgelöst werden können, bevor eine Politur erreicht wird. Die geringe Festigkeit begünstigt hier also die Eigenschaft der Griffigkeit.

Wegen der Festigkeit können die normalen Gneise nur einer mittleren Qualitätsgruppe zugeordnet werden. Für Schiefer ist eine noch kleinere Festigkeit anzunehmen, kommt also nur noch eine schlechte Qualität in Frage. Für die Härte stehen aus den gleichen Gründen nur mittelhart und weich zur Diskussion.

Ausgenommen von dieser Einteilung wären Gangquarze und Amphibolite, die aber mengenmäßig keine Bedeutung haben. Wo vorhanden, werden sie als gute Qualitätsgruppe ausgeschieden, ebenso kann man sie als hart bezeichnen.

Flyschsandstein

Die Forderungen nach hoher Festigkeit, Wetterbeständigkeit und Griffbarkeit sind hier ziemlich ideal erfüllt. Neben der Art der Gemengteile sind sicher die Kombinationen von Komponenten, Porenzement und feinkörnigem Bindemittel dafür verantwortlich, doch dürfte vor allem bei der Festigkeit der genaue Zusammenhang nicht auf einfache Weise erklärbar sein.

Die Eigenschaften der schwarzen Schiefer, die schon von Hand zerreibbar sind, bedürfen keiner Diskussion. Die schiefrigen Sandsteine mit Anreicherung von Glimmer in Lagen lassen eine Verwitterungsanfälligkeit befürchten und sind wohl vorteilhaft auch noch schlechten Qualitäten zuzuordnen.

Als mittlere Qualität werden wiederum Stücke mit Kalzitklüften abgetrennt. Die Härteeinteilung ergibt wenig Neues, höchstens, daß die schiefrigen Sandsteine allenfalls noch mittelhart bezeichnet werden können.

Amphibolit

Alle Amphibolitverietäten sind von hoher Festigkeit, die von der Saussuritisierung noch begünstigt wird. Bei Amphiboliten spricht man, wohl wegen ihrer Struktur, gerne auch von großer Zähigkeit.

Ein Verwitterungseinfluß ist, abgesehen von stark geklüfteten Stücken, durchaus vorhanden. Er äußert sich etwa als Glättung von Flächen, die der Verwitterung lange ausgesetzt waren. Der zeitliche Ablauf der Verwitterung ist aber so langsam, daß sie für das Verhalten im Belag von untergeordneter Bedeutung bleibt.

Tabelle 9

Qualitätseinteilung der Splittproben

(siehe ferner Anteil harter Gesteine S. 117)

Gestein	gute Qualität (Zahl %)	mittlere Qualität (Zahl %)	schlechte Qualität (Zahl %)
Jurakalk	—	98,5	1,5
	—	97,0	3,0
	—	96,0	4,0
Glaukonitsandstein	72,5	18,5	9,0
	70,5	21,5	8,0
	70,5	20,5	9,0
Kieselkalk, Kreide	62,0	31,0	7,0
	60,5	33,0	6,5
	73,0	23,5	3,5
Kieselkalk, Préalpen	76,0	13,0	11,0
	75,0	13,5	11,5
	76,5	13,5	10,0
Tessiner Gneise	5,0	70,0	25,0
	4,0	59,0	37,0
	7,5	71,0	21,5
Flyschsandstein	62,0	20,0	18,0
	62,0	22,5	15,5
	58,5	20,5	21,0
Amphibolit	82,5	11,5	6,0
	89,5	6,0	4,5
	77,0	12,5	10,5

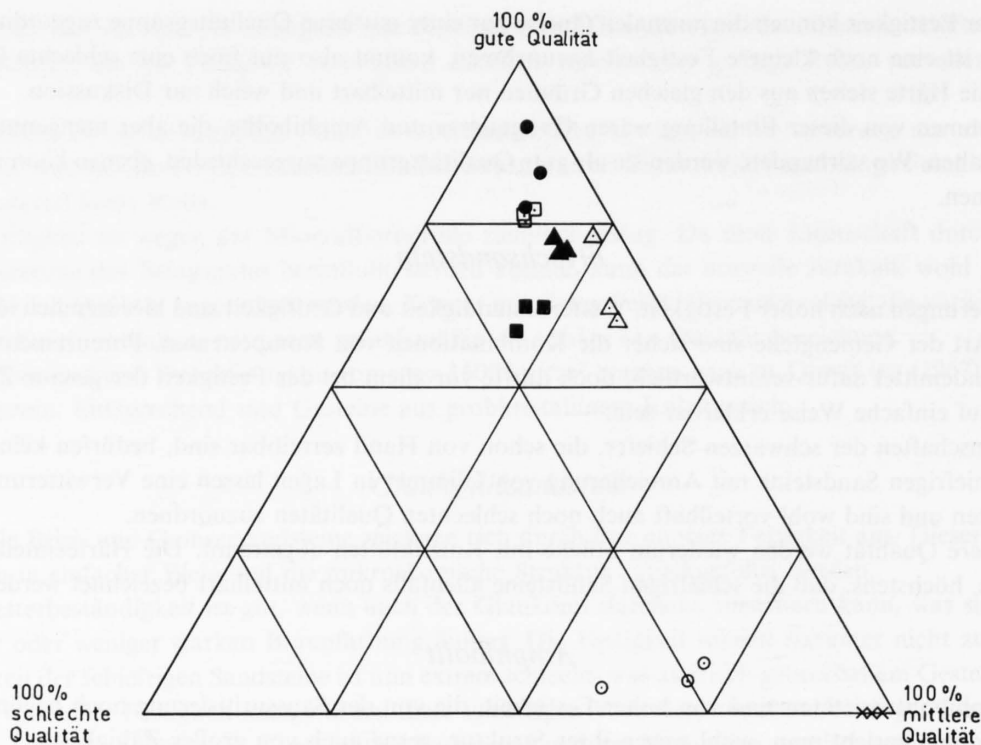


Abb. 28. Qualitätseinteilung der Splittproben nach petrographischer Beschreibung.

Die Griffigkeit ist wegen des recht hohen Anteils an feinkörniger Grundmasse nicht allzu hoch. Ob der Gehalt an Granat überhaupt eine Rolle spielt, ist schwer zu entscheiden. Wenn die Griffigkeit auch nicht optimal ist, so kann der Amphibolit trotzdem noch als gute Qualität bezeichnet werden und von den Kalken, Dolomiten und Gneisen mit mittlerer und stark zersetzten und geklüfteten Stücken mit schlechter Qualität unterschieden werden. Für die Härte gilt wiederum ähnliches.

Die getroffenen Einteilungen werden in Tabelle 9 und Abb. 28 dargestellt. Für die Härteeinteilung kommt offenbar ein sehr ähnliches Bild zustande.

Das ist verständlich, da in beiden Fällen die Würfeldruckfestigkeit und der Gehalt an harten Mineralien als Einteilungsgrundlagen vorkommen. Für die Griffigkeit würde bei der Anwesenheit von nur harten Mineralien allerdings ein Qualitätsabfall, damit eine zur Härteeinteilung unterschiedliche Bewertung zu erwarten sein. Bei den untersuchten Gesteinen kommt dieser Fall aber gar nicht vor.

Aus der Tabelle und der Darstellung ist zu entnehmen, daß ein Splitt von homogener Qualität im Bereich der Alpen nicht zu gewinnen ist. Ferner lassen sich die sieben Gesteinsarten nach ihrer Qualität grob unterscheiden. Da bei diesem summarischen Verfahren das Verhalten von Beimengungen schlechter Qualitäten, das Verhalten von Mischungen, unberücksichtigt bleibt, soll der Entscheid, welches Gestein die beste Qualität aufweist, noch offengelassen werden. Für genauere Aussagen ist man, wie sich hier zeigt, durchaus auf die Ergebnisse technisch-physikalischer Prüfungen angewiesen.

II. Technisch – physikalische Methoden

1. Kornformbestimmung

Pro Gestein wurden zwei Stichproben zu 200 Körnern des Splittes im Anlieferungszustand und eine weitere Stichprobe nach Absieben von Unter- und Überkorn ausgemessen. (Proben a, b und c.) Die aus der Anwendung des ALGOL-Programmes erhaltenen Daten zeigten die folgenden Ergebnisse:

a) Kornformgruppen nach ZINGG (1935) und DE QUERVAIN (1950)

Im Fall I sind die Kornformen definiert als

kubisch:	$b/a > 2/3$	$c/b > 2/3$	} nichtkubisch
flach:	$b/a > 2/3$	$c/b < 2/3$	
flachstenglig:	$b/a < 2/3$	$c/b < 2/3$	
stenglig:	$b/a < 2/3$	$c/b > 2/3$	

Im Fall II als

kubisch:	$b/a > 2/3$	$c/b > 1/2$	} nichtkubisch
flach:	$b/a > 2/3$	$c/b < 1/2$	
flachstenglig:	$b/a < 2/3$	$c/b < 2/3$	
stenglig:	$b/a < 2/3$	$c/b > 2/3$	

Die Anzahl der Körner in diesen Gruppen wurde berechnet.

Es wurde eine Dreiecksdarstellung gewählt, in der flache und stenglige Körner zusammengefaßt werden. Aus Tabelle 10 und Abb. 29–31 ergibt sich eine relativ gute Übereinstimmung der Stichproben a und b. Die Übereinstimmung ist im Fall II besser als im Fall I und ebenfalls besser für die Zusammenfassung in drei Formkategorien. Für eine zuverlässige Mittelwertbildung wären allerdings viel mehr Stichproben nötig.

Die Stichproben c der Gesteine A, B, C, F, G sind besser kubisch als die Stichproben a und b. Im Unterkorn sind also mehr schlechte Kornformen vorhanden. Damit wird die Bedeutung des Einhaltens von Korngrößentoleranzen unterstrichen, wie dies in der Praxis zu Recht verlangt wird.

Für alle Darstellungsarten erhält man aber eine deutliche, ungefähr gleichbleibende Qualitätsreihenfolge. Die besten Formen hat das Gestein C, die schlechtesten das Gestein A. Die andern liegen in einem mittleren Bereich. B, F und D haben eher bessere, G und E eher schlechtere Formen, was in der Darstellung Fall II deutlicher zum Ausdruck kommt. Die petrographischen Gesteinsbezeichnungen wurden hier weggelassen, damit nicht der Eindruck erzeugt wird, daß die Petrographie von wesentlicher Bedeutung wäre. Die Kornform ist eine spezifische Eigenschaft des jeweils vorliegenden Splittmaterials und nicht der Gesteinsart.

Tabelle 10

Kornformen (Summe der 4 Formkategorien = 200)

Probe	Fall I kubisch	flach	flachst.	stengelig	Fall II kubisch	flach	flachst.	stengelig
Aa	35	89	48	28	82	42	48	28
Ab	37	98	31	34	84	51	31	34
Ac	39	99	34	28	87	51	34	28
Ba	41	87	31	41	86	42	31	41
Bb	53	90	29	28	101	42	29	28
Bc	57	105	18	20	122	40	18	20
Ca	77	77	25	21	124	30	25	21
Cb	66	84	16	34	121	29	16	34
Cc	75	91	12	22	139	27	12	22
Da	49	106	24	21	111	44	24	21
Db	53	95	27	25	106	42	27	25
Dc	48	100	27	25	115	33	27	25
Ea	50	82	33	35	97	35	33	35
Eb	48	87	29	36	99	36	29	36
Ec	55	87	29	29	95	47	29	29
Fa	54	90	28	28	104	40	28	28
Fb	52	92	31	25	97	47	31	25
Fc	62	89	24	25	117	34	24	25
Ga	45	73	44	38	83	35	44	38
Gb	43	92	36	29	88	47	36	29
Gc	57	88	29	26	101	44	29	26

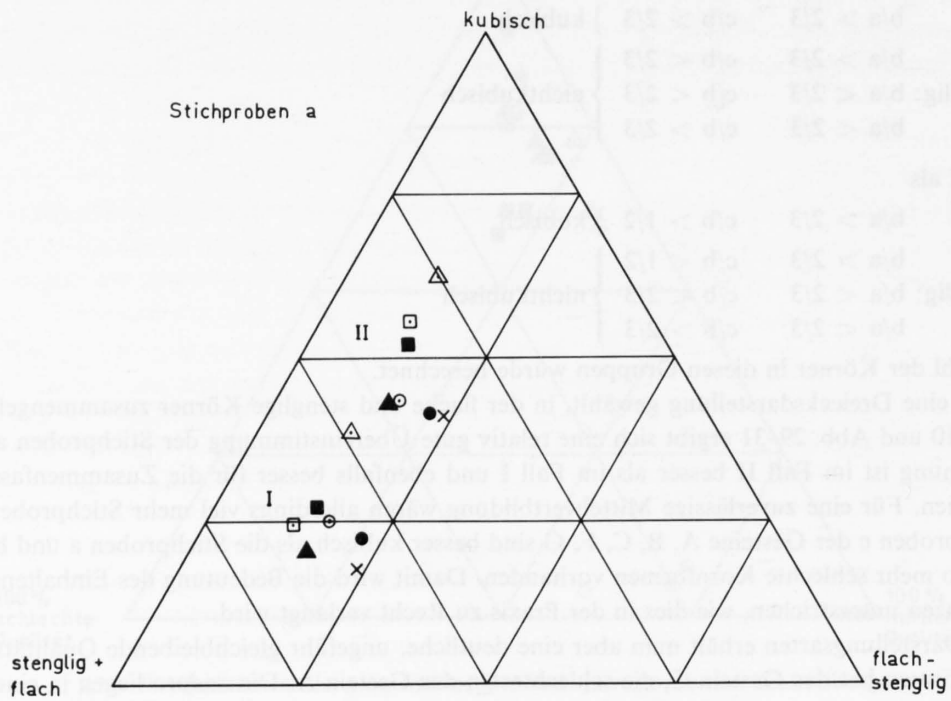


Abb. 29

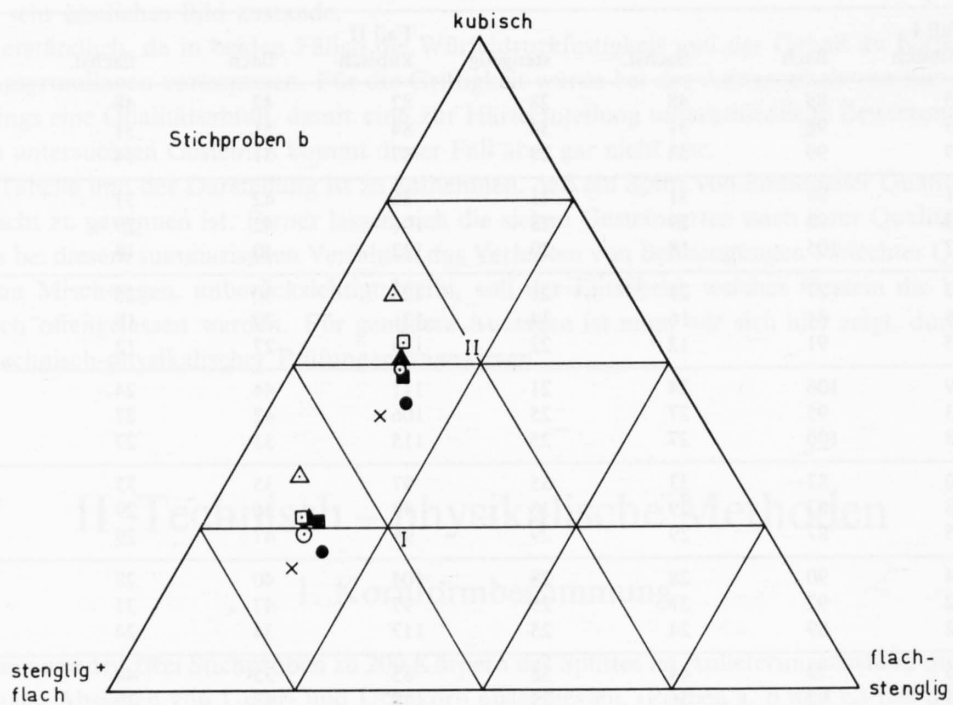


Abb. 30

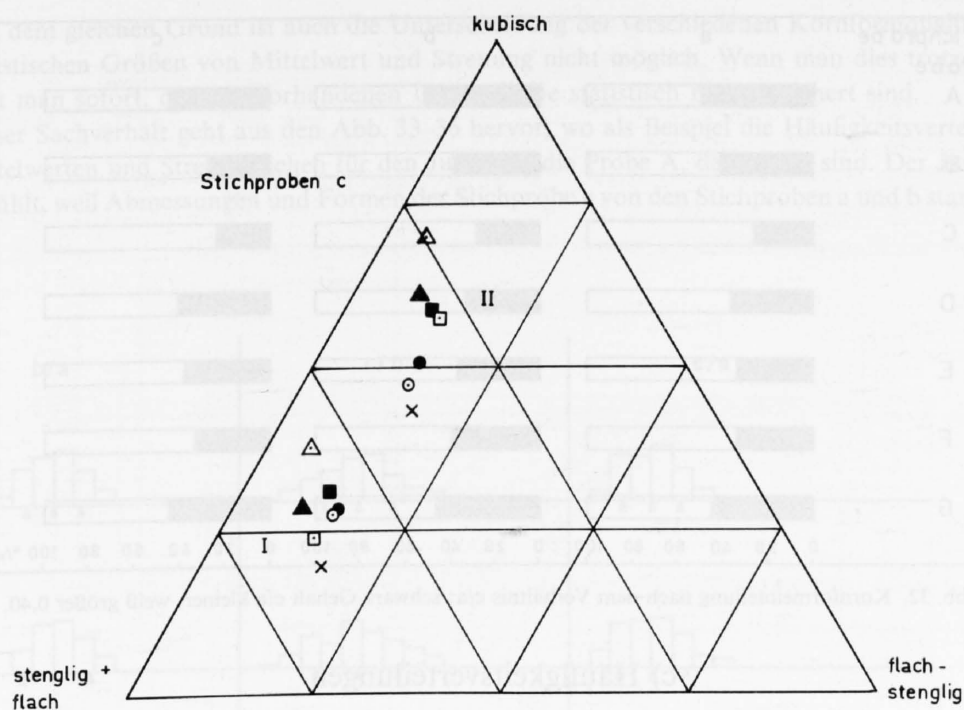


Abb. 31

Zur Berücksichtigung des Kornformeinflusses auf die Resultate der Druck-/Schlagversuche sind die Werte der Proben c zu verwenden.

b) Abgrenzung nach $c/a < 0,40$

In Tabelle 11 und Abb. 32 sind für alle drei Stichproben die Qualitätsreihenfolgen, wie sie im obigen Abschnitt auftraten, bestätigt. C bleibt beste Form, neben A hat auch G einen großen Anteil schlechter Formen. F, B, E und D liegen für die Stichproben c in dieser Reihenfolge von guten nach schlechteren Werten dazwischen, sind aber nicht wesentlich voneinander verschieden. Die Zingg'schen Verhältnisse liefern etwas detailliertere Angaben über die wirklich vorhandenen Formen. Zur Qualitätsbeurteilung scheint das Verhältnis c/a aber durchaus zu genügen.

In beiden Darstellungsarten kann eine zuverlässige Unterscheidung guter, mittlerer und schlechter Kornformqualitäten getroffen werden. Wie schon bemerkt, genügt die Zahl der Stichproben zur Berechnung von Mittelwerten, die etwa als Korrekturfaktoren der Zertrümmerungsgrade verwendet werden könnten, bei weitem nicht. Aus zeitlichen Gründen fällt das Ausmessen von mehr Stichproben hier und auch in der Praxis außer Betracht.

Tabelle 11

Anzahl der Verhältnisse $c/a < 0,40$ (von 200 Körnern)

Probe	A	B	C	D	E	F	G
a	98	81	52	73	69	69	91
b	103	76	55	66	73	78	93
c	89	71	47	81	76	66	90

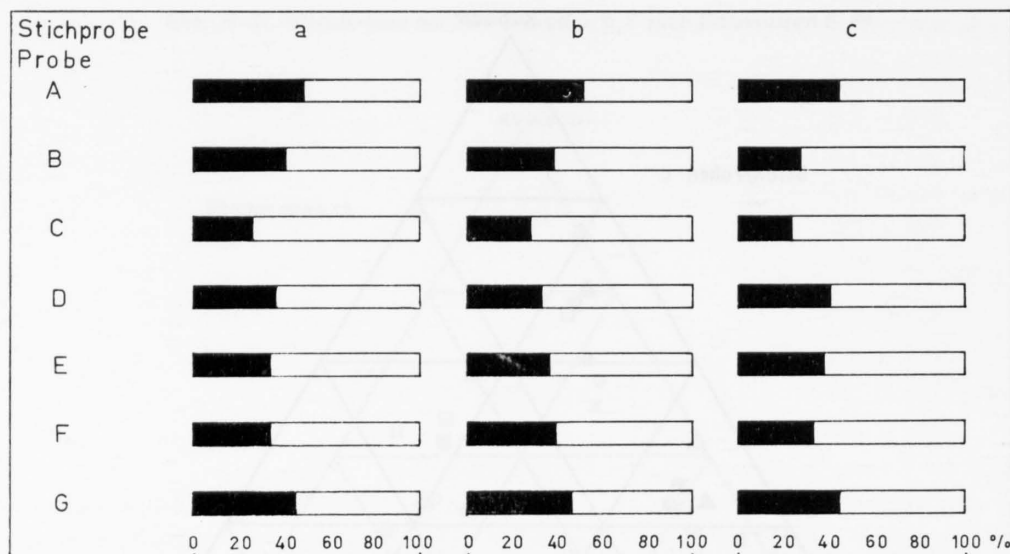


Abb. 32. Kornformteilung nach dem Verhältnis c/a ; schwarz Gehalt c/a kleiner, weiß größer 0,40.

c) Häufigkeitsverteilungen

Aus den Häufigkeitsverteilungen der Einzelwerte von a , b , c , b/a , c/b , c/a , g/s , a^2b/v , $1,91 v/a^3$, c^3/v , c^2/b^2 und v/abc kann folgendes entnommen werden:

- Es entstehen für a , b , c , b/a , c/b und v/abc mehr oder weniger symmetrische Verteilungen, in grober Annäherung Normalverteilungen gleichend, g/s , a^2b/v , $1,91 v/a^3$, c^3/v , c^2/b^2 sind deutlich asymmetrisch verteilt.
- Die gleichwertigen Stichproben a) und b) zeigen eine recht gute Übereinstimmung der Verteilungen. Zur Berechnung gültiger Kenngrößen müßten wiederum mehr Stichproben vorhanden sein. Dann könnten die erhaltenen mit hypothetischen Verteilungen verglichen werden. Mit den vorhandenen Meßwerten ist dies offenbar wenig sinnvoll.

Abb. 33–36. Häufigkeitsverteilungen von Kornabmessungen und Kornformkoeffizienten für den Jurakalk; Stichproben a, b, c je untereinander angeordnet. Die schwarzen Pfeile geben Mittelwert und Streubereich ($\pm S$) an.

