

Einige Beziehungen zwischen Kolloidchemie, Geologie und Technik.

Von Ing. und Dr. phil. Josef Stiny.

Ueber Zusammenhänge zwischen Kolloidchemie und Geologie liegen bereits zahlreiche Veröffentlichungen vor; ich erinnere nur an die Arbeiten von Leitmeier¹⁾, Niklas²⁾, Ehrenberg³⁾ usw. Pollacks⁴⁾ Studie beleuchtet unter anderem auch den Nutzen, den die Technik aus der Klärung mancher Fragen aus den Grenzgebieten zwischen Geologie und Kolloidchemie ziehen könnte.

In der Tat verdienen die Grenzgebiete zwischen Geologie und Technik eine sorgfältigere Pflege von seiten der Geologen als bisher. Das gleichgültige, um nicht zu sagen ablehnende Verhalten vieler Ingenieure gegenüber der Geologie rührt zum Teil auch von dem geringen Interesse her, das viele Geologen jenen Fragen entgegenbringen, welche den Techniker fesseln; gilt es doch in Geologenkreisen vielfach als weit zeitgemäßer, sich mit Tektonik als mit anderen Fragen der sogenannten allgemeinen Geologie zu beschäftigen. Auf dem Gebiete der letzteren ist man vielfach über die Kenntnisse noch nicht hinaus, die man bereits vor 50—60 Jahren über gewisse Naturerscheinungen gewonnen hatte; ich denke dabei besonders an die Abschnitte über Erosion, Bodenbewegungen usw., deren Bearbeitung in den geologischen Lehrbüchern der letzten Jahrzehnte fast die gleiche geblieben ist. Zwar haben Forscher wie Bargmann, Blanckenhorn, Frech, Heim, Koch, Löwl, Pollack, Reyer, Singer, Toulou usw. so manches Bemerkenswerte über Murbrüche, Bergstürze, Talbildung, Rutschungen und verwandte Erscheinungen veröffentlicht. Die Ergebnisse ihrer Beobachtungen und Untersuchungen waren für den Fortschritt der geologischen Wissenschaft und für die Technik gewiß gleich wertvoll und das Unterbleiben dieser Veröffentlichungen hätte für unsere Erkenntnis einen Ausfall bedeutet. Es fehlt aber in diesen älteren einschlägigen Arbeiten vielfach noch die quantitative Wertung der Naturerscheinungen; die geologische Forschung pflegte vornehmlich die spekulative Richtung und erst seit Daubrée,

¹⁾ Dölter, Cornu und Leitmeier, Die Anwendung der Kolloidchemie auf Mineralogie u. Geologie Zeitschrift für Chemie u. Industrie der Kolloide. 1909.

²⁾ Niklas, H., Die Kolloidchemie und ihre Bedeutung für die Bodenkunde, Geologie und Mineralogie. Interne Mitteilungen für Bodenkunde. 1913, S. 383 ff.

³⁾ Ehrenberg, Die Bodenkolloide. Dresden 1915.

⁴⁾ Pollack, V., Zur Frage der Bodenbeweglichkeit und Druckfestigkeit der „Tongesteine“ und verwandter Materialien, Kolloidzeitschrift 1917, S. 88 ff.

Paulcke u. a. zieht man auch den Versuch und die Statistik immer mehr und mehr zur Lösung strittiger Fragen heran. Versuch und Messung, abwägender Vergleich und kritische Zusammenstellung (Statistik) aber bieten erst jene festen Grundlagen, auf welchen der Ingenieur aufbauen und aus welchen er nutzbringende Schlüsse für seine Tätigkeit ziehen kann. Daß der Beruf des Ingenieurs ein überaus hoher und wichtiger ist, weil seine Ausübung unermeßliche volkswirtschaftliche Werte schafft, davon überzeugen sich die Völker täglich immer wieder vom neuen, ja man könnte die Achtung, die sich der Ingenieur bei einem Volke erfreut, fast als Gradmesser für die wirtschaftliche Fortgeschrittenheit des betreffenden Landes betrachten. Der Ingenieur wird seinen Aufgaben aber oft nur dann entsprechen können, wenn er die Naturerscheinungen kennt, die sich seinem Unternehmen mehr minder hinderlich entgegenstellen. Hier frommt es nicht, der rohen Naturgewalt wiederum wuchtige Kraft entgegenzusetzen; bei diesem aus wirtschaftlichen Gründen ungleichen Kampfe triumphiert zumeist die allmächtige Mutter Natur und der Mensch zieht den kürzeren. Hier setzt die Beratung und Ergänzung der Tätigkeit des Ingenieurs durch den Geologen ein; dieser lehrt den Techniker die Erkenntnis der Naturerscheinungen und das zweckmäßigste Verhalten gegenüber den die Erdrinde formenden Kräften. Aus der Kenntnis des Verlaufes, der Stärke, der Folgen usw. eines geologischen Vorganges schöpft der Ingenieur die Mittel, die Natur zu meistern und zu beherrschen; nur derjenige ist Ingenieur im vollen, hehren Sinne des Wortes, der es versteht, mit den gegebenen Kräften und Stoffen hauszuhalten, die Naturgewalten mit den geringstmöglichen Mitteln zu besiegen und, wo wünschenswert, sogar die Naturerscheinungen selbst zur Lösung von Aufgaben heranzuziehen und seinen Zwecken dienstbar zu machen. Der Geologe wird aber nur dann immer mehr veredelnd auf die Tätigkeit des Ingenieurs einwirken können, wenn er sich in entsprechendem Maße dem Ausbaue der Lehren der allgemeinen Geologie und der technischen Auswertung der Gesteinskunde widmet. Die Gebiete der historischen Geologie und der Paläontologie fördern die Technik unmittelbar wenig oder gar nicht, so sehr sie auch die rein geologische Erkenntnis bereichern und so mittelbar auch dem Ingenieur zugute kommen.

Die Wechselbeziehungen zwischen Gesteinskunde und Technik haben nun in der letzten Zeit durch eine Reihe namhafter Forscher sorgfältige Pflege und wesentliche Förderung erfahren; es dürfte genügen, aus der Fülle von geehrten Arbeitern auf Namen wie Hanisch, Herrmann, Hirschwald, Rosiwal u. a. hinzuweisen. Immerhin aber bleibt hier noch ein weites Arbeitsfeld für ergänzende Forschungen offen.

Mehr im argen liegen die Verhältnisse auf dem Gebiete der dynamischen Geologie. Zwar fehlt es auch hier nicht an Ansätzen zu einer ziffermäßigen Auswertung der Naturerscheinungen. Die großartigste Veröffentlichung stellt, von Hoff¹⁾ abgesehen, in

¹⁾ Hoff, K. E. A., Geschichte der durch Ueberlieferung nachgewiesenen natürlichen Veränderungen der Erdoberfläche. Gotha 1884.

dieser Hinsicht Sappers¹⁾ Arbeit über die Vulkane der Erde dar. Götzingers²⁾ schöne Veröffentlichungen bedeuten einen Gewinn für unseren ziffermäßigen Einblick in den Verlauf mancher Naturerscheinungen. Brauns³⁾ an und für sich gute Anregungen zu einer Statistik der Bodenbewegungen versprachen reiche Ausbeute auch für technische Zwecke, scheinen aber keinen Widerhall, beziehungsweise keine Fortsetzung gefunden zu haben. Häberle⁴⁾ beschäftigte sich mit den Fortschritten der Verwitterung, Erosion und Denudation. Auch der Verfasser⁵⁾ wies wiederholt auf die Notwendigkeit ziffermäßiger Feststellungen und von Versuchen bei geologischen Vorgängen hin und machte gelegentlich einige diesbezügliche Angaben. Das bisher von den Genannten und Anderen Geleistete ist aber bloß ein kleiner Anfang dazu, die dynamische Geologie auf jene sichere, konkretere Grundlage zu stellen, welche sie erst dem Techniker so recht wertvoll macht. Eine ungeheure Arbeit ist noch zu bewältigen. Entsprechend der Tatsache, daß so manche noch näher zu klärende Fragen auf dem Grenzgebiet zwischen Technik (Hydraulik usw.) und Geologie liegen, wird die Arbeit von Geologen und Ingenieuren gemeinsam geleistet werden müssen, soll für die ausübende Tätigkeit Ersprießliches erzielt werden. Zu diesem Behufe wird der Geologe seine Kenntnisse nach der technischen, der Ingenieur sein Wissen nach der geologischen Seite hin erweitern, ergänzen und vertiefen müssen. Die junge Wissenschaft der Kolloidchemie wird dabei gar oft zu Rate zu ziehen sein.

Es soll im Nachstehenden versucht werden, einige dieser Wechselbeziehungen zwischen Geologie, Technik und Kolloidchemie herauszugreifen und näher zu beleuchten. Eine erschöpfende Darstellung wird dabei weder erreicht noch angestrebt werden. Es möge daher die vorliegende Arbeit nur als eine bescheidene Anregung zur weiteren Verfolgung des gesteckten Zieles, die dynamische Geologie nach der quantitativen und experimentellen Seite hin auszubauen, aufgefaßt werden. Dabei sollen die Ergebnisse einiger Versuche mitgeteilt werden, welche vom Verfasser angestellt wurden; ihre gelegentliche Fortsetzung ist geplant.