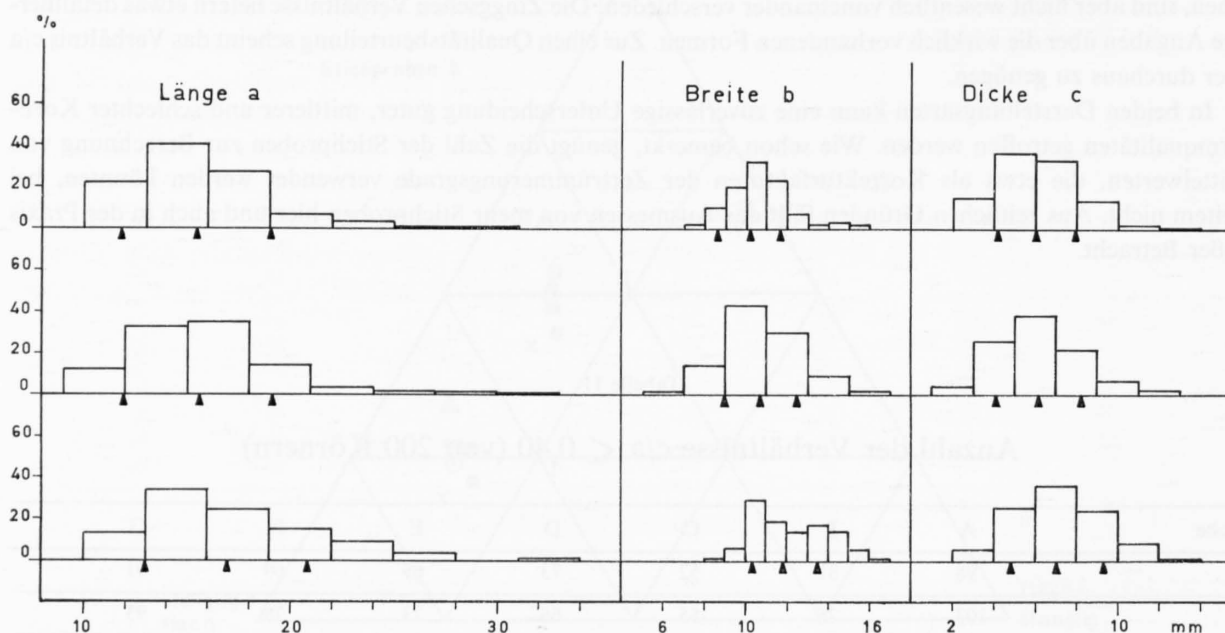


Abb. 33

- Aus dem gleichen Grund ist auch die Unterscheidung der verschiedenen Kornformqualitäten mit den statistischen Größen von Mittelwert und Streuung nicht möglich. Wenn man dies trotzdem versucht sieht man sofort, daß die vorhandenen Unterschiede statistisch nicht gesichert sind.
- Dieser Sachverhalt geht aus den Abb. 33–36 hervor, wo als Beispiel die Häufigkeitsverteilungen samt Mittelwerten und Streubereichen für den Jurakalk, die Probe A, dargestellt sind. Der Jurakalk wurde gewählt, weil Abmessungen und Formen der Stichprobe c von den Stichproben a und b stark abweichen.

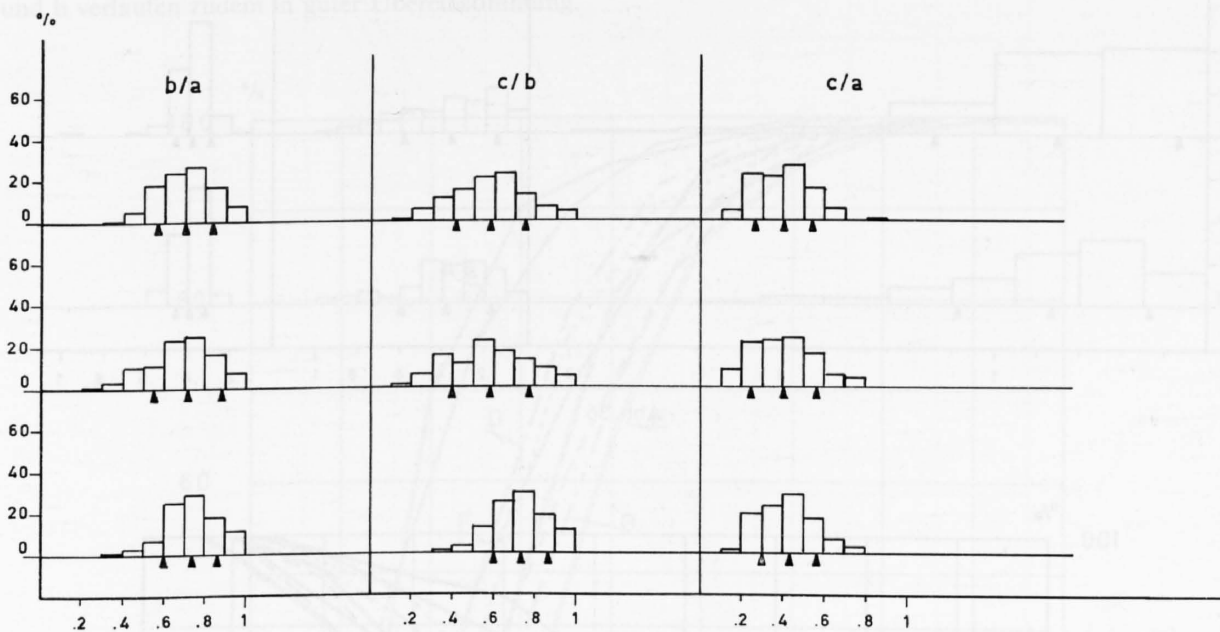


Abb. 34

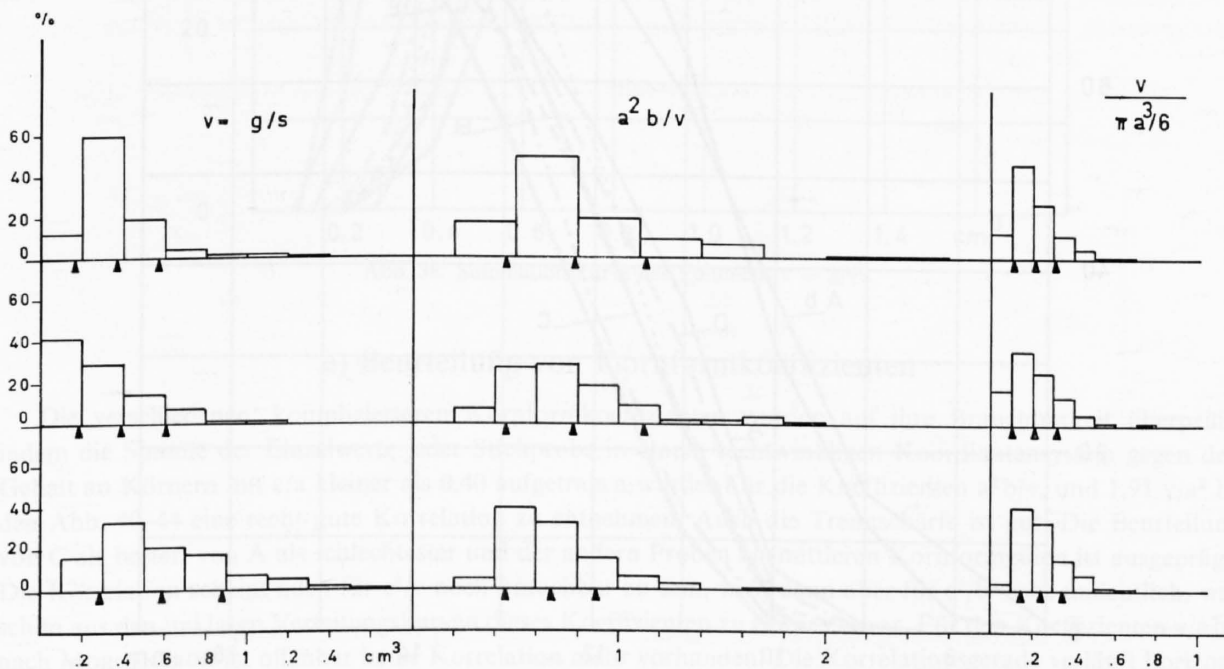


Abb. 35

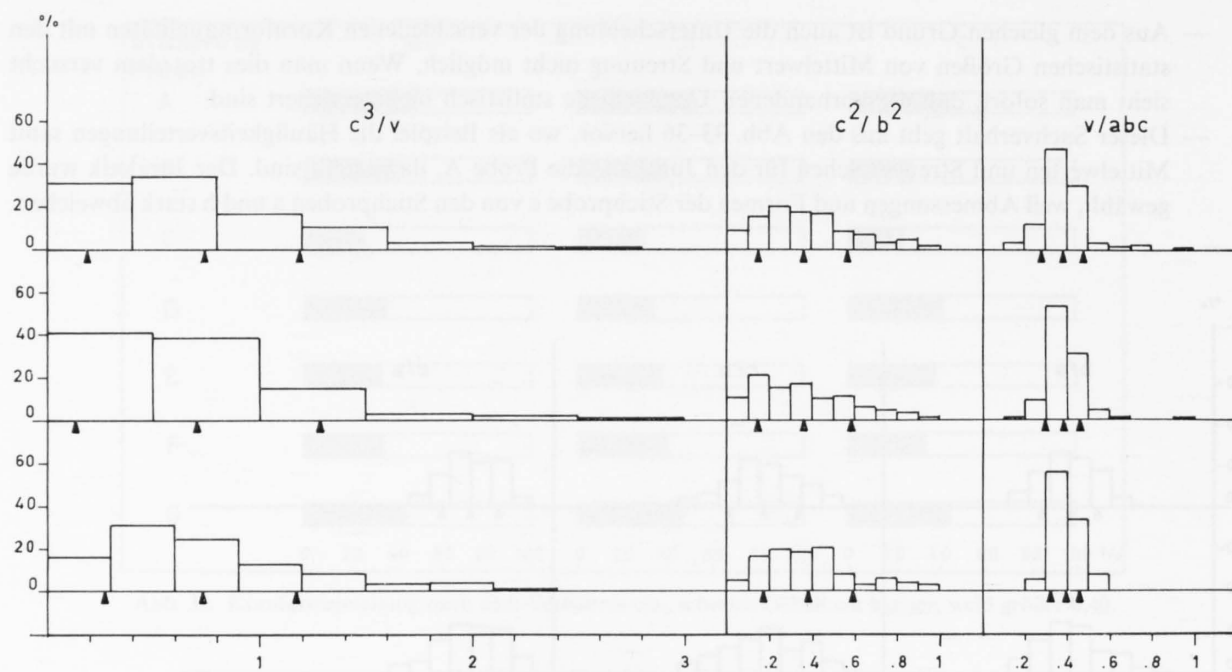


Abb. 36

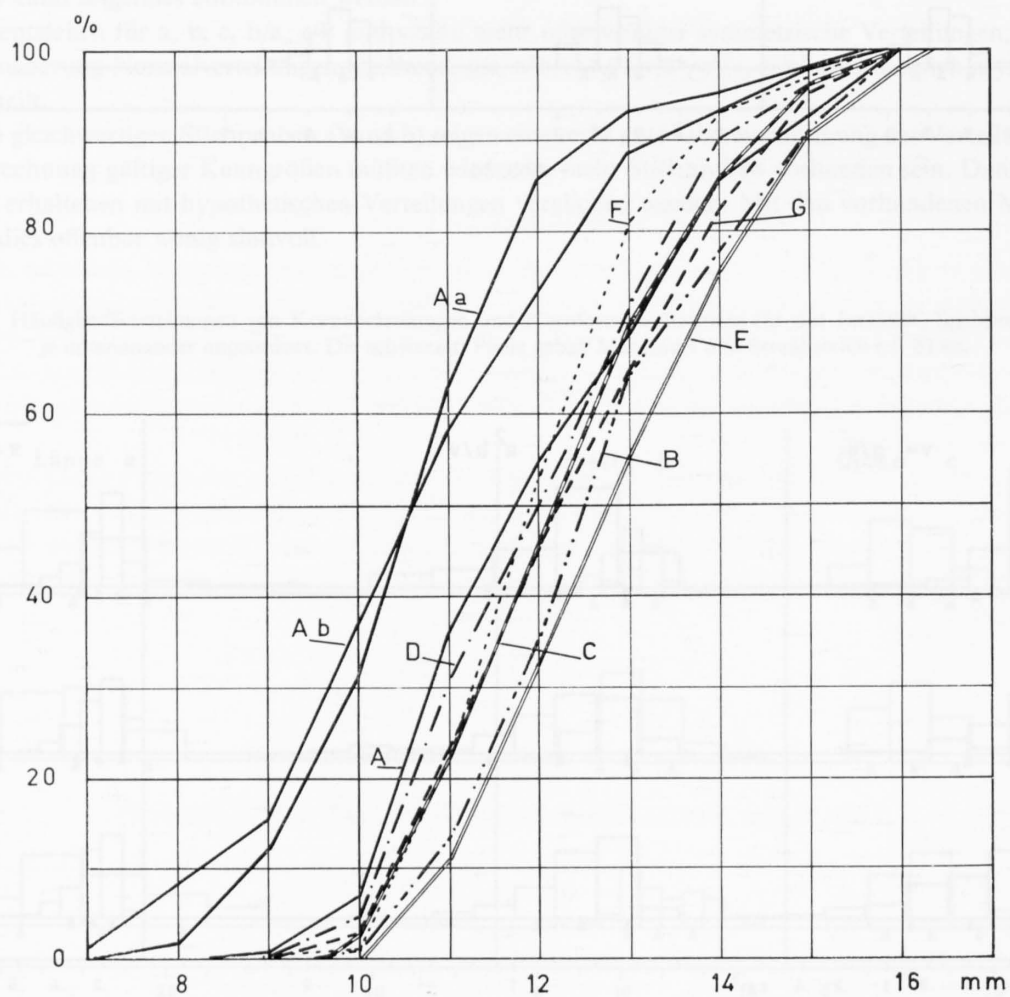


Abb. 37. Summationskurve der Breite b (Stichproben c , für Probe A auch a und b).

d) Korngrößenverteilungen

Aus den Summenkurven der Meßgröße b oder des Volumens g/γ_s , kann ein vernünftiges Bild der Korngrößenverteilung gewonnen werden, das im wesentlichen mit den Siebkurven der Fraktion 10/16 mm übereinstimmt, in einzelnen Bereichen wohl noch eine Verfeinerung liefert (Abb. 37–39). Zur genauen Abklärung der Beziehungen zwischen den Darstellungsarten müßten neben vermehrten Stichproben besonders auch viele Siebanalysen mit kleineren Fraktionsbreiten vorhanden sein. Für das Beispiel des Jurakalkes wird aber der Unterschied der Proben im Anlieferungszustand zu der Probe 10/16 mm sehr deutlich, die Kurven der Proben a und b verlaufen zudem in guter Übereinstimmung.

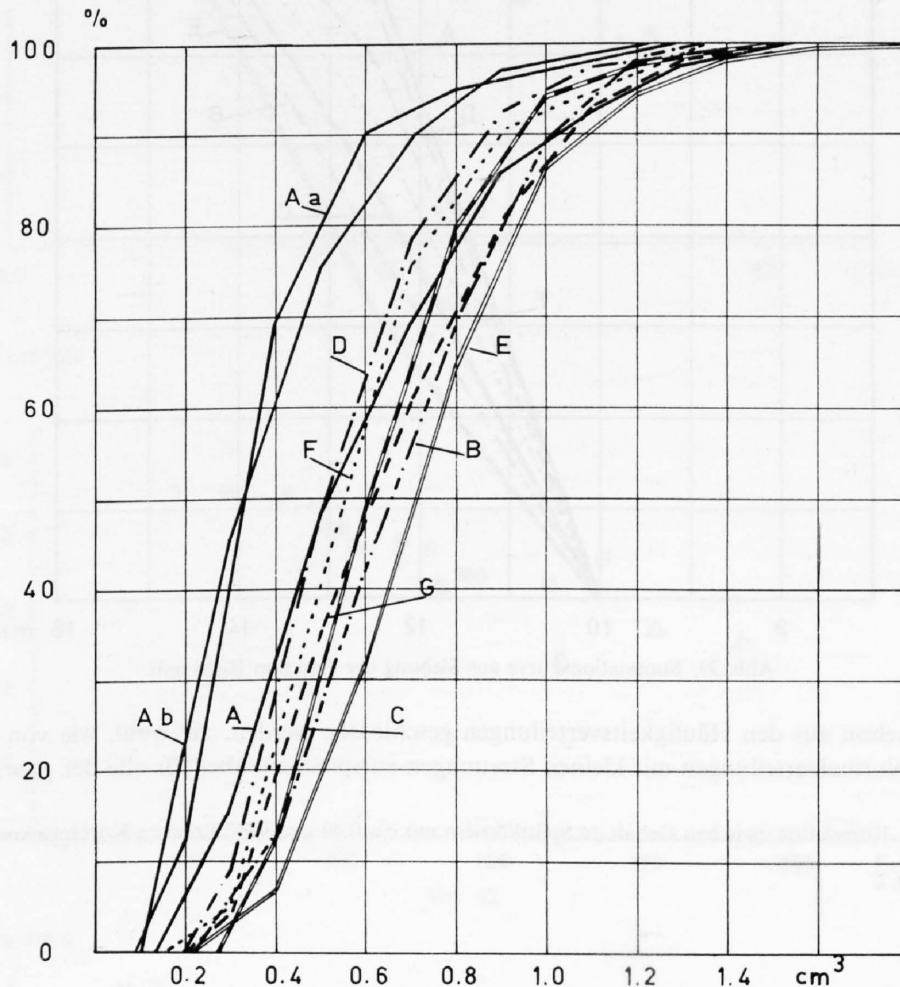


Abb. 38. Summationskurve des Volumens $v = g/\gamma_s$.

e) Beurteilung von Kornformkoeffizienten

Die verschiedenen, komplizierteren Kornformkoeffizienten wurden auf ihre Brauchbarkeit überprüft, indem die Summe der Einzelwerte jeder Stichprobe in einem rechtwinkligen Koordinatensystem gegen den Gehalt an Körnern mit c/a kleiner als 0,40 aufgetragen wurde. Für die Koeffizienten a^2b/v , und $1,91 v/a^3$ ist in den Abb. 40–44 eine recht gute Korrelation zu entnehmen. Auch die Trennschärfe ist gut. Die Beurteilung von C als bester, von A als schlechtester und der andern Proben als mittleren Kornformgüten ist ausgeprägt. Die Korrelation scheint auch für c^3/v noch brauchbar zu sein, wird dann aber für c^2/b^2 sehr undeutlich, was schon aus den unklaren Verteilungskurven dieses Koeffizienten zu erwarten war. Für den Koeffizienten v/abc nach MORGENBROD ist offenbar keine Korrelation mehr vorhanden. Die Korrelationsgerade verläuft horizontal, mit zunehmenden Gehalten an Körnern mit c/a kleiner als 0,40 tritt keine Veränderung des Koeffizienten

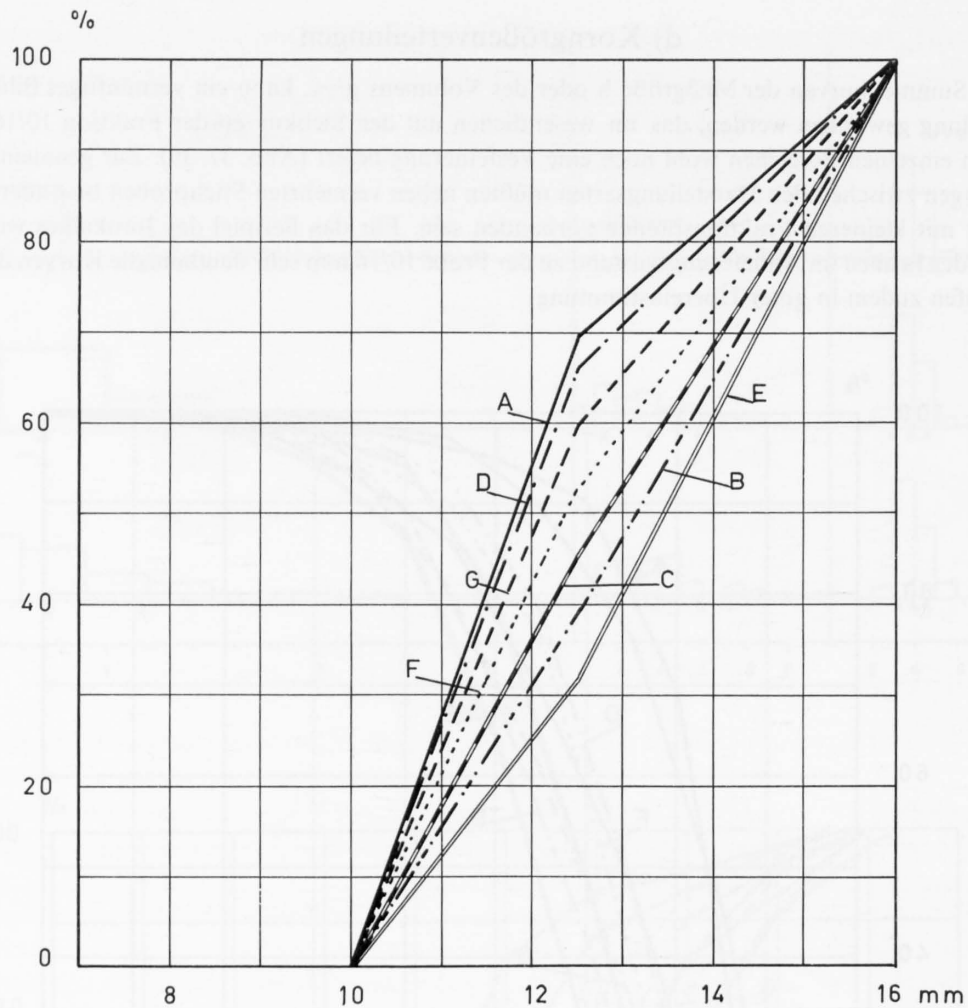


Abb. 39. Summationskurve aus Siebung der Fraktion 10/16 mm.

ein. Das kann schon aus den Häufigkeitsverteilungen geschlossen werden, die wohl, wie von MORGENBROD gezeigt wurde, Normalverteilungen mit kleinen Streuungen entsprechen, aber für alle der geprüften Gesteine

Abb. 40–44. Korrelation zwischen Gehalt an Splittkörnern mit c/a 0,40 und verschiedenen Kornformkoeffizienten.

% $c/a < 0.4$

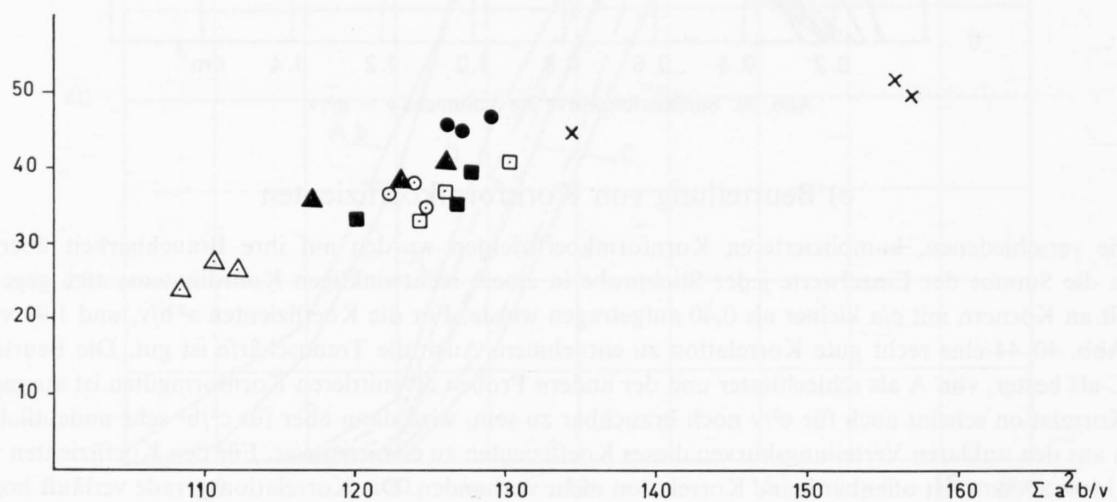
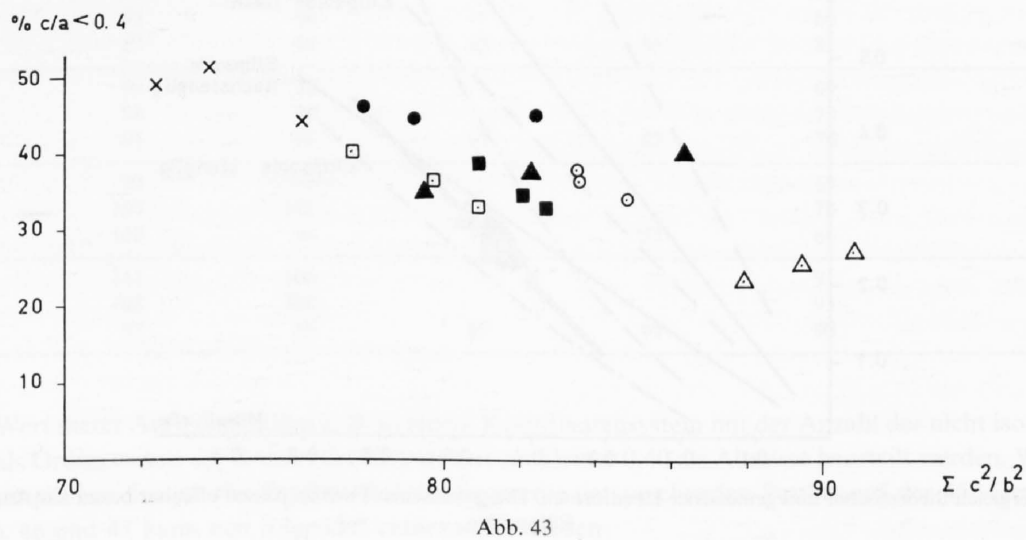
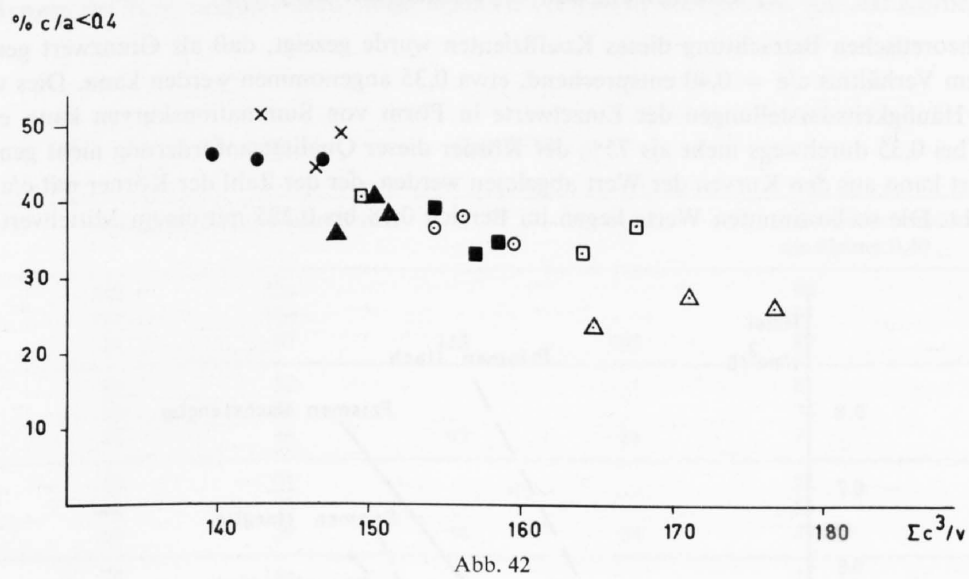
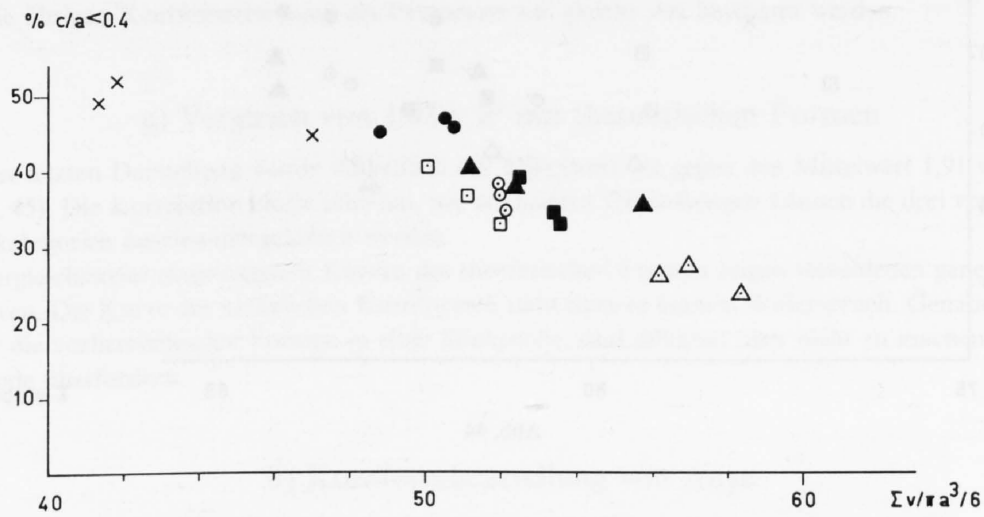
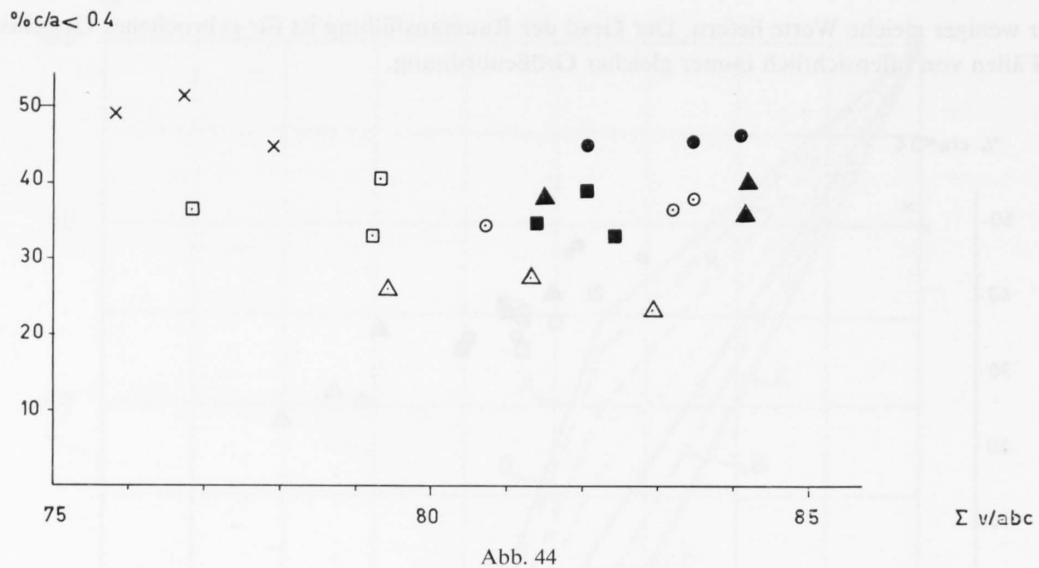


Abb. 40

mehr oder weniger gleiche Werte liefern. Der Grad der Raumaussfüllung ist für gebrochenes Gesteinsmaterial in vielen Fällen von offensichtlich immer gleicher Größenordnung.





f) Grenzwert des Koeffizienten $1.91 v/a^3$

Bei der theoretischen Betrachtung dieses Koeffizienten wurde gezeigt, daß als Grenzwert genügend/ungenügend, dem Verhältnis $c/a = 0,40$ entsprechend, etwa 0,35 angenommen werden kann. Dies war nun zu prüfen. Aus Häufigkeitsdarstellungen der Einzelwerte in Form von Summationskurven kann entnommen werden, daß bei 0,35 durchwegs mehr als 75% der Körner dieser Qualitätsanforderung nicht genügen.

Umgekehrt kann aus den Kurven der Wert abgelesen werden, der der Zahl der Körner mit c/a kleiner als 0,40 entspricht. Die so bestimmten Werte liegen im Bereich 0,18 bis 0,225 mit einem Mittelwert von 0,21.

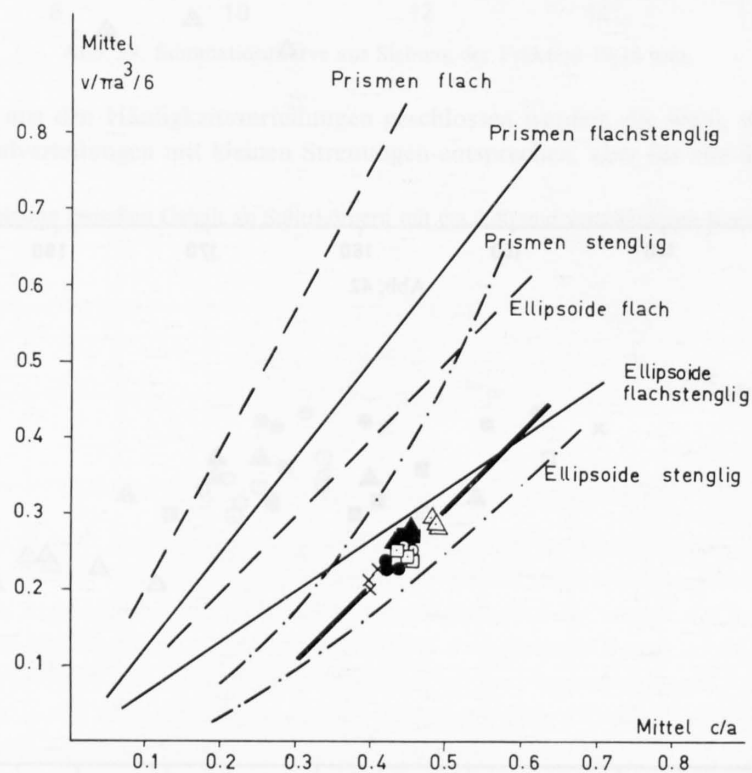


Abb. 45. Vergleich theoretischer und gemessener Kornformen. Die gemessenen Formen passen offenbar besser zur Annahme von Ellipsoiden.

Somit kann die Grenze genügend/ungenügend zu 0,20–0,22 festgelegt werden. Das Abweichen der Kornformen von theoretischen Formannahmen dürfte neben systematischen Meßfehlern die Ursache des kleineren Wertes sein.

Für die übrigen Koeffizienten kann ein Grenzwert auf gleiche Art bestimmt werden.

g) Vergleich von $1,91 \sqrt{v/a^3}$ mit theoretischen Formen

In einer letzten Darstellung wurde schließlich der Mittelwert c/a gegen den Mittelwert $1,91 \sqrt{v/a^3}$ aufgetragen (Abb. 45). Die Korrelation bleibt erhalten, wie bei andern Darstellungen können die drei vorkommenden Qualitätskategorien auseinandergehalten werden.

Die vergleichsweise eingetragenen Kurven der theoretischen Formen zeigen verschieden geneigte Geraden oder Kurven. Die Kurve der natürlichen Kornformen steht dazu in keinem Widerspruch. Genauere Angaben, etwa über die vorherrschenden Formen in einer Stichprobe, sind offenbar aber nicht zu machen und würden die Methode überfordern.

h) Kornformbeurteilung von Auge

Es wird eine Unterscheidung von isometrischen und nicht isometrischen Formen getroffen; in Tabelle 12 sind die Mengen der nicht isometrischen, ungenügenden Formen in Stichproben von 200 Körnern angegeben.

Tabelle 12

Probe	Auszahlungen nicht isometrisch				berechnete Verhältnisse c/a kleiner 0,40
A a	113	124			98
b	114	124			103
c	81	97	113	103	89
B a	83	82			81
b	82	84			76
c	81	86	93	84	71
C a	56	64			52
b	62	72			55
c	69	59	54	64	47
D a	74	114			73
b	83	90			66
c	87	89	85	85	81
E a	99	98			69
b	88	94			73
c	91	96	97	87	76
F a	90	98			69
b	103	101			78
c	108	91	78	87	66
G a	111	108			91
b	108	106			93
c	97	89	85	95	90

Der Wert dieser Aufteilung kann z. B. in einem Koordinatensystem mit der Anzahl der nicht isometrischen Körner als Ordinate und der Anzahl der Körner mit c/a kleiner 0,40 als Abszisse beurteilt werden. Wenn beide Bestimmungsarten das gleiche Ergebnis liefern, liegen die entsprechenden Punkte auf der 45°-Geraden. Aus den Abb. 46 und 47 kann nun folgendes entnommen werden:

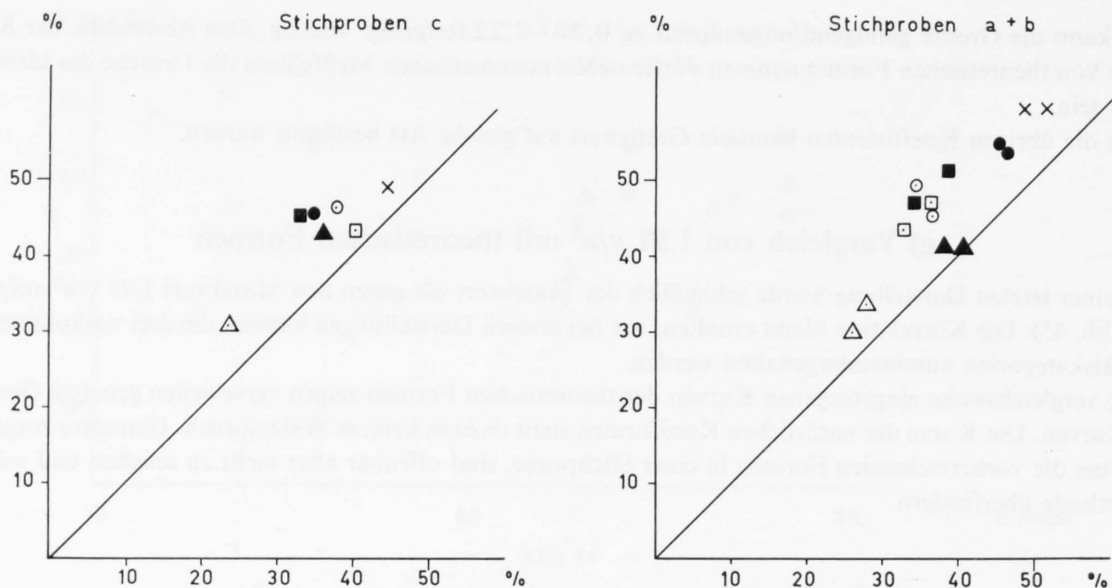


Abb. 46 und 47. Kornformbestimmung nach Augenschein und durch Messen des Verhältnisses c/a .

Ordinate: Gehalt nichtisometrisch nach Augenschein.

Abszisse: Gehalt nichtisometrisch gemessen und berechnet.

- die Werte wiederholter Auszählungen gleicher Stichproben streuen ziemlich stark;
- sie liegen aber durchwegs über der 45°-Geraden, d. h., die Beurteilung ist strenger als diejenige durch das Verhältnis c/a kleiner als 0,40. Es ist aber zu beachten, daß zweifelhafte Fälle immer zur Gruppe der nicht isometrischen Formen geschlagen wurden.
- Als schlechteste bzw. beste Formen erweisen sich auch hier die Proben A und C, Jurakalk und helvetischer Kieselkalk. Die andern Gesteine liegen dazwischen, können aber nicht deutlich voneinander unterschieden werden. Die Qualitätseinreihung dieser mittleren Gruppe war aber auch bei den andern Darstellungsarten mehr oder weniger zufällig.
- Die Formveränderung von den Proben im Anlieferungszustand zu den Proben c), Unter- und Überkorn abgesiebt, ist nur für den Jurakalk deutlich ausgebildet, kann etwas weniger ausgeprägt auch noch für den Amphibolit festgestellt werden. Dies war auch bei den andern Beurteilungsarten der Fall. Beide Proben enthielten den größten Anteil an Unterkorn (siehe auch S. 89).
- Auf Grund dieser Beobachtungen kann geschlossen werden:

Die Beurteilung nach Augenschein ist durchaus brauchbar; deutlich schlechte oder gute Formqualitäten werden ohne weiteres als solche erkannt. Wegen des geringen Zeitbedarfes können gleiche Stichproben leicht mehrere Male untersucht werden, was der wichtigste Vorteil gegenüber den messenden Methoden ist. Es können die für das Verhältnis c/a geforderten Anforderungen auch hier als maßgebend betrachtet werden. Infolge der von Auge strengeren Beurteilung geht man so geringe Risiken ein.

Die Beurteilung hängt natürlich von persönlichen Einflüssen ab. Für praktische Beurteilungen müssen deshalb Vergleichsproben mit bekannten, ausgemessenen Formverhältnissen zur Verfügung stehen, die im Rahmen einer Prüfserie vorteilhaft am Anfang und am Schluß von Auge zu beurteilen sind. Nach Möglichkeit sollten die gleichen Proben auch von mehreren Personen geprüft werden. Wenn dann noch Unsicherheiten bestehen und wenn genauere zahlenmäßige Angaben verlangt werden, sind natürlich wieder messende Methoden anzuwenden.

i) Schlußfolgerungen

In diesen Betrachtungen beschränkten wir uns teils auf einzelne Gesteinsproben und teils auf einzelne Kornformwerte. Neue Resultate sind aber nicht zu erwarten, wenn die Diskussion auf alle Proben und Koeffizienten erstreckt wird.

Die Verwendung der verschiedenen Kornformkoeffizienten ist durchaus möglich, doch zwingt sich ein Ersatz der Verhältnisse b/a , c/b und c/a nicht auf, die ohne Zweifel die objektivste Formbeurteilung ergeben.

In jeder Splittprobe werden schlechte Formen vorkommen. Mit der Angabe der Menge der Körner, deren Abmessungen bestimmte Anforderungen nicht erfüllen, läßt sich mehr anfangen als mit dem Mittelwert eines komplizierteren, weniger anschaulichen Koeffizienten, dessen Definition zum vornherein nicht eindeutig ist.

2. Druck- und Schlagversuche

Die Ergebnisse der Versuche an der EMPA (Versuchsbericht Nr. 36 484) können der Tabelle 13 entnommen werden. Es sind die Mittel von je zwei Versuchen aufgeführt, die in den meisten Fällen um nicht mehr als 0,5 Einheiten voneinander abweichen. Zusätzlich wird das Verhältnis der Zertrümmerungsgrade von Druck- zu Schlagversuch angegeben, das etwa als Zähigkeit bezeichnet wird.

Tabelle 13

Ergebnisse der Druck- und Schlagversuche an Splittproben

Probe	Zertrümmerungsgrad		Zähigkeit
	Druck (Zd)	Schlag (Zs)	
A. Jurakalk	24,0	25,8	0,93
B. Glaukonitsandstein	12,8	15,0	0,85
C. Helvet. Kieselkalk	12,7	13,0	0,98
D. Präalpinen Kieselkalk . . .	14,6	15,4	0,95
E. Gneise	25,2	30,3	0,83
F. Flyschsandstein	13,0	16,0	0,81
G. Amphibolit	13,7	17,9	0,77

Es zeichnet sich eine deutliche Gruppierung ab. Jurakalk und Gneise weisen die schlechtesten Werte auf, die übrigen Gesteine liegen wesentlich tiefer nahe zusammen. Glaukonitsandstein und helvetischer Kieselkalk können etwas besser als präalpiner Kieselkalk, Flyschsandstein und Amphibolit taxiert werden, die Unterschiede sind eher zufälliger Art. Die Zähigkeit läßt eine analoge Einteilung nicht zu, da der Begriff der Zähigkeit keinem einfachen Sachverhalt entspricht.

Die gewonnenen Zahlen sind als relative Qualitätsaussagen zu werten. Sie sind, als Ergebnisse einer Gebrauchsprüfung, nicht etwa typisch für die verschiedenen Gesteinsarten, sondern charakterisieren nur gerade das wirklich vorhandene und geprüfte Splittmaterial. Die Zertrümmerungsgrade resultieren aus der Summe der Einflüsse sämtlicher petrographischer, morphologischer und physikalischer Gesteinseigenschaften und der Eigenschaften des Splittaufenwerkes, natürlich auch der Versuchsanordnung.

Die Einflüsse einzelner Eigenschaften können nun teilweise abgeschätzt werden. Es ist dies vor allem für die Kornform wichtig. Zu diesem Zweck wurden ältere EMPA-Versuche durchgesehen (EMPA-Bericht Nr. 10 669, 1957, DE QUERVAIN und HALLER, 1959). Daraus konnte entnommen werden, daß sich bei Erhöhung des Gehaltes an Splittkörnern mit c/a kleiner als 0,40 um 10% die Zertrümmerungsgrade für Druck- und Schlagversuch um etwa 1 Einheit erhöhen, wobei gleich zu bemerken ist, daß diese Annahme eine grobe Annäherung bedeutet. Die Probe mit den besten Formen enthält 23,5% nichtkubische Körner. Es wird hier eine Reduktion der Zertrümmerungsgrade für alle Proben auf einen Gehalt von 20% ungenügender Splittkörner vorgenommen, in der Annahme, daß dieser Wert für gewöhnliche Splittlieferungen durch geeignete Maßnahmen relativ leicht erreicht werden kann und verlangt werden darf. Die reduzierten Zertrümmerungsgrade sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14

Reduzierte Zertrümmerungsgrade

Probe	Zertrümmerungsgrad		Zähigkeit
	Druck	Schlag	
A	21,55	22,35	0,97
B	11,25	13,45	0,84
C	12,35	12,65	0,98
D	12,55	13,35	0,94
E	23,4	28,5	0,82
F	11,7	14,7	0,80
G	11,2	15,4	0,73

A und E weisen wiederum schlechte Werte auf, die übrigen Proben liegen nahe zusammen. Die Proben mit größeren Differenzen von Druck- und Schlagversuch (oder geringerer Zähigkeit) dürften von etwas schlechterer Qualität sein. Es ist dies für die Proben G und F der Fall.

Eine weitere Reduktion kommt nun noch für die Korngröße in Frage. Hier zeigten die älteren genannten Versuche, daß wesentliche Veränderungen der Zertrümmerungsgrade ziemlich stark verschiedene Korngrößen erfordern. Für die vorliegenden Proben variiert die Korngröße in einem kleinen Bereich, Änderungen der Zertrümmerungsgrade von vielleicht 0,1–0,3 Einheiten bewirkend, die deutlich unter der Meßgenauigkeit der Versuche liegen. Der Korngrößeneinfluß kann hier gegenüber dem Einfluß der Kornform vernachlässigt werden.

Die reduzierten Zertrümmerungsgrade sind eher ein Abbild eigentlicher Gesteinseigenschaften, besonders der immer noch komplizierten Festigkeitseigenschaften oder z. B. der Gesteinshärte. Die erfahrungsmäßige Qualitätsbeurteilung wird vollauf bestätigt. Jurakalk und Gneise sind von schlechter, Kieselkalke, Sandsteine und Amphibolite von guter Qualität, je unter Berücksichtigung der im Splitt stets vorhandenen minderwertigen Gesteinsvarietäten.

Mit den wenigen ausgeführten Bestimmungen können Korrelationen zwischen Schüttraumgewichten und Kornformwerten oder an dieser Stelle mit Zertrümmerungsgraden nicht aufgezeigt werden, obwohl sie theoretisch durchaus vorhanden sind. (Schüttraumgewichtsbestimmungen im nächsten Abschnitt).

Abschließend halten wir hier fest, daß keine Größe so typisch für die Eigenschaften des Splithaufenwerkes ist wie der Zertrümmerungsgrad. Seine Bestimmung liefert immer wertvolle Anhaltspunkte über das Rohmaterial für Beläge und wird mit gutem Grund auch in neuen Publikationen gewünscht (GRUENBAUM, 1967).

Über Splittfestigkeitsprüfungen an Kalksteinen, Grauwacken und Basalt berichten BRAND, VOSS, ZICHER (1966), wobei vor allem verschiedene Körnungen berücksichtigt wurden, daneben aber auch die Kornformen. Zur Würfeldruckfestigkeit besteht auch hier keine Verbindung.