¹⁾ Sapper, K., Beiträge zur Geographie der tätigen Vulkane. Zeitschrift für Vulkanologie. 1917. Band III.

²⁾ Götzinger, G., Beiträge zur Entstehung der Bergrückenformen. Pencks geographische Abhandlung. Band IX. Heft 1. Leipzig 1907. — Götzinger, G., Häberles Messungen der Fortschritte der Verwitterung, Erosion und Denudation. Deutsche Rundschau für Geographie. XXXIV. 4. Heft, S. 176—178.

³⁾ Braun, G., Ueber Bodenbewegungen. Greifswald 1908.

⁴⁾ Häberle, D., Zur Messung der Fortschritte der Erosion und Denudation. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Stuttgart 1907. Band I. S. 7 ff. — Häberle, D., Ueber die Meßbarkeit der Fortschritte der Verwitterung. Jahresbericht und Mitteilungen des oberrhein. geologischen Vereins 1911. N. F. S. 52.

⁵⁾ Stiny, J., Die Ursachen der vorjährigen Vermurungen im Zillertal. Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft. Wien 1909. S. 213 ff. — Die Muren. Innsbruck 1910. — Fortschritte des Tiefenschurfes in der Gegenwart. Geologische Rundschau. III. Band. S. 166 ff. — Versuche über Schwemmkegelbildung. Geologische Rundschau 1917. S. 189 ff.

Die Versuche wurden im Laboratorium der Lehrkanzel für forstliche Standortslehre an der k. k. Hochschule für Bodenkultur in Wien ausgeführt; Herrn Prof. Dr. W. Grafen zu Leiningen sei an dieser Stelle für die gütige Erlaubnis zur Benützung der Arbeitsräume der geziemende Dank abgestattet. Als Versuchsstoffe dienten sarmatische Sande von der Türkenschanze und sogenannte „Tegel“ aus den Ziegeleien von Hernals (sarmatische Stufe des Tertiärs). Der verwendete Tegel enthielt, wie ermittelt wurde, 5·56 v. H. Kalziumkarbonat beigemischt, das verschiedenen, zerkleinerten Resten von Muscheln und Schnecken entstammt. Der Sand wurde durch Sieben, der Tegel durch Schlemmen mit dem Apparat von Appiani-Attenberg in Bestandteile von verschiedener Korngröße zerlegt, und die so gewonnenen Teile bekannter Größe den Versuchen zugrunde gelegt. Der Tegel erwies sich trotz des nicht geringen Kalkgehaltes als hochgradig bildsam und knetbar; dieses Verhalten dürfte wohl einerseits darauf zurückzuführen sein, daß der Kalk im Tegel wahrscheinlich z. T. selbst in kolloidaler Form auftritt, andererseits aber von ihm unter den gegebenen Verhältnissen nur so geringe Mengen in Lösung gehen, daß der Schwellenwert für die Aufhebung der Ausflockung nicht erreicht wird.

1. Das Raumgewicht von Aufschwemmungen fester Teilchen in Wasser.

Kaum ein Schriftsteller, welcher sich mit der Sinkstoff- und Geschiebeführung von Wässern beschäftigt hat, versäumte es, auf die Erhöhung der Dichte hinzuweisen, welche das Wasser durch die Beimischung von festen Stoffen erfährt. Namentlich Augenzeugen von Murgängen haben oft in überzeugender Weise geschildert, wie selbst große Felsblöcke von vielen Tonnen Gewicht nicht selten im Murbrei förmlich schwimmen; eine solche Erscheinung setzt aber ein außerordentlich hohes Raumgewicht der Murmassen voraus¹⁾. Wir können diese Erhöhung der Dichte von Wasser, welches mit festen Bestandteilen beladen ist, am besten verstehen, wenn wir von dem Raumgewichte kolloidaler Verteilungen in Wasser ausgehen.

Lange schon, ehe Graham das Wort „Kolloid“ geprägt hatte, wußte P. S. Girard²⁾, daß die Dichte von Seiwasser in geradem Verhältnisse mit der Menge von zartem Tonpulver von der Dichte = 2·47457 wachse, die man ihm beimischt. Die Ergebnisse von Girards Versuchen sind, umgerechnet, folgende:

¹⁾ Vgl. Stiny, J., Die Muren, S. 37.

²⁾ Girard, P. S., Ueber die Anziehung, die sich in merklichen Abständen zwischen den Oberflächen starrer Körper äußert, durch eine Flüssigkeit, in welcher sie untergetaucht sind. Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie. Leipzig 1825. S. 41 ff.

Tongehalt vom Hundert	Raumgewicht der Aufschwemmung	Anmerkung
75	1·9742	berechnet
70	1·9093	
60	1·7794	
50	1·6495	
40	1·5196	
30	1·3897	
20	1·2598	
10	1·1299	„
9·9	1·1181	nach Girard
5	1·0649	berechnet
4	1·0454	nach Girard
3·23	1·0335	„
1	1·0113	berechnet

Aus Girards Versuchen geht bereits hervor, daß die Zunahme der Dichte des Wassers mit der Beimischung fester, feinstverteilter Stoffe infolge von Zusammenziehungserscheinungen schwach beschleunigt erfolgt. Man ersieht außerdem ohne weiteres, daß schon in Wässern mit etwa 50 v. H. Gewichtsteilen Ton Gesteinsblöcke von geringer Dichte (Tuffe, gewisse Kalksteine usw.) leicht schwimmen können; denn ein Geschiebe von 1 m^3 Rauminhalt und etwa der Dichte = 1·60 verliert im Tonbrei obiger Zusammensetzung rund 1·65 t an Gewicht, vermag also in der Masse zu schwimmen, vorausgesetzt, daß die auf Girards Messungen aufgebauten Schwereberechnungen mit dem tatsächlichen Verhalten von Tonbrei stimmen, was nach den folgenden Ausführungen zu bezweifeln ist.

Schübler¹⁾ mischte weiße, kölnische Pfeifenerde von der Dichte = 2·44 mit verschiedenen Mengen Wassers und ermittelte das Raumgewicht der Aufschwemmung mittels eines genauen Aräometers. Nachstehend seien die von ihm ermittelten Werte, auf Hundertstel umgerechnet, wiedergegeben:

Tongehalt des Breies in Hundertsteln	Dichte des Breies	Anmerkung
2·44	1·012	nach Schübler
3·23	1·016	
3·84	1·020	
4·76	1·026	
6·25	1·034	„
9·091	1·046	„
10	1·0502	errechnet
20	1·1004	

¹⁾ Schübler, Grundsätze der Agrikulturchemie. Leipzig 1838.

Tongehalt des Breies in Hundertsteln	Dichte des Breies	Anmerkung
30	1·1506	errechnet
40	1·2008	
50	1·2510	
60	1·3012	
70	1·3514	
80	1·4016	
90	1·4518	

Schübler erhielt somit weit geringere Werte als Girard; aus seinen Ergebnissen können aber hinsichtlich der Dichtezunahme ganz ähnliche Gesetze abgeleitet werden.

Die Versuche, welche Linder und Picton¹⁾ mit kolloidem Arsentrisulfid anstellten, ergaben gleichfalls, daß die Dichtelinie nahezu streng eine Gerade ist. Aus ihren Angaben wurden nachstehende Werte errechnet:

Hundertstel As_2S_3 in der Mischung	Dichte
10 v. H.	1·075915
20 "	1·151830
30 "	1·227745
40 "	1·303660
50 "	1·379575
60 "	1·455490
70 "	1·531405
80 "	1·607320
90 "	1·683235

G. Quincke²⁾ fand die Dichte einer kolloidalen Kieselsäureverteilung zu

1·005 bei Anwesenheit von	1 v. H. Kieselsäure
1·017 bei Anwesenheit von	3 v. H. Kieselsäure
1·029 bei Anwesenheit von	5 v. H. Kieselsäure
1·059 bei Anwesenheit von	10 v. H. Kieselsäure

Sieht man von Girards Angaben ab, welche sich wegen der Unsicherheit der Umrechnungsziffer für das von ihm verwendete Aräometer nicht gut vergleichen lassen, so gewinnt man aus den Versuchen von Schübler, Linder-Picton und Quincke eine eigenartige Beziehung. Die wahre Dichte eines festen Körpers ist stets

¹⁾ Linder, S. E. und Picton, H., in „Journ. Chem. Soc. 1895“ wiedergegeben nach W. Ostwald, Grundriß der Kolloidchemie. Leipzig 1899.

²⁾ Quincke, G. in Drudes Annalen der Physik, 1903, S. 486, 509 und 1907, S. 800 (nach W. Ostwald).

etwas kleiner als die aus der Mischungsreihe theoretisch errechnete, welche man erhält, wenn man das Raumgewicht eines 10prozentigen Gemenges mit 10 vervielfacht. So erhält man z. B. die Dichte von

Kieselsäure (wasserhältig) tatsächlich zu	.2·30
rechnungsmäßig zu.....	2·59
Köln. Pfeifenerde tatsächlich zu.	...2·44
rechnungsmäßig zu.....	2·502
Arsentrisulfid tatsächlich zu	...2·70
rechnungsmäßig zu.....	2·759

Dies entspricht den bekannten Gesetzen, daß die Dichtezunahme für gleiche Gehaltzunahmestufen mit wachsendem Gehalte an festen Stoffen, wenn auch langsam, doch recht merklich steigt und daß das Raumgewicht von Aufschwemmungen infolge eintretender Zusammenziehungen größer ist, als das aus dem arithmetischen Mittel von Flüssigkeit und festem Körper berechnete.