3. Raumgewichtsbestimmungen an Gesteins- und Splittproben

a) Gesteinsproben

Nach den auf Seite 44 gegebenen Definitionen wurde das Raumgewicht und das scheinbare spezifische Gewicht mit H_2O und CCl_4 als Auftriebsflüssigkeiten, sowie das spezifische Gewicht nach dem Pyknometerverfahren bestimmt. Die Proben der Raumgewichtsbestimmung wurden für die Pyknometermethode pulverisiert. Tabelle 15 gibt eine Aufstellung der geprüften Proben:

Probenbezeichnungen für Raumgewicht und spez. Gewicht

Tabelle 15

A12	Jurakalk mit feinen Inhomogenitäten
A25	homogener Jurakalk
B19	Schwarzer Schiefer des Gault
B22	quarzreicher, heller Sandstein
B25	dunkler Glaukonitsandstein
C1	Kieselkalk, intensiv mit Kalzitklüften durchsetzt
C3	Schwarzer Kieselkalkschiefer
D3	Spätiger Liaskalk
D10	Schwarzer Schiefer
D15	Normaler Liaskieselkalk
E1	Augengneis, grobkörnig
E12	Feinkörniger Gneis
E18	Glimmerreicher Schiefer
F1	Feinkörniger Flyschsandstein
F7	Grobkörniger Flyschsandstein
F10	Feinkörniger, relativ glimmerreicher schiefriger Sandstein
F17	Vorwiegend schwarzer Schiefer
G7	Granatarmer Amphibolit
G12	Gebänderter Amphibolit
G25	Granatreicher Amphibolit

Die Probenbezeichnungen stimmen mit den Dünnschliffbezeichnungen überein. Mit diesen Gesteinen sind die wichtigsten in den Stichproben vorkommenden Varietäten berücksichtigt. Sie konnten zur Volumenberechnung für die Kornformen benützt werden.

Die Meßergebnisse zeigen, daß die Genauigkeit zur Kornvolumenberechnung genügt. Raumgewicht wie auch das spezifische Gewicht genügen zur Gesteinscharakterisierung, nicht aber zur Berechnung der Porosität.

Tabelle 16

Raumgewicht und spez. Gewicht von Einzelstücken

Probe	Raumgewicht	Mittel	spez. Gewicht	Mittel
A12	2,68/2,69/2,68	2,68	2,72/2,73	2,73
A25	2,67/2,69/2,69	2,68	2,70/2,71	2,71
B19	2,70/2,70/2,70	2,70	2,72/2,74	2,73
B22	2,64/2,64/2,64	2,64	2,66/2,66	2,66
B25	2,70/2,71/2,71	2,71	2,72/2,74	2,73
C3	2,71/2,71/2,71	2,71	2,71/2,72	2,72
C9	2,70/2,70/2,70	2,70	2,72/2,72	2,72
C19	2,70/2,71/2,69	2,70	2,72/2,71	2,72
D3	2,68/2,70/2,67	2,68	2,74/2,70	2,72
D10	2,66/2,65/2,66	2,66	2,71/2,70	2,71
D15	2,72/2,71/2,71	2,71	2,72/2,74	2,73
E1	2,61/2,62/2,61	2,61	2,70/2,70	2,70
E12	2,58/2,55/2,57	2,57	2,68/2,66/2,69	2,68
E18	2,65/2,66/2,65	2,65	2,69/2,71	2,70
F1	2,67/2,67	2,67	2,67/2,68	2,68
F7	2,68/2,67/2,68	2,68	2,72/2,72	2,72
F10	2,65/2,63/2,64	2,64	2,68/2,70	2,69
F17	2,70/2,68/2,69	2,69	2,69/2,71	2,70
G7	3,15/3,14/3,15	3,15	3,13/3,18	3,16
G12	3,09/3,07/3,10	3,09	3,10/3,12	3,11
G25	3,28/3,28/3,29	3,28	3,29/3,29	3,29

Absolute wie scheinbare Porosität sind aber bei allen Gesteinen sehr gering. Auf die Wiedergabe der scheinbaren spezifischen Gewichte kann verzichtet werden. Sie liegen immer sehr nahe beim spezifischen Gewicht selber.

Aus den Werten (Tabelle 16) ist ersichtlich, daß die quarzreichen Varietäten am tiefsten liegen. Die verschiedenen Varietäten einer Gesteinsart unterscheiden sich in der Regel nur wenig. Die Ergebnisse stimmen auch mit Literaturwerten gut überein. Hervorzuheben sind die Amphibolite mit ihren, durch den Granatgehalt verursachten, sehr hohen Werten. Der stark variierende Granatgehalt bewirkt auch große Unterschiede innerhalb der Amphibolite selber.

b) Bestimmungen an Splittproben 10/16 mm

Bei genau gleichem Verfahren bietet hier die kompliziertere Aufhängevorrichtung für die Auftriebswägung, ein Drahtkorb, neue Fehlerquellen, die durch die größere Probemenge aufgehoben werden können. Die Proben von 500–600 g sind von ähnlicher Größenordnung wie die Stichproben für die Kornformbestimmung.

Aus dem Feinanteil des Produktes der Druck-/Schlagprüfungen wurde eine Probe für eine Pyknometerbestimmung entnommen. Die so bestimmten spezifischen Gewichte liegen nahe bei den Werten der Einzelstücke (Abschnitt a). Eine Abweichung erhält man nur bei den Amphiboliten. Sie wird durch den relativ großen Gehalt an Kalk- und Gneiskörnern verursacht. Diese Gesteine nehmen im Feinanteil einen größeren Prozentsatz ein, da sie im Druck-/Schlagversuch leichter zerfallen als die Amphibolite. Das spezifische Gewicht wird deshalb kleiner als das Raumgewicht (Tabelle 17).

Tabelle 17

Raumgewicht und spez. Gewicht an Splittproben bestimmt

Gestein	Raumgewicht	spez. Gewicht
A. Jurakalk	2,68	2,71
B. Glaukonitsandstein	2,65	2,68
C. Kieselkalk Kreide	2,68	2,71
D. Kieselkalk Lias	2,68	2,71
E. Gneise	2,60	2,69
F. Flyschsandstein	2,64	2,71
G. Amphibolit	2,99	2,98 (!)

Die wenig von den Bestimmungen an Einzelproben abweichenden Werte können direkt in die Kornvolumenberechnungen übernommen werden. Es ist zu bemerken, daß bei diesen geringen Unterschieden zwischen Raumgewichten und spez. Gewichten eine Qualitätsbeurteilung nicht möglich ist.

Dies sollte anhand der Schüttraumgewichte möglich sein. Die an der EMPA im würfelförmigen 4-l-Gefäß bestimmten Schüttraumgewicht sind der Vollständigkeit halber in Tabelle 18 angegeben. Die auf Seite 46 diskutierten Methoden konnten leider nicht angewendet werden, weshalb über die Zusammenhänge mit der Qualität des Haufenwerks keine weiteren Aussagen gemacht werden können.

Tabelle 18

Schüttraumgewichtsbestimmung

Gestein	Schüttraumgewicht (kg/dm ³)
A. Jurakalk	1,525
B. Glaukonitsandstein	1,541
C. Kieselkalk Kreide	1,572
D. Kieselkalk Lias	1,555
E. Gneise	1,526
F. Flyschsandstein	1,583
G. Amphibolit	1,555

Der Kieselkalk als Probe mit den besten Kornformen hat erwartungsgemäß das höchste Schüttraumgewicht. Für die übrigen Gesteine sind die Beziehungen zur Kornform aber nicht mehr klar. Es sind zuwenig Bestimmungen vorhanden.

4. Polierversuche

a) Auswahl der Proben

In der Praxis soll der Aufbau eines Probekörpers der petrographischen Zusammensetzung der Splittprobe entsprechen. Um Einflüsse der Petrographie feststellen zu können, wurden hier besondere Splittvarietäten herausgelesen. Es kam dies nur für Varietäten, die zu 10–20% im Splitt vertreten waren, in Frage, da für die Herstellung der Prüfkörper ziemlich große Splittmengen erforderlich sind und sich nicht alle Körner in die Formen einpassen lassen. Folgende Proben wurden verwendet:

- A1: gewöhnlicher Jurakalk
- B1: schiefrige Glaukonitsandsteine bis schwarze Schiefer
- B2: Glaukonitsandstein, normale Gamserschichten
- C1: normaler Kieselkalk der Kreide
- C4: Kornoberflächen mit Kalzit belegt
- D1: feinspätiger Kalk
- D2: feinkörniger, liasischer Kieselkalk
- E1: Gneis, relativ grobkörnig bis augengneisartig
- E3: Gneis, relativ feinkörnig
- F1: feinkörniger Flyschsandstein
- F2: grobkörniger Flyschsandstein
- F6: schwarzer Schiefer, sehr feinkörnig
- G2: Amphibolit, relativ feinkörnig mit hohem Granatgehalt
- G4: Amphibolit mit grobkörniger Hornblende, grobkörnigem Plagioklas und mehr oder weniger Granat

Aus dieser Zusammenstellung ist ersichtlich, daß für die Mineralkorngröße ein breiter Variationsbereich vertreten ist, innerhalb einzelner Gesteinsgruppen wie auch über alle Proben zusammengenommen. So sind fein- bis grobkörnige Sandsteine (Glaukonitsandstein—Flyschsandsteine) und fein- bis grobkörnige Kalke (Jurakalk—, feinspätiger Kalk—Kluftkalzitflächen) vertreten. Die Variation im Mineralbestand ist etwas beschränkter. Immerhin ändert sich z. B. der Quarzgehalt ziemlich stark oder sind auch Übergänge von Kalk zu Kieselkalk berücksichtigt.

b) Meßergebnisse und petrographische Daten

Tabelle 19

Probe	Griffigkeitswerte				Petrographische Daten			
	vor Versuch	Streubereich	nach Versuch	Streubereich	Quarzgehalt	Gehalt < 0,03	Grundmasse	log (Md · 10 ³)
A1 . . .	60,6	5,8	39,2	2,3	0,0	85,0	76,5	0,30103
B1 . . .	67,2	5,7	65,7	2,0	14,0	69,0	70,0	1,04139
B2 . . .	67,8	8,2	57,0	5,8	47,0	30,0	34,0	1,77815
C1 . . .	62,7	4,3	50,9	4,8	10,0	75,0	70,0	1,07918
C4 . . .	60,1	9,8	46,8	3,7	0,0	—	—	—
D1 . . .	63,1	5,8	39,2	2,3	0,0	18,0	15,0	2,20412
D2 . . .	60,5	8,8	49,3	2,0	7,5	75,0	56,0	1,00000
E1 . . .	72,9	9,3	60,8	5,3	30,0	1,0	0,0	2,69897
E3 . . .	70,6	4,8	60,1	4,5	35,0	2,0	0,0	2,44716
F1 . . .	69,9	4,2	60,4	4,6	60,0	15,0	15,0	2,00000
F2 . . .	70,3	4,5	59,1	2,2	48,0	9,0	8,5	2,26717
F6 . . .	59,2	2,6	61,5	0,6	40,0	50,0	43,0	1,36173
G2 . . .	61,1	7,2	50,9	4,9	5,0	50,0	54,0	1,17609
G4 . . .	67,4	5,6	52,8	3,7	5,0	25,0	27,0	2,30103

Als Griffigkeitswerte wurden einfach die Skalenteile des Pendelgerätes eingesetzt, zum Vergleich mit dem Reibungskoeffizienten μ sind sie mit 10^2 zu dividieren. Beste Werte sind um etwa 80, mittlere um etwa 50, und schlechteste Werte um etwa 30 anzunehmen.

Die petrographischen Daten sind notgedrungen stark gerundet und wurden durch Schliffauszählungen gewonnen. Da die Splittkörner der Polierproben nur makroskopisch verglichen werden konnten, ist beispielsweise der Quarzgehalt kaum für alle Körner einer Probe gleich. Der Anteil an feinkörniger Grundmasse oder an Bindemittel ist von ähnlicher Größenordnung wie der Gehalt an Mineralkorngrößen unter 0,03 mm. Damit ist eine Kontrollmöglichkeit vorhanden. Der Median wurde den Summationskurven (Seite 81/82) entnommen, in der Tabelle aber mit seinem Logarithmus wiedergegeben, weil damit eine bessere Korrelation erreicht werden konnte. Die Logarithmen (dekadische) gelten für den mit 10^3 multiplizierten Median. Kluftkalzitflächen und dünne Schieferlagen konnten mikroskopisch nicht erfaßt werden.

c) Beurteilung der Meßergebnisse

Werte vor dem Versuch:

Die grobkörnigen Proben der Gneise und Flyschsandsteine zeigen die höchsten Werte, um etwa 70, die feinkörnigen Proben von Jurakalk, Kieselkalk und schiefrigen Gesteinen die tiefsten. Amphibolite und Glaukonitsandsteine passen mehr oder weniger in dieses Bild, insbesondere zeigt der grobkörnige Amphibolit einen größeren Wert als der feinkörnige. Spatkalk und Kluftbeläge sind Ausnahmen. Für den weichen Kalkspat spielt die Mineralkorngröße offenbar keine Rolle mehr. Der Wert des schiefrigen Glaukonitsandsteines erscheint zu hoch, was vermutlich eine Folge der höckrigen, teilweise scharfkantigen Bruchflächenbeschaffenheit ist. Einzelne Vorsprünge wirken sich dann ungeachtet der petrographischen Eigenschaften hemmend auf den Lauf des Pendels aus.

Die Zusammenhänge scheinen für den Gehalt an Grundmasse oder für den Gehalt an Korngrößen unter 0,03 mm ähnlich zu sein. Auch für den Quarzgehalt zeigen sich gewisse Gesetzmäßigkeiten, die Proben mit Kluftkalzit und spätigem Kalk fallen hier nicht aus dem Rahmen. Quarz in Form des Kiesel skelettes spielt hingegen keine Rolle. Wird für die Kieselkalke der detritische Quarz gezählt, passen auch sie ins Bild.

Werte nach Versuch:

Es sind dies die maßgebenden, für die Qualitätsbeurteilung zu verwendenden Werte. Sie zeichnen sich schon durch kleinere Streubereiche aus. Verschiedene zufällige Inhomogenitäten werden im Verlauf des Versuchs ausgeschaltet. Nach den britischen Erfahrungen entsprechen die Werte nach Versuch auch einem Endzustand der Polierfähigkeit, die bei wesentlich längeren Polierwirkungen nicht mehr überschritten wird.

Die im obigen Abschnitt genannten Tendenzen bleiben auch hier durchaus erhalten. Gneise und Flyschsandsteine liefern wiederum die relativ höchsten Werte, der Jurakalk bleibt tiefster Wert. Glaukonitsandstein, Kieselkalke und ein Teil der schiefrigen Varietäten verhalten sich erwartungsgemäß. Ein gesetzmäßiger Einfluß von Korngröße und Quarzgehalt scheint vorhanden zu sein. Kluftkalzit und Spatkalke sind erheblich polierbar, was offensichtlich der Weichheit des Kalkspates zuzuschreiben ist. Der tiefe Wert des feinkörnigen Amphibolites ist verständlich, weniger der des grobkörnigen. Er ist aber auch bei diesem der Anteil an feinkörniger Grundmasse, in Form des diablastischen Grundgewebes, recht hoch, weshalb sich ja auch die Kornverteilungskurve über einen weiten Bereich erstreckt. Das Grundgewebe ist gut polierbar, was durch die harten Einsprenglinge von Hornblende und Granat offenbar nicht verhindert werden kann.

Ein bemerkenswertes Resultat liefert der schwarze Schiefer aus dem Flyschsandstein, der nach dem Versuch einen höheren Wert zeigt. Das kann nur dadurch erklärt werden, daß die Korngrößen des Schiefers kleiner sind als diejenigen des Schleifmittels. In der Tat sind diese Schiefer extrem feinkörnig. Anstelle einer Politur findet eine Aufräuhung statt, die schon optisch wahrgenommen werden kann. Stellenweise sind die Schieferlagen so dünn, daß während des Versuches darunterliegende Sandsteine freigelegt werden. Dieser Vorgang hat sich aber nur bei einer Minderheit der Splittkörner abgespielt. Der Schiefer aus dem Glaukonitsandstein verhält sich übrigens ähnlich, der Wertabfall ist dort wohl vorhanden, aber sehr gering. Das Schleifmittel ist während des Polierens wenig wirksam. Man kennt eine ähnliche Erscheinung bei der Herstellung von Erzanschliffen, wo unter bestimmten Bedingungen ein Schleifmittel unwirksam bleibt oder eine Verschlechterung der Politur bewirkt.

Folgerungen:

Die Korngröße kann als Griffigkeitskriterium verwendet werden, wenn mehrere Mineralarten am Gesteinsaufbau beteiligt sind, die verschieden hart und verschieden spaltbar sein sollten.

Auch der Quarzgehalt kann als Kriterium verwendet werden, wenn seine kryptokristalline Form, wie im Kieselkalk, außer acht gelassen wird. Gesteine mit vorwiegend Quarz dürften allerdings kaum mehr gute Griffigkeitseigenschaften haben, das Optimum wird bei einer bestimmten Kombination von Quarz und weichen Mineralien liegen.

Auch Mineralkorngrößen und Gehalte an feinkörniger Grundmasse scheinen eine Griffigkeitsbeurteilung zu gestatten. Das Minimum der Griffigkeit fällt aber nicht mit den feinsten Korngrößen zusammen, sondern liegt ungefähr im Bereich der Korngrößen der verwendeten Schleifmittel.

In der Praxis wird auf die Ermittlung der Griffigkeit vor dem Versuch verzichtet. Das ist zulässig, zweifelhafte Fälle bei sehr feinem Korn ausgenommen.

Eine erste Beurteilung der Griffigkeitseigenschaften anhand petrographischer Befunde scheint durchaus möglich zu sein.

An dieser Stelle ist auf eine Untersuchung von MAAG (1967) einzugehen, der sich mit der Aufrauung glatt gewordener Betonbeläge beschäftigt hat. Er führte Versuche mit Anstrichen von Epoxydharzen, die mit Quarzsand vermischt wurden, aus und prüfte verschiedene Korngrößen des Quarzes auf ihre Griffigkeit. Diese nahm von feinen Körnungen (0,05 mm) bis zu einem Maximum bei etwa 0,5 mm zu, um für gröbere Körnungen wieder abzunehmen. Dies steht in keinem Widerspruch zu unseren Ergebnissen, da die Voraussetzungen verschieden sind. Maag hat eng begrenzte Korngrößenfraktionen verwendet, während bei allen von uns untersuchten Gesteinen immer ein weiter Größenbereich vertreten ist; ferner ist Quarz nie alleiniger Hauptgemengteil. Schließlich muß angenommen werden, daß in einer Mischung Epoxydharz/grobe Quarzkörnung der Anteil des Harzes an der untersuchten Fläche größer ist, als wenn nur oder zusätzlich feine Körnungen verwendet werden. Es kommt so die schlechtere Griffigkeit des Epoxydharzes mehr zur Geltung.

Nach Maag ist die Erkenntnis, daß derart feine Körnungen (0,1–0,5 mm) die optimale Griffigkeit ergeben, weitgehend neu. Es ist wohl kein Zufall, daß in den Versuchen mit Gesteinen die Gneise und Flyschsandsteine mit mittleren Korngrößen (Medianwerten) von 0,1–0,5 mm die besten Ergebnisse erzielt haben. Rein erfahrungsmäßig waren diese Gesteine schon immer für gute Griffigkeitseigenschaften bekannt.

d) Auswertung der Meßergebnisse durch einfache Statistik

Es wird versucht, die angedeuteten Zusammenhänge statistisch genauer zu belegen. So kann, unter der Annahme linearer Abhängigkeiten, die Regressionsgerade mit den jeweiligen petrographischen Daten als unabhängigen und den Griffigkeitswerten als abhängigen Variablen berechnet werden. Ein Rechenschema kann LINDER (1964) entnommen werden.

Zur Prüfung der Regression wird dann festgestellt, ob die Hypothese, daß der Regressionskoeffizient β der Grundgesamtheit gleich Null sei, zutreffe. Es ist das Verhältnis der Durchschnittsquadrate auf der Regression zu den Durchschnittsquadrate um die Regression F – verteilt mit den Freiheitsgraden $n_1 = 1$ und $n_2 = N - 2$. Der theoretische F -Wert wird einer Tabelle entnommen. Ist das berechnete F größer als das theoretische, kann die Hypothese $\beta = 0$ verworfen werden, zwischen den Größen besteht eine Regression.

Weiter sind dann die Vertrauensgrenzen zu berechnen, die für Punkte auf der Regressionsgeraden gelten. Man sagt damit aus, in welchen Bereichen der Griffigkeitswert, der zu einem bestimmten Wert des petrographischen Merkmals gehört, schwanken kann. Dazu muß eine bestimmte Sicherheitsschwelle gewählt werden.

Schließlich ist auch die Linearität der Regression zu prüfen, was durch Berechnung des Bestimmtheitsmaßes B geschehen kann. B kann Werte von 0 bis 1 annehmen, es ist um so größer, je enger der lineare Zusammenhang zwischen den Größen ist. Im Vergleich zu tabellierten B -Werten kann entschieden werden, ob B zufällig oder wesentlich von 0 abweicht, auch unter Annahme einer bestimmten Sicherheitsschwelle.

Die Tabelle 20 zeigt die Gleichungen der Regressionsgeraden $Y = a + bx$ (b = Regressionskoeffizient), berechnete und tabellierte F - und B -Werte. Als Sicherheitsschwelle wurde $P = 0,05$ gewählt. Die Werte vor und nach Versuch sind festgehalten.

Tabelle 20

Regressionsgeraden

Unabhängige Variable		Regressionsgerade	F berechnet	tabelliert	B berechnet	tabelliert
log Md	vor	$Y = 56,6926 + 5,6821 x$	56,616	5,317	0,8761	0,3993
	nach	$Y = 40,51 + 7,9414 x$	35,215	5,317	0,8149	0,3993
% < 0,03 mm	vor	$Y = 71,49 - 0,1393 x$	75,04	5,317	0,9037	0,3993
	nach	$Y = 61,10 - 0,1922 x$	36,25	5,317	0,8193	0,3993
% Grundmasse	vor	$Y = 71,78 - 0,1566 x$	72,55	5,317	0,8991	0,3993
	nach	$Y = 61,43 - 0,2165 x$	36,81	5,317	0,8158	0,3993
% Quarz	vor	$Y = 61,36 + 0,1844 x$	23,25	5,117	0,7199	0,3625
	nach	$Y = 47,07 + 0,2674 x$	25,70	5,117	0,7337	0,3625

In den Abb. 48–51 sind die Meßpunkte, Regressionsgeraden und Vertrauensgrenzen eingetragen. Die auf den ersten Blick recht guten Regressionen dürfen nun nicht überbewertet werden, da sie doch von einer ziemlich geringen Anzahl Proben gewonnen wurden. Weiter müssen auch die Seite 107 genannten Bedingungen innegehalten werden, womit die feinen Schiefer (Proben B1 und F6) und die monomineralischen Proben mit Kluftkalzit und Spatkalk (C4 und D1) von der Regression auszuschließen sind. Für die letzten beiden Proben bildet der Quarzgehalt eine Ausnahme. Er ist gleich Null und paßt natürlich gut zur Annahme, daß die Griffigkeit mit kleiner werdendem Quarzgehalt abnimmt. Im grobkörnigen Amphibolit schien die Verteilung des Quarzes im Bereich der Größe der Probekörner sehr inhomogen zu sein, weshalb auch da von einer Einbeziehung in die Regressionsberechnung abgesehen wurde.

Damit ist wohl klar, daß die hier gezeigten Zusammenhänge in der Praxis mit der nötigen Vorsicht zu verwenden sind. Auf die Durchführung von Poliersversuchen kann nicht einfach verzichtet werden, es kann aber ihre Anzahl vermindert werden. Für eine allgemeinere Verwendung der Regression müßten diese aus einer erheblich größeren, auch eine größere Variation der Gesteinsarten und -eigenschaften erfassenden, Anzahl von Versuchen gewonnen werden.

Abb. 48–51. Regressionsgeraden zur Abhängigkeit der Griffigkeit von Quarzgehalt, Gehalt an Mineralkorngrößen unter 0,03 mm, an Grundmasse oder Bindemittel und von der Mineralkorngröße. Es sind die Vertrauensgrenzen für $P = 0,05$ eingetragen. Zahlenangaben in Tabelle 19.