Die Versuche mit Arsentrisulfid und mit Kieselsäure beziehen sich auf streng kolloide Stoffe, bzw. Lösungen (Gemische). Schüblers Tonbrei stellt zwar eine Mischung von Wasser mit festen Stoffen dar, welche nicht zur Gänze kolloidaler Natur sind, läßt aber über die Korngröße der Nichtkolloide im Unklaren. Es wurden daher mit den Ergebnissen der eigenen Schlämmungen Versuche angestellt, von denen Klarheit über die Frage erhofft werden konnte, wie sich die einzelnen Korngrößen in Aufschwemmungen hinsichtlich ihres Raumgewichtes verhalten.

Es darf dabei eine Ungenauigkeit nicht verschwiegen werden, welche allen ähnlichen Versuchen anhaftet. Löffler¹⁾ wies bereits darauf hin, daß infolge des Niedersinkens der festen Stoffe in einer Aufschwemmung das Aräometer etwas zu niedrige, das Pyknometer aber etwas zu hohe Werte ergebe. Da ich bei meinen Versuchen ein Aräometer verwendete, so sind die im folgenden angeführten Beobachtungswerte nur innerhalb obiger Fehlengrenze verläßlich. Die Abweichung vom wahren Dichtewerte ist bei groben Körnungen so groß, daß die erhaltenen Ziffern unbrauchbar werden; der Fall der Körner erfolgt so rasch und mit solchem Ungestüm, daß das Aräometer rasch emporschnellt, um bald wiederum allmählich zu sinken; so ergab z. B. eine Aufschwemmung von 10 *gr* groben Sand mit 0·25 bis 1 *mm* Durchmesser in 90 *gr* Wasser das Raumgewicht von 1·02, einen offenbar zu niedrigen, unverwendbaren Wert. Bei den feinen Teilchen bereitet wiederum ihr Aneinanderkleben Schwierigkeiten und es kostet einige Mühe, möglichst gleichteilige, gleichmäßig mit festen Teilchen durchsetzte Aufschwemmungen zu erhalten.

Das Raumgewicht des Sandes von 0·25 bis 1 *mm* Korndurchmesser wurde zu 2·66 bestimmt, deckt sich also fast völlig mit dem des reinen Quarzes (D. = 2·65).

¹⁾ Löffler, Wann und auf welchem Wege beeinflussen suspendierte Teilchen Gewicht und Auftrieb einer Flüssigkeit? Poggendorfs Annalen der Physik 1907, S. 517—525.

Die Ermittlung des Raumgewichtes von Aufschwemmungen von Feinsand¹⁾ (Korndurchmesser 0·2 bis 0·06 *mm*) in Wasser führten zu nachstehenden Ergebnissen:

Hundertstel Feinsand im Gesamtgemenge	Dichte der Aufschwemmung	
10	1·053	Unmittelbar beobachtet
	2	
11·11	1·055	
20	1·107	
	55	
30	1·162	Aus Beobachtungen errechnet
	56	
40	1·218	
	57	
50	1·275	
	58	
60	1·333	
	59	
70	1·392	
	60	
80	1·452	
	61	
90	1·513	
	62	
100	2·575	

Die erhobene Dichte des Feinsandes ($D. = 2·525$) nähert sich jener des Kaolins ($D. = 2·50$), beziehungsweise des Zersetzungstones, wie er aus der Verwitterung der Feldspate hervorgeht. Der geringe Mehrbetrag ist auf Beimengung feiner Quarzkörner usw. zurückzuführen.

Die Abweichung des Beobachtungswertes der Zeile 1 vom arithmetischen Mittel beträgt 0·023.

Die Versuche mit Mehlsand (0·02 bis 0·06 *mm* Korndurchmesser) ergaben die auf nachstehender Tabelle I angeführten Resultate.

Die Dichte des Mehlsandes wurde zu 2·463 ermittelt. Die Abweichung des Beobachtungswertes Zeile 1 vom arithmetischen Mittel des Raumgewichtes von Mehlsand und Wasser beträgt 0·022.

Die entsprechenden Werte für Aufschwemmungen von Schluff (0·02 bis 0·006 Korndurchmesser) ergaben die auf Tabelle II angeführten Resultate.

¹⁾ Die Bezeichnungen „Feinsand“, „Mehlsand“, „Schluff“, „Mu“ usw. werden im Sinne Attenbergs gebraucht. (Vgl. Attenberg, Die mechanische Bodenanalyse und die Klassifikation der Mineralböden Schwedens. Internationale Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. II, Heft 4.)

Tabelle I:

Hundertstel Mehlsand im Gesamtgemenge	Raumgewicht der Aufschwemmung	
10	1·051	} beobachtet
	53	
20	1·107	
	54	
30	1·158	
	55	} Aus Beobachtungen berechnet
40	1·213	
	56	
50	1·269	
	57	
60	1·326	
	58	
70	1·384	
	59	
80	1·443	
	60	
90	1·503	
	61	
100	2·564	

Tabelle II:

Hundertstel Schluff im Gesamtgemenge	Raumgewicht der Aufschwemmung	
10	1·044	} unmittelbar beobachtet
	29	
16·67	1·073	
	22	
20	1·095	
	53	} Aus Beobachtungen errechnet
30	1 148	
	55	
40	1·203	
	57	
50	1 260	
	58	
60	1 318	
	59	
70	1·377	
	60	
80	1·437	
	61	
90	1·498	
	62	
100	2·560	

Das Raumgewicht des Schluffes beträgt 2·451, die Abweichung des arithmetischen Mittels vom Beobachtungswerte der ersten Zeile 0·0288. Die Dichte des Schluffes deckt sich fast völlig mit jener der kölnischen Pfeifenerde, welche Schübler zu seinen Versuchen verwendete; demgemäß stimmen auch die erhaltenen Ergebnisse gar nicht schlecht überein.

Für feinen Staub (0·002 bis 0·006 Korndurchmesser) wurden nachstehende Dichtezahlen ermittelt:

Hundertstel Feinstaub im Gesamtgemenge	Raumgewicht der Aufschwemmung	
10	1·054	unmittelbar beobachtet
	54	
20	1·108	
	46	
28·57	1·154	Aus Beobachtungen errechnet
	10	
30	1·164	
	58	
40	1·222	
	59	
50	1·281	
	60	
60	1·341	
	61	
70	1·402	
	62	
80	1·464	
	63	
90	1·527	
	64	
100	2·591	

Die Dichte des Feinstaubes beläuft sich, wie festgestellt wurde, auf 2·439, die Abweichung des Wertes der ersten Zeile vom arithmetischen Mittel 0·018. Auch hier zeigen sich nahe Beziehungen zu den Ergebnissen des Schübler'schen Versuchs.

Es zeigt sich somit die Erscheinung, daß das Raumgewicht der Bestandteile des Tegels mit der Korngröße abnimmt. Diese Verringerung der Dichte beruht nicht bloß auf der Abnahme der Volumenergie allein, an deren Stelle allmählich die Oberflächenenergie tritt, sondern wohl auch auf einem Wechsel der mineralogischen Zusammensetzung. An die Stelle des Quarzes, welcher den groben Sand fast allein zusammensetzt, treten beim Mu (0·2—0·02 Korndurchmesser = Feinsand + Mehlsand) immer mehr und mehr schüppchenartige Teilchen, wie Glimmerblättchen, Tonflinschen usw. Inwieweit infolge der Oberflächenwirkung der feinen Teilchen Luftbläschen an ihnen haften bleiben und die Dichte verringern, läßt sich nicht überblicken.

Die Abweichung der errechneten Dichte einer 100 prozentigen, gedachten Aufschwemmung von der tatsächlich im Versuchswege ermittelten nimmt mit abnehmender Korngröße zu; sie beträgt bei:

Grobsand .	+ 0·010
Feinsand	+ 0·050
Mehlsand .	+ 0·101
Schluff	+ 0·109
Feinstaub	+ 0·152

Anders ausgedrückt, die Zusammenziehung (Verdichtung) der Aufschwemmung wächst mit zunehmender Kleinheit des Kornes.

Auftrieb, das ist Gewichtsverlust der festen Stoffe in der Flüssigkeit, kann tatsächlich erst dann eintreten, wenn die Masse der festen Teilchen völlig durchfeuchtet ist. Nach den Berechnungen von Schmid¹⁾ und anderen sind zur vollständigen Durchtränkung von Schwimmsand mit Wasser bei kugeligter Gestalt der Sandkörnchen und dichter Lagerung 25·95 v. H. Raumteile Wasser nötig. In der Gewichtseinheit nassen, dichten Schwimmsandes sind daher

87·26 v. H. Gewichtsteile Sand enthalten, wenn	
die Dichte des Sandes	2·4
87·70 v. H.	2·5 und
88·10 v. H. Gewichtsteile, wenn die Dichte des	
Sandes	2·6

beträgt. Man kann daher von Aufschwemmungen mit mehr als etwa 90 Prozent Gewichtsteilen Sand nur gedachtermaßen sprechen, in der Wirklichkeit bestehen sie im allgemeinen nicht. Nur dann, wenn die Sandkörner nicht kugelförmig, sondern annähernd würfel- oder vielfächenähnlich geformt sind und mit ihren Flächen aneinanderlagen, käme eine völlige Durchnässung früher zustande und würde die obige Grenze der möglichen Aufschwemmungen über 90 v. H. Gewichtsteile Sandes hinaufrücken. Das umgekehrte gilt für Sandkörnchen beliebiger Gestalt von lockerer Lagerung. Diese erfordern bei kugelförmiger Form zur völligen Durchnässung bis zu 47·6 v. H. Raumteile Wasser²⁾; bei den vielfächigen glazialen Sanden Schwedens schwankt dieser Betrag nach Atterberg³⁾ zwischen 36 und 41 v. H.

Die angestellten Versuchsreihen würden eine bessere Auswertung erfahren können, wenn die Dichte der festen Bestandteile aller Korngrößen dieselbe wäre und nicht, wie dies tatsächlich der Fall ist, mit der Korngröße abnähme. Dieser Umstand, wie die damit zum Teil

¹⁾ Schmid, E., Ueber die in Schwimmsandlagern mögliche Wassermenge. Oesterr. Zeitschrift für Berg- u. Hüttenwesen. Wien 1908. S. 581 ff. — Lueger, O., Technisches Lexikon.

²⁾ Nach Lang, Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik, 8. 1895; wiedergegeben nach Atterberg (siehe Fußnote 3).

³⁾ Atterberg, A., Die landwirtschaftlichen Versuchsstationen. Band 69, 1908, S. 98—148.

zusammenhängende Abweichung in der mineralogischen Zusammensetzung, trübt etwas den Ueberblick über die Erscheinung. Immerhin aber läßt sich erkennen, daß bei gleichbleibender Dichte der aufgeschwemmten Teilchen mit abnehmender Größe derselben das Raumgewicht der Aufschwemmung selbst zunimmt. Hochwässer sind daher unter sonst gleichen Umständen um so schwerer, je feiner die von ihnen mitgeführten Sinkstoffe sind. Zwar dürfte die Gewichtserhöhung von Hochwässern der Tieflandflüsse entsprechend ihrer geringen Schlammführung keine allzu bedeutende sein und sich nur selten über einige Hundertstel hinausbewegen; für die Mitführung von Treibholz, die Verstärkung der Stoßkraft usw. ist aber selbst eine so wenig beträchtliche Dichtevermehrung immer noch von Belang und man wird Schübler (a. a. O.) beipflichten müssen, wenn er sagt, daß „schon mehr weniger durch Ton und erdige Teile getrübbtes Flußwasser schwerer belastete Schiffe zu tragen imstande ist, als völlig klares, reines Wasser“. Auf diese Weise würde also die Erbauung von Talsperren in Sammelgebieten schiffbarer Flüsse durch Zurückhaltung der Sinkstoffe die Tragfähigkeit des Wassers herabmindern.

Einschneidender macht sich die Raumgewichterhöhung bei Gebirgsbächen und Flüssen bemerkbar, deren größere Geschwindigkeit eine wesentlich vermehrte Sinkstoffführung gestattet, am meisten aber bei den Muren, welche meines Erachtens im Sinne der neueren Kolloidforschung nichts anderes darstellen, als Aufschwemmungen großartigsten Maßstabes, welche von weniger stoffbeladenen Wassermassen immer wieder vom neuen vorgestoßen werden, beziehungsweise Bewegungsimpuls empfangen¹⁾. Hier muß man mit außerordentlich hohen Dichten des Murbreis rechnen. Bei einem Raumgewichte von etwa 1·50 — allerdings wohl ein nicht häufiger oberer Grenzfall — müßten alle Gesteinstrümmen von einer die Korngröße der festen Teile der Aufschwemmung übersteigenden Größe auf dem Rücken des Murganges mehr minder schwimmen, wenn ihr eigenes Raumgewicht unter 1·50 liegt. Ueber den Gehalt der Muren an festen Massen folgen weiter unten eigene Untersuchungen. Daß aber außerordentlich dichte Murbreie wirklich vorkommen, das lehrt auch die Beobachtung, daß in manchen Murgängen gewaltige Felsblöcke förmlich schwimmend abgetriftet werden und daß die Oberfläche besonders zähflüssiger, wasserarmer Muren oft von größeren Geschieben förmlich eingehüllt wird. Hierüber tieferstehend mehr.

Jedenfalls spielt das Raumgewicht bei der Beurteilung von Murgängen, ihren Wirkungen usw. eine vom Techniker nicht zu unterschätzende Rolle; von ihr hängt die Beanspruchung noch nicht völlig verlandeter Talsperren, von Sohlen gepflasterter Gerinne usw. ab. Freilich wird es schwer sein, den Betrag der Dichte schärfer zu erfassen, weil seine Höhe von der Zusammensetzung der Muren aus festen Bestandteilen verschiedener Korngröße und Dichte, vom Wassergehalt des Murbreies, vom Gefälle des Gerinnes und anderen Einflüssen abhängt, welche ebenso wie die vorgenannten entweder nur

¹⁾ Ehrenberg, P. (Die Bodenkolloide, Leipzig 1915, S. 83—85) muß als Vorläufer dieser Auffassung gelten.

ganz annähernd im voraus geschätzt oder mit Mittelwerten in Rechnung gesetzt werden können. Man wird sich aber für technische und geologische Zwecke mit der möglichen geringeren Genauigkeit um so eher begnügen können, als die Berechnung anderer, den Geologen und Techniker gleich interessierender Werte, wie der Abflußmengen, der Wassergeschwindigkeit usw. in Wildbachgerinnen ebenfalls auf keiner ganz sicheren Grundlage ruht; man wird daher den hier üblichen Sicherheitszuschlag zu den errechneten Werten auch bei der Anschätzung der möglichen Dichte zu erwartender Murgänge in Anschlag bringen.

2. Der Wassergehalt von Murgängen.

In meiner kleinen Schrift über die Muren habe ich die Abtrennung der echten Murgänge von den geschiebereichen Hochwässern in der Weise vorgenommen, daß ich, gestützt auf den äußeren Anblick, den Murgänge gewähren und Anhaltspunkte im Schrifttum annahm, bei den Muren überwiege die Masse der festen Stoffe gegenüber dem Wasserinhalte, während bei der gewöhnlichen Geschiebeförderung durch Wasser die Masse des letzteren überwiege. Ich habe damals, als ich diese Zeilen niederschrieb, lange gezweifelt, ob es nicht besser sei, an Stelle der „Masse“ das „Gewicht“ als unterscheidendes Kennzeichen einzusetzen. Um Klarheit über das Verhältnis zu schaffen, in welchem sich Wasser und Geschiebe zum Murbrei vereinigen, habe ich nunmehr eine Reihe von Versuchen angestellt.

Die Anordnung der Untersuchungen war folgende: In einem Gerinne von bekannter Neigung gegen die Wagerechte wurde ein Brei aus festen Stoffen bestimmter Korngröße aufgetragen und zumeist aus ihm eine Art stauender Barre geformt. Hierauf wurde aus einem Behälter ein dünnerer oder dickerer Wasserfaden zugeleitet. Das Wasser sammelte sich zuerst hinter dem Hinderniswalle, bis es schließlich die Barre durchbrach und als geschiebereiches Hochwasser zu Tale fuhr oder eine kleine Mure in Bewegung setzte. Bei sehr steiler Neigung entstanden Muren auch ohne Aufstau durch Selbstbeladung des Wassers mit Geschiebe. Je nach Absicht wurde sodann ein Teil des Hochwasserstromes oder ein ganzer „Murschub“ in einer gewogenen Porzellanschale aufgefangen. Die gefüllte Schale wurde sofort wiedergewogen, sodann aufs Wasserbad gebracht und das Gewicht der Schale mit dem wasserfreien „Geschiebe“ bestimmt. Auf diese Weise konnte der Wassergehalt von Murgängen ziemlich einwandfrei ermittelt werden. Die Beurteilung einer Geschiebefracht als geröllreiches Hochwasser oder als echte Mure erfolgte nach den in der Natur im großen gemachten Beobachtungen dieser Erscheinungen auf Grund der äußeren Bewegungsformen. Als Gerinne diente teils eine weite Glasröhre von kreisförmigem Querschnitte, teils eine trapezförmige Holzrinne von 1 cm Sohlenbreite und einfüßigen Böschungen. Da die murenbildenden Stoffe gewöhnliche, wenn auch feine Flußgeschiebe waren, gelten die erhaltenen Versuchsergebnisse auch nur für Geschiebemuren, nicht aber für Aschen-, Moor- oder sonstige Murformen.

a) Ermittlungen im Glasgerinne.

Die ersten Versuche, welche im Glasgerinne mit Sand von 0·25—1·0 *mm* Korngrößedurchmesser bei einer Gerinnsollenneigung von 14 Graden angestellt wurden, ergaben Uebergangsformen zwischen geschiebereichen Hochwässern und echten Muren; der Anteil des Geschiebes an der Gesamtmenge von Wasser und Fördergut betrug nur 35·4—38·5 Gewichtshundertstel.