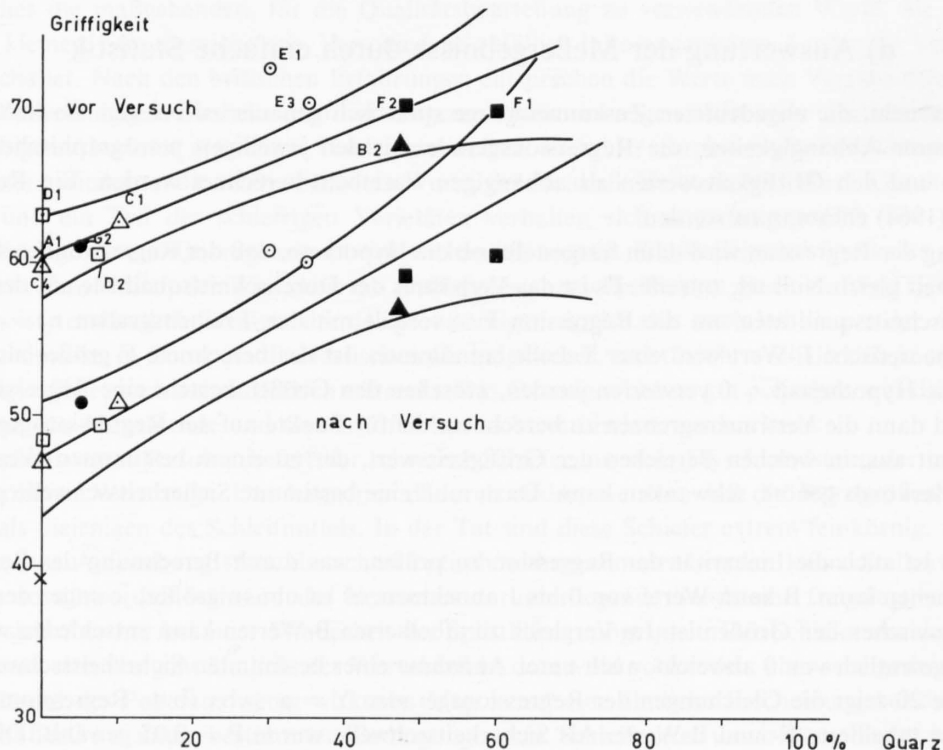
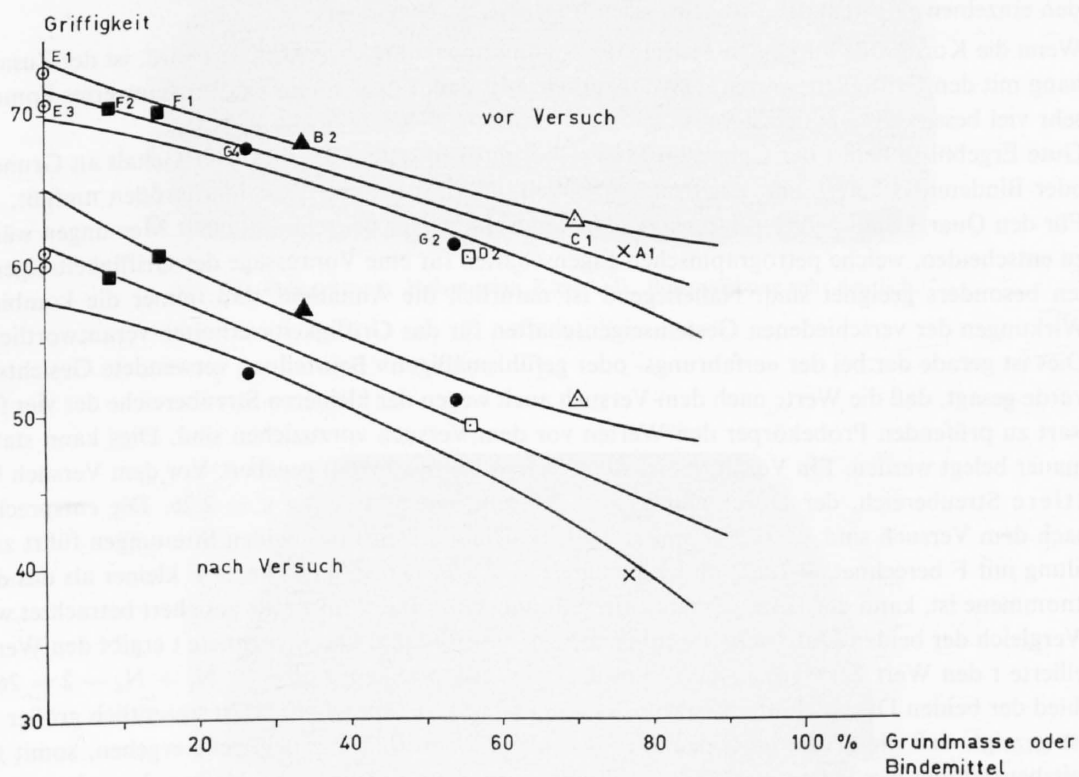
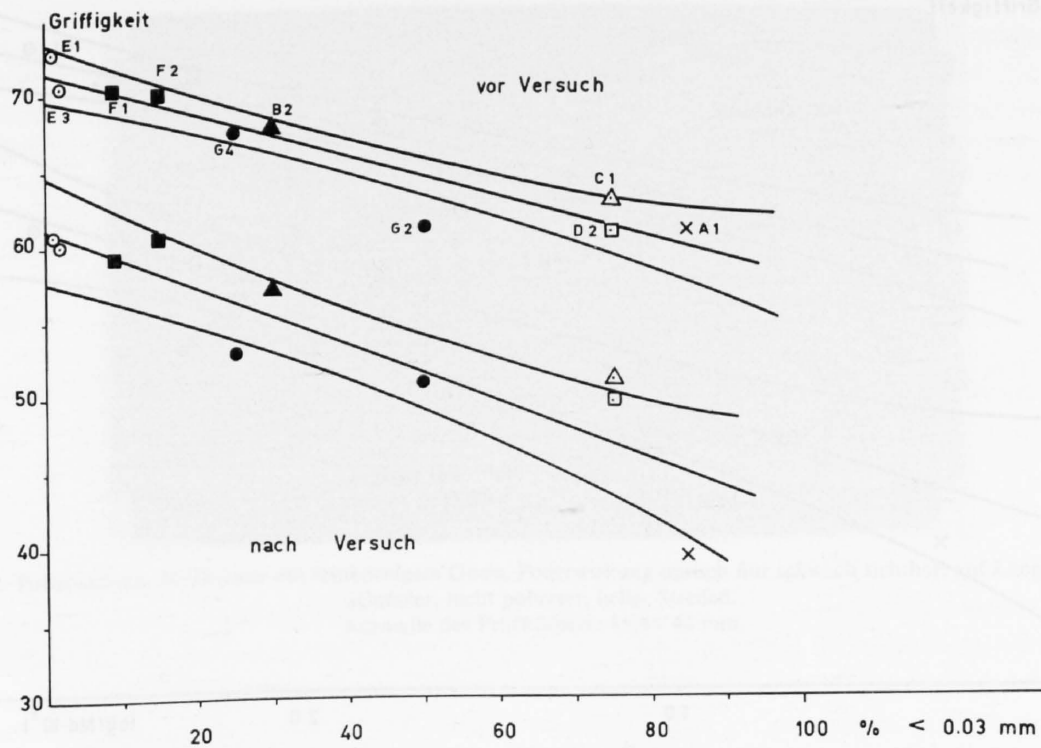


Abb. 48.



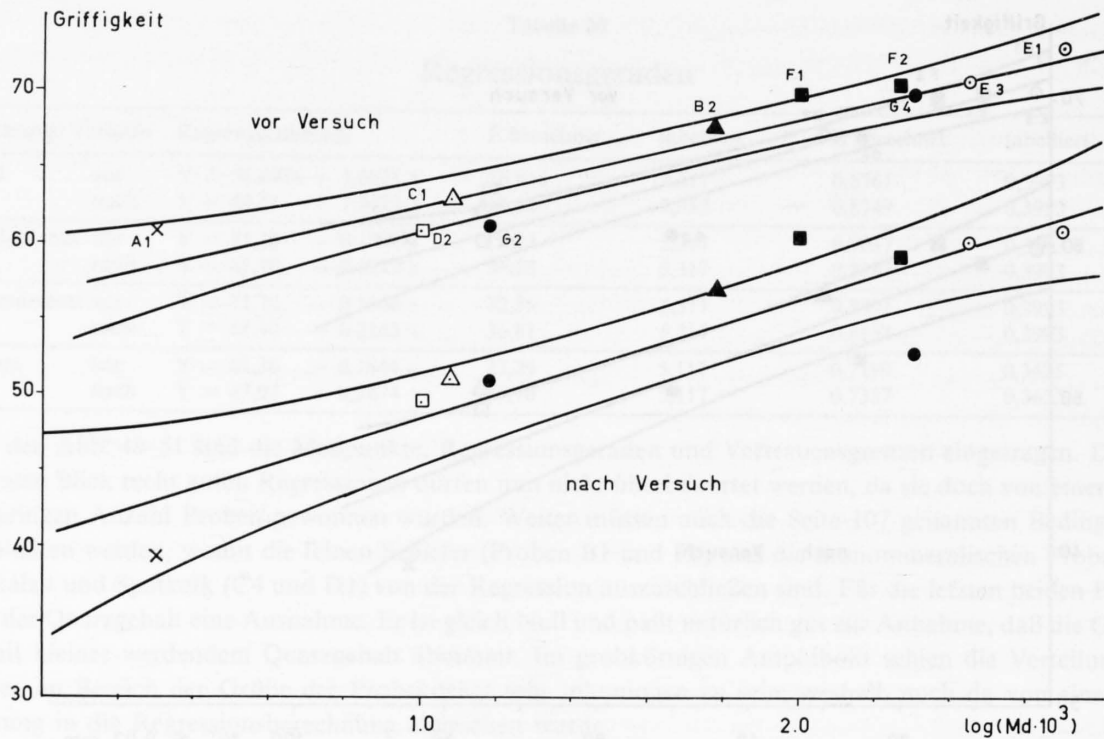


Abb. 51

Zu den einzelnen Darstellungen ist etwa noch folgendes zu bemerken:

- Wenn die Korngröße durch den Median der Summationskurve charakterisiert wird, ist der Zusammenhang mit den Griffigkeitswerten sehr undeutlich. Mit dem Logarithmus des Medianwertes kommt eine sehr viel bessere Regression heraus.
- Gute Ergebnisse liefert der Gehalt an Mineralkorngrößen unter 0,03 mm. Der Gehalt an Grundmasse oder Bindemittel liefert eine Kontrollmöglichkeit, da er vor allem diese Korngrößen umfaßt.
- Für den Quarzgehalt ist die Regression etwas schlechter. Nur bei sehr viel mehr Messungen wäre aber zu entscheiden, welche petrographischen Eigenschaften für eine Voraussage der Griffigkeitseigenschaften besonders geeignet sind. Naheliegender ist natürlich die Annahme, daß immer die kombinierten Wirkungen der verschiedenen Gesteinseigenschaften für das Griffigkeitsverhalten verantwortlich sind. Dies ist gerade der bei der «erfahrungs- oder gefühlsmäßigen» Beurteilung verwendete Gesichtspunkt.

Es wurde gesagt, daß die Werte nach dem Versuch auch wegen der kleineren Streubereiche der vier für eine Gesteinsart zu prüfenden Probekörper den Werten vor dem Versuch vorzuziehen sind. Dies kann statistisch noch genauer belegt werden. Ein Verfahren ist wiederum in LINDER (1964) gegeben. Vor dem Versuch beträgt der mittlere Streubereich, der Durchschnitt, $\bar{x}' = 5,09$ mit einer Streuung $s' = 2,26$. Die entsprechenden Werte nach dem Versuch sind $\bar{x}'' = 2,68$ mit $s'' = 1,64$. Der Vergleich der beiden Streuungen führt zu einer F-Verteilung mit $F_{\text{berechnet}} = 1,902$ und $F_{\text{tabelliert}} = 2,676$. Da das berechnete F kleiner als das der Tabelle entnommene ist, kann der Unterschied beider Streuungen s' und s'' nicht als gesichert betrachtet werden.

Ein Vergleich der beiden Durchschnitte führt auf eine t-Verteilung. Das berechnete t ergibt den Wert 3,55, das tabellierte t den Wert 2,056 (Sicherheitsschwelle $P = 0,05$, Freiheitsgrad $n = N_1 + N_2 - 2 = 26$). Der Unterschied der beiden Durchschnitte \bar{x}' und \bar{x}'' ist als gesichert zu betrachten, \bar{x}' ist wesentlich größer als \bar{x}'' . Damit ist gezeigt, daß die Werte nach dem Versuch kleinere absolute Streubereiche ergeben, somit für die Griffigkeitsbeurteilung wertvoller sind. Daß die Streuungen selber ziemlich groß bleiben, kann kaum vermieden werden, da es sehr schwierig ist, von einer Gesteinsprobe vier völlig gleiche Prüfkörper herzustellen.

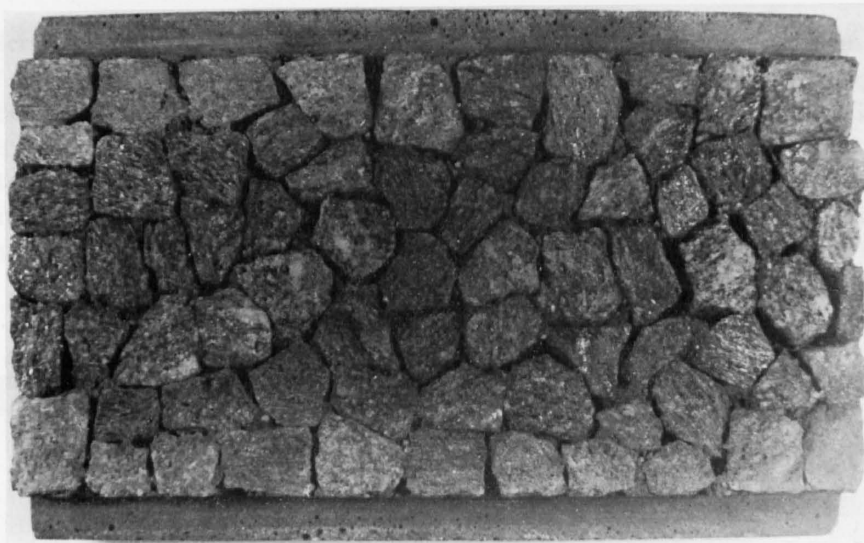


Abb. 52. Polierversuch, Prüfkörper mit feinkörnigem Gneis, Polierwirkung optisch nur schwach sichtbar, auf Längsseiten je ein schmaler, nicht polierter, heller Streifen.
Ausmaße des Prüfkörpers: 88,9 × 44 mm.



Abb. 53. Polierversuch. Helvetischer Kieselkalk, Polierwirkung sehr deutlich.

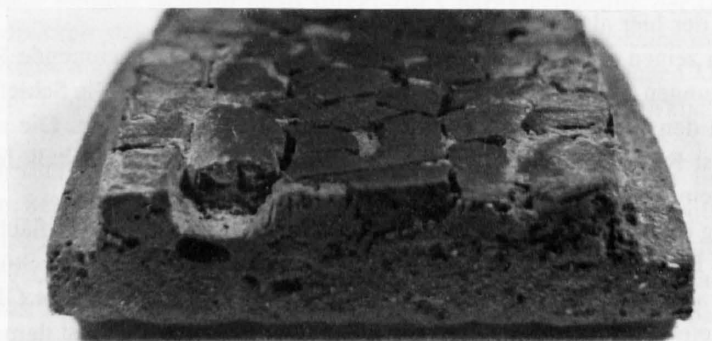


Abb. 54. Polierversuch. Préalpiner Kieselkalk mit ebenfalls sehr gut sichtbarer Polierwirkung.

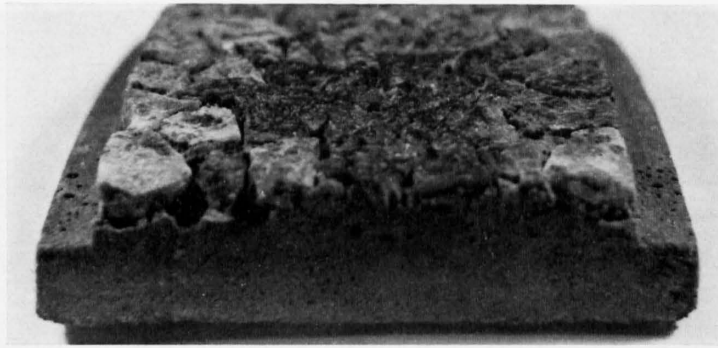


Abb. 55. Polierversuch. Grobkörniger Amphibolit, die erhabenen Zonen der Splittkörner sind im Bereich der Polierung stark geglättet worden.

5. Verwendung des Betonprüfhammers

Die Verwendungsmöglichkeiten des Betonprüfhammers wurden Seite 49 ff. kurz diskutiert. Resultate von Voruntersuchungen wurden dort festgehalten und ergaben, daß der Prüfhammer unter gewissen Bedingungen für die Gesteinsprüfung zu verwenden wäre. Für die Splittprüfung werden sich damit aber nicht wesentlich neue Angaben machen lassen, eine besondere Erläuterung erübrigt sich an dieser Stelle.

6. Tränkversuche mit Salzlösungen

Diese Versuche hatten ein beschränktes Ziel. Es galt festzustellen, ob Lösungen von CaCl_2 eine im Vergleich zu Na_2SO_4 -Lösungen bedeutende Wirkung auf das Gestein ausüben können. Es wurden fünf Proben ausgewählt:

- 1: grobkörniger Gneis
- 2: feinkörniger Gneis
- 3: Schiefer aus dem Glaukonitsandstein
- 4: Schiefer aus dem helvetischen Kieselkalk
- 5: liasischer Kieselkalk der Präalpen

Sie wurden in Form von Schotterstücken (Fraktion etwa 20/30 mm) den Lösungseinwirkungen ausgesetzt. Nach 20 Zyklen von je einer Tränkung und Trocknung wurde der Versuch abgebrochen.

Die Einwirkungen lassen sich in etwa 3 Gruppen einteilen. Bei allen Proben ist nach einigen Zyklen ein Bodensatz in den Lösungsbehältern vorhanden, der aus einzelnen Mineralien wie Glimmer oder auch ganz kleinen Gesteinsbruchstücken bestehen kann. Auf den gebrochenen Gesteinsflächen scheinen sich aber immer einzelne Mineralkörner oder Gesteinspartien in einem Zustand zu befinden, der ein Ablösen auch ohne Salzwirkungen, also auch durch das Trocknen allein oder durch Abreiben, ermöglicht. Dieses Absanden tritt deshalb bei allen Proben auf. Eine zweite Wirkungsart führt zu Rißbildungen, meistens längs Schieferungsrichtungen, vielfach sichtbar längs Schieferhäuten oder Glimmerlagen. Im Endeffekt führt die Rißbildung zum Zerfall der Probestücke, der hier als dritte Gruppe betrachtet wird.

In Na-Sulfatlösungen zeigen die grobkörnigen Gneise nach 20 Zyklen beginnende Rißbildungen, die feinkörnigen Gneise Rißbildungen nur über kleine Bereiche in Oberflächennähe. Die Schiefer des Glaukonitsandsteines sind zerfallen, an den Bruchstücken schreitet die Rißbildung weiter fort. Die schiefrigen Kieselkalke weisen demgegenüber erst Rißbildungen längs Schieferhäuten auf; im Liaskieselkalk fehlen Risse, oberflächlich lassen sich einige kleine Bruchstücke abreiben.

Die Ca-Chloridlösung bewirkt beim grobkörnigen Gneis keine Rißbildung, oberflächlich kann ein sandiger Abrieb erzeugt werden. Das gleiche gilt für den feinkörnigen Gneis, wo an einem Stück zusätzlich noch ein Riß gebildet wurde, der aber einer ausgeprägten Schieferlage folgt. Im Schiefer des Glaukonitsandsteines ist die Rißbildung deutlich, ein Zerfall aber noch nicht eingetreten. Die Rißbildung ist dann im schiefrigen Kieselkalk erst angedeutet und fehlt am Liaskieselkalk ganz.

Der Schiefer des Glaukonitsandsteines verhält sich gemäß den Beschreibungen von DE QUERVAIN und JENNY (1953). Allgemein zeigt sich, daß ein Einfluß des Ca-Chlorids durchaus vorhanden ist. Na-Sulfatlösungen wirken aber erheblich intensiver. Zerstört werden Gesteine, die auch aus andern Gründen (Festigkeit, Griffigkeit) als Straßenbausteine nicht in Frage kommen. Es kann mit großer Sicherheit angenommen werden, daß Gesteine, die den Na-Sulfattest erfolgreich bestehen, auch von CaCl_2 nicht zerstört werden, dessen Verwendung im Winterdienst keine Schwierigkeiten bereiten dürfte. Nach DE QUERVAIN und JENNY (1951) sind die Wirkungen des Kochsalzes noch viel schwächer.

III. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Beurteilung der Gesteinsqualität

1. Allgemeines

Bis dahin erfolgte eine vergleichende Qualitätsbeurteilung der Gesteine nur in bezug auf einzelne Prüfungen im Rahmen der Diskussion der betreffenden Versuchsergebnisse. Was aber allgemein unter Gesteinsqualität verstanden wird, ist das Resultat kombinierter Wirkungen verschiedener Eigenschaften oder Verhaltensweisen. Für eine Gesamtbeurteilung sind hier nun die Versuchsergebnisse in geeigneter Form zusammenzufassen.

In erster Linie sind wesentliche von nebensächlichen Eigenschaften zu unterscheiden. Die ungenügende Ausbildung einer wesentlichen Eigenschaft ergibt eine schlechte Gesteinsqualität, während ungenügende nebensächliche Eigenschaften nur eine geringe Qualitätsverminderung bewirken. In diesem Sinne sind wesentliche Eigenschaften:

- die Kornform, wenn es auch möglich ist, daß Splittmaterial mit schlechten Formen noch genügende Zertrümmerungsgrade aufweist. Es bleibt dann aber immer noch die geringere Packungsdichte, die höheren Bindemittel- oder Füllerverbrauch erfordert, als unerwünschte Eigenschaft übrig;
- der Zertrümmerungsgrad als Ausdruck der Widerstandsfähigkeit des Haufenwerkes gegen mechanische Beanspruchungen;
- die Griffigkeit, sofern das Gesteinsmaterial in der Verschleißschicht oder Zementbetondecke verwendet wird;
- die Wetterbeständigkeit.

Als nebensächliche Eigenschaften können dann Größen wie spez. Gewicht oder Raumgewicht, Gehalt an verwitterbaren akzessorischen Mineralien, Verschmutzungsgrad usw. bezeichnet werden. Eine Häufung schlecht ausgebildeter nebensächlicher Eigenschaften wird sich in den wesentlichen Eigenschaften bemerkbar machen.

Die einzelnen Prüfungen lieferten zahlenmäßige Resultate. Die Untersuchungen zeigten, daß die Ergebnisse über größere Bereiche streuen, auch bei wiederholten gleichen Versuchen, daß zufällige Einflüsse bei der Probenaufbereitung und infolge des inhomogenen Gesteinscharakters nicht ganz eliminiert werden können. Die gewonnenen Zahlen können deshalb nicht direkt zur Charakterisierung der Gesteinsqualität verwendet werden. Ihre Verwendbarkeit steigt aber sofort, wenn verschiedenartige Gesteine miteinander verglichen werden können, was meistens nur möglich ist, wenn diese Gesteine in einer gleichen Untersuchungsserie geprüft werden. Nur deutliche Unterschiede in den Prüfergebnissen entsprechen wirklich vorhandenen Qualitätsunterschieden.

Die Ergebnisse werden in Qualitätsgruppen zusammengefaßt. Bestimmten Bereichen der betreffenden Eigenschaften werden Bezeichnungen wie sehr gut, gut usw. zugeordnet. Dies entspricht dem schon in den Anfängen der Gesteinsprüfung verwendeten System von Güteziffern. Im einfachsten Fall werden etwa gute, mittlere und schlechte Qualitätsgruppen abgetrennt, durch weitere Stufen kann auch eine verfeinerte Skala aufgestellt werden. Dies hängt von der erreichbaren Genauigkeit der Zahlenangaben ab.