Weitere Hochwässer, welche reich an Geschieben von 0·2 bis 0·5 *mm* Korndurchmesser waren, führten im Mittel aus mehreren Versuchen bei 14° Sohlenneigung gar nur 33·7 v. H. Sand gegen 66·3 Gewichtshundertstel Wasser.

Bei Anwendung von Mehlsand (0·02—0·06 *mm* Korndurchmesser) wurden in überaus geschiebereichen, zu echten Muren überleitenden Hochwässern nachstehende Werte ermittelt:

Gerinneneigung	Wasser in Gewichtshundertstel der Gesamtmenge	Geschiebe in Gewichtshundertstel der Gesamtmenge
20° = 36·4 v. H. mehr hochwasserartig	49·88	50·12
25° = 46·6 v. H. mehr hochwasserartig	49·45	50·55
30° = 57·7 v. H. murenähnlich	48·19	51·81
35° = 70·0 v. H. murenähnlich	46·68	53·32
40° = 83·9 v. H. murenähnlich	45·27	54·73

Es zeigt sich somit zwar ein Anwachsen der Geschiebemenge mit zunehmender Sohlenneigung, die Masse des Geschiebes aber bleibt selbst bei steilem Neigungswinkel beträchtlich gegen die Masse des Wassers zurück.

Echte Murgänge, welche mit Sand von 0·5—0·2 *mm* Korndurchmesser erzeugt wurden, ergaben wohl einen größeren Anteil der Geschiebe an der Gesamtmasse; es wurden gefunden bei einer Neigung der Gerinnssole von

20°	66·10 Gewichtshundertstel Geschiebe
30°	67·06 Gewichtshundertstel Geschiebe
40°	69·31 Gewichtshundertstel Geschiebe

Nachdem aber erst 71·43 Gewichtshundertstel 50 Massenhundertstel eines Geschiebes von rund 2·5 Dichte ergeben, bleibt auch bei diesen Versuchen, welche echte Muren erzielten, die Masse des Geschiebes hinter jener des Wassers immer noch zurück.

Wenn nun auch die Neigung der Gerinnesohle, Art, Form und Größe des Geschiebes sowie verschiedene andere Einflüsse Abweichungen von der Regel herbeizuführen imstande sind, so wird man doch im großen und ganzen die Muren als Naturerscheinungen umschreiben können, bei welchen im allgemeinen das Gewicht des bewegten Geschiebes jenes der fördernden Wassermenge völlig oder nahezu übertrifft. Dahin wäre die ältere Anschauung, daß die Masse des Geschiebes vor jener des Wassers vorwiegt, richtigzustellen.

b) Ermittlungen im Holzgerinne.

Die ersten im Holzgerinne angestellten Versuche galten dem Vergleiche mit den Ergebnissen im Glasgerinne. Mit Mehlsand von 0·02—0·06 *mm* Korndurchmesser wurden künstliche Hochwässer, beziehungsweise Murgänge erzeugt; sie enthielten bei einer Neigung des Gerinnes gegen die Wagerechte von

	Gewichtshundertstel		
	Wasser	Geschiebe	
20°	51·73	48·27	} geschiebereiche, murähnliche Hochwässer
25°	52·04	47·96	
30°	55·12	44·88	
35°	43·64	56·36	} echte Muren
40°	42·15	57·85	

Die erzielten Ergebnisse Zeile 1—3 stimmen mit der Erwartung vollkommen überein, daß die größere Reibung im Holzgerinne zur Geschiebefracht auch größere Mengen Wassers nötig machen wird. Andererseits zeigen die letzten Zeilen wiederum die Richtigkeit des Satzes, daß in echten Muren das Geschiebe nicht der Masse, sondern dem Gewichte nach überwiegt.

Letzteres geht auch aus den nachstehenden Versuchen mit Schluff (0·02 bis 0·006 *mm* Korngröße) hervor. Die erzeugten, sehr geschiebebeladenen Hochwässer enthielten bei einer Sohlenneigung von

	Gewichtshundertstel	
	Wasser	Geschiebe
10°	82·89	17·11
15°	78·11	21·89
20°	60·39	39·61
30°	57·16	42·84
40°	57·78	42·22

Es ist nicht leicht, mit so kleinen Tegelkörnchen künstliche Muren zu erzeugen, da die feinen Teilchen fest aneinanderkleben und sich mit Wasser schwer zu einem Brei mischen. Selbst wenn man außerhalb des Gerinnes einen dicken Brei anrührt, diesen ins Gerinne einträgt und dann erst die Sohle mit Wasser beschickt, gelingt es nur ausnahmsweise, Murbewegungen nachzuahmen. Man fühlt sich zu dem anfangs widersinnig erscheinenden Ausspruche veranlaßt, daß bildsame (knetbare), fette, feine Stoffe weniger zur Murenbildung neigen als nicht formbare, magere; letztere dagegen wiederum unterliegen den Rutschungen und ähnlichen Bewegungen weniger leicht als die ersteren. Es wird Aufgabe weiterer Versuche sein, hierüber völlige Klarheit zu schaffen.

Eine schöne Reihe ergaben Versuche mit Sand von 0·2 bis 0·5 *mm* Korndurchmesser. Sie zeigten, daß bei geringen Bachbettneigungen (10° bis 15°) noch keine echten Muren abgehen, sondern nur geschiebe-

überladene, murenähnliche Hochwässer; Murgänge setzen unter den gegebenen Verhältnissen eine Neigung der Gerinnesohle von im allgemeinen mehr als 15° gegen die wagrechte Ebene voraus. In steileren Gerinnen lassen sich künstliche Murgänge auf zweierlei Art hervorrufen. Erstlich durch Aufstauung einer Wassermasse hinter einem Sandrücken. An den Durchbruch des aufschwellenden Riegels kann sich dann der Abgang einer Mure anschließen; dieser Fall tritt sowohl bei stärkerer als auch bei schwächerer (aber 15° übersteigender) Gerinneneigung ein. Weiters aber können in steilen künstlichen Bachbetten Muren auch dadurch erzeugt werden, daß verhältnismäßig große Wassermassen die aus lockerem Sande bestehende Gerinnesohle bis auf den festen Untergrund (die Holzsohle) aufreißen und mit Geschiebe überladen als Mure zu Tale stürzen. Letzterer Vorgang der Murenbildung kann auch in der Natur oft dort beobachtet werden, wo bei Eintritt bestimmter meteorologischer Ereignisse mehr Wasser als gewöhnlich über steile Schutthalden herabschießt oder in einer Felsklamm, die in Zeiten vergleichsweise Ruhe meterhoch mit Schutt aufgefüllt wurde, plötzlich gewaltige Wassermengen abfließen. Nachstehend die bei den Versuchen erhaltenen Zahlenwerte.

Neigung	Gewichtshundertstel		Anmerkung
	Wasser	Geschiebe	
20°	65.01	34.99	Murähnliches Hochwasser
25°	40.28	59.72	echte Murgänge
30°	34.42	65.58	
35°	32.40	67.60	
40°	32.37	67.63	

Um den Einfluß zu untersuchen, den die Zusammensetzung des Murbreies aus Teilchen verschiedener Korngröße auf die Murenbildung ausübt, wurden Versuche mit Gemengen von Sand und Schluff, beziehungsweise feinen Staub angestellt, deren Ergebnisse tiefer folgen.

α) Versuche mit einer Mischung von 10 g Feinstaub (0.002 bis 0.006 mm Korndurchmesser) und 200 g Sand von 0.25—1.00 mm Korndurchmesser.

Sohlenneigung	Gewichtshundertstel	
	Wasser	Geschiebe
20°	44.84	55.16
40°	32.51	66.49

β) Versuche mit einer Mischung von 10 g Feinstaub und 200 g Sand von 0.2—0.5 mm Korndurchmesser.

20°	48.73	51.27
40°	30.39	69.61

Man ersieht aus den erhaltenen Ergebnissen ohne weiteres, daß die Beimengung einer geringeren Menge kolloidaler Teile zu einer weit größeren Sandmasse auf die Murenbildung keinen merklichen Einfluß ausübt. Der Geschiebeinhalt der Murgänge aus solchen Ge-

mischen ist ungefähr derselbe, keineswegs aber wesentlich höher als jener reinen Sandes. Es geht daraus die auch aus der Beobachtung der Verhältnisse in der Natur erschließbare Tatsache hervor, daß bei Vorhandensein entsprechender Wassermengen und Gefällsverhältnisse das grobe Geschiebe zur Murenbildung allein genügt und lehmig-toniger Stoffe als Schmiermittel nicht unbedingt bedarf. Weitere Versuche sind beabsichtigt.

Bei stärkerer Beimengung von Schluff (= Staub mit 0.02—0.006 Korndurchmesser) macht sich das Zusammenkleben des Schluffes in ähnlicher Weise unangenehm bemerkbar, wie es schon bei der Anwendung von Grobstaub allein störend fühlbar wurde. Die nachstehend mitgeteilten Ergebnisse erhärten nur bereits weiter oben Ausgeführtes.

γ) Versuche mit 10 g Schluff auf 30 g Sand von 0.25—1 mm Korndurchmesser.