Anhand der vorliegenden Prüfungsergebnisse und wenn nötig unter Verwendung von Werten aus der Literatur, wird diese Einteilung zuerst für jede der geprüften Eigenschaften allein durchgeführt.

2. Qualitätseinteilung

Für die geprüften Eigenschaften können sechs Kategorien von sehr gut bis sehr schlecht abgetrennt werden, ohne die Meßgenauigkeiten zu überfordern (siehe Tabelle 21). Im einzelnen ist etwa noch zu bemerken:

Für die Kornformen ist die Einteilung nach dem Verhältnis $c/a = 0,40$ naheliegend. Sie wird auch in den VSS-Normen angewendet. In der Skala ist die Normvorschrift, daß max. 45% der Körner einer Stichprobe nichtkubisch sein dürfen, zu berücksichtigen. Die gleiche Einteilung kann auch für die Beurteilung nach Augenschein verwendet werden.

Natürlich sind auch die andern Achsenverhältnisse verwendbar. Um vergleichbare Resultate zu erhalten muß die Minimalanforderung etwas verschoben werden. Wenn Körner mit b/a kleiner als $2/3$ und c/b kleiner als $1/2$ als nichtkubisch bezeichnet werden, müssen mindestens 45% der Körner kubisch sein, oder dürfen maximal 55% nichtkubisch sein. Im nichtkubischen Anteil können immer noch Körner mit c/a größer als 0,40 anwesend sein. Aus den durchgeführten Messungen kann aber noch kein Proportionalitätsfaktor zwischen den beiden Einteilungsarten bestimmt werden.

Der Zertrümmerungsgrad kann nicht definitiv eingeteilt werden. Es sind zu wenige Messungen vorhanden, die offenbar auch nicht mit früheren Bestimmungen an zum Teil gleichen Gesteinen verglichen werden können. Die getroffene Einteilung ist nur für die in dieser Serie gefundenen Zertrümmerungsgrade sinnvoll.

Die Klassierung der Poliersversuche ist recht gut möglich. Sie hat sich nach den im Splitt am häufigsten vertretenen Gesteinsvarietäten zu richten. Varietäten mit stark abweichenden Griffigkeitswerten geben erst zu Korrekturen Anlaß, wenn sie zu mehr als mindestens 10% im Splittmaterial vertreten sind. Nach Erfahrungen des IStETH liegen die besten Griffigkeitswerte nach dem Versuch bei 0,8, mittlere um 0,5 und schlechteste um 0,3 (Skalenteile dividiert durch 100, entsprechen dem Reibungskoeffizienten).

Als Maß für die Wetterbeständigkeit kann der Gehalt an verwitterungsanfälligen Splittkörnern betrachtet werden. Für die petrographische Beurteilung wurde der Gehalt schlechter Varietäten allgemein bestimmt, die aber nicht alle wetterunbeständig sein müssen. Soweit es sich einfach um Körner geringer Festigkeit handelt, äußert sich ihr Einfluß in den Zertrümmerungsgraden. Wir können uns an das Material halten, welches im Sulfattest versagt. Angaben dazu können der Literatur entnommen werden und werden durch die wenigen eigenen Versuche bestätigt. Es darf angenommen werden, daß Gehalte an verwitterungsgefährdeten Körnern unter 5% keine spürbare Wirkung haben.

Die nebensächlichen Eigenschaften können zusammengefaßt werden. Es werden nur jene berücksichtigt, die qualitätsvermindernd wirken. Der Gütegrad vermindert sich mit zunehmender Anzahl derartiger Eigenschaften (Pyritgehalt, Verunreinigungen usw.). Diese Beurteilung führt dann wieder in die Nähe der petrographischen, «erfahrungsmäßigen» Methoden.

Tabelle 21

Qualitätseinteilung für verschiedene Eigenschaften

Qualitätsbezeichnung	Kornform; $c/a < 0,4$	Gehalt $b/a < 2/3$ $c/b < 1/2$	Zertrüm- merungs- grad	Griffigkeit	Gehalt wetterun- beständig	Anzahl neg. nebensächl. Eigenschaften	Signatur
Sehr gut	< 15	< 25	< 10	> 0,7	0	0	★★★★★
Gut	25–15	25–35	10–12½	0,6–0,7	< 5	1	★★★★★
Mittel	25–35	35–45	12½–15	0,5–0,6	5–10	2	★★★★
Noch genügend	35–45	45–55	15–20	0,45–0,5	10–15	3	★★★
Schlecht	45–65	55–75	20–25	0,4–0,45	15–20	4	★★
Sehr schlecht	> 65	> 75	> 25	< 0,4	> 20	5	★

3. Qualität der untersuchten Gesteine

In der Tabelle 22 sind die genannten Qualitätseinteilungen angewendet worden, vorerst für die einzelnen Prüfungen für sich und in der letzten Zeile für die kombinierte Wirkung aller Eigenschaften. Die Tabelle liefert nun eine rein relative Bewertung der verschiedenen Gesteinsarten. Es kann angenommen werden, daß die

Verwendung von mehr Stichproben dort eine Bestätigung der Tabelle liefern würde, wo die relativen Qualitäten verschiedener Gesteine um mehr als eine Qualitätsstufe verschieden sind. Bei benachbarten Qualitätsklassen ist es denkbar, daß die Unterschiede von der Meßgenauigkeit herrühren. Wo eine wesentliche Eigenschaft schlecht taxiert werden muß, kommt für die Gesamtqualität auch nur noch die Bezeichnung schlecht in Frage.

Tabelle 22

Gesteinsqualität

Eigenschaft	Jurakalk	Glaukonit-sandstein	Kieselkalk Kreide	Kieselkalk Lias	Gneis	Flysch-sandstein	Amphibolit
% c/a < 0,40	★★★	★★★	★★★★★	★★★	★★★	★★★★	★★★
% b/a < 2/3, c/b < 1/2	★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★	★★★★	★★★
Zert.-Grad Druck	★★	★★★★	★★★★	★★★★	★	★★★★	★★★★
Schlag	★	★★★★	★★★★	★★★	★	★★★	★★★
Griffigkeit vor	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
nach	★	★★★★	★★★	★★★	★★★★★	★★★★	★★★★
Wetterbeständigkeit	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Nebensächliche Eigenschaften . . .	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★
Gesamtqualität	★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★	★★★★	★★★★

Damit sind als Resultat der Untersuchungen Jurakalk und Gneis als schlechte, Glaukonitsandstein, Kieselkalk des Lias und Flyschsandstein als mittlere und Kieselkalk der Kreide als gute Qualität zu bezeichnen.

Je nach Verwendung der Splittmaterialien wird man die Qualitätsbeurteilung von verschiedenen Gesichtspunkten aus vorzunehmen haben. Für Verschleißschichten, Fahrbahndecken im allgemeinen, tritt die Griffigkeit natürlich in den Vordergrund, so daß dann der helvetische Kieselkalk eine strengere Beurteilung erfährt. Es wäre dann beispielsweise zu untersuchen, wie die Griffigkeit des ganzen Belags durch die Kornzusammensetzung des Mischgutes allenfalls verbessert werden kann.

Weiter kann man Kornformen und Zertrümmerungsgrade besonders herausgreifen. Wo die Kornformen schlecht sind, kann man sich auf den Standpunkt stellen, daß sie durch geeignete Maßnahmen verbessert werden können. Damit würde sich auch das Verhalten im Druck- und Schlagversuch verbessern. Durch diese Verbesserungsmaßnahmen könnte die Qualität von Glaukonitsandstein, Kieselkalk des Lias, Flyschsandstein und Amphibolit in Richtung des helvetischen Kieselkalkes verschoben werden, von mittleren zu guten Qualitäten. Darin liegt zu einem großen Teil der Sinn der technisch-physikalischen Prüfmethode, zu entscheiden, wo an vorliegendem Gesteinsmaterial Qualitätsverbesserungen überhaupt noch möglich sind. Die aus den Versuchen resultierenden zahlenmäßigen Angaben erlauben es dann auch zu sehen, ob eine Verbesserungsmaßnahme erfolgreich war oder nicht.

In diesem Sinne erfolgt nachstehend für jede der sieben Splittproben eine stichwortartige Qualitätscharakterisierung mit Angaben über die Verbesserungsmöglichkeiten und Hinweisen auf Eigenschaften, die beim betreffenden Gestein besonders beachtet werden müssen. Diese Charakterisierungen betreffen nicht das Gestein als solches, sondern das vorliegende Splittmaterial.

Jurakalk:

Großer Anteil schlechter Kornformen, hohe Zertrümmerungsgrade, sehr schlechte Griffigkeit (nur Werte nach Versuch sind maßgebend). Die Kornformen können sicher verbessert werden, was aber keine genügende Verbesserung der Zertrümmerungsgrade ermöglicht (siehe Tabelle 14). Die Griffigkeit kann nicht verbessert werden. Der Jurakalk ist als Splittmaterial unbrauchbar.

Glaukonitsandstein:

Kornformen, Zertrümmerungsgrad, Griffigkeit und Wetterbeständigkeit sind alle genügend bis gut. Eine geringe Kornformverbesserung, damit auch geringe Verbesserung des Festigkeitsverhaltens, ist möglich,

wird sich aber kaum lohnen. Die Wetterbeständigkeit kann verbessert werden, wenn die schiefrigen Glaukonitsandsteine vom Splitt ferngehalten werden können. Ein größerer Gehalt schiefriger Sandsteine verschlechtert die Qualität bis zur Unbrauchbarkeit. Wenn dies beachtet wird, kann ein Splitt von mittlerer bis guter Qualität gewonnen werden.

Kieselkalk der Kreide:

Das Material ist durch gute Kornformen gekennzeichnet, damit auch gute Festigkeitseigenschaften, ebenso Wetterbeständigkeit gut. Einzig die Griffigkeit ist nicht sehr hoch, wenn auch noch genügend, eine Verbesserung ist nur durch die Körnung des Mischgutes möglich. Das untersuchte Material stellt den Kieselkalk in seiner optimalen Qualität dar.

Kieselkalk des Lias:

Splittmaterial mittlerer Qualität, an Kornformen und Festigkeit geringe Verbesserung möglich, ebenso kann die Wetterbeständigkeit noch besser ausfallen, wenn schiefrige Varietäten eliminiert werden können. Bezüglich Griffigkeit siehe Kieselkalk der Kreide. Die Gewinnung einer mittleren Splittqualität sollte auf alle Fälle möglich sein.

Tessiner Gneise:

Dominierend ist der hohe Zertrümmerungsgrad, der nach Tabelle 14 auch durch die an sich mögliche Kornformverbesserung nicht auf brauchbare Werte gebracht werden kann. Am Glimmergehalt, der unter den nebensächlichen Eigenschaften in der Tabelle 21 berücksichtigt wurde, ist ebenfalls nichts zu ändern. Damit hat man sich mit der schlechten Qualität des Gneissplittes abzufinden. Wenn er verwendet wird ist auf jeden Fall der Nachweis zu erbringen, daß durch geeignete Körnungen und Bindemittel genügende Festigkeiten erreicht werden können.

Flyschsandstein:

Die hauptsächlich mittleren Qualitäten aller Eigenschaften können nicht wesentlich verbessert werden. Es ist auf den Anteil an schwarzen Schiefen zu achten, daß er nicht in zufälligen Konzentrationen angereichert wird.

Amphibolit:

Die knapp genügende Kornform wäre zu verbessern, damit könnte auch der gerade noch brauchbare Zertrümmerungsgrad des Schlagversuches auf eine mittlere Qualität gebracht werden. Mittlere Griffigkeit und Wetterbeständigkeit sind als fest anzunehmen, hingegen kann der Gehalt an Kalk und Dolomit sowie an stärker verwitterten Stücken (unter nebensächlichen Eigenschaften berücksichtigt) durch sorgfältigen Abbau verringert werden.

Diese kurzen Bemerkungen stehen nun in relativ guter Übereinstimmung mit den Literaturangaben und den petrographischen Beurteilungen (S. 85). Das Bild wird aber doch differenzierter und die Einflüsse einzelner Eigenschaften sind besser abschätzbar. Hier wie dort fallen Jurakalk und Gneis als schlechte Qualitäten auf, doch wird der Jurakalk nach der petrographischen Beurteilung immer noch zu gut beurteilt. Die übrigen Gesteine liegen beiderorts in ähnlichen Bereichen (siehe Abb. 28), genaue Aussagen sind aber nur anhand der technisch-physikalischen Prüfungsergebnisse möglich. Die relativ beste Qualität des Kieselkalkes kommt nach der petrographischen Beurteilung nicht zum Ausdruck. Vor allem aber wird der Amphibolit überbewertet und der Flyschsandstein unterbewertet. Beide sind aber von sehr ähnlicher Qualität, der Flyschsandstein eher von besserer als der Amphibolit.

Damit kann gesagt werden, daß die erfahrungsmäßige Beurteilung nach dem petrographischen Befund wohl möglich ist, daß die technisch-physikalischen Prüfverfahren aber genauere und besser gesicherte Ergebnisse liefern, denen unbedingt größeres Gewicht beizumessen ist. Andererseits dürfen die zahlenmäßigen Versuchsergebnisse auch nicht als Materialkonstanten betrachtet werden, es sind zu viele Einflüsse daran beteiligt. Darum scheint uns auch die Verwendung dieser Zahlen in Qualitätsformeln, die ein Gestein mit einer einzigen Zahl qualitativ charakterisieren sollen, nicht sinnvoll zu sein. Es muß dies nicht falsch sein, sicher ist es aber nicht anschaulich.

4. Anwendung von Qualitätsvorschriften

Die Vorschriften in den Normen der VSS (und andern Stellen) betreffen vor allem den Kornaufbau des Belagsmaterials, der im Rahmen dieser Untersuchungen nicht berücksichtigt werden konnte. Weitere Vorschriften gelten für den Anteil an Sand und Staub unter 0,63 mm und an Holz- und Pflanzenresten. Die Art der Probenahme ergab zum vornherein einen relativ sauberen Splitt, der diesen Bedingungen genügt. Ausgenommen sind dabei die Gneise, die als Flußmaterial Holzreste enthalten und wo sich beim Sieben oder Transportieren leicht ein großer Anteil an feinem Staub bildet.

Die hier noch in Frage kommenden Bedingungen betreffen die Kornformen und den Gehalt harter Gesteine im Splitt. Der maximale Anteil an nichtkubischen Körnern von 45% wurde schon bei der Festlegung der Qualitätsgruppen berücksichtigt. Die Bedingung ist bei allen sieben Proben nach Absieben von Unter- und Überkorn erfüllt; im Anlieferungszustand weisen Jurakalk und Amphibolit wenig höhere Gehalte auf.

Der Gehalt harter Gesteine (definiert nach DE QUERVAIN) soll 65% erreichen. Es kann hier zum Teil auf die Tabelle 9 zurückgegriffen werden. Da die dortige Qualitätsgruppierung noch weitere Eigenschaften neben der Gesteinshärte berücksichtigt, werden hier die Gehalte harter Gesteine angegeben:

Tabelle 23

Jurakalk	0%
Glaukonitsandstein . .	79,5%
Kieselkalk Kreide . . .	83,5
Kieselkalk Lias	80,5
Gneise	7,5
Flyschsandstein	72,0
Amphibolit	77,0

Die Zahlen gelten für die Proben ohne Unter- und Überkorn. Sie liegen meistens etwas höher als die Gehalte an guten Qualitäten, sind aber mit jenen Zahlen doch eng verknüpft. Jurakalk und Gneise erfüllen die Anforderung bei weitem nicht, während die als Gesteine mittlerer bis guter Qualität bezeichneten Proben auch dieser Vorschrift vollauf genügen. Es ist aber wieder ersichtlich, daß im Bereich der Alpen die Gewinnung von Splitt einheitlicher, erstklassiger Qualität nicht möglich ist. Es wird immer ein Anteil in der Größenordnung von 20% von mäßiger bis schlechter Qualität vorhanden sein.

Für Zertrümmerungsgrad und Griffigkeit halten wir uns an die auf Seite 114 getroffene Einteilung. Besonders die Zertrümmerungsgrade gelten nur für diese Prüfserie, was der Vergleich mit älteren Bestimmungen an gleichen Gesteinen zeigt. Für die Griffigkeit kann für das Gestein selber ein Minimum von 0,45 verlangt werden, für den fertigen Belag ist die Grenze höher anzusetzen; damit wird der Einfluß der Körnung auf die Griffigkeit berücksichtigt.

Weitere Vorschriften, im speziellen über die petrographische Zusammensetzung, betreffen nach WEBER (1966) das Gesamtgemisch des Belagsgutes. Sie konnten hier deshalb nicht auch noch überprüft werden.

D. Folgerungen

I. Bedeutung der petrographischen Beschreibung

Es war Ziel dieser Arbeit, festzustellen, wie weit aus der genauen Kenntnis der petrographischen Eigenschaften eines Gesteins auf sein Verhalten in technisch-physikalischen Prüfungen oder unter Verkehrsbeanspruchung im Straßenbelag geschlossen werden kann.

Nach den durchgeführten Untersuchungen kann gesagt werden, daß von der Petrographie her mit großer Sicherheit auf die Griffigkeit geschlossen werden kann. Schon wesentlich unsicherer ist der Schluß auf die in den Druck- und Schlagversuchen bestimmten Zertrümmerungsgrade, auch wenn der große Einfluß der Kornform in geeigneter Weise berücksichtigt wird, wie dies Seite 102 beispielsweise versucht wurde.

Für die Verwitterungsanfälligkeit besteht nur ein deutlicher Zusammenhang mit petrographischen Eigenschaften, wenn im Gestein eindeutig ein größerer Gehalt leicht verwitterbarer Mineralien vorhanden ist.

Der Zusammenhang zwischen der Kornform der Splittkörner und der Petrographie ist sehr unsicher, da der technische Vorgang der Splittherstellung eine größere Rolle spielt.

Sonst dient die petrographische Beschreibung nur der Gesteinscharakterisierung. Damit ist eine Vergleichsgrundlage geschaffen und eine Qualitätsbeurteilung ist nun möglich, wenn das Verhalten ähnlicher Gesteine schon bekannt ist. In diesem Sinne wird Qualitätsbeurteilung schon seit jeher betrieben, indem etwa gute, mittlere und schlechte Qualitäten unterschieden werden. Eine ähnliche Beurteilungsmöglichkeit gibt die Einteilung in Härtegruppen, die aber wiederum die Kenntnis einer technisch-physikalischen Eigenschaft, der Würfeldruckfestigkeit, erfordert.

Im Fall der Splittbeurteilung ist das Erkennen wirklich schlechter Gesteinsvarietäten in Stichproben nicht schwierig. Es handelt sich meistens um schieferartige Gesteine, die leicht zerbrechen oder etwa auch durch ihre Färbung auffallen. Ausnahmen sind aber bekannt, als Beispiel kann der schiefrige Glaukonitsandstein genannt werden. Für mittlere Qualitäten wird die Beurteilung rein von der Petrographie aus erheblich schwieriger und im Bereich guter Qualitäten eher spekulativ. Wichtig ist aber, daß die Unterscheidung von guten und schlechten Qualitäten möglich ist. Genauere Angaben bleiben den technisch-physikalischen Prüfverfahren vorbehalten.

II. Bemerkungen zu den Prüfverfahren

1. Einzelne Methoden

a) Petrographische Methoden

Das Hauptgewicht ist auf die makroskopische Gesteinsbestimmung zu legen. Es ist ein Irrtum, zu glauben, daß im Mikroskop wesentlich neue Aussagen gemacht werden können. Im Dünnschliffbereich werden viele Inhomogenitäten, die für die Splittqualität eine Rolle spielen können, nicht mehr erfaßt, es sei denn mit einer sehr großen Anzahl von Dünnschliffen. So dienen denn Dünnschliffbetrachtungen, wie auch röntgenographische Untersuchungen, vor allem der Bestätigung von makroskopischen Beobachtungen. Wenn schon Dünnschliffe hergestellt werden, so sollen sie auch zur zahlenmäßigen Festlegung von Mineralbestand und Korngröße benützt werden. Durch Anwendung der petrographischen Methoden ist erstens das Material zu charakterisieren und zweitens eine erste Qualitätsbeurteilung vorzunehmen, wie dies oben erwähnt wurde.

b) Kornformbestimmung

Sie erfolgt normalerweise durch Ausmessen der Länge, Breite und Dicke an Stichproben von je 200 Körnern. Diese Anzahl sollte wenn möglich verwendet werden. Am anschaulichsten ist die Formcharakterisierung nach ZINGG (1935) oder DE QUERVAIN (1950). Für praktische Zwecke ist das Verhältnis c/a besonders geeignet, damit auch die Verwendung der Schublehre nach SCHULZE (1953).

Brauchbar ist nun auch die Formbeurteilung von Auge. Wegen der größeren Ungenauigkeit sind mehrere Stichproben zu verwenden. Zum Vergleich sind jeweils Stichproben mit bekannten, ausgemessenen Formverhältnissen in die Beurteilung mit einzubeziehen.

Die verschiedenen möglichen Formkoeffizienten scheinen keine Verbesserung der Beurteilungsmöglichkeiten zu geben. Der Rechenaufwand lohnt sich dort in normalen Fällen nicht. Der Koeffizient nach MORGENBROD vermag Unterschiede verschiedener Proben nicht deutlich zu machen.

Als zahlenmäßige Bezeichnung der Kornform wird vorteilhaft der Gehalt an kubischen oder nichtkubischen Körnern verwendet, anhand der Einteilung von ZINGG in kubische, flache, stenglige und flachstenglige Formen gewinnt man noch ein genaueres Bild.

c) Festigkeit

Es interessiert die Festigkeit des Haufenwerkes, nicht des Gesteins. Die Druck- und Schlagversuche mit Bestimmung des Zertrümmerungsgrades eignen sich dafür am besten. Die Vergleichsmöglichkeiten sind beschränkt, da das Einhalten konstanter Versuchsbedingungen offenbar Schwierigkeiten macht. Es sollten möglichst viele Proben in der gleichen Prüfsérie untersucht werden können. Der Zertrümmerungsgrad ist ein guter Sammelwert, der die Einflüsse von Petrographie, Kornform und Korngröße enthält.

d) Raumgewicht und spezifisches Gewicht des Gesteins

Diese Größen liegen für Straßenbaugesteine und damit vorkommenden Varietäten in ähnlichen Bereichen und können nicht als Qualitätshinweise verwendet werden. Anstelle der Berechnung der absoluten Porosität wird hier vorgeschlagen, die Wasseraufnahme nach 24stündiger Wasserlagerung zu bestimmen. Wenn sie außergewöhnliche Werte ergibt, können dann weitere Untersuchungen angeschlossen werden. Die Wasseraufnahme kann gut an Splittproben bestimmt werden.

e) Schüttraumgewicht

Die Bestimmung des Schüttraumgewichtes ist nur sinnvoll, wenn ein genau genormter Einfüllvorgang innegehalten werden kann. Dann kann eine Qualitätsaussage gewonnen werden, die in erster Linie den Kornformeinfluß berücksichtigt. Weiter kann damit entschieden werden, ob verschiedene Stichproben des gleichen Vorkommens (Deponie, Ladung usw.) voneinander abweichen.

f) Polierversuche

Eine Voraussage der Griffigkeit aus petrographischen Daten ist weitgehend möglich. Die Polierversuche an Splittproben haben dann vor allem den Zweck, diese Voraussagen zu prüfen. Damit kann die Zahl der notwendigen Versuche beschränkt werden. Anstelle der Prüfung einzelner Gesteine oder Korngrößen sollten vor allem Mischungen verschiedener Körnungen, verschiedene Splitt-Filler-Verhältnisse und fertige Belagsmischungen oder fertige Beläge überhaupt vermehrt untersucht werden.

g) Sulfatversuch (Tränkversuch)

Auch dieser Versuch ist an Splittproben durchführbar. Erwünscht sind Versuche mit zweifelhaften und schlechten Varietäten, die dann makroskopisch so charakterisiert werden müssen, daß sie im Rahmen der petrographischen Splittuntersuchung ausgeschieden werden können. Ferner sind die Gesteine zu finden, die im Versuch versagen und denen dies äußerlich nicht angesehen werden kann. Daraus sind dann Regeln zu entwickeln, die Aufschluß über das geologische Auftreten derartiger Gesteine geben (z. B. schiefriger Glaukonitsandstein, der früher nicht als verwitterungsempfindlich erkannt worden war).