Neigungswinkel	Gewichtshundertstel		Anmerkung
	Wasser	Geschiebe	
15°	91.06	8.94	Hochwasser mit Geschiebe
20°	76.08	23.92	Hochwasser mit sehr viel Geschiebe
	70.57	29.43	
30°	32.98	67.02	echte Murgänge
40°	32.75	67.25	

Keiner der erzeugten Murgänge enthält der Masse nach mehr Geschiebe als Wasser, sondern nur dem Gewichte nach.

Zu ganz ähnlichen Ergebnissen führten auch die Versuche mit größerem Sand von 0.25 = 1.0 mm Korngröße. Der Geschiebeinhalt der Murgänge, beziehungsweise der Hochwässer weicht nur bei schwacher Bettneigung erheblich von jenen unmittelbar vorhergehenden Versuchsreihen ab, bei steilem Gefällswinkel der Sohle stimmen die Werte beider Versuchsreihen gut überein. Trägt man die Werte der Bettneigung als Abszisse, jene des Geschiebegehaltes als Ordinaten eines rechtwinkligen Koordinatensystems auf, so erhält man aus den Ziffern beider Untersuchungsreihen sanft gekrümmte, gegen die Abszissenachse schwach ausgebauchte Linien. Tieferstehend die bei den Versuchen mit Sanden von 0.25—1.0 mm Durchmesser erhaltenen Werte:

Neigung		Gewichtshundertstel				Massenhundertstel	
		Grenzwerte		Mittelwerte			
Grade	Hundertstel	Wasser	Geschiebe	Wasser	Geschiebe	Wasser	Geschiebe
10°	17.6	—	—	53.46	46.54	74.17	25.83
15°	26.8	—	—	50.13	49.87	71.58	28.47
20°	36.4	40.49—45.73	51.27—59.57	44.21	55.79	66.45	33.55
25°	46.6	—	—	45.42	54.58	67.54	32.46
30°	57.7	32.16—39.38	60.62—67.82	35.78	64.22	58.21	41.79
35°	70.0	—	—	32.08	67.97	54.09	45.91
40°	83.9	29.95—35.20	64.80—70.05	32.58	67.42	54.71	45.29

Die durch die bisherigen Versuche über den Wassergehalt von Muren erhaltenen Ergebnisse lassen sich in folgenden Sätzen zusammenfassen:

1. In Murgängen übertrifft das Gewicht der in ihnen enthaltenen Geschiebemassen in der Regel jenes des die Rolle des Fördermittels spielenden Wassers. Geschiebefrachten mit etwa 50–60 Gewichtshundertstel Wassermasse vermitteln im großen und ganzen zwischen den geschiebereichen Hochwässern und den echten Muren.

2. In schwach geneigten Bachbetten können echte Muren im allgemeinen nicht zustande kommen, sondern nur geschiebereiche Hochwässer. Wo Muren in Bachstrecken mit geringer Sohlenneigung (zum Beispiel auf Schwemmkegeln) abgehen, haben sie ihren Bewegungsimpuls bereits erhalten, bevor sie die Strecke geringen Gefälles betreten. Die untere Grenze der Sohlenneigung, bei welcher die Bildung von Muren noch möglich ist, dürfte in der Regel bei etwa 15 Grad liegen. Dieser Neigungswinkel wird wohl nur in Ausnahmefällen, die ihren Grund in Besonderheiten der Oertlichkeit, des Materiales usw. haben, unterschritten.

3. Der Wassergehalt von Murgängen sinkt im allgemeinen mit zunehmendem Sohlengefälle oder, besser ausgedrückt, mit wachsender Bettneigung nimmt auch die mittlere Geschiebemenge zu, welche Murgänge unter sonst gleichen Umständen zu Tale fördern können.

4. Gegenüber der Neigung der Bachsohle spielt die Größenordnung des zu bewegenden Materials für die Entstehung von Muren eine minder große Rolle; insbesondere ist zur Bildung von Murgängen das Vorhandensein feinen Materials keine unumgängliche Vorbedingung; Muren können sich auch bloß aus sandigen, mit Grobgeschieben vermengten Stoffen zusammensetzen, ja unter Umständen aus Blöcken allein. Wo der Murbrei reichlich tonige Gemengteile enthält, ist dafür die Beschaffenheit des Materials des Einzugsgebietes der Mure verantwortlich.

5. Allem Anscheine nach sind sehr fette Tone und Lehme der unmittelbaren Murenbildung wegen ihrer nur ganz allmählich erfolgenden, völligen Durchweichung weniger günstig als Sande, Schotter, Grobschutt und magere Tongesteine; bei der Entstehung von Muren spielen ja seltener langandauernde Regengüsse als vielmehr in den meisten Fällen plötzlich zustande kommende große Wassermassen eine bedeutsame Rolle. Bei fetten Tongesteinen lösen sich im allgemeinen vor Eintritt von Murgängen Bodenbewegungen aus, welche freilich bei Eintritt von Verklausungen oder sonstwie erfolgreicher, vollständiger Durchtränkung mit Wasser ihrerseits wiederum oft in Murgänge ausklingen können; sie geben also häufiger mittelbar zur Murenbildung Veranlassung.

6. Der Höchstgehalt von Muren an Geschiebe dürfte etwa um 70 Gewichtshundertstel liegen, der Mindestgehalt etwa zwischen 45 und 50, seltener zwischen 40 und 45 Gewichtshundertstel. Unter dieser Grenze liegt das Gebiet der geschiebebeladenen Hochwässer. Die Abgrenzung der Muren von den Schwimmsanden, Fließlehmen usw.

ergibt sich im allgemeinen auch aus den Angaben von Schmid, Lang und Atterberg, welche im vorhergehenden Abschnitte angeführt wurden.

3. Die Dichte von Hochwässern und Murgängen.

Im Anschlusse an weiter oben Gesagtes seien über die Dichte von Hochwässern und Murgängen im Nachstehenden noch einige bestimmte Fälle besprochen.

Während des Hochwassers des Raabflusses am 12. November 1917 wurde ein Sinkstoffgehalt des Wassers von 0·086 Gewichtshundertsteln festgestellt. Nimmt man an, die Sinkstoffe entsprächen ihrer Größenordnung nach ungefähr Schluff, so erhielt man für das in Rede stehende Raabhochwasser nach den weiter vorn angeführten Untersuchungen etwa eine Dichte von 1·0004.

Für die Hochwässer der Rienz vom 16.—19. September 1882 ermittelte Breitenlohner¹⁾ in Bruneck einen Gehalt an Schwebstoffen von 1·917 v. H.; dies würde unter den gleichen Voraussetzungen, welche oben gemacht wurden, einem Raumgewichte von etwa 1·009 gleichkommen.

E. Markus²⁾ gibt für den Sinkstoffgehalt der Hochwässer des Ombrone (Toscana) den Mittelwert von 8 v. H. an; die dazugehörige Dichte kann mit etwa 1·04 angegeben werden.

Alle diese Werte erscheinen jedoch klein gegenüber dem Geschiebeinhalt der Hochwässer von Gebirgsbächen. Dieser wurde im Versuchswege mit bis zu 40, ja 45 v. H. bestimmt. Entsprechend dem hohen Gehalte solcher, oft zu den Murerscheinungen hinüberleitender Hochwässer an festen Stoffen muß auch ihr Raumgewicht ein sehr großes sein und mag je nach den Umständen Beträge von 1·15 bis 1·25 erreichen. Freilich entfernen sich solche geschiebereiche Hochwässer von den echten Aufschwemmungen um so mehr, je größeres Geschiebe sie enthalten; demgemäß wird auch ihre Dichte etwas unter jener eigentlicher Aufschwemmungen bleiben und sich mehr jener reinen Wassers nähern. Dieser Ausfall wird aber bis zu einem gewissen Grade wieder wettgemacht durch die Vermehrung des Auftriebes durch Strömungen in lotrechter Richtung, welche durch Wirbelbewegungen und durch das Tiefsinken vieler fester aufgewirbelter Teilchen erzeugt wird.

Für Murgänge in überaus steilen Gerinnen und mit einer Geschiebefracht von rund 70 Gewichtshundertsteln wäre nach den weiter oben angeführten Versuchsergebnissen die Erreichung eines Raumgewichtes von etwa 1·4 ohne weiteres denkbar. Ein aus Mehlsand und Feinsand mit 40 Gewichtshundertstel Wasser angerührter mittelsteifer Brei ergab bei der Messung mit dem Aräometer sogar eine Dichte von 1·425, mithin einen Wert, der im Vergleiche zu anderen unter 1

¹⁾ Breitenlohner, J., Fortschritte auf dem Gebiete der Agrikultur-Physik 1886.