2. Prüfverfahren in der Praxis

Kennzeichnend für den modernen Straßenbau ist wohl der große Baumaterialbedarf und der rasche Einbau des Belagsmaterials über größere Strecken. Das Problem der Gesteinsprüfung besteht deshalb darin, möglichst schnell große Materialmengen zu begutachten. Viele der beschriebenen Prüfmethoden sind nun äußerst langwierig und benötigen dazu noch viele Hilfskräfte. Der Bedingung der Raschheit vermögen eigentlich nur die beschreibenden Methoden zu genügen, d. h. also die petrographische Bestimmung von Splittproben, die «erfahrungsmäßige» Beurteilung der Qualität, die allgemeine Beurteilung nach Augenschein. Eine größere Materialmenge kann nur mit einer großen Zahl von Stichproben einigermaßen zuverlässig erfaßt werden. Es ist darum offenbar besser, viele Stichproben mit beschreibenden Methoden zu untersuchen, als einige wenige Stichproben mit langwierigen Messungen aufs Genaueste zu prüfen. Unter diesen Umständen kommt etwa folgender Prüfungsverlauf in Frage:

- Normgerechte Entnahme vieler (fünf oder mehr, je nach Materialmenge) Stichproben;
- Stichproben durch Probenteilung auf 200 Stücke reduzieren;
- Beschreibung der Petrographie dieser reduzierten Stichproben und Unterscheidung von z. B. guten, mittleren und schlechten Qualitäten oder von harten und weichen Gesteinen;
- Kornformuntersuchung nach Augenschein an den gleichen Proben;
- Beschreibung weiterer Eigenschaften wie Verschmutzung, Gehalt an Pflanzen und Holz usw.;
- nach der Petrographie Charakterisierung der Griffigkeit.

Damit kann eine erste Qualitätsbeurteilung ausgeführt werden. Wenn sich die verschiedenen Stichproben als gleich erwiesen haben, können sie miteinander vermischt werden. Daraus wäre dann durch erneute Probenteilung Material für einen Druck- und Schlagversuch und für weitere Prüfungen wie den Sulfatversuch zu entnehmen, wenn die petrographische Begutachtung noch Zweifel offengelassen hat. Ebenso wären hier 200 Körner für eine einzige Kornformbestimmung durch Ausmessen zu entnehmen, schließlich Splittmaterial für einen Griffigkeitsversuch. Die Gleichartigkeit der Stichproben sollte vorgängig auch noch durch Bestimmung des Schüttraumgewichtes überprüft werden, sofern dafür die nötigen Einfüllvorrichtungen zur Verfügung stehen.

Erweisen sich die Stichproben als ungleichartig, wird man zuerst den Ursachen nachgehen müssen, die beispielsweise in den Abbauverhältnissen im Steinbruch oder in der Grube begründet sein können. Für die technisch-physikalischen Eigenschaften wären dann vermehrte Prüfungen auszuführen, oder wenn dies nicht möglich ist, dafür die nach der petrographischen Beschreibung schlechtesten Stichproben zu verwenden. Damit könnte man mehr anfangen als mit einem für die ganze Materialmenge gültigen mittleren Qualitätswert, wie er nach Durchmischen der Stichproben erhalten wird.

Mit einem derartigen Verfahren ist eine erste Beurteilung rasch zur Hand. Für die technisch-physikalischen Prüfungen sind dann weniger Proben zu untersuchen, womit diese Untersuchungen wahrscheinlich auch mit größerer Sorgfalt ausgeführt würden. Dann kann den zahlenmäßigen Angaben wieder ein größeres Gewicht beigemessen werden.

Probleme der Kornverteilung wurden hier weggelassen. Soll die Kornverteilung berücksichtigt werden, kommt zu den besprochenen Prüfungen die Siebanalyse. Sie kann vor der Qualitätsbeurteilung angesetzt werden; diese kann dann für die verschiedenen Fraktionen besonders durchgeführt werden, was z. B. für die Kornform interessant ist, oder auf die Fraktion beschränkt werden, die den Hauptanteil einnimmt. Schließlich kommt die Siebanalyse auch nach der Qualitätsbeurteilung in Frage, dies aber eher nur im Fall von wenig variierenden Korngrößen. Für die Siebanalyse scheint uns das Vorhandensein einer maschinellen Siebeinrichtung Bedingung zu sein, ebenso sollte der Siebvorgang (Siebdauer, Materialmenge usw.) genormt sein.

Mit der Anpassung des Prüfvorgangs an die infolge des großen Materialbedarfes veränderten Abbaubedingungen befaßt sich eine Arbeit von KILIAN (1967).

III. Die Gesteinshärte

Dieser Begriff wird von verschiedenen Autoren benutzt, die darunter oft sehr verschiedene Eigenschaften verstehen. So wird etwa die Würfeldruckfestigkeit als Härte bezeichnet, dann auch das Verhalten im Deval-Versuch, im Bauschinger-Versuch, im Sandstrahlgebläse. Weitere Beanspruchungen sind Hämmern, Bohren und Ritzen usw., die alle für die Härtebestimmung herhalten müssen. In dieser Arbeit wurde die Härtedefinition nach DE QUERVAIN (1937, 1948, 1967) benutzt, die sich der Kombination von Würfeldruckfestigkeit und Gehalt an harten Mineralien bedient.

Es ist zu überlegen, was Härte denn eigentlich bedeutet. Härte ist offenbar eine komplexe Eigenschaft und hat sicher nichts mit einer physikalischen Stoff- oder Materialkonstanten zu tun. Ihre Definition wird eine subjektive Angelegenheit.

Allgemein gesagt ist Härte der Widerstand, den ein Stoff irgendeiner Einwirkung entgegensetzt. Die Definition kann durch Beschränkung auf Einwirkungen mechanischer Art noch etwas enger gefaßt werden. Umgekehrt ist Härte auch die Einwirkung, die ein Stoff an einem andern verursachen kann, wieder mit der Beschränkung auf die mechanische Natur der Einwirkung.

In diesem Sinne wird unter Mineralhärte selbstverständlich die mechanische Einwirkung des Ritzens verstanden. Alle andern Auffassungen der Härte werden in Mineralogie und Metallurgie genauer charakterisiert:

- Rosiwal-Härte: Abschleifen
- Brinell-Härte: Kugeleindruck
- Mikro-Härte (Vickers-Härte): Eindruck einer Stahlspitze

Dies sind immer ziemlich verschiedene Einwirkungsarten. Bei Gesteinen stehen ähnlichen Bezeichnungen keine Hindernisse im Wege. Es kommen allerdings nicht genau gleiche Methoden in Frage. Der Eindruck einer Stahlspitze ist dem Gesteinscharakter nicht angepaßt. Die Methoden müssen den größeren Homogenbereich der Gesteine berücksichtigen. Es können beispielsweise die folgenden Begriffe verwendet werden:

- Druckhärte: aus Druckfestigkeit abgeleitet
- Rückprallhärte: Wirkung des Betonprüfhammers
- Bohrhärte: Wirkung eines genormten Bohrers
- Schleifhärte: Wirkung einer Schleifvorrichtung
- Polierhärte: Wirkung einer Polierapparatur
- Schlaghärte: Wirkung von Hammerschlägen

oder die genannte Definition von DE QUERVAIN, die ebenfalls angegeben werden muß.

Das Problem stellt sich für die Festigkeit in gleicher Weise. Auch dort wird die Art der Beanspruchung angegeben und von Druck-, Zug-, Scherfestigkeit usw. gesprochen.

Die Anwendung der Mohsschen Skala auf Gesteine ist in jedem Falle unsinnig, wenn sie auch hie und da noch vorkommt.

E. Zusammenfassung

Ein Überblick über die Entwicklung der Gesteinsprüfung zeigt, daß neben den klassischen Methoden (Würfeldruckfestigkeitsbestimmung, Deval- und Bauschinger-Versuch, Abnützung im Sandstrahl, Frostbeständigkeitsprüfung), die der Prüfung von Bausteinen im allgemeinen dienen, auch eine große Zahl von Verfahren zur besonderen Untersuchung von Straßenbaugesteinen zur Verfügung stehen. Es sind Stoff- und Gebrauchsprüfungen zu unterscheiden und dabei petrographische und praktisch-physikalische Methoden auseinanderzuhalten.

Prüfungen und Anforderungen an die Gesteinseigenschaften sind in den meisten Ländern in Normen und Vorschriften festgelegt, wohl ähnliche Eigenschaften von Gesteinen und fertigen Straßenbelägen betreffend, aber in den Methoden immer so stark verschieden, daß direkte Vergleiche von Prüfergebnissen und Qualitätsbeurteilungen in den wenigsten Fällen möglich sind.

Unter petrographischen Methoden sind Beschreibungen des Gesteins in verschiedenen Bereichen (Groß-, Klein- und Mikrobereich) zu verstehen. Sie dienen vor allem der Charakterisierung des Materials. Eine Qualitätsbeurteilung ist streng genommen nur möglich, wenn Vergleichsmaterial bekannter Eigenschaften vorhanden ist. Neben Beschreibungen, die der Heterogenität des Gesteins am besten angepaßt sind, kommen vor allem im Mikrobereich auch Messungen von Mineralbestand, Mineralkorngrößen usw. in Frage, Größen, die in technischen Prüfungen als Veränderliche auftreten. Sonst ist die Beschreibung von Handstücken oft aufschlußreicher als die mikroskopische Beobachtung. Auch modernere Methoden wie Röntgenographie und DTA sind in der Regel vor allem für die Vervollständigung der Materialbeschreibung brauchbar.

Aus der Diskussion praktisch-physikalischer Methoden geht hervor, daß die Bestimmung von Materialkonstanten (z. B. spez. Gewicht) wegen der typischen Heterogenität der meisten Gesteine problematisch ist, aus dem gleichen Grund bietet auch die Anwendung der Fehlerrechnung gewisse Schwierigkeiten. Zudem liefern Materialkonstanten von Straßenbaugesteinen noch keinen wesentlichen Beitrag zur Qualitätsbeurteilung. Verschiedene Methoden wie z. B. die Kornformbestimmung sind infolge unklarer Definitionen mehrdeutig. Es liegen ihnen oft nur schwer zu begründende Vorstellungen über die ideale Materialbeschaffenheit zugrunde, nach denen die ganze Prüfmethodik ausgerichtet wird. Zur Kornformbestimmung sind objektiv messende Methoden ohne Beziehungen zu theoretischem Festigkeitsverhalten der Splittkörner oder zu Schüttraumgewichten vorzuziehen.

Gute Gebrauchsprüfungen zeichnen sich dadurch aus, daß sie durch zufällige Inhomogenitäten der Proben wenig beeinflußt werden, was bei Druck- und Schlagversuchen an Splittproben und bei Poliersversuchen weitgehend der Fall ist. Die auftretenden Beanspruchungen sind dabei allerdings sehr vielfältig. Es werden deshalb nicht mehr Materialeigenschaften, sondern Verhaltensweisen unter bestimmten Bedingungen festgestellt.

Es wurden Proben aus schweizerischen Steinbrüchen (Jurakalk, Glaukonitsandstein, Kieselkalk der helvetischen Kreide, Kieselkalk des préalpines Lias, Gneise aus Flußgewinnung des Tessin, Flyschsandstein und Amphibolit) untersucht. Nach der petrographischen Beschreibung liefert kein Vorkommen ein Splittmaterial einheitlicher Qualität. Ein gewisser Prozentsatz (um 10–20%) besteht aus Gesteinen minderwertiger Qualität, die aus Zwischenlagen von Schiefern, Verwitterungsbereichen und Zonen starker Klüftung stammen (schiefrige Splittkörner, stark verwitterte Stücke, Körner mit vorwiegend Kluftkalzit usw.). Es kann hier festgehalten werden, daß Material aus Gruben des Mittellandes Splittlieferungen aus Steinbrüchen durchaus nicht unterlegen zu sein braucht.

Petrographische Beschreibung und Literaturangaben ergeben für Splitt aus Jurakalk und Gneisen eine schlechte Qualität; die übrigen Gesteine können als mittlere bis gute Qualitäten bezeichnet werden. Bei gewissen Lieferungen (Glaukonitsandstein) ist auf das Vorhandensein sehr ungeeigneter Varietäten zu achten. Eine Abgrenzung von guter, mittlerer und schlechter Gesteinsqualität erlaubt, vor allem bei Splittstichproben, einen guten ersten Überblick zu gewinnen. Die Bestimmung des Anteils harter Gesteine (definiert nach DE QUERVAIN als Kombination von Würfeldruckfestigkeit und Gehalt harter Mineralien) liefert ein sehr ähnliches Ergebnis.

Die Beurteilung wird durch die Resultate der praktisch-physikalischen Prüfungen verfeinert. Zur Kornformbestimmung wird, nach Berechnung verschiedener Formkoeffizienten mit einem ALGOL-Programm, das

Verhältnis c/a neben der Beurteilung nach Augenschein, unter Berücksichtigung des zeitlichen Aufwandes, als geeignete Beurteilungsmöglichkeit empfohlen. Kompliziertere Ausdrücke können wohl benützt werden, liefern aber nicht wesentlich genauere Beurteilungen.

Die Ergebnisse von Druck- und Schlagversuchen bestätigen die schlechte Qualität von Jurakalk und Gneisen.

Die Polierversuche ergeben unter bestimmten Bedingungen Beziehungen zwischen petrographischen Eigenschaften und Versuchsergebnissen (Zunahme der Griffigkeit mit zunehmender Korngröße und mit zunehmendem Quarzgehalt, Abnahme mit zunehmendem Gehalt an Korngrößen unter 0,03 mm und mit zunehmendem Gehalt an Bindemittel oder Grundmasse). Die entsprechenden Größen wurden durch Messungen an Dünnschliffen bestimmt.

Kristallisationsversuche mit Salzlösungen bestätigen frühere Arbeiten und die Wetterbeständigkeit der normalen Varietäten der untersuchten Gesteine.

Für verschiedene Eigenschaften wird eine Einteilung in 6 Qualitätsgruppen (sehr gut bis sehr schlecht) vorgenommen, wobei wesentliche von nebensächlichen Eigenschaften zu unterscheiden sind. Auf die Gesteine angewendet, erhält so der helvetische Kieselkalk die beste Gesamtqualität. Glaukonitsandstein, Kieselkalk des Lias, Flyschsandstein und Amphibolit sind ungefähr gleichwertig nur wenig vom Kieselkalk verschieden, Gneis und Jurakalk deutlich ungenügend. Die Anwendung bestehender Qualitätsvorschriften führt zum gleichen Schluß.

Nach Anwendung der verschiedenen Prüfmethode können Vorschläge zur Prüfmethodik formuliert werden, die vor allem den Zeitbedarf berücksichtigen. Vor der Anwendung zeitraubender Versuche ist durch petrographische Beschreibung und Beurteilung nach Augenschein an mehreren Stichproben eine Qualitätsbeurteilung durchzuführen, in der auch «persönliche Erfahrung» zu benützen ist, was Vergleich mit Gesteinen bekannter Qualität bedeutet.

Abschließend wird der Begriff der Gesteinshärte kurz diskutiert. Es ist dies keine physikalische Größe, weshalb verschiedene Definitionen gebräuchlich sind, die jeweils zu erwähnen sind, wenn der Ausdruck verwendet wird. So ist die Definition von DE QUERVAIN (1937, 1948, 1967) Kombination von Würfeldruckfestigkeit und Gehalt harter Mineralien, ein brauchbarer Vorschlag; weitere Definitionen sind aber durchaus möglich.

Résumé

La littérature nous donne les principales méthodes d'essais pour le jugement de la qualité des pierres à bâtir et des agrégats minéraux pour la construction des routes qui seront discutées ici.

Les matériaux en question ont été étudiés par les méthodes pétrographiques classiques comme la description de la géologie régionale, celle des échantillons de roches, des agrégats minéraux et des lames minces et, dans certains cas, les méthodes radiographiques. Les quantités des divers minéraux, la granulométrie et d'autres propriétés des roches sont des paramètres mesurables pour quelques méthodes d'essais.

La détermination des constants physiques des matériaux est difficile, vu que généralement, les roches et leurs produits contiennent des irrégularités fréquentes.

Les méthodes d'essais appropriées ne sont pas influencées par les inhomogénéités accidentelles des matériaux pierreux. La détermination de la résistance à la compression ou au choc des agrégats, la susceptibilité au polissage des agrégats, les méthodes classiques de l'abrasion (Deval, Los Angeles) etc. remplissent cette condition.

On a prélevé dans sept carrières suisses des échantillons de gravillon (10/16 mm), en tenant compte des sédiments et des roches métamorphiques pouvant servir à la construction des revêtements:

Calcaires du Malm supérieur du Jura plissé, grès glauconitiques de la Crétace helvétique (Gargasien/Albien), calcaires siliceux de la Crétace helvétique (Hauterivien), calcaires siliceux du Lias des Préalpes Romands, gneiss d'une exploitation de graviers de la rivière Tessin, grès du Flysch helvétique et amphibolites de la Silvretta-Decke.

Dans tous les échantillons, 10–20% des gravillons ont une qualité inférieure à la normale. Cet effet est dû à de minces bancs de marne ou de schistes, de zones de décomposition et de veines calcitiques toujours présentes dans les roches alpines. On peut obtenir des agrégats d'une qualité égale ou meilleure dans les exploitations des graviers de l'époque quaternaire.

On obtient une classification préliminaire de la qualité des agrégats en déterminant visuellement les pourcentages des gravillons d'une qualité bonne, moyenne ou mauvaise. Un résultat analogue est obtenu en examinant le contenu des roches dures dans les échantillons de gravillon (dureté des roches définie d'après DE QUERVAIN 1937, 1948, 1967 en combinant la résistance à la compression sur cubes avec le contenu des minéraux d'une dureté supérieure à 6 d'après Mohs).

Les méthodes de contrôle de la forme des gravillons sont ensuite discutées. Après l'évaluation des divers coefficients de forme avec un programme ALGOL, on peut recommander l'application du coefficient c/a (quotient de l'épaisseur et de la longueur) et l'examen visuel des échantillons.

La susceptibilité au polissage des agrégats au moyen d'un pneu dépend de certaines propriétés pétrographiques. La qualité antidérapante a) augmente avec les diamètres moyens des grains minéraux et le contenu du quartz détritique, b) diminue avec le contenu croissant de la masse de base ou des grains minéraux d'un diamètre inférieur à 0.03 mm.

La détermination de la résistance à la compression et au choc des agrégats et de la résistance aux solutions de Na_2SO_4 confirme les essais exécutés dans les années précédentes.

Le jugement définitif de la qualité a été exécuté d'une part pour les méthodes d'essais seules et d'autre part pour l'ensemble de toutes ces méthodes. La meilleure qualité a été trouvée pour les calcaires siliceux helvétiques celle des grès glauconitiques, des calcaires siliceux des Préalpes, des grès du Flysch et des amphibolites est légèrement inférieure. Les calcaires jurassiques et les gneiss ne correspondent pas aux exigences.

La description des qualités pétrographiques et l'examen visuel de la qualité doit toujours précéder l'application des méthodes d'essais exigeant un temps très long. On peut se servir également de l'expérience personnelle basée sur la comparaison des agrégats avec des roches ou des matériaux d'une qualité connue.

Summary

Various widely – used methods of testing building stones and mineral aggregates for highway construction are discussed, with reference to the literature.

Petrographic methods (description of the regional geology, macro- and microscopic examination of rocks and aggregates, X-ray methods etc.) are applied to characterize a material. The mineral content, the grain size of minerals and other features are variables which can be measured. These variables should be considered in many Standard tests.

The determination of physical constants of the material (specific gravity, porosity etc.) is difficult due to the heterogeneity of rocks and rock products.

A test of quality, in order to be useful, should not be influenced by accidental inhomogeneities of the material. The aggregate crushing test, the skid-resistance test by use of the British polishing machine, the classical abrasion test (Deval, Los Angeles) and others meet this condition.

Samples of coarse aggregates (10–16 mm) were taken from seven quarries of Switzerland; these represent sedimentary and metamorphic rocks used for highway construction. The rocks being quarried are: limestone, upper Jurassic of the Jura mountains; glauconitic sandstone, Cretaceous (Gargasian/Albian) of the Helvetic Alps; siliceous limestone, Cretaceous (Hauterivian) of the Helvetic Alps; siliceous limestone, Lias of the Préalps; gneisses of a deposit of the Tessin river; Flysch sandstone, Tertiary of the Helvetic Alps; amphibolite of the Austroalpine nappes.

These samples always include some (10–20%) lowerquality aggregate particles. The quarried rocks contain layers of shales and slates, zones of weathering or assemblages of calcite veins always present in alpine rocks. Inclusions of these zones cannot be avoided using modern methods of quarrying. Aggregates of a comparable quality can be obtained easily from quaternary deposits in the Swiss plateau.

A preliminary quality classification was made by visual examination of random samples, determining the number of aggregate particles of good, medium or bad quality. A further useful classification is based on the percentage of hard aggregate particles (the rock-hardness definition of DE QUERVAIN 1937, 1948, 1967, as a combination of compressive strength and content of minerals harder than 6 in the Mohs scale, has been used).

Methods of testing particle shape are discussed. Different coefficients of shape were calculated using an ALGOL-programm. On the basis of these calculations, the application of the coefficient c/a (shortest to longest axis) is suggested as well as the rapid visual examination.

The results of the skid-resistance test using the British polishing machine can be correlated with petrographic data. The skid-resistance increases with increasing size of mineral grains and content of detrital-quartz, and decreases with increasing amounts of groundmass or mineral grains less than 0,03 mm in diameter. The data were determined in thin sections.

Aggregate crushing tests and sodium sulfate tests confirm earlier results.

The final quality classification was made using all test methods alone and in combination. The Cretaceous siliceous limestone is of the highest quality, followed closely by the aggregates of the glauconitic sandstone, the Liassic siliceous limestone, the Flysch sandstone and the amphibolite. The Jurassic limestone and the gneisses are of poor, insufficient quality.

Considering the time required to perform the various tests, quality classification using petrographical description and visual examination should always precede more complicated tests. Acquired experience, based on comparison with rocks and materials of known quality, is very useful.

F. Literaturverzeichnis

- AHU, M. J. (1952): Le contrôle des gravillons routiers. Revue général des routes et des aérodromes, 251/1952, 51–64.
- AMERICAN SOC. FOR TESTING AND MATERIALS (1964): Book of ASTM Standards, Part. 10, Concrete and Mineral Aggregates. Philadelphia.
- BACKHAUS, E. (1962): Der Betonprüfhammer als Hilfsmittel zur Bestimmung der relativen Festigkeit bei Sedimentgesteinen. Geol. Mitt. TH Aachen, 3, 2.
- BADOUX, H. (1965): Geol. Atlas der Schweiz, Blatt 1264, Montreux, mit Erläuterungen. Schweiz. Geol. Kommission.
- BAUSCHINGER, J. (1873): Versuche über die Festigkeit von Mörtelproben am Perlmooser Portland-Cement und hydr. Kalk. Mitt. mech.-techn. Lab. k. polytechn. Schule München, H. 1.
- BAUSCHINGER, J. (1874): Festigkeit verschiedener Bausteine. Mitt. mech.-techn. Lab. k. polytechn. Schule München, H. 4.
- BAUSCHINGER, J. (1875): Über den Elastizitätsmodel und die bleibende Zusammendrückung und Ausdehnung mehrerer Bausteine. Mitt. mech.-techn. Lab. k. polytechn. Schule München, H. 5.
- BAUSCHINGER, J. (1884): Untersuchungen über die Elastizität und Festigkeit der wichtigsten natürlichen Bausteine in Bayern. Mitt. mech.-techn. Lab. k. polytechn. Schule München, H. 10.
- BAUSCHINGER, J. (1884): Versuche über die Abnützbarkeit und Druckfestigkeit von Pflaster- und Schottermaterialien. Mitt. mech.-techn. Lab. k. polytechn. Schule, München, H. 11.
- BOESCH, H. H., CADISCH, J., und WENK, E. (1953): Geol. Atlas der Schweiz, Blatt 424, Zerne, mit Erläuterungen. Schweiz. Geol. Kommission.
- BOUCHAYER, J. (1952): Influence de la préparation des gravillons dans l'exécution et sur la tenue des revêtements superficiels. Revue général des routes et des aérodromes, 251/1952, 39–50.
- BRAND, W., VOSS, R., ZICHNER, G. (1966): Über die Festigkeitsprüfung von Gesteinssplitten. Straße und Autobahn 2/1966, 50–57.
- BREYER, H. (1950): Die Klassifizierung und die mechanische Prüfung von Straßenbaugesteinen. Ein kritischer Vergleich britischer und deutscher Erfahrungen. Straße und Autobahn 12/1950, 25–29.
- BREYER, H. (1935): Die Entwicklung der Gesteinsprüfung und ihrer Verfahren, ihr heutiger Stand und ihre weiteren Ziele. Zeitschr. dtsh. Geol. Ges. 7/87, 434–446.
- BRINELL, J. A. (1900): Ein Verfahren zur Härtebestimmung nebst einigen Anwendungen desselben. Baumaterialienkunde, 5. Jhg., Stuttgart.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION (1951, 1960): British Standard 812:1951, 812:1960. London.
- BROWN, G. (1961): The X-Ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals. Min. Soc. (Clay Mineral Group), London.
- BURCHARTZ, A. (1930): Die Prüfung von Straßen- und Gleisbettungsstoffen auf Verhalten gegenüber statischen und dynamischen Beanspruchungen. Mitt. des Neuen Int. Verb. für Mat.-Prüfungen, Zürich, 25–31.
- CADISCH, J. (1953): Geologie der Schweizer Alpen. Wepf & Co., Basel, 2. Aufl.
- DANTINNE, R. (1965): Confrontation des Normes d'essais des matériaux pierreux à usages routiers adoptées dans différents pays. Univ. de Liège, Faculté des Sciences appliquées, Mémoires (Nouvelle Serie) du Centre d'études de rech. et d'essais scientifiques du génie civil (C.E.R.E.S.), No. 10.
- DANTINNE, R., und LONGUEVILLE, P. (1965): Etude critique des méthodes de qualifications des pierres utilisées dans les constructions routiers. Univ. de Liège, Faculté des Sciences appliquées, Mémoires (Nouvelle Serie) du C.E.R.E.S., No. 10.
- DE QUERVAIN, F. (1931): Petrographische Untersuchungen an Schotter- und Pflastermaterialien. Schweiz. Min. Pet. Mitt. 11, 183–227.
- DE QUERVAIN, F. (1937): Über den Härtebegriff bei nutzbaren Gesteinen. Hoch- und Tiefbau, 50, 395–396.
- DE QUERVAIN, F. (1941): Die Eigenschaften des Gesteinsmaterials, wie es für die Herstellung von Belägen verwendet wird. Straße und Verkehr, 21, 387–401.
- DE QUERVAIN, F. (1945): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. Teil I. Beitr. Geol. der Schweiz, Geotechn. Serie 23. Schweiz. Geotechn. Kommission.
- DE QUERVAIN, F., und GSCHWIND, M. (1949): Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. Schweiz. Geotechn. Kommission, Kümmerly & Frey, 2. Auflage.
- DE QUERVAIN, F. (1950): Über die Klassifizierung des Gesteinsmaterials für den Straßenbau. Straße und Verkehr, 10/1950, 297–301.
- DE QUERVAIN, F., und JENNY, V. (1951): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. Teil. II. Beitr. Geol. der Schweiz, Geotechn. Serie 30, Schweiz. Geotechn. Kommission.
- DE QUERVAIN, F., und JENNY, V. (1953): Untersuchungen zum Verhalten von Schottergesteinen gegenüber Witterungseinflüssen. Ber. d. Schweiz. Geotechn. Kommission (unveröffentlicht).
- DE QUERVAIN, F. (1953): Untersuchungen an Gesteinsmaterial für bituminöse Straßenbeläge. Straße und Verkehr 3/39, 1953, 63–70.
- DE QUERVAIN, F. (1954/55): Untersuchung der Gesteinsmaterialien für Bahnschotter. EMPA-Ber. Nr. 9922 erstattet an die Schweiz. Bundesbahnen.
- DE QUERVAIN, F., WALZ, K., GRAF, O., KIESLINGER, A. (1957): Die Prüfung der natürlichen Bausteine. Handbuch der Werkstoffprüfung, Bd. III; J. Springer, Berlin, 2. Aufl.
- DE QUERVAIN, F. (1959): Beziehungen zwischen Gesteinsbeschaffenheit, Form und Festigkeit bei Straßensplitt. Straße und Verkehr, 9/1959.

- DE QUERVAIN, F. (1961): Rapport sur le pierre exploité dans les carrières d'Arvel (VD) et de Massongex (VS) comme aggrégat minéral pour béton de revêtement de routes. Unveröffentlichtes Gutachten.
- DE QUERVAIN, F. (1963): Der Fels als Gesteins-Großbereich. Schweiz. Bauz. 6/81, 78–79.
- DE QUERVAIN, F. (1967): Technische Gesteinskunde. Birkhäuser Basel und Stuttgart, 2. Aufl.
- ELSTER, G. (1928): Untersuchungen über Härte und Festigkeit von Gesteinen. Glückauf, 9/64, 278–281.
- EMPA (1958): Ergebnisse der Prüfung der Festigkeitseigenschaften von 7 Splittsorten Schweiz. Provenienz mit einer Korngröße von 9–13 mm. EMPA Nr. 10669, Gutachten an die Ver. Schweiz. Straßenfachmänner.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRASSENWESEN (1957): Merkblatt für Körnungen aus gebrochenem Naturstein. Straße und Autobahn 10/1957, 371.
- FREDSTED, T. (1965): Die Bedeutung der Fahrbahnoberfläche für die Verkehrssicherheit. Straßen- und Tiefbau 10/1965.
- FRIEDMAN, G. M. (1958): Determination of sieve-seize distribution from thin-section data for sedimentary petrological studies. Journ. of Geol. 66, 394–416.
- FUETER, E., und AMSTUTZ, E. (1965): Materialprüfung und Versuchswesen in der Schweiz und im Ausland. Verlags-Aktiengesellschaft, Thun.
- GARY, M. (1897, 1898, 1901): Prüfung natürlicher Gesteine. Mitt. aus den k.-techn. Vers.-Anst. Berlin, 15., 16. und 19. Jhg.
- GARY, M. (1904): Versuche mit dem Sandstrahlgebläse, Mitt. aus den k.-techn. Vers.-Anst. Berlin, 22. Jhg.
- GOOD, J. F., und OWINGS, E. P. (1961): A laboratory – field study of hot asphaltic concrete wearing course mixtures. ASTM Spec. Techn. Publ. No. 309, Philadelphia.
- GRAF, O. (1927): Über Versuche zur Ermittlung des Widerstandes von nichtmetallischen Baustoffen gegen Abnutzung. Der Straßenbau, 33/18, 563–567.
- GRENGG, R. (1925): Über ziffernmäßiges Erfassen von Gefügeeigenschaften der Gesteine. Tschermak's Min. und Pet. Mitt. 38, 479–493.
- GRENGG, R. (1928): Versuche über den Verschleiß von Straßenschottern und die damit einhergehende Staub- und Schlammabildung. Das Straßenwesen 1, 12–14.
- GRENGG, R. (1928): Über die Bewertung von natürlichen Gesteinen für bautechnische Zwecke. Abh. zur prakt. Geol. und Bergwirtsch.lehre 15; W. Knapp, Halle.
- GRENGG, R. (1930): Anwendung mineralogischer und petrographischer Erkenntnisse auf die technische Materialprüfung der nichtmetallischen anorganischen Stoffe. Mitt. des Neuen Intern. Verb. für Mat.-Prüfung, Zürich, 12–20.
- GRUENBAUM, H. (1967): Lebensdauer eines Belages in Abhängigkeit von Zusammensetzung und Aufbereitung des Mischgutes. Straße und Verkehr 5/53, 195–199.
- HALLER, P. (1959): Die Prüfung der Festigkeitseigenschaften von Splitt und Schotter. Straße und Verkehr 9/1959.
- HANTKE, R. (1961): Tektonik der helvetischen Kalkalpen zwischen Obwalden und dem St. Galler Rheintal. Vierteljahresschrift der Natf. Ges. Zürich, 1/106.
- HEIM, ARN. (1913, 1916): Monographie der Churfürsten-Mattstock-Gruppe, Teile II und III. Beitr. zur Geol. K. der Schweiz, N. F. 20. Lieferung.
- HEIM, W., TEMME, T., EWERS, N., REZNAK, L., LEINS, W., NAGEL, J. (1965): Gesteinsprüfung im In- und Ausland. Der Naturstein im Straßenbau, 2/11, H. 40. Stein-Verlag Janson, Bonn.
- HERB, R. (1962): Geologie von Amden. Beitr. zur Geol. K. der Schweiz, N. F. 114. Lieferung.
- HIRSCHWALD, J. (1908): Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. W. Ernst & Sohn, Berlin.
- HIRSCHWALD, J. (1912): Handbuch der Bautechnischen Gesteinsprüfung. Gebr. Bornträger, Berlin.
- HOEFFGEN, H. (1930): Abgekürzte Verfahren zur mechanischen Prüfung von Straßenbaugesteinen. Steinbruch und Sandgrube, 29. Jg., Nr. 27–36, Halle. Dissertation TH Karlsruhe (1929).
- HOLLER, H. (1935): Über die Abhängigkeit der technologischen Gesteinseigenschaften von der Gefügeregelung. Zeitschr. dtsch. Geol. Ges. 7/87, 447–452.
- JEANNET, A. (1912/13): Monographie géologique des Tours d'Ai et des régions avoisinantes (Préalpes vaudoises). Beitr. zur Geol. K. der Schweiz, N. F. 34. Lieferung.
- KATHREIN, G. (1927): Über den Einfluß der Kornform auf das Siebergebnis. Der Straßenbau, 12/18, 191–192.
- KESSLER, W. A. (1930): The resistance of stone to frost action. Mitt. des Neuen Intern. Verb. für Mat.-Prüfung, Zürich, 37–44.
- KIESLINGER, A. (1935): Kugeldruckprobe an Gesteinen. Geologie und Bauwesen, 2/7, 65–78.
- KILIAN, G. (1967): Über die Notwendigkeit einer umfassenden Qualitätsprüfung bei der Herstellung von Gesteinsplitten für den Straßenbau. Straßen- und Tiefbau 1/1967, 20–24.
- KLEIN, W. (1928): Petrographische Untersuchungen über die Eignung von Basalten als Pflastermaterial. Mitt. aus dem Geol.-Min. Inst. der Univ. Köln.
- KNIGHT, H. B. (1935): Road aggregates, their uses and testing. The Roadmakers Library, Vol. 3, E. Arnold, London.
- KRUEGER, K., BIERHALTER, W., OHSE, E., SKOPNIK, A. v., STOECKE, K. (1932): Wie prüft man Straßenbaustoffe? Allg. Ind.-Verlag GmbH, Berlin.
- LEES, G. (1964): The measurement of particle elongation and flakiness: a critical discussion of British Standard and other methods. Magazine of Concrete Research, Vol. 16, Nr. 49, 225–230.
- LINDER, A. (1964): Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. Birkhäuser Basel und Stuttgart, 4. Auflage.

- MAAG, E. (1967): Verbesserung der Griffigkeit von Fahrbahnbelägen durch Epoxydharz-Überzüge. *Straße und Verkehr* 5/53, 214–216.
- MAC LEAN, D. J., und SHERGOLD, F. A. (1961): Das Polieren von Gesteinen in Beziehung zu ihrer Auswahl für die Verwendung in Straßendecken. *Straße und Autobahn* 10/1961.
- MARKWICK, A. H. D., und SHERGOLD, F. A. (1945): The aggregate crushing test for evaluating the mechanical strength of coarse aggregate. *Journ. Instn. Civ. Engineers*, 24.
- MILNER, H. B. (1962): *Sedimentary Petrography*, Vol. I. Georg Allen & Unwin Ltd., London, 4. Ed.
- MOLL, P. (1951): Zur Untersuchung von Splitten auf ihre Festigkeit. *Straße und Autobahn*, 1951, 18–20, 56–58.
- MORGENBROD, A. (1955): Die graphische Darstellung der Kornformwerte nach DIN 1991. *Straßen- und Tiefbau* 10/1955, 644–649.
- MORGENBROD, A. (1956): Untersuchungen über Raummetergewichtsfragen, Kornformbestimmungsmethoden und über die korrelativen Zusammenhänge der technisch bestimmbaren Kornformgrößen. Dissertation, TH Aachen.
- MORGENBROD, A. (1961): Beitrag zur Ermittlung eines Prüfverfahrens für die Schlag- und Druckfestigkeit von Splitt. *Straßen- und Tiefbau*, 9/1961, 780–783.
- MUELLER, G. (1964): *Sediment-Petrologie, Teil I: Methoden der Sediment-Untersuchung*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- MUELLER, L. (1963): *Der Felsbau*, I. Band. F. Enke Verlag, Stuttgart.
- NIGGLI, P., PREISWERK, H., GRUETTER, O., BOSSARD, L., KUENDIG, E. (1936): Geologische Beschreibung der Tessiner Alpen zwischen Maggia- und Bleniotal mit geol. Spez.-Karte Nr. 116. *Beitr. zur Geol. der Schweiz*, N. F., 71. Lieferung.
- NIGGLI, P. (1928): Neuere Untersuchungen über Straßenbaustoffe und ihre Bewertung in Deutschland und Österreich. *Schweiz. Zeitschr. f. Straßenwesen*, 1/1928, 3–8.
- NIGGLI, P. (1930): Mitwirkung des Mineralogen und Petrographen bei der Beurteilung der natürlichen und künstlichen Bausteine und Straßenbaumaterialien. *Mitt. des Neuen Int. Verb. f. Mat.-Prüfungen*, Zürich, 1–9.
- NOTZ, R. (1924): Geologische Untersuchungen an der östlichen Lägern. Dissertation Univ. Zürich.
- OBERHOLZER, J. (1933): Geologie der Glarneralpen. *Beitr. zur Geol. Karte der Schweiz*, N. F. 28. Lieferung.
- ONITSCH-MODL, E. M. (1953): Die Mikrohärteprüfung in Theorie und Praxis. *Schweiz. Archiv*, 19/1953, 330–343.
- PAULS, J. T., und CARPENTER, C. A. (1948): Mineral aggregates for bituminous construction. *ASTM Spec. Techn. Publ. No. 83*, 173–181.
- PELTIER, R. (1963): *Handbuch für das Straßenbaulabor*, übersetzt von Mieg, J. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin.
- PEIFER, H. (1951): Ein Beitrag zur Kornverfeinerung in bituminösen Fahrbahnbelägen (Kleinprüfung an Splittproben). *Straße und Autobahn* 9/1951, 308–312.
- PICKEL, H., und ROTHFUCHS, G. (1938): Bewertung der Kornform von Edelsplitt. *Bitumen*, 1938.
- RHOADES, R., und MIELENZ, R. (1948): Petrographie and mineralogic characteristics of aggregates. *ASTM Spec. Tech. Publ. No. 83*, 20–48.
- ROSIWAL, A. (1896): Neue Untersuchungsergebnisse über die Härte von Mineralien und Gesteinen. *Verh. der k. k. geol. Reichsanstalt*, 475–491.
- ROSIWAL, A. (1899): Über einige neue Ergebnisse der technischen Untersuchung von Steinbaumaterialien. Eine neue Methode zur Erlangung zahlenmäßiger Werte für die «Frische» und den «Verwitterungsgrad» der Gesteine. *Verh. der k. k. geol. Reichsanstalt*, 204–225.
- ROSIWAL, A. (1909): Die Zermalmungsfestigkeit der Mineralien und Gesteine. *Verh. der k. k. geol. Reichsanstalt*, 386–390.
- ROESSLEIN, D. (1941): Steinbrecheruntersuchungen unter besonderer Berücksichtigung der Kornform. Berlin, 1941.
- ROTHFUCHS, G. (1931): Bewertung der verschiedenartigen Kornform von Steinschlag und Splitt. «Zement», Heft 28.
- ROETHLISBERGER, H. (1957): Zur seismischen und petrographischen Charakterisierung einiger Molassegesteine, einschließlich der Beschreibung von Methoden der Korngrößenbestimmung in Festmaterial. *Beitr. zur Geol. der Schweiz, Serie Geophysik*, Nr. 1.
- RUDELOFF, M. (1897): Untersuchungen von Kies- und Steinschlag zur Beurteilung ihres Wertes als Stopfmateriale für den Eisenbahnoberbau. *Mitt. aus den k.-techn. Vers.-Anst. Berlin*, 15. Jhg.
- SABINE, P. A., MOREY, J. E., SHERGOLD, F. A. (1954): The correlation of the mechanical properties and petrography of a series of quartzdolerite roadstones. *Journ. appl. chemistry*, 4/1954, 131–137.
- SACHSE, H. (1964): *Der moderne Straßendeckenbau*. Verlagsges. R. Müller, Köln-Braunsfeld, 2. Aufl.
- SCHULZ, F. (1952): Zum Problem der Kornformbestimmung. *Straßen- und Tiefbau*, 1952, 340–345.
- SCHULZ, F., und STELZER, G. (1954): Ein genaues Schnellverfahren zur Bestimmung der Kornformgüte. *Straße und Autobahn*, 1954, 48–52.
- SCHULZE, K. (1953): Schnellverfahren zur Kornformbestimmung und Vorschläge zur Definition von Splitt und Edelsplitt. *Straße und Autobahn*, 1953, 253–257.
- SCHULZE, K. (1959): Einfluß der geometrischen Feingestalt der Straßenoberfläche auf den Kraftschluß. *Straße und Autobahn*, 10/1959, 379–385.
- SCHWEIZ. GEOTECHNISCHE KOMMISSION (1915): Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz. *Beitr. zur Geol. der Schweiz, Geotechn. Serie*, V. Lieferung.
- SHERGOLD, F. A. (1947): The trade groups of roadmaking rocks. *The Quarry Manager's Journal*, 8/30, 471–480.
- SHERGOLD, F. A., und GREYSMITH, M. G. (1947): Factors governing the grading and shape of crushed rock. A survey of the literature. *The Quarry Manager's Journal*, 12/30, 703–712.

- SHERGOLD, F. A. (1951): Vorschriften für die Beschaffenheit und Prüfung von Straßenbaugesteinen. Straßen- und Tiefbau, 1951, 51–54.
- SPAENHAUER, F. (1932): Petrographie und Geologie der Grialetsch-Vadret-Sursura-Gruppe. Schweiz. Min. und Petr. Mitt. 12, 27–146.
- STAUB, W. (1911): Geologische Beschreibung der Gebirge zwischen Schächental und Maderanertal. Beitr. zur Geol. Karte der Schweiz, N. F. 32. Lieferung.
- STEINER, F. (1922): Bericht über die Ergebnisse der Schotterversuche. Schweiz. Zeitschr. für das Straßenwesen, 1–3/1922.
- STINY, J. (1935): Die Auswahl und Beurteilung der Straßenbaugesteine. Springer Verlag, Wien.
- STOECKE, K. (1938): Versuche an Steinpflaster im Prüfraum und auf der Straße. Die Bautechnik, 16, 509–512.
- STOECKE, K., WEISE, F., WALZ, K., DE QUERVAIN, F., KIESLINGER, A. (1941): Die Prüfung der natürlichen Bausteine, Bd. III des Handbuches der Werkstoffprüfung. J. Springer, Berlin, 1. Auflage.
- STRECKEISEN, A. (1928): Geologie und Petrographie der Flüelagruppe. Schweiz. Min. und Petr. Mitt., 8, 87–239.
- SUTER, H., und HANTKE, R. (1962): Geologie des Kantons Zürich. Verlag Leemann, Zürich.
- SWEET, H. S. (1948): Physical and chemical tests of mineral aggregates and their significance. ASTM Spec. Techn. Publ. No. 83, 49–73.
- TEMME, TH. (1963): Gestein im Straßenbau. Verlagsges. R. Müller, Köln-Braunsfeld.
- VAN ELSSEN, F. (1956): Méthodes de mesure des propriétés physiques et mécaniques des pierres et graviers concassés. Ass. permanente des congrès Belges de la route, VIII. congrès, Antwerpen, 1956.
- VESPERMANN, R. (1936): Technische Eigenschaften der natürlichen Gesteine und der Hochofenschlacken und ihre Bewertung für Straßenbauzwecke. Union Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin.
- VOGLER, H. (1965): Die Politur an Straßenbaugesteinen. Straßen- und Tiefbau, 7/1965.
- VOGLER, H. (1965): Das Abschleifverhalten von Straßenbaugesteinen und seine Auswirkungen auf den Kontakt zum Reifengummi. Straße und Autobahn, 8/1965.
- VON MOOS, A., und DE QUERVAIN, F. (1948): Technische Gesteinskunde. Birkhäuser, Basel, 1. Auflage.
- VSS (Vereinigung Schweiz. Straßenfachmänner): Normen zu Mineralischen Baustoffen, Qualitäts- und Prüfvorschriften. (Verz. 1966.) SNV 40 440 Meßverfahren SRT, 441 Richtwerte SRT; 70 710a Splitt und Schotter, Größe, 720 Splitt und Schotter, Form, 740 Sand und Kies für HMT, 745 Sand und Kies für Zementbetonbeläge, 760 Rundsand für bituminösen Belagsbau, 765 Brechsand für bituminösen Belagsbau, 800 Probenahme, 808 Prüfsiebe, 810 Siebversuch, Allgemeine Grundsätze, 812 Trokensiebung, 814 Naßsiebung.
- VON WEINGRABER, H. (1954): Über die Rauheit von Straßendecken und ein neues Verfahren zu ihrer Messung. Straße und Autobahn, 4/1954, 121–127.
- VUAGNAT, M. (1949): Granulométrie réelle et granulométrie apparente. Arch. des Sc., Genève, 3/2, 423–477.
- WALDMANN, A. (1950): Über die Methoden zur Bestimmung der Kornform. Straßen- und Tiefbau, 11/1950, 334–337.
- WALZ, K. (1936): Die Bestimmung der Kornform der Zuschlagstoffe. Die Betonstraße, 1936.
- WALZ, K. (1939): Die Kennzeichnung der Kornform von grobkörnigen Schüttgütern. Der Straßenbau, 1, 2 /1939.
- WALZ, K. (1939): Die Prüfung von Kies und Splitt für Straßenbeton. Die Betonstraße, 14. Jg., 215–221, 229–234.
- WEBER, J. (1966): Petrographische Anforderungen an Gesteinsmaterialien für Straßenbeläge und Heißmisch-Tragschichten. Straße und Verkehr, 12/1966, 611–617.
- WEHNER, B. (1965): Ergebnisse von Griffigkeitsmessungen und Verkehrssicherheit. Straße und Autobahn, 8/1965.
- WENK, E. (1934): Beiträge zur Petrographie und Geologie des Silvretakristallins. Schweiz. Min. und Petr. Mitt. 14, 196–278.
- WENN, B. (1951): Untersuchungen von Splittkörnungen auf Widerstandsfähigkeit gegen Schlag und Druck. Straße und Autobahn, 1951, 85–89.
- WOOLF, D. O. (1948): Needed Research. ASTM Spec. Techn. Publ. No. 83, 221–233.
- ZELTER, W. (1927): Petrographische Untersuchung über die Eignung von Graniten als Straßenbaumaterial. Abh. zur prakt. Geol. und Bergwirtschaftslehre, Bd. 12, W. Knapp, Halle.
- ZELTER, W. (1935): Über Erfahrungen mit Naturgesteinen im Straßenbau. Zeitschr. dtsch. Geol. Ges., 7/87, Berlin-Stuttgart.
- ZINGG, T. (1935): Beitrag zur Schotteranalyse. Schweiz. Min. und Petr. Mitt. 15, 39–140.
- ZUBERBUHLER, C. (1964): Die Untersuchung der Griffigkeitseigenschaften von Straßensplitt. Straße und Verkehr, 4/1964.