²⁾ Markus, Das landwirtschaftliche Meliorationswesen Italiens. Wien 1881.

angestellten Berechnungen ziemlich hoch erscheinen muß. Ein künstlich hergestellter Brei bleibt, der Ruhe überlassen, eben nicht lange gleichartig, sondern entmischt sich bald, indem die festen Teilchen allmählich zu Boden sinken, während der lockerer gebundene Teil des Wassers nach aufwärts strebt und dort im Laufe der Zeit eine kleine Ansammlung von fast reiner Flüssigkeit verursacht; die in dem schweren Teile des der Entmischung entgegengehenden Breis hinabtauchende Kugel des Aräometers erhält dann mehr Auftrieb, als der mittleren Dichte des ursprünglich gut gemischten Breies entspricht. In der Natur verhindern die Strömungen und Wirbelbildungen im Murbrei meist derartige Saigerungen der Murmasse; andererseits aber erhöhen solche Bewegungen den Auftrieb des Murbreis und damit auch seine scheinbare Dichte, so daß für die Tragkraft von Murmassen tatsächlich ein ähnliches Ergebnis zu erwarten steht, wie der vorerwähnte Versuch geliefert hat. In einem Murbrei mittleren Raumgewichtes werden also leichtere Gesteinsmassen, wie solche von lückigem Kalkstein, Tuffen, Durchbruchgesteinschlacken¹⁾ usw. Auftrieb erhalten und im vollsten Sinne des Wortes „schwimmen“ können. Bei Gesteinsarten mit höherem Raumgewicht trifft der Ausdruck „schwimmen“ wohl nur bildlich zu. Riesige Felsbrocken treten in Murgängen ebenso an die Oberfläche, wie dies die kleineren in einem förmlichen Rhythmus tun; die Blöcke bilden dann gleich den kleineren Geschieben und den Sandkörnern gewissermaßen gleichberechtigte Teilnehmer an der Aufschwemmung und nicht Fremdlinge, die der Auftrieb der Aufschwemmung an die Oberfläche drängt. Diese Auffassung der meisten größeren Felstrümmer im Murbrei als Glieder jener bewegten Aufschwemmung fester Teile in Wasser, die man Murgang nennt, dürfte dem häufig zu beobachtenden Auf- und Wiederuntertauchen solcher großer Blöcke wohl am ehesten gerecht werden. Von den Aufschwemmungen, wie man sie in Arbeitsräumen herstellt, unterscheiden sich die Muren-aufschwemmungen im allgemeinen nur durch die Größe ihrer festen Anteile und die fortgesetzte Bewegung, in der sich die ganze Verteilung samt dem Verteilungsmittel befindet.

In jenen Fällen, in welchen die technische Praxis nach der Dichte von Murmassen fragt, dürften, bis umfassendere Versuche vorliegen, annäherungsweise Werte leicht aus den Versuchsergebnissen unter 1. und 2. zu entnehmen sein. Es ist bloß erforderlich, eine bestimmte Gerinneneigung nach den besonderen Verhältnissen des betreffenden Wildbaches anzunehmen und sodann an der Hand derselben aus den Tabellen unter 2. den voraussichtlichen Mindestwassergehalt der zu erwartenden Murgänge anzuschätzen; zu diesem Geschiebehöchstgehalte können dann die zugehörigen Dichtewerte unter 1. unschwer aufgesucht werden. Eine vorläufig noch nicht auszumerkende Fehlerquelle liegt aber u. a. auch darin, daß bei der Schwierigkeit, die Dichte von Aufschwemmungen groben Sandes zu bestimmen, Angaben über das Raumgewicht von Aufschwemmungen

¹⁾ Man vergleiche die Beobachtung E. C. J. Mohrs, daß in den Aschenmuren der Tropen Blöcke schwimmen. Bull. du departm. de l'agriculture des Indes Néerlandaises. 1908.

fester Stoffe mit mehr als 2·525 Raumgewicht dermalen fehlen. Es ist daher ein kleiner Zuschlag — etwa 0·05—0·10 — zu den aus den Tabellen entnommenen Werten unter allen Umständen empfehlenswert.

Ich habe versucht, in tieferstehender Zahlentafel vorige Schwierigkeit dadurch zu umgehen, daß ich für die Dichteangaben jene Ziffernwerte benützte, welche Linder und Picton (a. a. O.) für Arsentrisulfid (D. = 2·7) erhielten.

Zahlentafel für die mutmaßliche Dichte von Murgängen.

(Rohe Mittelwerte.)

Sohlengefälle des Wildbaches	Gewichtshundertstel Geschiebe		Raumgewicht der Mure	
	mindestens	höchstens	mindestens	höchstens
15°	45	50	1·34	1·38
20°	50	60	1·38	1·46
25°	55	65	1·42	1·49
30°	60	68	1·46	1·52
35°	65	70	1·49	1·53
40°	65	70	1·49	1·53

Für Hochwässer dürfte es sich bei Gebirgsbächen gleichfalls empfehlen, die Ergebnisse der Versuche von Linder und Picton zu benutzen, wenn es sich nicht um die Ermittlung, beziehungsweise Anschätzung des Raumgewichtes sinkstoffbeladener Wässer, sondern um die Erhebung der Dichte geschiebereicher, d. i. mit größeren Geröllen beladener Wildfluten handelt.

Es würde sich da vielleicht die Benützung nachstehender abgerundeter Werte empfehlen.

Geschiebinhalt in Hundertstel	Raumgewicht der Aufschwemmung (des Hochwassers)
10	1·08
15	1·11
20	1·15
25	1·19
30	1·23
35	1·27
40	1·30
45	1·34

Eine mißliche Sache ist nur die Anschätzung des Geschiebereichtums von Hochwässern bestimmter Bäche. Da Schöpfproben großen Stiles in den seltensten Fällen ausführbar sein dürften, geben da wohl bloß die herbeigeführten Verschotterungen und Versandungen einige Anhaltspunkte. Diese sind unter sonst gleichen Umständen

um so flacher und — quer zum Bachlaufe gemessen — um so ausgedreiteter, je wasserreicher die Geschiebverfrachtungen waren. Mit der Zunahme der Geschiebemenge wächst die Wölbung der Geschiebeablagerung nach außen und nimmt ihre Breite im Verhältnis zur Dicke der aufgelandeten Schicht ab.

4. Die „Zähigkeit“ von Hochwässern und Murmassen.

Viele Forscher haben bereits die Zähigkeit (innere Reibung, Viskosität) von kolloidalen Verteilungen festgestellt. Da Hochwässer und Murgänge im Lichte der neueren Anschauungen nichts anderes sind als gröbere Aufschwemmungen fester Stoffe in Wasser, welche im großen und ganzen denselben Gesetzen folgen wie die kolloidalen Verteilungen, so fesseln die von den Kolloidforschern gewonnenen Ergebnisse auch den Techniker.

Nach den angestellten Untersuchungen nimmt die Zähigkeit von Aufschwemmungen viel rascher zu als die Verteilungsdichte. Dies beleuchten besonders schön die Versuche, welche F. Bottazzi und G. d'Errico¹⁾ mit Glykogenhydrosol angestellt haben und welche im Nachstehenden — entsprechend ausgewertet — wiedergegeben sein sollen.

Innere Reibung von Glykogenhydrosol.

Verdichtung (Verteilungsgrad)	Innere Reibung (Durchlaufzeit)	Zähigkeit im Vergleiche zu reinem Wasser
0 v. H.	124 Sekunden	1
1 v. H.	129	1·04
5 v. H.	157	1·266
10 v. H.	208	1·667
15 v. H.	259	2·089
20 v. H.	440	3·631
25 v. H.	564	4·548
30 v. H.	914	7·371
35 v. H.	1516	12·340
40 v. H.	3549	28·62
45 v. H.	7688	62·0

Um das Verhalten von Aufschwemmungen verschiedener Sande und von Schluff in Wasser hinsichtlich ihrer Zähigkeit zu prüfen und mit den oben in Tafelform wiedergegebenen Ergebnissen der Kolloidarbeiten vergleichen zu können, habe ich eine Reihe eigener Versuche angestellt. Um Beobachtungsfehler tunlichst einzuschränken,

¹⁾ Bottazzi, F. und Errico, G. d', Pflügers Archiv für Physiologie 1906, S. 859.

wurde für niedere Verteilungsgrade (stark verdichtete Aufschwemmungen) ein Zähigkeitsmesser mit großer, für hohe Verteilungsgrade ein Reibungsmesser mit kleiner Ausflußöffnung angewendet; um Einheitlichkeit zu erzielen, wurden die Werte entsprechend umgerechnet.

**a) Innere Reibung von Gemischen von Wasser und Feinsand
(0·2—0·06 mm Korndurchmesser).**

Verdichtungsgrad	Zähigkeits- Mittelwerte	Zähigkeit im Vergleich mit reinem Wasser
0 v. H.	10 Sekunden	1·00
30 v. H.	10 ¹ / ₂	1·05
33·3 v. H.	10 ³ / ₄ "	1·075
40 v. H.	11 ¹ / ₂ "	1·15
50 v. H.	15 "	1·50
60 v. H.	30 "	3
70 v. H.	420 "	42

b) Zähigkeit von Sand mit 0·25—1·00 mm Korndurchmesser.

0 v. H.	12 Sekunden	1·00
50 v. H.	39 "	3·25

c) Zähigkeit von Sand (0·2—0·5 mm) in Wasser verteilt.

Verdichtung	Zähigkeit im Vergleich mit Wasser:	
	weite	enge
	A b f l u ß ö f f n u n g	
0 v. H.	1	1·0
30 v. H.	2·6	—
40 v. H.	4·0	—
50 v. H.	6·—	147
60 v. H.	12·—	—
70 v. H.	30·—	276

Auch aus diesen Versuchen geht die hohe innere Reibung von geschiebereichen Hochwässern und von Murschüben hervor; die Zähigkeit scheint aber in einem hohen Grade von der Korngröße der verteilten Stoffe und der Weite der Abflußöffnung abzuhängen, so daß es weiterer Versuche bedarf, um die Gesetzmäßigkeiten klarer überschauen und auf die Verhältnisse in der Natur Rückschlüsse ziehen zu können. Im großen und ganzen erwecken die bisherigen Ergebnisse den Anschein, daß die Zähigkeit einer Aufschwemmung von Sand in Wasser mit der Korngröße bis zu einer gewissen Höchstgrenze wächst und von dieser bei weiterer Vergrößerung des Kornes wiederum abnimmt.

5. Die Standfestigkeit von Sanden und Tongesteinen.

Um die Standfestigkeit verschiedener Tongesteine und Sande zu erproben, wurden aus Stoffen bekannter Körnung in gewöhnlichen Schmelzriegeln von 17 cm^3 Inhalt Kuchen gepreßt. Die Kuchen wurden getrocknet und auf sie sodann mittels eines Hebers aus einem Meßzylinder Wasser geträufelt. Der längere Schenkel des Winkelhebers war mit einem Hahn versehen, welcher eine bequeme Regelung des Wasserauslaufes gestattete. Die ausfließende Wassermenge konnte durch Ablesungen an der Teilung des Meßglases leicht erhoben werden.

Die ersten Versuche wurden mit Sand von $0.25 - 1\text{ mm}$ Korndurchmesser angestellt. Nach Hinzufügung von $4\frac{1}{2}\text{ cm}^3$ Wasser waren die Kuchen stets mit Wasser gesättigt; dies bestätigt die auf Rechnungen sich gründenden Behauptungen Schmid's (a. a. O.) und Luegers (a. a. O.), daß Schwimmsand bei einem Wassergehalte von 25.95 Raumbundertstel vollkommen durchfeuchtet sei. Läßt man aus dem Meßglase auf die mit Wasser getränkten Kuchen weitere Wassermengen ganz allmählich und tropfenweise träufeln, so treten so lange keine Rutschungen ein, als die Poren des Sandkuchens imstande sind, die jeweils zufließenden Wassermengen restlos zu verschlucken und weiterzuleiten. Uebersteigt aber der Wasserzufluß die Wasserleitungsfähigkeit der Zwischenräume zwischen den Sandkörnchen, so rutschen die Kuchen alsbald in sich zusammen, beziehungsweise fließen auseinander. Schwimmsand kann also nur dort zustande kommen, wo der Wasserzutritt den Wasserabfluß überwiegt; insbesondere wird dies dort der Fall sein, wo Sande zwischen undurchlässigen Schichten eingespannt sind; solange die zugeführte Wassermenge durch die Hohlräume zwischen den Körnern leicht abfließen kann, erweisen sich somit grobkörnige Sande im angefeuchteten Zustand unter den Versuchsbedingungen als nahezu uneingeschränkt standfest.

Sande von $0.2 - 0.5\text{ mm}$ Korndurchmesser erwiesen sich bereits insofern etwas weniger standfest, als die kleineren Hohlräume zwischen ihren Körnern weit langsamer seihen als jene der gröberen Sande. Aber auch hier trat der große Unterschied im Verhalten der Sande auf verschiedener Unterlage hervor; auf durchlässiger Unterlage traten Rutschungen erst sehr spät und bei starkem Wasserzutritte ein, auf undurchlässigem Liegenden (Glasplatte) dagegen viel früher (im Durchschnitt nach 30 cm^3 Wasserzutritt).

Noch langsamer saugen Kuchen aus Sand von $0.2 - 0.06\text{ mm}$ Korndurchmesser das auf sie geträufelte Wasser auf. Es ist daher nötig, die Wassertropfen in längeren Zwischenräumen in ein auf der Oberseite des Kuchens hergestelltes napfförmiges Grübchen fallen zu lassen, von dem aus das Wasser dann nach allen Seiten in den Kuchen eindringt. Rutschungen traten nach Zugabe von $20 - 21.5\text{ cm}^3$ Flüssigkeit ein.

In Kuchen, welche aus Mehlsand ($0.02 - 0.06\text{ cm}$ Korndurchmesser) geformt waren, traten Abrutschungen erst nach Zufuhr von $102 - 120\text{ cm}^3$ Wassers ein. Die Schnelligkeit des Wasserzuffusses muß auf etwa 5 Tropfen in der Minute herabgesetzt werden; ein Mehr

an Wasser wird nicht mehr restlos aufgesogen, sondern rinnt teilweise frei über die Kuchenböschung herab.

Bei Kuchen aus grobem Staub (Schluff) muß die Geschwindigkeit noch mehr, etwa auf 2 Tropfen in der Minute herabgesetzt werden. Es dauert sehr lange, bis der Schluff so völlig durchweicht und zusammenhanglos geworden ist, daß Rutschungen eintreten; so groß ist die Klebrigkeit des Stoffes. Die Rutschgrenze liegt bei 250—300 cm^3 Wasser.

Für die technische Praxis lassen sich aus diesen Versuchen folgende Nutzenwendungen ziehen. Grobe Sande sind ziemlich standfest; die Standfestigkeit der Sande nimmt mit dem Kleinerwerden des Kornes ab; von einem gewissen Punkte ab, wo die Sande anfangen bildsam zu werden und auch andere Eigenschaften der Tone anzunehmen, in die sie allmählich übergehen, nimmt dann die Standfestigkeit wieder zu, wenigstens in dem Sinne, daß zum Eintreten von Rutschungen längere Zeit und stärkere Durchfeuchtung notwendig wird. An sich freilich und mit den Grobsanden verglichen, sind auch die Tone wenig standfest; für den Eintritt von Bewegungen sind aber nicht so sehr größere Wassermengen erforderlich, als vielmehr ein der langsamen Wasseraufnahme durch Ton entsprechend allmählich erfolgreicher, aber langandauernder Wasserzudrang. Die oben ange-deutete Grenze, bei welcher die Sande wieder standfester werden, liegt nach vorstehenden Versuchen bei 0.02—0.06 mm Korndurchmesser. Sie fällt genau mit der Feststellung Atterbergs¹⁾ zusammen, daß die Ausflokkbarkeit von Sanden bei 0.05—0.02 mm Korndurchmesser beginnt.

Die weiteren Versuche bezogen sich auf Gemenge verschiedener Korngrößen. Kuchen aus 20/21 Sand von 0.2—0.5 mm Korndurchmesser und 1/21 Feinstaub (0.002—0.006 mm Korndurchmesser) rutschten nach Zufuhr von 20—24 cm^3 Wasser, also etwas rascher als Kuchen aus Sand allein; hier kommen also die Bewegungen fördernden Eigenschaften der Tone — wenn auch in beschränktem Umfange — zur Geltung.

Dagegen veränderte die Beimengung von 1/21 Feinstaub zu Sand von 0.25—1.0 mm Korndurchmesser die Standfestigkeit der Kuchen nicht merklich; bei langsamer Aufgabe des Wassers blieb die Kuchenform selbst nach Zufluß von über 100 cm^3 Wasser noch erhalten. Bei Beschleunigung des Wasserzutrittes allerdings kam es auch hier zu einer baldigen Zerstörung des Kuchens.

Die Zugabe von 1/6 Feinstaub zu 5/6 Mehlsand (0.02—0.06 mm Korndurchmesser) verminderte anscheinend die Standfestigkeit der Kuchen in geringem Ausmaße; es treten nach Zufügung von 100 bis 150 cm^3 Wasser Rutschungen ein.

Es muß auffallen, daß der nicht unbeträchtliche Gehalt des zu den Versuchen verwendeten Tegels an Kalk (5.56 v. H.) die Knetbarkeit und sonstigen kolloiden Eigenschaften des Stoffes gar nicht beeinflußt hat. Man hat sonst meist geglaubt, daß anwesender kohlen-

¹⁾ Atterberg, P., Studien auf dem Gebiete der Bodenkunde. Die landwirtschaftlichen Versuchsstationen. 1908, S. 93—143.

saurer Kalk als Elektrolyt wirkt, die Kolloidteilchen ausflockt und so die Stoffe mager, standfest, nicht rutschungsgefährlich macht. Auch Pollack hat (a. a. O.) schon darauf aufmerksam gemacht, daß viele rutschende Lehme und Tone einen ziemlich hohen Kalkgehalt aufweisen (15·62 v. H. beim Cyrenenmergel des Mainzerbeckens). Ueber die Gründe dieses eigenartigen Vorganges kann man bis jetzt höchstens Vermutungen (vgl. Ehrenberg, a. a. O. S. 85 ff.) äußern. Ich versuchte die Frage im Versuchswege zu lösen, es gelang mir zwar die feinen, kolloidartigen Teilchen nach Entkalkung der Proben in reichlich Flüssigkeit durch geeignete Mittel auszuflocken, nicht aber sie während der Dauer der Versuche, insbesondere bei hoher Verdichtung in diesem Zustande zu erhalten. Es ist beabsichtigt, die Versuche fortzusetzen und die Ergebnisse später gemeinsam mit den anderen in dieser Arbeit angekündigten zu veröffentlichen.

Wien, im September 1918.
